



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement
für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Kommission Nukleare Entsorgung KNE

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 1

Stellungnahme der KNE zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit der vorgeschlagenen Standortgebiete



23. Februar 2010

Kommission Nukleare Entsorgung (KNE)

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 1:

Stellungnahme der KNE zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit der vorgeschlagenen Standortgebiete

23. Februar 2010

© Kommission Nukleare Entsorgung KNE

www.kne-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
1.1	Auftrag	10
1.2	Verwendete Projekt-Dokumente	11
1.3	Berichtsaufbau und Bearbeiter	13
1.4	Nachvollziehbarkeit und Umsetzung der Vorgaben des Sachplanverfahrens	14
2	Bewertung der Anforderungen an die Geologie der SMA- und HAA-Tiefenlager	16
2.1	Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra	16
2.2	Hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins und Betrachtungszeitraum	16
2.2.1	Herleitung der Anforderungen an die hydraulische Barrierenwirkung und den Betrachtungszeitraum durch die Nagra	17
2.2.2	Grundlagen zur Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung	19
2.2.3	Beurteilung der Anforderungen an die hydraulische Barrierenwirkung und den Betrachtungszeitraum durch die KNE	20
2.3	Minimale Tiefenlage SMA- und HAA-Lager im Hinblick auf Hebung, Erosion und Gesteins-Dekompaktion	21
2.3.1	Herleitung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage der SMA- und HAA-Lager durch die Nagra	21
2.3.2	Grundlagen zur Bewertung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage der SMA- und HAA-Lager	23
2.3.3	Beurteilung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage durch die KNE	26
2.4	Maximale Tiefenlage für SMA- und HAA-Lager im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	27
2.4.1	Herleitung der Anforderungen an die maximale Tiefenlage unter Terrain durch die Nagra	27
2.4.2	Grundlagen zur Bewertung der maximalen Tiefenlage	28
2.4.3	Beurteilung der maximalen Tiefenlage durch die KNE	29
2.5	Räumliche Anforderungen (Laterale Ausdehnung, Platzangebot untertage, Mächtigkeit)	31
2.5.1	Herleitung der räumlichen Anforderungen der Nagra	31
2.5.2	Grundlagen zur Bewertung der räumlichen Anforderungen	32
2.5.3	Beurteilung der räumlichen Anforderungen durch die KNE	32
2.6	Geochemische Anforderungen an die SMA- und HAA-Tiefenlager	33
2.6.1	Herleitung der Anforderungen an die geochemischen Eigenschaften durch die Nagra	33
2.6.2	Grundlagen der Bewertung der geochemischen Eigenschaften	35
2.6.3	Bewertung der Anforderungen an die geochemischen Eigenschaften durch die KNE	37

3	Bewertung der Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume	39
3.1	Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra	39
3.2	Beurteilung der Kriterien und Indikatoren der geologischen Langzeitstabilität	40
3.2.1	Anforderungen an die Langzeitstabilität durch die Nagra	40
3.2.2	Grundlagen zur Bewertung der Langzeitstabilität	41
3.2.3	Bewertung der Indikatoren zur geologischen Langzeitstabilität durch die KNE	43
3.3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen für die Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume	44
3.3.1	Anforderungen an die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen durch die Nagra	44
3.3.2	Grundlagen zur Bewertung der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	45
3.3.3	Bewertung der Indikatoren zur Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen durch die KNE	46
3.4	Zusammenfassende Bewertung der Grossräume für SMA- und HAA-Lager durch die KNE	47
4	Bewertung der Auswahl potenziell geeigneter Wirtgesteine	49
4.1	Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra	49
4.2	Zurückgestellte potenzielle Wirtgesteine	51
4.2.1	Durch die Nagra zurückgestellte potenzielle Wirtgesteine	51
4.2.2	Grundlagen der Bewertung zurückgestellter potenzieller Wirtgesteine	52
4.2.3	Bewertung zurückgestellter potenzieller Wirtgesteine durch die KNE	53
4.3	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf hydraulische Barriereneigenschaften	54
4.3.1	Herleitung der Anforderungen durch die Nagra	54
4.3.2	Grundlagen zur Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung	54
4.3.3	Beurteilung der hydraulischen Barrierenwirkung durch die KNE	54
4.4	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf den Gehalt an Schichtsilikaten („Tongehalt“)	55
4.4.1	Nomenklatorisches und Herleitung der Mindestanforderungen	55
4.4.2	Grundlagen zur Bewertung des Gehalts an Schichtsilikaten	56
4.4.3	Beurteilung des Gehalts an Schichtsilikaten durch die KNE	56
4.5	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf mesoskale lithologische Variationen – „Homogenität des Gesteinsaufbaus“	57
4.5.1	Nomenklatorisches und Herleitung der Mindestanforderungen	57
4.5.2	Grundlagen zur Bewertung der lithologischen Variationen	57
4.5.3	Beurteilung der lithologischen Variationen durch die KNE	58
4.6	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Selbstabdichtung	58
4.6.1	Nomenklatorisches und Ableitung der Mindestanforderungen	58
4.6.2	Grundlagen zur Bewertung der Selbstabdichtung	59
4.6.3	Beurteilung der Selbstabdichtung durch die KNE	60

4.7	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Mächtigkeit	61
4.7.1	Ableitung der Mindestanforderungen	61
4.7.2	Grundlagen der Bewertung der Mächtigkeit	61
4.7.3	Beurteilung der Mächtigkeit durch die KNE	61
4.8	Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Verkarstung	62
4.8.1	Ableitung der Mindestanforderungen	62
4.8.2	Grundlagen der Bewertung der Verkarstung	62
4.8.3	Beurteilung der Verkarstung durch die KNE	62
5	Bewertung der vorgeschlagenen Standortgebiete	64
5.1	Vorgehen der Nagra	64
5.2	Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die hydrogeologischen Verhältnisse	67
5.2.1	Anwendung der Anforderungen an die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Nagra	67
5.2.2	Grundlagen zur Bewertung der hydrogeologischen Verhältnisse	69
5.2.3	Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse durch die KNE	71
5.3	Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die tektonischen und neotektonischen Verhältnisse	75
5.3.1	Anwendung der Anforderungen an die tektonischen Verhältnisse durch die Nagra	75
5.3.2	Grundlagen zur Bewertung der tektonischen Verhältnisse	76
5.3.3	Beurteilung der tektonischen Verhältnisse durch die KNE	79
5.4	Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	83
5.5	Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	84
5.5.1	Anwendung der Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit durch die Nagra	84
5.5.2	Grundlagen zur Bewertung der bautechnischen Machbarkeit	85
5.5.3	Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit durch die KNE	86
5.6	Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die räumliche Ausdehnung	87
5.6.1	Anwendung der Anforderungen an die räumliche Ausdehnung durch die Nagra	87
5.6.2	Grundlagen zur Beurteilung der räumlichen Ausdehnung	88
5.6.3	Beurteilung der räumlichen Ausdehnung durch die KNE	88
5.7	Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche und Standortgebiete	91
6	Verwendete Literatur und Berichte	98

Verzeichnis der Figuren

Figur 3-1:	Schematisches Profil durch die Nordostschweiz (aus NTB 99-08, S. 133)	45
Figur 5-1:	Von der Nagra vorgeschlagene Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager	66
Figur 5-2:	Karte der regionalen Störungen und tektonisch stärker zergliederten Teilgebiete (NTB 08-03, Fig. 5.1-5, ergänzt mit dem Gebiet Wellenberg.)	77
Figur 5-3:	Schematische Darstellung der generellen tektonischen Überprägung in Tafeljura sensu stricto, Vorfaltenzone, Faltenjura und Subjurassischer Zone (NTB 08-03, Fig. 5.1-6)	78
Figur 5-4:	Schematische Darstellung der generellen tektonischen Überprägung im Bereich des Hegau-Bodensee-Grabens (NTB 08-03, Fig. 5.1-6)	78
Figur 5-5:	Querschnitt durch den Standort Wellenberg (aus NTB 08-03)	80

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Zusammenstellung aller Teilschritte der Etappe 1 gemäss dem Vorgehen der Nagra (aus NAB 08-02)	11
Tabelle 2-1:	Konzeptuelle Modellansätze für generische Sicherheitsbetrachtungen der Nagra (NTB 08-05, Fig. 2.5-3)	17
Tabelle 2-2:	Beziehung zwischen potenziellen Wirtgesteinen und konzeptuellen Modellansätzen (NAB 09-29)	20
Tabelle 2-3:	Durch die Nagra berücksichtigte geochemische Indikatoren für die verschiedenen Sicherheitsfunktionen	34
Tabelle 2-4:	Mineralzusammensetzung von zwei potenziellen Wirtgesteinen	36
Tabelle 2-5:	Grundwasserzusammensetzung von zwei potenziellen Wirtgesteinen	36
Tabelle 2-6:	Kationenaustauschkapazität (CEC) verschiedener Mineralien (nach Schachtschabel et al. 1979; Sparks 2003)	36
Tabelle 3-1:	Für die KNE wichtige und in Kapitel 3 im Detail diskutierte Indikatoren und Kriterien zur Beurteilung geologisch-tektonischer Grossräume	40
Tabelle 4-1:	Für die KNE wichtige und in Kapitel 4 im Detail diskutierte Indikatoren und Kriterien zur Beurteilung potenzieller Wirtgesteine	50
Tabelle 5-1:	Übersicht über die mit der Hydrogeologie in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren	68
Tabelle 5-2:	Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung für SMA-Standortbereiche	74
Tabelle 5-3:	Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung für HAA-Standortbereiche	74
Tabelle 5-4:	Bewertung der untertägigen Erschliessung für SMA-Standortbereiche	75
Tabelle 5-5:	Bewertung der untertägigen Erschliessung für HAA-Standort-Bereiche	75
Tabelle 5-6:	Übersicht über die mit der Tektonik/Neotektonik in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren	76

Tabelle 5-7: Bewertung der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen für SMA-Standortbereiche.....	82
Tabelle 5-8: Bewertung der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen für HAA-Standortbereiche.....	83
Tabelle 5-9: Übersicht über die mit der glazialen Tiefenerosion in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren	83
Tabelle 5-10: Übersicht über die mit der den felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren.....	85
Tabelle 5-11: Bewertung bautechnischer Eigenschaften für SMA-Standortbereiche	87
Tabelle 5-12: Bewertung bautechnischer Eigenschaften für HAA-Standortbereiche.....	87
Tabelle 5-13: Übersicht über die mit dem Platzbedarf/Platzangebot in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren	88
Tabelle 5-14: Bewertung der räumlichen Ausdehnung für SMA-Standortbereiche	90
Tabelle 5-15: Bewertung der räumlichen Ausdehnung für HAA-Standortbereiche.....	90
Tabelle 5-16: Legende zu den Tabellen 5-17 bis 5-21 mit Beurteilungen der Nagra bzw. der KNE	91
Tabelle 5-17: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-OPA (1/2).....	92
Tabelle 5-18: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-OPA (2/2).....	93
Tabelle 5-19: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-BD	94
Tabelle 5-20: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-EFF und SMA-HEL	95
Tabelle 5-21: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche HAA-OPA	96

Zusammenfassung und Beantwortung der Fragen an die Prüfbehörden

Ende 2008 legte die Nagra im Rahmen von Etappe 1 des Sachplanverfahrens für geologische Tiefenlager¹ (SGT) ihre Vorschläge geologischer Standortgebiete für das schwachmittelaktive (SMA)-Lager und hochaktive (HAA)-Lager vor. Der vorliegende Expertenbericht zuhanden des ENSI überprüft diese Vorschläge und nimmt zu den im Konzeptteil des SGT an die Prüfbehörden formulierten Fragen Stellung. Der Bericht umfasst eine detaillierte Beurteilung ausgewählter – von der KNE als relevant beurteilter – Kriterien und Indikatoren sowie aller Schritte im 3-stufigen Einengungsprozess. Explizit in diesem Bericht nicht bewertet wurden die Thematik der Korrosionsgase (HAA/BE-Abfälle und SMA), die Zuteilung der Abfallkategorien auf das SMA- und HAA-Tiefenlager sowie die Freisetzungs- und Dosisberechnungen mittels generischer Sicherheitsbetrachtungen, welche vom ENSI mit eigenen Berechnungen überprüft wurden.

Die vorliegende Beurteilung basiert auf einer detaillierten Analyse der drei Hauptberichte zu Etappe 1 SGT (NTB 08-03; NTB 08-04; NTB 08-05), ausgewählter Arbeitsberichte und interner Berichte der Nagra, einem detaillierten Fragenkatalog und entsprechender schriftlicher Antworten der Nagra zu NTB 08-04 und NTB 08-05, einer Feldbegehung zu Aufschlüssen neuer potenzieller Wirtgesteine, zweier Besichtigungen von Bohrkernen, sowie rund einem Dutzend Fachgesprächen zwischen Mitgliedern der KNE und Spezialisten der Nagra. Die umfangreichen Arbeiten der KNE wurden in der Periode von November 2008 bis Dezember 2009 ausgeführt.

Frage 1: Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die geologisch-tektonische Situation, an das Wirtgestein bzw. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und an den Standort für die KNE nachvollziehbar und genügend?

Die Ergebnisse des Einengungsprozesses beruhen auf kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Bewertungsskalen von 49 Indikatoren (NTB 08-05, Anhang 1). Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Ableitung der Anforderungen an viele Indikatoren ein iterativer Prozess ist und viele Indikatoren miteinander verknüpft sind. Für die Bewertung der Anforderungen an die Transporteigenschaften des Wirtgesteins stützt sich die KNE auf die Aussagen des ENSI ab. Die durch die Nagra festgelegten Anforderungen an die Indikatoren sind für die KNE in den meisten Fällen genügend und nachvollziehbar. Von der KNE werden insbesondere Fragen zu den Anforderungen an die felsmechanischen Eigenschaften der potenziellen Wirtgesteine^{Abs.5.5.3}, die minimale Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Dekompaktion und flächenhafte Erosion^{Abs.2.3.2ff}, die Klimaentwicklung und Landschaftsgeschichte^{Abs.3.3.2} (zusätzlicher Indikator), den Tongehalt^{Abs.4.4.1ff} sowie die Selbstabdichtung^{Abs.4.6.2} gestellt. Die maximalen Tiefenlagen für die HAA-Einlagerungsstollen sind nach Einschätzung der KNE nur mit vollflächigen Stützmitteln sicher realisierbar^{Abs.2.4.3}. Gemäss NTB 08-05 und NTB 08-03 sind solche Stützmittel nicht im Barrierenkonzept des Tiefenlagers berücksichtigt. Die Auswirkungen solcher Stützmittel (insbesondere zementhaltiger Spritzbeton und Tübbinge) auf die Langzeitsicherheit sind im Detail zu überprüfen^{Abs.2.4.3}. Das Ausbaukonzept ist zukünftig genauer zu spezifizieren, da es Auswirkungen auf die Begrenzung der HAA-Standortgebiete (insbesondere Verkleinerung) haben kann^{Abs.2.4.3}.

¹ Kernenergieverordnung, Artikel 11

Frage 2: Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke der Vororientierung?

Die Anwendung der Kriterien und Indikatoren im eigentlichen Einengungsprozess basiert auf einer umfassenden Grundlage der zugänglichen geologischen Daten. Diese geologischen Grundlagen werden fachlich fundiert und sehr umfassend in NTB 08-04 sowie zahlreichen weiteren Arbeitsberichten der Nagra beschrieben, analysiert und interpretiert. Die regional-geologischen Grundlagen sind für die KNE umfassend beschrieben und nachvollziehbar. Die KNE kommt zum Schluss, dass die Nagra die bekannten relevanten geologischen Informationen berücksichtigt hat und dass diese für die Etappe 1 SGT ausreichend sind.

Frage 3: Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?

Die Nagra hat die vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete stufengerecht berücksichtigt. Die Anwendung der vorgegebenen Kriterien erfolgte nach Ansicht der KNE nicht immer in adäquater Form: Im Schritt 5 werden die bevorzugten Bereiche durch dreimalige Mittelwertbildung (Indikatoren, Kriterien, Gesamtbewertung) bewertet. Durch die damit verbundene Rundung verliert das Bewertungssystem an Sensitivität. Die Gewichtung der einzelnen Indikatoren ist zum Teil eine Ermessensfrage und wird in gewissen Fällen durch die Experten der KNE anders bewertet als durch die Nagra^{Abs.3.4.4.1,5.7}. Die Bestimmung der „Bereiche erster Priorität und weiterer bevorzugter Bereiche“ ist im SGT nicht vorgesehen^{Abs.5.7}.

Frage 4: Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete für die KNE transparent und nachvollziehbar?

Die von der Nagra vorgelegten Unterlagen (Nagra Technische Berichte, Nagra Arbeitsberichte, Nagra Interne Berichte, Nagra Aktennotizen und Sitzungsbeilagen) sind – der Bedeutung von Etappe 1 entsprechend - äusserst umfangreich und in den allermeisten Fällen fachlich sehr kompetent geschrieben. Die KNE betont explizit und schätzt die ausserordentlich hohe Transparenz und Verfügbarkeit aller relevanten Projektunterlagen und Daten. Das Studium dieser Unterlagen ist auch für Fachleute sehr anspruchsvoll, dies aufgrund des komplexen und iterativen mehrstufigen Einengungsprozesses, der Integration von Arbeiten und Erkenntnissen aus früheren Untersuchungen der Nagra, aber auch aufgrund der in verschiedensten Berichten enthaltenen Informationen. Im Reviewprozess hat die Nagra zahlreiche Zusatzinformationen geliefert, die für das Verständnis und die Beurteilung durch die KNE wesentlich waren.

Frage 5: Kann die KNE den Vorschlägen aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume (SGT Schritt 3): Der Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume für das SMA- und HAA-Tiefenlager stimmt die KNE zu. Allerdings stellt sich die Frage, warum die aus sehr unterschiedlichen Gesteinskörpern mit unterschiedlichen Metamorphosegraden aufgebauten Alpen gesamthaft einem Grossraum zugeordnet wurden^{Abs.3.4}. Die von der Nagra verwendete Abstufung lässt im Bereich der Alpen keinerlei Rückschlüsse zu, welcher Teil dieses Grossraumes als „ungünstig“ und welche als „bedingt günstig“ für eine SMA-Tiefenlager eingestuft wurde. Die KNE beurteilt es als sinnvoll, aus Sicht der Langzeitsicherheit die Grossräume östlicher Tafeljura und östliches Molassebecken für ein HAA-Tiefenlager weiter zu betrachten und die übrigen Grossräume für HAA auszuschliessen. Die KNE stimmt dem Resultat zu, dass aus Sicht der Langzeitstabilität keine Grossräume für das SMA-Tiefenlager ausgeschlossen werden. Die KNE unterstützt die Einschätzung der Nagra, dass das westliche und östliche Molassebecken sowie der östliche

Tafeljura und die östliche Subjurassische Zone für SMA-Lager als geologisch-tektonische Grossräume günstige bis sehr günstige Verhältnisse aufweisen.

Auswahl bevorzugter Wirtgesteine (SGT Schritt 4): Basierend auf dem heutigen Wissensstand und der vorhandenen Datengrundlage kommt die KNE zum Schluss, dass die ausschliessliche Auswahl von Tongesteinen als Wirtgesteine für HAA- und SMA-Tiefenlager gerechtfertigt ist. Der Auswahl des Opalinustons als bevorzugtes Wirtgestein für SMA- und HAA-Tiefenlager stimmt die KNE vollumfänglich zu. Im weiteren sind heute nach Ansicht der KNE die Effinger Schichten, der „Braune Dogger“ und die Helvetischen Mergel nicht auszuschliessen. Die KNE unterstützt explizit die Zurückstellung der Oberen und Unteren Süsswassermolasse (OSM und USM), der Flysche und Bündnerschiefer als potenzielle Wirtgesteine, da diese Gesteine verschiedene sicherheitsrelevante Anforderungen nicht erfüllen^{Abs.4.2}.

Auswahl bevorzugter Standortgebiete (SGT Schritt 5): Die KNE hat die bevorzugten Bereiche und Vorschläge für geologische Standortgebiete im Detail überprüft^{Abs.5.2-5.6}. Die grosse Anzahl der in diesem Schritt unterschiedlich bewerteten Indikatoren^{Abs.5.7} reflektiert primär den Ermessensspielraum bei der Bewertung erdwissenschaftlicher Daten und der Anwendung der Vorgaben des Sachplans Geologische Tiefenlager. In vereinzelt Fällen wurden jedoch auch signifikante Unterschiede in der Bewertung und methodische Schwachpunkte identifiziert^{Abs.5.7}.

Die einzelnen Verfahrensschritte, die zur Wahl der bevorzugten Standortgebiete in der Nordschweiz führen, sind in NTB 08-03 umfassend beschrieben und basieren auf einer ausserordentlich guten geologischen Grundlage und einer hochqualifizierten Methodik. Den Bewertungen und der Standortauswahl der Nagra hinsichtlich der ausseralpinen SMA- und HAA-Standorte kann die KNE zustimmen.

Dagegen ist die Evaluation der potenziellen Bereiche für SMA-Lager im alpinen Raum durch die Nagra für die KNE zum Teil diskutabel und bezüglich einiger zentraler Indikatoren nicht in letzter Konsequenz durchgeführt. So verwendet die Nagra für die stark tektonisierten Mergel-Akkumulationen des Helvetikums am Alpennordrand Sonderregelungen, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der Kriterien „Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse“ und „räumliche Ausdehnung“ (Indikatoren *Abstand zu regionalen Störungszonen*, *Diffus gestörte Zonen* und *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*)^{Abs.5.3}. Dabei wird von der Nagra die intensive Tektonisierung der Mergel-Akkumulationen (mit sehr zahlreichen erbohrten, mächtigen kataklastischen Bruchzonen) als primäre, zum Teil positive Gesteinseigenschaft bewertet^{Abs.5.3.3}. Die KNE anerkennt zwar, dass nicht alle Indikatoren direkt von der Nordschweiz auf die Alpen übertragen werden können, sie legt aber dennoch grossen Wert auf ein für alle Standortgebiete möglichst einheitlich angewendetes Auswahlverfahren. Insbesondere scheint es der KNE in diesem Zusammenhang wichtig, dass nur schwach tektonisierte Gebiete mit möglichst unbedeutender neotektonischer Aktivität als potenzielle Standortregionen in Betracht gezogen und weiterverfolgt werden. Dies führt dazu, dass die KNE das Standortgebiet Wellenberg trotz einiger sehr positiver Eigenschaften (grosse Mächtigkeit und gute Barriereneigenschaften in einer Tiefe von > 550 m u.T.) als deutlich weniger geeignet einstuft als die bevorzugten Standortgebiete in der Nordschweiz.

Hinsichtlich des *Platzangebotes untertage*² wird der bevorzugte Bereich SMA-BD-VZ-W (Nördlich Lägeren) durch die KNE schlechter bewertet als durch die Nagra^{Abs.5.6.3}. Ebenfalls diskutierbar ist das tatsächliche Platzangebot am Standort Wellenberg^{Abs.5.6.3}.

² Die Nagra verwendet die Bezeichnung „untertags“.

1 Einleitung

1.1 Auftrag

Die Kommission Nukleare Entsorgung KNE ist eine vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und dem Departement für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) eingesetzte ausserparlamentarische Fachkommission und hat die Aufgabe, als erdwissenschaftliches Fachgremium das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI (vormals HSK) in sicherheits- und bautechnischen Fragen der nuklearen Entsorgung zu beraten und zu wissenschaftlichen Berichten der Nagra Stellung zu nehmen. Die KNE umfasst neun Mitglieder, vornehmlich aus dem Hochschulbereich, welche verschiedene in der geologischen Tiefenlagerung relevante Fachbereiche abdecken.

Im Rahmen des Sachplans Geologische Tiefenlager SGT (BFE 2008) hat die KNE die Aufgabe, das ENSI in seiner Arbeit zu den sicherheitstechnischen Beurteilungen zu unterstützen und zuhanden des ENSI zur geologischen Beurteilung von Standortgebieten sowie zur bautechnischen Machbarkeit geologischer Tiefenlager Stellung zu nehmen. Die KNE arbeitet ferner im Technischen Forum Sicherheit mit, wo wissenschaftliche Fragen zu Sicherheit und Geologie diskutiert und beantwortet werden.

Der Sachplan geologische Tiefenlager legt für das Standortauswahlverfahren einen schrittweisen Einengungsprozess fest, welcher ausgehend vom heutigen Stand der geologischen Kenntnisse in drei Etappen zu Standorten für Tiefenlager von schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA) und hochaktiven Abfällen (HAA) führt (BFE 2008). In Etappe 1 werden aufgrund definierter sicherheitstechnischer Kriterien und Vorgehensschritte (BFE 2008; NAB 07-35) von der Nationalen Genossenschaft für Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) im Auftrag der Entsorgungspflichtigen Vorschläge für geologische Standortgebiete ausgearbeitet, innerhalb welcher in den darauf folgenden Etappen 2 und 3 geeignete geologische Standorte weiter eingegrenzt, sicherheitstechnisch, raumplanerisch und sozioökonomisch verglichen werden und schliesslich ein Standort pro Lagertyp evaluiert wird. Mit dieser schrittweisen Einengung ist eine stufenweise Vertiefung der Sicherheitsbetrachtungen verbunden, die über generische Betrachtungen der Etappe 1 zu provisorischen Sicherheitsanalysen in der Etappe 2 und schliesslich zu einer umfassenden Sicherheitsanalyse in der Etappe 3 im Hinblick auf ein Rahmenbewilligungsgesuch führen. Die geologischen Kenntnisse sind dabei in Etappe 2 und Etappe 3 schrittweise zu ergänzen und weiter zu vertiefen. Für die Rahmenbewilligung muss die Eignung des Standortes durch erdwissenschaftliche Untersuchungsergebnisse bestätigt sein (KEG 2003). Sowohl in den Etappen als auch zwischen den Etappen besteht nach SGT (BFE 2008, S.39) die Möglichkeit eines Rückgriffs auf geologische Standortgebiete oder Standorte, die bei einem Einengungsentscheid zurückgestellt wurden.

Ende 2008 legte die Nagra im Rahmen von Etappe 1 des Sachplanverfahrens ihre Vorschläge geologischer Standortgebiete für das SMA-Lager und das HAA-Lager vor, welche nun von der Sicherheitsbehörde ENSI und ihren Experten überprüft werden. Die Etappe 1 besteht gemäss SGT aus fünf Bearbeitungsschritten:

- 1) Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA
- 2) Festlegung des Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben
- 3) Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume
- 4) Identifikation potenzieller Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche

5) Identifikation geeigneter Konfigurationen

Die Nagra hat dieses 5-stufige Einengungsverfahren weiter in Teilstufen untergliedert. Eine Zusammenstellung aller Teilstufen von Etappe 1 zeigt Tabelle 1-1.

Tabelle 1-1: Zusammenstellung aller Teilschritte der Etappe 1 gemäss dem Vorgehen der Nagra (aus NAB 08-02)

Nr.	Schritte und Teilschritte
1	Abfallzuteilung auf das SMA- und das HAA-Lager
2	Festlegung des Barrieren- und Sicherheitskonzepts und der kriterienbezogenen quantitativen und qualitativen Anforderungen und Vorgaben
3	Evaluation der geologisch-tektonischen Grossräume
3.2	Identifikation der weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume
3.2	Auswahl der bevorzugten geologisch-tektonischen Grossräume (entfällt, weil die Grossräume in sich zu heterogen sind für eine weitergehende Einengung)
3.3	Charakterisierung und Bewertung der weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume
4	Evaluation der Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche
4.1	Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche
4.2	Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche
4.3	Charakterisierung und Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche
5	Evaluation der Konfigurationen und Festlegung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete
5.1	Identifikation potenziell möglicher Bereiche
5.2	Auswahl der bevorzugten Bereiche
5.3	Charakterisierung und Bewertung der bevorzugten Bereiche und Prioritätensetzung für die Abgrenzung von geologischen Standortgebieten
5.4	Festlegung der geologischen Standortgebiete ausgehend von den prioritären Bereichen
5.5	Zusammenfassende Bewertung der geologischen Standortgebiete

Die vorliegende Stellungnahme fasst die Ergebnisse der Überprüfung durch die KNE zusammen, die sich an den im SGT festgehaltenen fünf zentralen Fragen orientieren:

- 1) Sind die von den Entsorgungspflichtigen hergeleiteten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die Geologie nachvollziehbar und genügend?
- 2) Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend?
- 3) Haben die Entsorgungspflichtigen die vorgegebenen sicherheitstechnischen Kriterien bei der Erarbeitung der Vorschläge potenzieller Standortgebiete adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
- 4) Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge geologischer Standortgebiete transparent und nachvollziehbar?
- 5) Kann die KNE den Vorschlägen aus Sicht von Sicherheit und Machbarkeit zustimmen?

1.2 Verwendete Projekt-Dokumente

Ende Oktober 2008 reichte die Nagra im Auftrag der Entsorgungspflichtigen bei den Bundesbehörden (BFE) ihren Hauptbericht über Vorschläge geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager ein:

- NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

Dieser Bericht legt dar, wie die Vorgaben des Sachplans geologische Tiefenlager umgesetzt wurden, dokumentiert den schrittweisen Einengungsprozess und präsentiert die Ergebnisse des Evaluationsprozesses mit den Vorschlägen geologischer Standortgebiete für SMA und HAA.

Zwei weitere Hauptberichte, die wichtige Grundlagen für das Einengungsverfahren enthalten, wurden von der Nagra im Januar und Februar 2009 publiziert:

- NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Geologische Grundlagen, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.
- NTB 08-05: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

Diese Hauptberichte stützen sich bei Detailbetrachtungen auf zahlreiche Referenzberichte ab, die von der Nagra auf Anfrage der KNE vorgelegt wurden.

Im Zusammenhang mit der Überprüfung der eingereichten Unterlagen wurde von der KNE eine Reihe von spezifischen Fragen formuliert, die von der Nagra schriftlich beantwortet wurden oder zu welchen zusätzliche technische Berichte (Nagra Arbeitsberichte und Nagra unpubl. Interne Berichte) zur Verfügung gestellt wurden.

- NAB 05-15: Felsmechanische Modellierungen Opalinuston im Rahmen EP-05, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- NAB 06-26: Stratigrafie, Mächtigkeit und Lithofazies der mesozoischen Formationen in der Nordschweiz. Eine Kompilation von Bohrungen, Übersichts- und Aufschlussprofilen, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 07-15: EP-05 EWS Küttigen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.
- NAB 07-28: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss - Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttigen 1, Küttigen 2 und Oftringen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.
- NAB 07-35: Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2007.
- NAB 08-02: NOK EWS-Bohrung Oftringen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht), Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-03: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-07: Tectonics of the Molasse Basin of Western Switzerland: An Overview, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.

- NAB 08-09: Analyse des Tongehalts in den Effinger Schichten anhand von Bohrlochmessungen, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-43: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Ton- und Mergel-Formationen im Faltenjura und angrenzenden Gebieten, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-45: Comparative rock-mechanical modeling of ILW caverns in different host rocks, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 08-48: Felsmechanische Eigenschaften möglicher Wirtgesteine für geologische Tiefenlager, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.
- NAB 09-07: Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3 - Alternatives Ausbaukonzept („Liner concept“) für BE/HAA-Lagerstollen, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2009.
- Nagra 2009a: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager: Grundlagen und Umsetzung der Indikatoren *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit* sowie *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* (Bericht zu Behördenanfrage), Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen.
- Nagra 2009b: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager: Interne Arbeitsnotizen zu den Grundlagen und zur Umsetzung des Indikators *Platzangebot untertags* (Bericht zu Behördenanfrage), Nagra unpubl. Interner Bericht, Wettingen.

Die Antworten der Nagra auf Fragen der Prüfbehörden (ENSI, KNE) bilden ferner einen weiteren Bestandteil der Dokumentation zu den Standortgebietsvorschlägen, der Anfang 2010 als NAB erscheinen wird (NAB 09-29).

1.3 Berichtsaufbau und Bearbeiter

Der vorliegende Bericht folgt den im SGT festgelegten Schritten der Etappe 1, wobei Schritt 1 (Abfallzuteilung auf die beiden Lagertypen SMA und HAA) in diesem Bericht nicht behandelt wird und jeweils nur ausgewählte Aspekte der Schritte 2 bis 5 behandelt werden. Die Auswahl der im vorliegenden Expertenbericht schwerpunktmässig behandelten Themen basiert auf der Bedeutung für die sicherheitsrelevanten Schlussfolgerungen der Etappe 1 und den speziellen Fachkenntnissen der KNE-Mitglieder.

Explizit in vorliegendem Bericht nicht überprüft werden, neben Schritt 1 der Etappe 1, die Annahmen zu den Auswirkungen der Korrosionsgase von Stahlbehältern der HAA/BE-Abfälle sowie die generischen Modellrechnungen zum Radionuklidtransport. Für eine umfassende Bewertung dieser Thematik standen der KNE die notwendigen fachlichen und zeitlichen Ressourcen nicht zur Verfügung.

Der vorliegende Bericht wurde von den nachfolgenden KNE-Mitgliedern erarbeitet (in Klammer Fachbeiträge zur vorliegenden Bericht):

- 1) Prof. Simon Löw, Geologisches Institut, ETH Zürich, Projektleitung (Fachbereich Ingenieurgeologie und Felsmechanik)
- 2) Prof. Lukas Baumgartner, Institut de Minéralogie, Université de Lausanne, Lausanne (Fachbereich Geochemie und Transportmodellierung)

- 3) Dr. Alfred Isler Bundesamt für Landestopographie, Swisstopo, Wabern (Fachbereich Regionale Geologie und Tektonik)
- 4) Dr. Annette Johnson, EAWAG, Forschungsabteilung W&T, Dübendorf (Fachbereich Geochemie und Gesteins-Wasser-Wechselwirkung)
- 5) Prof. Rolf Kipfer, EAWAG, Forschungsabteilung W&T, Dübendorf (Fachbereich Isotopengeochemie und Hydrogeologie)
- 6) Dipl. Bauing. ETH Jürg Matter, Basler & Hofmann Ingenieure und Planer AG, Zürich (Fachbereich Untertagebau)
- 7) Prof. Hans-Rudolf Pfeifer, Centre d'Analyse Minérale CAM, Université de Lausanne (Fachbereich Hydrogeologie)
- 8) Prof. Fritz Schlunegger, Institut für Geologie, Universität Bern (Fachbereich Exogene Geologie, Geodynamik und Klimaentwicklung)
- 9) Prof. Andreas Wetzel, Geologisches Institut, Universität Basel (Fachbereich Sedimentologie, Stratigraphie und Tonmineralogie)

Die KNE hat sich im Rahmen ihrer Möglichkeiten als ausserparlamentarische nebenamtliche Expertenkommission sehr intensiv mit den von der Nagra vorgelegten Unterlagen im Zeitraum von November 2008 bis Dezember 2009 auseinandergesetzt. Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen von 12 ganztägigen Kommissionssitzungen, einer Feldbegehung von Aufschlüssen der neuen bevorzugten Wirtgesteine, zwei Besuchen des Nagra-Kernlagers, einer grossen Anzahl von Fachgesprächen in Subkommissionen, sowie einer externen Bearbeitung einzelner Fachbeiträge im Rahmen von Expertenaufträgen des ENSI. Details der jeweiligen Sitzungstraktanden sind auf der Webseite der KNE beschrieben (www.kne-schweiz.ch > Sitzungen). Die KNE wurde durch das Sekretariat des ENSI (Dr. Erik Frank, Dr. Martin Herfort, B. Würsch) bei der Durchführungen dieser Arbeiten und der Berichterstattung tatkräftig unterstützt.

1.4 Nachvollziehbarkeit und Umsetzung der Vorgaben des Sachplanverfahrens

Im Konzeptteil des SGT (BFE 2008, Abschnitt 1.1 von Anhang I) sowie in NAB 07-35 werden die detaillierten Vorgaben zu den vorbereitenden Schritten 1 und 2 sowie zur Einengungsprozedur der Schritte 3 bis 5 beschrieben und erläutert. Die behördlichen Vorgaben zum Einengungsprozess in Etappe 1 sind sehr umfassend und beinhalten neben 13 sicherheitstechnischen Kriterien eine Vielzahl von „zu beurteilenden Aspekten“ und von für die Standortevaluation „relevanten Indikatoren“ sowie Vorschriften zur Anwendung der Kriterien und Indikatoren in den einzelnen Schritten. Die Anwendung dieser Vorgaben in den vorbereitenden Schritten 1 und 2 sowie im Einengungsprozess werden in NTB 08-03 (Kapitel 2.1) übersichtlich zusammengefasst.

Die Ergebnisse des Einengungsprozesses (Schritte 3 bis 5) beruhen auf den durch die Nagra festgelegten quantitativen und qualitativen Anforderungen an die verwendeten Indikatoren (Schritt 2). Die Herleitung dieser Anforderungen ist für die KNE aus strukturellen und fachlichen Gründen nicht vollständig aus dem entsprechenden Hauptbericht NTB 08-05 nachvollziehbar. Die meisten dieser Unklarheiten konnten durch Zusatzinformationen in anschliessenden Fachgesprächen und nachgelieferten Arbeitsberichten zufriedenstellend geklärt werden. Die verbleibenden fachlichen Kritikpunkte oder Unklarheiten von Schritt 2 sowie die Anforderungen an die verwendeten Indikatoren werden insbesondere in Kapitel 2, aber auch in den Kapiteln 3 bis 5 diskutiert.

Die geologischen Grundlagen für die Entscheide der Einengungsprozedur orientieren sich nach SGT (BFE 2008, S.33) am aktuellen Kenntnisstand und werden von der Nagra fachlich fundiert und umfassend in NTB 08-04 sowie zahlreichen weiteren Arbeitsberichten beschrieben, analysiert und interpretiert. Diese geologischen Grundlagen sind für die KNE nachvollziehbar. Die von der Nagra ausgeführten Arbeiten zur Etappe 1 sind sehr umfassend und berücksichtigen die gesamte vorhandene regionalgeologische Literatur und soweit möglich auch unpublizierte Projektunterlagen. Die vorhandenen geologischen Informationen sind für Etappe 1 ausreichend.

Die Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine und Vorschläge geologischer Standortgebiete, basierte auf der Bewertung einer sehr grossen Anzahl von Kriterien und miteinander verknüpften Indikatoren (NTB 08-03). Die KNE kann die meisten, aber nicht alle Bewertungen im Detail nachvollziehen. Die Fragen der KNE zur Bewertung einzelner Kriterien und Indikatoren sowie zum Bewertungsprozess und zu einzelnen Standortgebieten werden in den Kapiteln 3 bis 5 erläutert.

2 Bewertung der Anforderungen an die Geologie der SMA- und HAA-Tiefenlager

2.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

Basierend auf der vom ENSI im Detail überprüften Abfallzuteilung und dem Barrieren- und Sicherheitskonzept der SMA- und HAA-Tiefenlager, welche von der KNE nur ansatzweise hinsichtlich der Plausibilität überprüft und beurteilt wurden, sind gemäss SGT die quantitativen und qualitativen Anforderungen an sicherheitstechnische Kriterien und Indikatoren in Schritt 2 der Etappe 1 durch die Nagra herzuleiten. Die quantitativen Anforderungen umfassen Mindestanforderungen an das Wirtgestein und die Geosphäre, und Verschärfte Anforderungen an Indikatoren, welche für die Sicherheit und Machbarkeit von der Nagra als sehr wichtig beurteilt werden. Potenziell mögliche Grossräume, Wirtgesteine und Standortgebiete, welche die Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden von der Nagra in einem mehrstufigen Einengungsverfahren ausgeschlossen. Alle resultierenden *bevorzugten* Varianten (bevorzugte Bereiche) erfüllen die Verschärften Anforderungen und sind damit sicherheitsmässig vergleichbar. Die anschliessende Bewertung der bevorzugten Varianten basiert auf *Bewertungsskalen*, welche teilweise quantitative und teilweise qualitative Argumente umfassen.

Im STG sind nicht nur die Herleitung von quantitativen Anforderungen an Indikatoren für das Wirtgestein und die Geosphäre und die Herleitung von quantitativen und qualitativen Zielvorgaben für das Wirtgestein vorgeschrieben, sondern auch eine vierstufige Bewertungsskala für Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit.

In vorliegendem Kapitel wird die Herleitung der quantitativen und qualitativen Anforderungen und die Bewertungsskala von ausgewählten sicherheitstechnischen und bautechnischen Indikatoren durch die KNE überprüft und bewertet. Weitere Bewertungen zu Anforderungen an die Indikatoren finden sich in den nachfolgenden Kapiteln 3 (Indikatoren zur Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen), und 4 (Indikatoren zu Wirtgesteins-eigenschaften).

2.2 Hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins und Betrachtungszeitraum

Die hier besprochenen generischen, also standortunabhängigen Sicherheitsbetrachtungen beziehen sich auf (i) den Transport der Radionuklide aus einem Tiefenlager durch das Nahfeld und die intakte Geosphäre, sowie (ii) den Transport der Radionuklide im Falle einer erosiven Freilegung des Tiefenlagers nach sehr langen Zeiträumen (NTB 08-05). Mit den zu (i) durchgeführten Modellrechnungen quantifiziert die Nagra Anforderungen an Indikatoren, welche den Kriterien Hydraulische Barrierenwirkung (Kriterium 1.2) und Freisetzungspfade (Kriterium 1.4) zugehören, aber auch in die Bewertung weiterer Kriterien einfließen. Ziel der generischen Sicherheitsbetrachtungen in Etappe 1 des SGT ist insbesondere die Ableitung von quantitativen Anforderungen an die potenziellen Wirtgesteine und die weitere Geosphäre, welche die Radionuklidausbreitung mitbestimmen (*hydraulische Durchlässigkeit, Art der Transportwege und Ausbildung des Porenraums, Homogenität des Gesteinsaufbaus, Länge der Freisetzungspfade, Transmissivität präferenzialer Freisetzungspfade, Mächtigkeit des Wirtgesteins*). Diese Anforderungen sind zum Teil direkt mit einer entsprechenden Aufteilung der radioaktiven Abfälle auf das HAA-Lager und das SMA-Lager verknüpft (Referenzzuteilung bzw. Alternative Zuteilung), welche jedoch von der KNE nicht beurteilt wurde.

Mit vereinfachten quantitativen Transportrechnungen zu (ii) untersucht die Nagra, welche Strahlenbelastungen sich für künftige Generationen ergeben könnten, wenn ein Tiefenlager erosionsbedingt nach langen Zeiten ganz oder teilweise in den Einflussbereich der Biosphäre (Dekompaktionszone, oberflächennahes Grundwasser, vollständige Freilegung und Abtragung) gelangen würde. Die Modellansätze zu (ii) sind die wichtigste Grundlage zur Festlegung des Betrachtungszeitraums für SMA- und HAA-Tiefenlager.

2.2.1 Herleitung der Anforderungen an die hydraulische Barrierenwirkung und den Betrachtungszeitraum durch die Nagra

Hydraulische Barrierenwirkung

Die Nagra stellt Mindestanforderungen und Verschärfte Anforderungen für SMA- und HAA-Lager an den Indikator *Hydraulische Durchlässigkeit*. Für die *Homogenität des Gesteinsaufbaus* werden Verschärfte Anforderungen für HAA-Lager definiert. Für den Indikator *Transmissivität präferentieller Freisetzungspfade* werden Mindestanforderungen verwendet. Für alle diese Indikatoren wurden Bewertungsskalen erstellt.

Die Nagra verwendet einfache, robuste Konzeptmodelle, um eine Bandbreite verschiedener, realistischer geologischer Situationen zu beschreiben. Basierend auf diesen konzeptuellen Modellen werden mittels verschiedener Massentransport-Algorithmen die Auswirkungen von Parameterveränderungen auf den Radionuklidtransport in der Geosphäre untersucht. Die Resultate der Modellrechnungen wurden mit dem Schutzkriterium 1 der Richtlinie ENSI-G03 verglichen, d.h. für jede als wahrscheinlich eingestufte zukünftige Entwicklung darf die Freisetzung von Radionukliden innerhalb des Betrachtungszeitraums zu keiner Individualdosis führen, die 0.1 mSv/a überschreitet.

Die zugrundeliegenden konzeptionellen Modelle müssen die geologischen Gegebenheiten und den Kenntnisstand adäquat berücksichtigen und ausserdem flexibel genug sein, die ganze Bandbreite der in der Schweiz in Frage kommenden Wirtgesteine und Konfigurationen abzudecken. Die konzeptionellen Modellansätze, welche die Grundlage entsprechender Rechenfallfamilien darstellen, sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Tabelle 2-1: Konzeptuelle Modellansätze für generische Sicherheitsbetrachtungen der Nagra (NTB 08-05, Fig. 2.5-3)

NTB 08-05 Fig. 2.5-3	Konzeptuelle Gruppierung	Beschreibung
Typ a)	I	Homogenes, poröses Medium
Typ b)	II	Homogenes, poröses Medium mit engständigen, regelmässigen Klüften
Typ c)	III a)	Horizontal geschichtetes Medium, jede Schicht homogen nach a)
Typ d)	III b)	gleich wie c), eine Schicht mit Klüften wie in b)
Typ e)	IV a)	Zwei Lithologien, die eine in unregelmässigen, linearen horizontalen Elementen.
Typ f)	IV b)	Wie e), aber mit Klüften im Sinne von b) in den linearen Elementen
	I – IV	Modellfamilien a) -f), mit einer grossen Störungszone alle 100 m

Die verschiedenen Rechenfälle wurden mit eigenen numerischen Modellen simuliert. Im Nahfeld (Abfallgebinde, technische Barrieren und Auflockerungszone des Wirtgesteins) wurde der Code VPAC (NAB 08-05) eingesetzt, welcher den reaktiven Transport (Fluss und chemische Wechselwirkungen: Reaktionen, Sorption) für homogene Parameterverteilungen simuliert. Im Fernfeld (geologische Barriere) wurde der CODE PICNIC (NTB 02-06) verwen-

det. PICNIC simuliert ein Netzwerk von eindimensionalen Transportmodellen („legs“). Ein „leg“ repräsentiert z.B. Klüfte oder Störungszonen. Die Kluftströmung ist mit Diffusion und Adsorption in transversaler Richtung (in eine homogene Gesteinsmatrix) verbunden, um die Retention der Radionuklide zu berücksichtigen. An der Schnittstelle zwischen Nahfeld und Fernfeld (Grenzfläche Verfüllung / Wirtgestein) werden die aus dem Nahfeld stammenden Flüsse gemischt und in PICNIC eingespeist. Dieser unkonventionelle hybride Ansatz wird benützt, um den Massentransport und die Retention von Radionukliden in homogenen und geklüfteten Wirtsgesteinen zu modellieren.

Die schliesslich von der Nagra abgeleiteten Mindestanforderungen (MA) für die vertikale hydraulische Durchlässigkeit (K_v -Werte) sind in NTB 08-05 (Anhang A1.9) erläutert und in NTB 08-04 (Tab. 4.2-1) zusammengefasst. Sie betragen für SMA-Lager $\leq 10^{-10}$ m/s für die sogenannte Referenz-Abfallzuteilung und $\leq 10^{-9}$ m/s für eine alternative Abfallzuteilung, und für HAA-Lager jeweils $\leq 10^{-10}$ m/s. Die Anforderungen an K -Werte gelten, wenn nicht anders vermerkt, für einen relativ kleinen hydraulischen Gradienten von ca. 0.1 m/m. Es wird also von einer flachen Topographie ausgegangen, wie sie für das schweizerische Mittelland typisch ist. Falls die Gradienten grösser sind (z.B. in den Alpen), werden die Mindest- K -Werte gemäss NTB 08-05 (Anhang A1.9) reduziert.

Um eine feinere Beurteilung der potenziellen Wirtsgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Grossräume durchführen zu können, hat die Nagra folgende Verschärfte Anforderungen (VA) an die K -Werte festgelegt (NTB 08-05, Anhang A1.9): Die oben aufgeführten K -Werte sollen auch für die horizontale hydraulische Durchlässigkeit K_h (die in Gesteinen meist höher als K_v ist) gelten.

Die Transmissivität T wird verwendet, um den potenziellen Wasserfluss in kürzester Transportrichtung zu bewerten, wenn präferenzielle Fliesswege mit variabler oder unbekannter Durchlässigkeit oder Mächtigkeit (Klüfte, Adern, Störungszonen) zu beurteilen sind. Hier sind die Mindestanforderungen für SMA 10^{-8} m²/s und für HAA 10^{-9} m²/s, und die Gradientenabhängigkeit gilt auch hier (NTB 08-05, Anhang A1.20). Es wurden keine Verschärfte Anforderungen definiert.

Die Werte der hydraulischen Barriereneigenschaften wurden für einen Abstand des Tiefenlagers von grossen, hochpermeablen Störungszonen von 100 m berechnet (sog. auslegungsbestimmende Störzonen). Die Distanz zwischen diesen Störungszonen ist an sich eine Festlegung, die auf bisherigen Feldbefunden der Nagra beruht und für die vorgeschlagenen Lagerpläne eine genügend grosse Lagerkapazität ergibt. Tatsächlich fliessen neben den neuen generischen Sicherheitsbetrachtungen auch die Erfahrungen früherer Untersuchungen für den Wellenberg (NTB 94-06), das Kristallin (NTB 93-22) und den Opalinuston (NTB 02-02, NTB 02-03) in die Beurteilung der hydraulischen Durchlässigkeit potenzieller Wirtsgesteine ein. Im Weiteren spielen dabei die Beobachtungen zur natürlichen Mobilität von Elementen und Isotopen in geologischen Barrierengesteinen auch eine wichtige Rolle (sog. unabhängige Evidenzen). Solche Untersuchungen erlauben es, die unter realen Bedingungen realistisch zu erwartenden hydraulischen Durchlässigkeiten einzugrenzen.

Freilegung des Tiefenlagers und Anforderungen an den Betrachtungszeitraum

Anhand von drei verschiedenen, sehr einfachen, z. T. analytisch lösbaren konzeptionellen Modellen versucht die Nagra abzuschätzen, wie gross die zu erwartende Strahlendosis für den Menschen wäre, wenn ein geologisches Tiefenlager nach 'langer Zeit' (10^5 - 10^6 Jahre) durch flächenhafte Erosion in die Nähe der Erdoberfläche gelangt oder sogar ganz freigelegt würde. Hierbei würde dessen nuklearer Inhalt und seine noch vorhandene Resttoxizität mehr oder weniger direkt in die Umwelt abgegeben. Die Modellrechnungen sollen die Dosis illust-

rieren, die sich bei einer erosionsbedingten Freilegung eines Tiefenlagers nach verschiedenen angenommenen Einschusszeiten ergeben würde. Die freigesetzte und auf den Menschen einwirkende Strahlendosis wird mit dem Schutzkriterium (0.1 mSv/a) verglichen (10% des minimal auftretenden natürlichen Strahlungshintergrunds in der Schweiz. Die Betrachtungen zu diesen Erosions- und Freilegungsszenarien basieren auf drei sehr einfachen Modellen:

- Modell 1: Das nahe der Oberfläche liegende Tiefenlager wird direkt von genutztem Grundwasser durchströmt, sodass der Aquifer zusätzlich zum natürlichen Hintergrund mit Radionukliden / Strahlung kontaminiert wird (maximale Dosisabschätzung, wegen vollständiger und instantaner, sorptionsfreier Radionuklidauflösung im Aquifer). Die Strahlendosis ergibt sich durch den Konsum von belastetem Trinkwasser (Grundwasser).
- Modell 2: Die an der Oberfläche freigelegten Bereiche des Tiefenlagers werden erodiert und das freigesetzte mit Radionukliden kontaminierte Material wird im Einzugsgebiet einer Trinkwasserressource abgelagert. Die Strahlendosis ergibt sich durch die Direktstrahlung aus dem Boden sowie durch den Konsum von kontaminiertem Trinkwasser.
- Modell 3: In einer ersten Phase wird die Strahlendosis anhand des 'Standard'-Biosphärenmodells berechnet, wobei bei der Modellierung der Radionuklidfreisetzung aus der Geosphäre allerdings die zeitabhängige Zunahme der Durchlässigkeit des nun oberflächennahen Wirtgesteins aufgrund der zunehmenden Dekompaktion berücksichtigt wird. In der zweiten Phase während dem Eintritt in die Biosphäre, wenn das Tiefenlager sehr nahe an der Erdoberfläche zu liegen kommt, wird die Strahlendosis analog zu Modell 1 berechnet.

2.2.2 Grundlagen zur Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung

Die Transport- und Retentionseigenschaften von Gesteinen variieren von Ort zu Ort über einige Grössenordnungen, denn Gesteine sind häufig sehr heterogen aufgebaut. Die generischen Sicherheitsbetrachtungen werden darum in Etappe 2 und 3 durch spezifische Szenarienanalysen für individuelle Standortgebiete ersetzt.

Die quantitative Einschätzung der Eignung einer geologischen Formation als Wirtgestein für radioaktive Abfälle hängt unter anderem von deren Radionuklid-Rückhaltevermögen ab. Das Rückhaltevermögen ist für homogene tonige Wirtgesteine hoch und relativ einfach und sicher zu prognostizieren. Die von der Nagra benützte qualitative Bewertungsskala des Indikators *Homogenität des Gesteinsaufbaus* (NTB 08-05, Anhang A1.18) wird in Kap. 4.5 diskutiert. Für viele Gesteine muss deren Heterogenität explizit berücksichtigt werden, ebenso wie die zeitliche Entwicklung der Retentions- und Transporteigenschaften (z.B. Phillips 1991). Tabelle 2-2 zeigt die Beziehung zwischen potenziellen Wirtgesteinen und den konzeptuellen Modellansätzen auf.

Tabelle 2-2: Beziehung zwischen potenziellen Wirtgesteinen und konzeptuellen Modellansätzen (NAB 09-29)

Wirtgesteine für SMA-Tiefenlager	Konzeptualisierung NTB 08-05, Fig. 2.5-3, S. 52	Rechenfall-Familien NTB 08-05, Kap. 3.3.1, S. 88 ff
Opalinuston	Typ a)	R1
Effinger Schichten	Typ d) bzw. Typ b)	R1, R2, R3, R4
Brauner Dogger	Typ d) bzw. Typ c)	R1, R2
Mergel des Helvetikums	Typ b) bzw. Typ d)	R1, R2, R3, R4
USM bzw. OSM	Typ e) bzw. Typ f)	Rechnungen sind in NTB 08-05 nicht dokumentiert, da USM und OSM zurückgestellt wurden

2.2.3 Beurteilung der Anforderungen an die hydraulische Barrierenwirkung und den Betrachtungszeitraum durch die KNE

Hydraulische Barrierenwirkung

Der verwendete Ansatz zur Modellierung der Radionuklidenausbreitung ist, wie oben erwähnt, hybrid. Die individuellen Programme und die ihnen zu Grunde liegenden konzeptuellen Ansätze wurden von der Nagra sorgfältig getestet (siehe z.B. Jacob et al., 2003). Die Wahl von zwei Modellen (Nahfeld: VPAC; Fernfeld: PICNIC) resultiert in einer Mischzone an der Grenzfläche zwischen den Modellen. Dieser Ansatz ist ungewöhnlich und bedarf deshalb einer Überprüfung. Die vom ENSI durchgeführten Modellrechnungen für die Rechenfallfamilie R2 zeigen, dass mit unabhängigen Modellansätzen (ohne Mischzone) und Programmen keine signifikanten Unterschiede in den berechneten Dosen und Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit resultieren (ENSI Gutachten zu SGT Etappe 1).

Der von der Nagra gewählte deterministische Ansatz ist für die Ableitung der hier diskutierten minimalen und Verschärften Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit sinnvoll. Die deterministische Behandlung der generischen Modellierung ist konsistent mit den einfachen, aber schlüssigen konzeptuellen Modellansätzen (siehe Tabelle 2-1). Für die nächsten Etappen des SGT sind auch stochastische Modellansätze in Betracht zu ziehen. Dabei sind auch die Voraussetzungen, welche in die konzeptuellen Modelle eingeflossen sind (z.B. der Abstand und die geometrischen Verhältnisse von regionalen Störungszonen und engständigen Störungen) in den bevorzugten Standortgebieten zu überprüfen. So ist es z.B. vorstellbar, dass die Kombination von grossräumigen Störungen und anderen Parametern der konzeptuellen Gruppierung III und IV (Tabelle 2-1) unvorhergesehene präferenzielle Freisetzungspfade ergeben könnte.

Die Nagra ist in der Lage, basierend auf früheren, umfassenden lagerspezifischen Erfahrungen mit Transportmodellen und in-situ Messungen (z.B. Wellenberg (NTB 94-06), Kristallin (NTB 93-22) und Opalinuston (NTB 02-02, NTB 02-03)) eine allgemeingültige Strategie für die generischen Sicherheitsbetrachtungen zu entwickeln und so die Mindestanforderungen und Verschärfte Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins, einer der wesentlichen Indikatoren für das Wirtgestein, festzulegen. Die Modellrechnungen selbst wurden von der KNE nicht geprüft. Die von der Nagra verwendeten Anforderungen (MA, VA) an die hydraulische Barrierenwirkung (hydraulische Durchlässigkeiten und Transmissivität präferenzieller Fliesspfade) sind gemäss der bis heute gewonnenen internationalen Erfahrungen und der geltenden Modelle festgelegt worden. Sie werden von der KNE aufgrund der Berechnungen des ENSI als zweckmässig betrachtet.

Freilegung des Tiefenlagers und Anforderungen an den Betrachtungszeitraum

Die von der Nagra verwendeten Modelle zur Beurteilung des Einflusses der Erosion nach langen Zeiten sind konzeptuell stark vereinfacht und beruhen auf vielen (z.T. konservativen) Annahmen. Die starken Vereinfachungen sind dadurch bedingt, dass der Nagra keine konkreteren Informationen über die möglichen Erosions- und Freilegungsbedingungen an der Oberfläche (bzw. im Bereich der Biosphäre) in Zeiträumen von 10^5 - 10^6 Jahren zur Verfügung stehen.

Je nach Wahl der Parameter im entsprechenden Modell liegt die berechnete Dosis unterhalb oder oberhalb des Schutzkriteriums von 0.1 mSv/a. Aus dieser zeitlichen Entwicklung kann für die verschiedenen Abfalltypen die Zeitdauer des notwendigen Einschlusses in der intakten Geosphäre abgeleitet werden. Für Brennelemente (BE) und HAA ergibt sich aus den Modellen 1 und 2 eine minimale Einschlussdauer von 1-2 Millionen Jahren³. Aus Modell 3 ergibt sich, dass eine Kombination von minimaler Tiefenlage (440 m) und maximaler Erosions/Hebungsrate (0.4 mm/Jahr) inklusive Dekompaktion innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahre für BE, HAA und LMA (langlebige mittelaktive Abfälle) zu Dosen knapp unterhalb des Schutzziels von 0.1 mS/a führt. Für SMA genügen für die Modelle 1 und 3 100'000 Jahre, bei Modell 2 wäre die notwendige Einschlussdauer kürzer. Diese Resultate müssen allerdings bei SMA mit Vorsicht behandelt werden, da die Abfallzuteilung basierend auf solchen Betrachtungszeiträumen vorgenommen wurde.

Im Detail ist die Wahl der effektiv gewählten numerischen Parameterwerte nicht durchwegs nachvollziehbar. So ändert sich z. B. die freigesetzte Strahlendosis in Modell 2 in Abhängigkeit des Winkels, mit dem ein Tiefenlager die erodierte Erdoberfläche / Geländekante durchstösst. Eine Abschätzung zeigt, dass die freigesetzte Strahlendosis mit kleiner werdendem Winkel ansteigt (NTB 08-05, Fig. 2.5–7). Die freigesetzte Dosis liegt schon bei 5° über dem Schutzkriterium von 0.1 mS/a. Wie die Nagra die berücksichtigten Winkel (5 - 15°) begründet, bleibt offen. Die KNE kann zur Zeit nicht beurteilen, wie die erosionsbedingte Nuklidfreisetzung in die Umwelt die Berechnung der Dosis in der Biosphäre beeinflusst (NTB 08-05, Kap. 2.5.5) und wie sich die entsprechenden Unsicherheiten bei der Dosisberechnung wechselseitig beeinflussen. Die Betrachtungszeiträume von 10^6 Jahren für HAA und 10^5 Jahren für SMA sind das Resultat eines iterativen Vorgehens und sind für die KNE plausibel. Die KNE hat die entsprechenden Berechnungen aber nicht im Detail überprüft.

2.3 Minimale Tiefenlage SMA- und HAA-Lager im Hinblick auf Hebung, Erosion und Gesteins-Dekompaktion

2.3.1 Herleitung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage der SMA- und HAA-Lager durch die Nagra

Die Mindestanforderungen an die Tiefenlage des SMA- und HAA-Lagers werden so bestimmt, dass am Ende des Betrachtungszeitraums die Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Extremfall die Erdoberfläche erreicht. Der Betrachtungszeitraum für das jeweilige Lager entspricht dabei der Tiefenlage der Obergrenze des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zum Zeitpunkt der Einlagerung, dividiert durch die Erosionsrate (NTB 08-05, S. 162). Nach Ablauf des Betrachtungszeitraums von 10^6 Jahren darf die Strahlenbelastung nicht wesentlich höher als die natürliche radiologische

³ Gemäss der Richtlinie G03 gilt das Schutzkriterium von 0.1 mS/a für einen Zeitraum bis 10^6 Jahre. Für spätere Zeiten (nach 10^6 Jahren) dürfen die Auswirkungen nicht wesentlich höher sein als die natürliche radiologische Belastung.

Belastung sein (Richtlinie ENSI-G03). Die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hängt aber auch von der Mächtigkeit der Dekompaktionszone ab, die eine grössere Gesteinsdurchlässigkeit aufweist. Damit ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. Entweder wird auf Grossregionen mit geringen Hebungs- und Erosionsraten ausgewichen, oder das Lager wird in grössere Tiefenlagen gelegt. Die Mächtigkeit der Dekompaktionszone hängt von regionalen Gegebenheiten wie z.B. der litho-tektonischen Architektur, der Versenkungsgeschichte, der Topographie und der Hangstabilität ab und bildet eine weitere Variable. Trotz der Komplexität dieser Zusammenhänge gilt es, eine machbare Lösung zu finden, bei der nach dem Freilegen des Lagers die vorgeschriebene Strahlendosis nicht überschritten wird. Des Weiteren darf ein Lager aus bautechnischen Gründen nach Ansicht der Nagra nicht in Tiefen ≥ 800 m für Sedimentgesteine und ≥ 1200 m für kristalline Gesteine zu liegen kommen (SGT-Kriterium 1.1, NTB 08-05, Anhang A1.1). In Abschnitt 2.3 werden durch die KNE weitergehende Einschränkungen an die maximale Tiefenlage aus bautechnischer Sicht gefordert.

Die Nagra kommt zu Schluss, dass eine Tiefenlage von ≥ 200 m und ≥ 400 m für SMA- beziehungsweise HAA-Lager hinreichend ist, um den Sicherheitsanforderungen aller entsprechender Indikatoren zu genügen (Mindestanforderungen an Indikatoren *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion, flächenhafte Erosion* sowie *Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion*; SGT-Kriterium 1.1, NTB 08-05, Anhänge A1.2, A.1.3, A1.4). Diese Tiefenlage unter der Erdoberfläche entspricht den Mindestanforderungen von maximal 0.4 mm pro Jahr flächenhafte Erosion für ein HAA-Tiefenlager in der Nordschweiz und von maximal 2 mm pro Jahr für ein SMA- Tiefenlager. Bei der glazialen Tiefenerosion ist nicht die Erdoberfläche, sondern die Felsoberfläche der Bezugshorizont.

Die Bestimmung der Verschärften Anforderungen an den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion* hängt einerseits vom potenziellen Wirtgestein ab, und andererseits davon, ob obere Rahmengesteine beim Opalinuston notwendig sind. Verschärfte Anforderungen an den Indikator *Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion* umfassen zusätzliche 100 m für die Tiefenlage, wo übertiefte Felsrinnen vorhanden sind. An den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion* werden keine Verschärften Anforderungen gestellt (NTB 08-05, Anhang A1.2, A.1.3 und A1.4).

Die Bewertungsskala wurde von der Nagra derart formuliert, dass sehr günstige Verhältnisse vorliegen, wenn die Verschärften Anforderungen an den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion* um mindestens 100 m für SMA-Lager bzw. 200 m für HAA-Lager übertroffen werden, und wenn hinsichtlich *glazialer Tiefenerosion* das Lager ausserhalb des Bereichs der Haupttäler (Rhein-, Aare- Thur-, Glattal) zu liegen kommen, oder die Verschärften Anforderungen um mehr als 100 m übertroffen werden (NTB 08-05, Anhang A1.4). Hinsichtlich *flächenhafter Erosion* darf in einem sehr günstigen Standort nach 100'000 Jahren bzw. 1 Mio. Jahren (SMA bzw. HAA-Lager) der Top des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs noch nicht von Dekompaktion betroffen sein. Günstige Verhältnisse liegen vor, wenn alle Standorte mindestens die Verschärften Anforderungen erfüllen, bzw. das Wirtgestein nach Ablauf der Beobachtungszeit mehrheitlich noch nicht von Dekompaktion betroffen wird (hier fehlt eine Quantifizierung von ‚mehrheitlich‘) (NTB 08-05).

2.3.2 Grundlagen zur Bewertung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage der SMA- und HAA-Lager

Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf flächenhafte Erosion*

Der Hebung und Erosion kommen für die Bestimmung der Tiefenlage eine wichtige Rolle zu, da diese Prozesse bestimmen, wann ein Lager in die Dekompaktionszone oder den Einflussbereich der Hydrosphäre gelangen kann. Es ist deshalb wichtig zu wissen, wie schnell die Alpen und das Mittelland gehoben und flächenhaft erodiert werden. Prognosen sind über das Prozessverständnis oder basierend auf Erfahrungswerten möglich, die sich aus der Rekonstruktion für die letzten Millionen Jahre ergeben. Die Nagra wählt den letzteren, aus der Sicht der KNE vernünftigen Ansatz (NTB 08-04).

Interessanterweise weisen nahezu alle Indikatoren darauf hin, dass sich in den letzten ca. 3-5 Mio. Jahren das Muster der Hebung bis heute nicht verändert hat (Vernon et al. 2009) und dass Hebung und Erosion in den Alpen um mindestens einen Faktor 2 grösser waren als im Mittelland. Unklar dagegen ist, ob die Abnahme der Hebung von den Alpen zum Vorland diskret entlang von Störungzonen erfolgt oder ob der Übergang kontinuierlich ist. Neuere Modelle lassen eher auf das Letztere schliessen (Champagnac et al. 2009), jedoch fehlt eine auf Feldbeobachtungen basierende abschliessende Betrachtung. Jüngere Untersuchungen an Bohrmaterial aus dem Molassebecken zeigen zudem, dass das nordalpine Vorland in den letzten 5 Mio. Jahren invertiert und eine Erosion von 900 bis mehr als 1500 m (Standort Boswil-1) und in der Subalpinen Molasse bis 3000 m erfahren hat (Cederbom et al. 2004). Damit ergibt sich ein durchschnittlicher Erosionswert zwischen ~ 0.2 und 0.5 mm pro Jahr für das zentrale Molassebecken.

Für die Übergangszone östlicher Tafeljura/Molassebecken schätzen Mazurek et al. (2006) die Erosion in den letzten 10 Mio. Jahren zwischen 750-1050 m (siehe auch NTB 99-08). Dies ergibt eine durchschnittliche Erosionsrate von ~0.1 mm pro Jahr (oder ~0.2 mm pro Jahr, wenn die Erosion vor etwa 5 Mio. Jahre vor heute einsetzte). Diese Erosion wäre mit einer Zunahme des Sedimentflusses aus den Alpen verbunden, was für die letzten 5 Mio. Jahre auch nachgewiesen wurde (Hay et al. 1992; Kuhlemann et al. 2001). Damit zeigt sich, dass die geologische Geschichte der Alpen und des Mittellandes in den letzten Millionen Jahre durch grossräumige Veränderungen der geodynamischen Prozesse charakterisiert ist. Die Sedimentflusskurve von Kuhlemann et al. (2001) impliziert zudem, dass die Abschätzung des Beginns der Beckeninversion auf 5 Mio. Jahre vor heute (Cederbom et al. 2004) vermutlich korrekt ist. Zudem scheint es möglich, dass ein Grossteil dieser Beckenerosion nach den ersten 2-3 Mio. Jahre vor heute abgeschlossen war (Cederbom et al., unpublizierte Daten). Allerdings ist die Interpretation dieses Zeitintervalls von 2-3 Mio. Jahre ziemlich spekulativ, wie die Autoren in ihrer noch nicht publizierten Arbeit festhalten. Trotzdem liegen indirekte Hinweise aus der Betrachtung der > 1.8 Mio. Jahre alten Höheren Deckenschotter am Irchel vor, welche die Vermutung von Cederbom et al. (unpublizierte Daten) bestätigen. Diese Schotter liegen 175 m und mehr über dem heutigen Talniveau (NTB 99-08, S. 64). Da auch dort die Molasse seit 5 Mio. Jahre vor heute abgetragen wurde, müssen je nach Quelle im Zeitraum zwischen 5 und 2 Mio. Jahre 550-850 m (Mazurek et al. 2006) beziehungsweise 700-1300 m abgetragen worden sein (Cederbom et al. 2004). Das ergibt für die Übergangszone östlicher Tafeljura/Molassebecken ein Erosionsszenarium von ~0.2-0.3 mm pro Jahr für den Zeitraum zwischen 5 und 2 Mio. Jahre vor heute, und < 0.1 mm pro Jahr zwischen 2 Mio. Jahre und heute. Für das zentrale Molassebecken resultieren nach dieser Berechnung Erosionsraten zwischen 0.2 und 0.4 mm pro Jahr für den Zeitraum zwischen 5 und 3 Mio. Jahre, und < 0.1 mm pro Jahr danach. Die letzten Millionen Jahre waren also gekennzeichnet durch hohe und zeitlich variierende Erosion (s. auch Hinderer 2001; Kuhlemann et

al. 2001). Wird das Erosionsgeschehen der letzten Millionen Jahre als Referenz für die geodynamische Stabilität beigezogen, dann muss mit Erosions- und Hebungsraten gerechnet werden, die im Mittelland den Wert von 0.4 mm pro Jahr für kürzere Zeiträume (~2-3 Mio. Jahre) durchaus erreichen können. Obwohl die meisten quantitativen Studien auf Hebungs- und Erosionsraten um 0.1-0.2 mm pro Jahr für das distale Molassebecken und das Zürcher Weinland hinweisen, kann ein 'Worst-Case'-Szeanrium vom 0.4 mm pro Jahr nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Die KNE stellt fest, dass die Nagra diese Möglichkeit in der Berechnung der Freisetzung von Radionukliden nach langen Zeiten (Abschnitt 2.2) berücksichtigt hat (Erosionsraten zwischen 0.1 und 0.5 mm pro Jahr; NTB 08-05, S. 65).

Die Erosionsszenarien (maximaler Wert von 2 mm pro Jahr), die für SMA-Lager in Betracht gezogen werden, sind nach dem heutigen Stand der Kenntnisse unbestritten. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass für die Sicherheit eines SMA-Lagers in den Alpen grosse Massenbewegungen explizit berücksichtigt werden müssen (insbesondere in inkompetenten Mergeln). Diesem Aspekt trägt die Nagra durch grosszügigere Mächtigkeiten für die Dekompaktionszone Rechnung, die allerdings aus Sicht der KNE nicht hinreichend sind (s. unten).

Für die Beurteilung des Indikators *Tiefenlage im Hinblick auf flächenhafte Erosion* im Gebiet der Nordostschweiz (östlicher Tafeljura, östliches Molassebecken, östliche Subjurasische Zone) und der Alpen (nur SMA-Lager) ergeben sich folgende, aus der Sicht der KNE relevante Punkte:

- Die meisten Evidenzen gehen dahin, dass das nordalpine Vorland inklusiv östlichem Tafeljura (mit Bohrung Weiach) und östlichem Molassebecken ab ca. 5 Mio. Jahre vor heute grossräumig erodiert wurde.
- Im Bereich der Bohrung Weiach beträgt diese Erosion 750 bis 1050 m (Mazurek et al. 2006). Gegen das zentrale östliche Molassebecken hin nimmt dieser Wert zu (Cederbom et al. 2004).
- Seit spätestens 1.8 Mio. Jahre vor heute wurde die Molasse um 175 m erodiert. Die Erosionsbasis kann durchaus auch früher, z.B. um 2 oder 3 Ma erreicht worden sein.
- Das Szenarium gleichförmiger Hebung und Erosion in den letzten 5 Mio. Jahren ergibt für diesen Teil der Schweiz eine Prozessrate von maximal 0.2 mm pro Jahr.
- Je nach Szenarium, wie die Abtragung der Molasse tatsächlich erfolgte, ist mit kurzfristigen (Zeitdauer 2-3 Mio. Jahre), maximalen Erosionsraten von 0.4 mm pro Jahr zu rechnen. Diese hohen Prozessraten stellen einen Maximalwert dar, der für die Region rund um die Bohrung Weiach in Frage kommt.
- Ein HAA-Lager in 400 m Tiefe kann im Falle des Szenariums maximaler Erosion (0.4 mm pro Jahr) nach dem Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahre an die Oberfläche geraten. Für den Fall durchschnittlicher Erosion (< 0.2 mm pro Jahr) wird ein in 400 m Tiefe angelegtes Lager nach 1 Mio. Jahre in einer Tiefe von 200 m liegen. Ein Lager in 600 m Tiefe wird die Oberfläche im Hinblick auf flächenhafte Erosion im Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahre nie erreichen.
- Ein SMA-Lager in 200 m Tiefe kann im Falle der maximal zu erwartenden Erosion von 2 mm pro Jahr nach 100'000 Jahren an die Oberfläche geraten. Für den Fall durchschnittlicher Erosion (~1 mm pro Jahr in den Alpen) wird ein in 200 m Tiefe angelegtes Lager nach 100'000 Jahren in einer Tiefe von 100 m sein, im Mittelland noch tiefer. Ein SMA-Lager in 300 m Tiefe ist unter Berücksichtigung durchschnittlicher Erosion in den Alpen nach 100'000 Jahren immer noch in einer Tiefe von 200 m.
- Für SMA-Lager in den Alpen sind auch lokale Erosionseffekte und tiefgründige Massenbewegungen zu berücksichtigen.

Indikator Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion

Glaziale Prozesse haben die Alpen und das angrenzende Vorland beziehungsweise das Mittelland grundlegend verändert. Zudem sind glaziale Prozesse, und dabei insbesondere Wechsel von glazialen zu interglazialen Zeitintervallen, vermutlich für die anhaltende beschleunigte Abtragung der Alpen verantwortlich, die spätestens seit dem Ende des Pliozäns einsetzte. Der Grund, wieso diese Wechsel die Erosion und die Veränderung der Landschaft beschleunigt haben, ist wissenschaftlich nicht hinreichend geklärt und ist Gegenstand laufender Forschung. Zudem kann die glaziale Übertiefung mit herkömmlichen geophysikalischen Methoden (z.B. Seismik) wegen der steilen Flanken kaum bestimmt werden. Schliesslich ist der stratigraphisch-chronologische Rahmen dieser übertieften und mit Quartärsedimenten gefüllten Täler nahezu unbekannt. Die Datierung dieser Füllungen wäre aber wesentlich, weil damit bestimmt werden könnte, ob z.B. die letzte Vereisung die Täler zusätzlich tiefer gelegt oder lediglich modifiziert und nicht weiter vertieft hat. Damit könnte abgeschätzt werden, ob eine zusätzliche Vergletscherung eine weitere Vertiefung zur Folge hätte oder lediglich zur Erosion der oberen Füllungen führen würde.

Indikator Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion

Aufgrund von Feldbeobachtungen kann die Dekompaktion eines Gebirges (Gestein und Trennflächen) im Wesentlichen auf drei Prozesse zurückgeführt werden:

- Oberflächennahe Dekompaktion infolge von Verwitterungsprozessen, insbesondere wichtig bei mergeligen und leicht wasserlöslichen Gesteinen. Diese Prozesse reichen in wenig kompetenten Gesteinen wenige Dekameter in den Untergrund (z.B. Hekel 1994).
- Gravitative Prozesse an Talflanken (geologische Massenbewegungen wie Rutschungen, Sackungen, Bergstürze, etc.) und damit verbunden intensive Auflockerung des Gebirges. Je nach Topographie und Geologie können solche Massenbewegungen sehr tiefliegende Bewegungsflächen haben (im Alpenraum 200 m bis ca. 400 m). Die Auswirkung auf die Durchlässigkeit ist abhängig von der Lithologie. In spröden tonarmen Gesteinen sind die Auswirkungen extrem stark (z.B. Klemenz 1974). In tonreichen Gesteinen können sie immer noch mehrere Grössenordnungen betragen (z.B. Tacher et al. 2005).
- Dekompaktion infolge langfristiger und grossräumiger Hebung und Erosion. Die Reaktionen auf grossräumige Hebung und Erosion sind stark von den mechanischen Gebirgsfestigkeiten und den topographischen Verhältnissen abhängig. Starke Gebirgsverformung und Dekompaktion ergeben sich aus nicht-elastischen Anpassungen des Gebirges an die neuen Spannungsverhältnisse. In flacher Topographie (Jura, Molassebecken) werden durch die seitliche Einspannung primär die Vertikalspannungen durch vertikale Entlastungsbewegungen abgebaut. Im Alpenraum mit steilen Talflanken können sich die aus der Tiefe ererbten Gebirgsspannungen oberhalb der Talsohle grundsätzlich leichter abbauen, da eine seitliche Einspannung zumindest in einer horizontalen Richtung (talparallel) oft fehlt. Inwieweit diese Entlastung tatsächlich stattfindet, hängt primär von den Gesteinsfestigkeiten ab. Inkompetente Gebirge wie geklüftete Mergel und Tonsteine bauen Scherspannungen durch entsprechende plastische Verformungen leichter ab als massige Gesteine mit grosser Festigkeit. In massigen festen Gesteinen (wie z.B. wenig geklüftete Granite) können hohe ererbte Spannungen bis in Oberflächennähe erhalten bleiben und sich dann durch die Bildung von talparallelen Entlastungsklüften bis in eine Tiefe von maximal 150-200 m entspannen (Bucher & Loew 2009).

Die Dekompaktionstiefen sind darum differenziert zu betrachten. Sie sind im Alpenraum deutlich stärker ausgebildet als im flachen Alpenvorland. Die Nagra trägt diesen Unsicherheiten durch entsprechende Mindestanforderungen und Verschärfte Anforderungen an diesen Indikator Rechnung (Verschärfte Anforderungen Mergel-Formationen des Helvetikums > 400 m gegenüber >200 m Opalinuston und > 300 m Effinger Schichten und „Brauner Dogger“). Zudem untersucht die Nagra in den generischen Sicherheitsbetrachtungen den Fall, dass das HAA- und SMA-Lager im Verlaufe von 1 Mio. bzw. 100'000 Jahren in die Dekompaktionszone geraten könnte und damit Radionuklide schneller in die Hydro- und Biosphäre freigesetzt werden könnten (Abschnitt 2.2).

2.3.3 Beurteilung der Anforderungen an die minimale Tiefenlage durch die KNE

Stellungnahme zu den Mindestanforderungen und Verschärften Anforderungen

Würden nur die Mindestanforderungen an die Tiefenlage des SMA- und HAA-Lagers (≥ 200 m bzw. ≥ 400 m) eingehalten, dann könnte das SMA- und HAA-Lager unter Berücksichtigung der maximal zu erwartenden flächenhaften Erosion im Betrachtungszeitraum in die Dekompaktionszone geraten. Die Verschärften Anforderungen (NTB 08-05, Anhang A1.2) schaffen eine Reserve. Aber auch unter diesen Bedingungen kann das Lager am Ende des Betrachtungszeitraumes in den tieferen Bereich der Dekompaktionszone und damit in den Einflussbereich der Hydrosphäre gelangen.

Die KNE stellt fest, dass die Nagra den verschiedenen Einflussfaktoren der Dekompaktion und ihren geologischen Untersuchungen wenig Rechnung getragen hat. Für SMA-Lager in den Alpen sollte eine erhöhte Mächtigkeit der Dekompaktionszone insbesondere im Bereich von potenziell möglichen oder vorhandenen tiefgründigen Rutschungen und Sackungen berücksichtigt werden.

Die Nagra untersucht in NTB 08-05 (S. 62 ff) Szenarien der Endlagerfreilegung mit verstärkter Radionuklidfreisetzung. Gemäss diesen Untersuchungen sind Szenarien, bei denen das Tiefenlager vor Ende der Betrachtungsperiode in den Einflussbereich der Dekompaktionszone gerät, sowohl für ein HAA- wie ein SMA-Tiefenlager nicht relevant (vergl. Abschnitt 2.2.3). Für eine vollständige erosive Freilegung der Endlagers (respektive der kontaminierten Nebengesteine) sind die Auswirkungen des HAA-Tiefenlagers auf die Dosisbelastung bedeutender als bei einem SMA-Tiefenlager.

Die Nagra hat sich eingehend mit dem Problem der Tiefenerosion durch glaziale Prozesse auseinandergesetzt. Sie hat in diesem Zusammenhang auch ein Forschungsprojekt initiiert, das das Verständnis der subglazialen Prozesse und Erosion verbessern soll. Erste Ergebnisse sollen demnächst publiziert werden. Zudem strebt die Nagra an, den chronologischen Rahmen der Füllungen der glazial übertieften Täler zu rekonstruieren. Die von der Nagra verwendeten Interpretationen und Modellvorstellungen entsprechen dem heutigen Kenntnisstand. Das Verständnis der glazialen Erosion hinsichtlich der steuernden Faktoren, Prozessraten und auch bezüglich des maximalen Tiefenschurfs ist aber nach wie vor lückenhaft. Diesem Manko sollte mit einer noch vorsichtigeren, d.h. konservativeren Einschätzung der zukünftigen Erosionsleistung begegnet werden (s. unten).

Stellungnahme zur Bewertungsskala

Als sehr günstig wird durch die Nagra eine Tiefenlage beurteilt, welche die Verschärften Anforderungen um mindestens 100 m (SMA) bzw. 200 m (HAA) überschreiten (NTB 08-05, Anhang A1.2). Eine günstige Tiefenlage liegt dann vor, wenn die Verschärften Anforderun-

gen bis zu 100 m (SMA) bzw. 200 m (HAA) überschritten werden. Bedingt günstige oder ungünstige Verhältnisse werden nicht berücksichtigt (NTB 08-05, Anhang A1.2). Die KNE stellt fest, dass die HAA-Lager, welche hinsichtlich der Tiefenlage als sehr günstig beurteilt werden, unter Berücksichtigung auch sehr hoher Erosionsraten (0.4 mm pro Jahr) voraussichtlich nicht in die Dekompaktionszone geraten werden. Die KNE stimmt darum dieser Bewertungsskala für die HAA-Tiefenlager zu. Im alpinen Raum bestehen bezüglich der Bewertungsskalen von SMA-Tiefenlager noch Ungewissheiten, insbesondere vor dem Hintergrund grossräumiger Massenbewegungen. Eine Berücksichtigung dieses Effekts könnte durch entsprechende Verschärfte Anforderungen an die Dekompaktionszone erfolgen. 400 m, wie sie für die Mergelformationen des Helvetikums gefordert werden, scheinen allerdings zu wenig zu sein.

Die Mindestanforderung an die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter der Felsoberfläche entspricht der Tiefenlage zur Berücksichtigung der grossräumigen Erosion (NTB 08-05, A1-3). Die Folgen der glazialen Tiefenerosion werden mit den Verschärften Anforderungen berücksichtigt. Da viele Bohrungen nicht in der Tal- bzw. Trogachse abgeteuft wurden, ist die maximale Trogtiefe meist nicht genau bekannt. Die Verschärften Anforderungen bilden daher eine minimale Abschätzung des möglichen Betrags der glazialen Tiefenerosion. Liegt ein SMA- und HAA-Lager unter einem glazial übertieften Tal, so muss damit gerechnet werden, dass es im Verlaufe der Zeit von 100'000 bzw. 1 Mio. Jahren in den Bereich der Dekompaktionszone gelangt und damit Radionuklide schneller in den hydrologischen Kreislauf freigesetzt werden. Die zusätzlichen ≥ 100 m, die an die Verschärften Anforderungen geknüpft sind, bilden in dieser Hinsicht nur eine minimale Reserve.

Der von der Nagra vorgenommenen Bewertung der bevorzugten Bereiche in Bezug auf die glaziale Tiefenerosion kann beigestimmt werden. Da hinsichtlich des maximalen, zukünftigen Tiefenschurfs aber eine erhebliche Unsicherheit besteht, ist die Verschärfte Anforderung an den Grenzabstand zur Felsoberfläche im Bereich glazial übertiefter Felsrinnen konservativ-erweise von 100 m auf 150 m zu erhöhen. Einige der ausgewählten Bereiche könnten dadurch etwas verkleinert werden. Diese Verschärfung der Verschärften Anforderung berücksichtigt vor allem die Unsicherheiten bezüglich linear konzentrierter subglazialer Erosion, die zur Entstehung von tief eingeschnittenen, klammartigen Schluchten führen kann. Solche Schluchten sind schwierig zu detektieren und werden oft nur zufällig erbohrt. Sie können aber beträchtliche Tiefen aufweisen. Eine solche äusserst schmale und rund 80 m tiefe Rinne ist z.B. beim Kappelenring nordwestlich von Bern durch eine Erdsondenbohrung belegt (s. Atlasblatt Bern). Die Erhöhung des Grenzabstandes auf 150 m wird vor allem den relativ weichen und rasch erodierbaren Molassegesteinen gerecht.

2.4 Maximale Tiefenlage für SMA- und HAA-Lager im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit

2.4.1 Herleitung der Anforderungen an die maximale Tiefenlage unter Terrain durch die Nagra

Basierend auf Erfahrungen und eigenen Untersuchungen legt die Nagra in NTB 08-05 (Anhang A1.1) die Mindestanforderungen (maximale Tiefenlage) an den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* von SMA- und HAA-Tiefenlagern fest. Für Sedimentgesteine wird in Schritt 4 (Evaluation der Wirtgesteine) bei SMA als Mindestanforderung eine maximale Tiefenlage von ≤ 800 m u. T. (bezogen auf die „Mitte des Wirtgesteins“) festgelegt. Aufgrund der deutlich kleineren Querschnitte der HAA-Lagerstollen, der kürzeren Zeitspanne bis zur Wiederverfüllung (2 Jahre) und der Ausrich-

tung der Lagerachse in Richtung der maximalen horizontalen Spannung, wird die Mindestanforderung der maximalen Tiefenlage beim HAA-Lager auf ≤ 900 m u. T. erhöht.

Im Schritt 5 (Identifikation potenziell möglicher Bereiche) werden durch die Nagra die gleichen Mindestanforderungen an den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* bezüglich der Lagerebene („Mitte des notwendigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“) definiert.

Die Verschärften Anforderungen an die maximale Tiefenlage aus bautechnischer Sicht (wiederum bezogen auf die Lagerebene) unterscheiden sich nur für den Opalinuston und die Tonsteine des „Braunen Doggers“ in der östlichen Subjurassischen Zone von den Mindestanforderungen (keine Verschärfung im Tafeljura s. str. und Vorfaltenzone (VA = MA); Lagerebene VA ≤ 700 m u. T. für die östliche Subjurassische Zone). Im Fall von SMA-Lagerkavernen in Sedimentgesteinen mittlerer bis hoher Festigkeit (Effinger Schichten und Palfris-Mergel) erfolgt keine Verschärfung der Anforderungen (VA = MA). Im Fall von HAA-Lagerstollen im Opalinuston erfolgt keine Verschärfung im Tafeljura s. str. und in der Vorfaltenzone (VA = MA), dafür in der östlichen Subjurassischen Zone (Lagerebene VA ≤ 800 m u. T.).

Neben der maximalen Tiefenlage aus felsmechanischer Sicht berücksichtigt die Nagra auch die Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeit im Betriebszustand des Tiefenlagers.

2.4.2 Grundlagen zur Bewertung der maximalen Tiefenlage

Bei der Herleitung der maximalen Tiefenlage unter Terrain stützt sich die Nagra auf Erfahrungen im schweizweiten Tunnelbau und vororientierende numerische Modellrechnungen.

In der Schweiz verfügt man über eine reiche Tunnelbauerfahrung in einem Teil der bevorzugten Wirtgesteine (Opalinuston, Effinger Schichten, Palfris-Schiefer). Die Erfahrungen reichen bis zu einer Überdeckung von 700–800 m (Grenchenbergstunnel), liegen aber meist zwischen 200–400 m (NTB 02-03). Eine Zusammenfassung der Erfahrungen findet sich unter anderem im NTB 02-03.

Bereits im Rahmen des Entsorgungsnachweises wurden orientierende felsmechanische Berechnungen durchgeführt und die generelle Machbarkeit eines HAA-Lagerstollens sowie dessen Erschliessungsbauwerke bis zu einer Überdeckung von 650 m nachgewiesen (Nagra 2000, 2003; NTB 02-02). Im Zuge des SGT wurde die bautechnische Eignung verschiedener potenzieller Wirtgesteine (Opalinuston, Effinger Schichten und USM) für die SMA-Lagerstollen (Kavernenquerschnitt K12-2.4) bis zu einer Überdeckung von 800 m u. T. durch felsmechanische Berechnungen eingehend untersucht (NAB 08-45). Bezüglich felsmechanischer Kennwerte und Details zu den Stoffgesetzen wird auf die jeweiligen Berichte verwiesen.

Anhand der Modelluntersuchungen wird gezeigt, dass HAA-Lagerstollen bis 650 m u. T. sowie SMA-Lagerstollen (Kavernenquerschnitt K12-2.4) im Opalinuston und in den Effinger Schichten bis 800 m u. T. mit heutigen Sicherheitmitteln und Vortriebsmethoden bautechnisch machbar sind (Nagra 2000; NAB 08-45). Ebenso wird der Nachweis erbracht, dass ein HAA-Lagerstollen im intakten Opalinuston bis in eine Tiefe von 650 m u. T. alleine mit Ankern und Kopfschutz (Netz) aufgefahren werden kann.

Die maximale Tiefenlage des Tiefenlagers ist neben bautechnischen Aspekten auch von der Maximaltemperatur abhängig (detaillierte Angaben dazu finden sich in Nagra 2009a). Bis 55°C sind heute bei industriell hergestellten Untertagebauwerken sicher machbar. Die Kühlung des Gotthard-Basistunnels – gemäss SIA 196 muss im Arbeitsbereich die Trockentemperatur auf 28°C heruntergekühlt werden – ist zum Beispiel für eine maximale Temperatur

von 50(±5) °C ausgelegt. Kritisch sind dabei weniger die Felstemperaturen, sondern warme Wasserzutritte in grösseren Mengen (> 10 l/s) und die Abwärme der eingesetzten Maschinen. Signifikante Wasserzutritte sind aber in einem geologischen Tiefenlager ausgeschlossen. Geothermische Gradienten im Jura und Mittelland liegen zwischen 35 und 45°C/km (Schill, pers. Mitt. 2009). Von ähnlichen mittleren Gradienten geht auch die Nagra aus (NIB 09-04), auch wenn bekannt ist, dass diese lokal stark erhöht sein können (z.B. über aufsteigenden Tiefenwässern am Rand des Nordschweizer Permokarbondrogs oder in dichten Tonsteinlagen). Für die Daten in Kohl et al. (2005) ergeben sich – für 55°C Maximaltemperatur – Endlagertiefen von etwa 1000 bis 1200 m.

2.4.3 Beurteilung der maximalen Tiefenlage durch die KNE

Die maximale *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit* stellt ein wesentliches Kriterium zur Einengung der bevorzugten Bereiche von SMA- und HAA-Tiefenlagern dar.

SMA-Lager

Im Fall der SMA-Lagerstollen wurden in den Modellrechnungen der Nagra Tiefenlagen angenommen, welche der Mindestanforderung von ≤ 800 m u. T. entsprechen. Die horizontalen Spannungen wurden gemäss den Erwartungswerten variiert. Die Berechnungen legen die bautechnische Machbarkeit bis zur Mindestanforderung für SMA-Lager dar. Allerdings repräsentieren die felsmechanischen Kennwerte die Festigkeit des intakten Fels und nicht die für den Bau massgebende Gebirgsfestigkeit, wodurch die Ergebnisse auf tektonisch überprägte Gebiete mit engständigen Klüften/Störungen nicht uneingeschränkt übertragbar sind (siehe auch NAB 08-45, S. 27).

Aufgrund der Tatsache, dass bei SMA keine Einschränkungen in den Sicherungsmitteln bestehen, ist die generelle Machbarkeit der SMA-Lagerstollen in intaktem Fels bzw. einem Gebirge mit sehr weitständigen Trennflächen wohl ausreichend dargelegt. Für Sedimentgesteine niedriger Festigkeiten und / oder erhöhter tektonischer Überprägung (wie dem Wellenberg) ist aus Sicht der Berichterstatter bei sorgfältiger Planung das Auffahren eines SMA-Lagers bautechnisch machbar. Dies muss jedoch an einem konkreten Standort noch verifiziert werden. Die Festlegung der maximalen Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit von SMA-Tiefenlagern wird von der KNE unterstützt.

HAA-Lager

Für HAA Lagerstollen bestehen im Gegensatz zu den SMA-Lagerkavernen Einschränkungen bezüglich der einsetzbaren Sicherungsmittel (NAB 09-07; NTB 08-04). Ein nachvollziehbarer bautechnischer Nachweis für Tiefenlagen > 650 m (MA ≤ 900 m u. T.) liegt weder für intaktes Gebirge noch für tektonisch überprägtes Gebirge vor⁴.

Die Beurteilung der maximalen Tiefenlage für ein HAA-Tiefenlager basiert auf den von der Nagra beschriebenen Ausbaukonzepten (NTB 08-04) und Modellrechnungen, den bisherigen Erfahrungen im Schweizer Tunnelbau und von der ETH Zürich durchgeführten analytischen und numerischen Analysen zur Stabilität der Hohlräume eines HAA-Stollens in unterschiedlicher Tiefenlage. Die neuen, in NAB 09-07 beschriebenen Ausbaukonzepte der HAA-Lagerstollen, mit vollflächigem Ausbau aus Stahl/Spritzbeton oder Tübbing, weichen von den Darstellungen in NTB 08-03 und Nagra 2009a ab.

⁴ Die Ausführungen der Nagra im nachgereichten NAB 05-15 (insbesondere Annahmen zu den Eigenschaften der Anker) kann die KNE nicht nachvollziehen.

Für die HAA-Lagerstollen existieren auf das Züricher Weinland bezogene, standortspezifische Berechnungsergebnisse für intakten Opalinuston, die von einer Überdeckung von maximal 650 m u. T. und einem kreisförmigen Querschnitt von 2.5 m Durchmesser ausgehen. Im Rahmen des SGT wurden weitere Standorte vorgeschlagen, welche zum Teil ungünstigere felsmechanische Bedingungen (grössere Überlagerung, tektonische Überprägung und eventuell höhere Trennflächendichte als im Tafeljura) erwarten lassen (siehe auch Nagra Aktennotiz 09-269). Für die Realisierung der Lagerstollen bis zu einer Tiefenlage von 900 m (MA \leq 900 m) liegen weder für intakten Opalinuston noch für tektonisch überprägte Gebiete nachvollziehbare felsmechanische bzw. statische Untersuchungen der bautechnischen Machbarkeit vor⁵. Die Berechnungsergebnisse für HAA-Lagerstollen mit 2.5 m Durchmesser sind als Nachweis der bautechnischen Machbarkeit nur für intaktes Gebirge bis 650 m u. T. gültig oder nur dann, wenn die Trennflächenabstände grösser als der relevante Betrachtungsmaassstab (Hohlraumgrösse) sind. Für den Fall eines engerständigen Trennflächengefüges (VZ, SJ) und grösserer Ausbruchquerschnitte liegen keine Nachweise vor.

Aus den bisher von der Nagra durchgeführten numerischen Berechnungen von Stollen mit 2.5 m Durchmesser im intakten Opalinuston mit Überlagerungen von maximal 650 m u. T. zeigt sich, dass bereits in 650 m Tiefe mit ausgedehnten Bruchzonen um den Hohlraum zu rechnen ist. Dies betrifft insbesondere Felspartien oberhalb der Firste und unterhalb der Sohle (Ausdehnung der Bruchzone bis zu 1 Tunneldurchmesser). Im Bereich der Ulmen beschränkt sich die Bruchzone auf wenige Dezimeter bis 1 m. Allerdings konvergieren die Modelle und die Totalverschiebungen betragen lediglich 20 bis 30 mm.

Für ein HAA-Tiefenlager im Opalinuston ist heute unter Berücksichtigung einer gewissen Variabilität der Gesteinsfestigkeit und Gebirgsspannungen anzunehmen, dass ab einer Tiefenlage von > 650-700 m die bautechnische Machbarkeit mit systematischen Ankern und Netzen zunehmend schwieriger wird (Amann & Löw 2009). Zudem zeigen diese Autoren mit numerischen Konzeptmodellen, dass Bruchphänomene mit zunehmender Tiefenlage (Spannungen) zunehmend vor der Ortbrust auftreten und durch radiale Sicherungsmittel nicht beherrschbar sind. Vollflächige Sicherungskonzepte, wie in NAB 09-07 (Anhang 3) beschrieben, werden wahrscheinlich selbst in intaktem Material mit nur vereinzelt Klüften (TJ) bei grösserer Überlagerung (> 700 m) notwendig werden. Innerhalb tektonischer Einheiten, welche Klüfte in relevanten Abständen (< 1 m) und Eigenschaften enthalten (VZ, SJ), muss davon ausgegangen werden, dass bereits bei geringerer Überdeckung Ausbaukonzepte mit grosser stützender Wirkung (NAB 09-07, Anhang 3; Spritzbeton, Stahlbögen, Tübbingausbau) notwendig werden. Die maximalen Tiefenlagen (MA und VA) sind unter Zugrundelegung der alternativen Ausbaukonzepte (NAB 09-07) sinnvoll festgelegt. Nachweise der bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen bis 900 m Tiefe (MA) bzw. 800 m (VA) stehen sowohl für intaktes als auch für geklüftetes Gebirge noch aus.

Falls alternative Ausbaukonzepte mit konventionellem Spritzbeton oder Tübbing gewählt würden, sind die resultierenden Porenwässer in der Regel hochalkalisch (pH>13) und lösen quellbare Tonminerale im Bentonit und Schichtsilikate in tonreichen Wirtgesteinen auf. Unter diesen Bedingungen erfolgt im Wirtgestein anschliessend eine Ausfällung von Sekundärmineralen wie Calcit, Zeolith und Ca-Al-Silikat-Hydraten (CASH Phasen). Montmorillonit im Bentonit wandelt sich vermutlich in Illit um, was die Permeabilität und Kationenaustauschkapazität beeinflusst. Da sich die mineralogischen Veränderungen im Wirtgestein nur ein paar Meter weit ausbreiten, sind die Auswirkungen dieser zementgebundenen Stützmittel auf die Bentonitbarriere grösser als auf die Geosphäre. Weitere mögliche Auswirkungen betreffen die Stahlkorrosion und die Sorptionseigenschaften des Nahfeldes.

⁵ Siehe vorhergehende Fussnote

Diese neuen (vollflächigen) Ausbaukonzepte sind im Barrierenkonzept HAA-Tiefenlager nicht enthalten. Die Auswirkungen der neuen Ausbaukonzepte (insbesondere zementhaltige Tübinge und Spritzbeton) auf die Langzeitsicherheit des HAA-Tiefenlagers sind darum im Detail zu überprüfen. Die neuen Ausbaukonzepte sind genauer zu spezifizieren, da sie eine Auswirkung auf die maximale Tiefenlage und Begrenzungen der Standortgebiete haben können.

Falls die Langzeitsicherheit des HAA-Tiefenlagers mit den im NAB 09-07 vorgeschlagenen alternativen Ausbaukonzepten nicht bestätigt werden kann, so sind die Auswirkungen veränderter Mindestanforderungen oder Verschärfter Anforderungen an den Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit* für die Auswahl und Auslegung der HAA-Konfigurationen (NTB 08-03, Tabelle C.4-13 ff und 5.6-2) wesentlich. Reduktionen der maximalen Tiefenlage unter Terrain aus bautechnischer Sicht würden zu grösseren Gebietseinschränkungen führen.

2.5 Räumliche Anforderungen (Laterale Ausdehnung, Platzangebot untertage, Mächtigkeit)

2.5.1 Herleitung der räumlichen Anforderungen der Nagra

Indikator *Laterale Ausdehnung*

Die Mindestanforderungen an die *laterale Ausdehnung* ergeben sich aus der Lagerkonfiguration, den Lagerquerschnitten und der Abfallmenge. Zudem wird bei der Ermittlung des notwendigen Platzbedarfs durch die Entsorgungspflichtigen ein Sicherheitsabstand zu gebietsbegrenzenden geologischen Strukturen (wie regionalen Störungszonen) und geologischen Ungewissheiten einbezogen. Die angegebenen Werte für die laterale Ausdehnung beziehen sich auf ein Lager bei optimaler geologischer Konfiguration. Für SMA-Lager wird vereinfacht ein gleichmässiges Profil (K09, Lichtraumfläche 110 m²) zugrunde gelegt, für HAA-Lager das Stollenprofil mit 2.5 m Durchmesser (Lichtraumfläche 4.9 m²). Mit den Mindestanforderungen für den Indikator *Laterale Ausdehnung* wird sichergestellt, dass in den Grossräumen (Schritt 3) und Wirtgesteinen (Schritt 4) ein räumliches Potenzial für wenig zergliederte Bereiche für die Anordnung von Lagerkammern (2 km² für SMA-Lager oder 4 km² für HAA Lager) vorhanden ist. Neben der Lagerfläche sind auch die minimalen nutzbaren Breiten der Lagerflächen festgelegt. Sie betragen für die SMA-Lager ≥ 1 km und für die HAA-Lager ≥ 1.5 km.

Für die Bewertung des räumlichen Potenzials (Schritt 3) werden bei den HAA-Lagern grössere unzugliederte Bereiche verlangt als bei für SMA-Lager. Die Bewertungsskala selbst ist für beide Lagertypen identisch.

In den Schritten 3 und 4 wird nur das Potenzial für eine geeignete räumliche Ausdehnung eruiert. Eine detaillierte Prüfung des Kriteriums „Räumliche Ausdehnung“ erfolgt im Schritt 5. Im Schritt 5 werden die Mindestanforderungen für die Lagerflächen um 50% erhöht (vgl. Abschnitt 5.6).

Indikator *Mächtigkeit*

Zusätzlich werden Minimalanforderungen an die *Mächtigkeit* potenzieller Wirtgesteine gestellt, welche für SMA- und HAA-Lager identisch sind. Die Anforderungen an die *Mächtigkeit* ergeben sich aus sicherheitstechnischen Betrachtungen (Modellierungen zur minimal notwendigen Transportpfadlänge in unterschiedlichen Wirtgesteinen und geologischen Situationen, Abschnitt 2.2). Die Untersuchungen der Nagra haben ergeben, dass der Indikator *Late-*

rale Ausdehnung einen wesentlich höheren Einfluss auf die Eignung von potenziellen Wirtgesteinen hat – insbesondere beim SMA Lager – als der Indikator *Mächtigkeit* (vgl. NTB 08-03, Tab. 4.2-1).

2.5.2 Grundlagen zur Bewertung der räumlichen Anforderungen

Massgebend für die Bewertung der räumlichen Ausdehnung sind die Indikatoren *Mächtigkeit*, *Laterale Ausdehnung* und *Platzangebot untertage* (NTB 08-05, Anhang A1.5, A1.7 und A1.8). Die Tiefenlage (Abschnitt 2.3 und 2.4) hat vor allem Auswirkungen auf die technische Machbarkeit, während regionale Störungszonen und tektonische Strukturen die laterale Ausdehnung beschränken können. Der Vergleich zwischen dem Platzbedarf, der sich aus der zu lagernden Abfallmenge und der Lagerkonfiguration ergibt, und dem Platzangebot im potenziellen Wirtgestein eines potenziellen Standortgebiets zeigt die vorhandenen Reserven für die Erstellung eines Tiefenlagers. Der vorliegende Abschnitt behandelt hauptsächlich den Indikator *Laterale Ausdehnung*. Auf den Indikator *Mächtigkeit* (Abschnitt 4.7) wird hier nur eingegangen, sofern er im Zusammenhang mit der lateralen Ausdehnung steht.

Als Grundlage für die Ermittlung des Platzbedarfs hat die Nagra Annahmen für die geometrischen Abmessungen und die Lagerkonfigurationen getroffen, welche im folgenden beschrieben und beurteilt werden.

Lagerquerschnitte und Lagerlängen

Für die Bestimmung der räumlichen Anforderungen für die SMA-Lager wurden sechs verschiedene Querprofile entwickelt. Die Länge der Einzelkavernen bei den SMA-Lagern beträgt 200 m und der gegenseitige Abstand 100 m. Die geringe Menge an LMA von 7'500 m³ sowie der gewählte Querschnitt des Lagertunnels (Typ K06, Lichtraumfläche 77 m²) ergibt ebenfalls eine Lagerlänge von ca. 200 m. Die kreisrunde Querschnittsform des HAA-Lagerstollen mit einem Durchmesser von 2.5 m ergibt sich aus der Form der Endlagerbehälter und der Anforderung an eine möglichst geringe Plastifizierung des Gebirges und Ausdehnung der Auflockerungszone. Die Länge der Einzelstollen beim HAA-Stollen beträgt 700 m und der gegenseitige Abstand jeweils 40 m.

Die erforderlichen Lagerabmessungen wurden für alle dargestellten Profile ermittelt und basieren auf dem umhüllenden Abfallvolumen, bestehend aus den in einer KKW-Betriebszeit von 50 Jahren anfallenden radioaktiven Abfällen (inklusive Wiederaufbereitung, Rückbau der KKW und Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung) und den Abfällen von drei weiteren zukünftigen Kernkraftwerken.

Unter Berücksichtigung der angegebenen Kavernen- und Stollenquerschnitte sowie der angenommenen Lagerlängen ermittelte die Nagra für die beiden Lagertypen je eine Lagerkonfiguration.

2.5.3 Beurteilung der räumlichen Anforderungen durch die KNE

Lagerquerschnitte

Die Wahl des Kavernentyps K09 zur vereinfachten Überprüfung der lateralen Ausdehnung der Lagerflächen wird für diese Phase als zweckmässig erachtet. Grössere Querschnitte ergeben zwar kleinere benötigte Lagerlängen, brauchen jedoch je nach Tiefenlage einen wesentlich höheren Aufwand an Sicherungsmassnahmen. Die Wahl kleinerer Lagerkavernen führt zu einer erhöhten lateralen Ausdehnung der Lagerkonfigurationen. Bei der Verwendung

des Kavernentyps K06 zum Beispiel vergrössert sich die Gesamtlänge der Lagerkavernen gegenüber dem Typ K09 um 50%.

Die Menge der LMA von $7 \cdot 500 \text{ m}^3$ sowie der gewählte Querschnitt des Lagertunnels (Typ K06) ergibt eine Lagerlänge von ca. 200 m und kann deshalb für die Bestimmung der gesamten Lagerfläche vernachlässigt werden.

Die kreisrunde Querschnittsform des HAA-Lagerstollens mit einem Durchmesser von 2.5 m kann in dieser Phase als zweckmässig angesehen werden. Die neuen, in NAB 09-07 beschriebenen Ausbaukonzepte der HAA-Lagerstollen mit vollflächigem Ausbau aus Stahl/Spritzbeton oder Tübbingungen verlangen z.T. nach grösseren Ausbauquerschnitten.

Lagerlängen

Die Länge der Einzelkavernen von 200 m und der gegenseitige Abstand von 100 m sind zum heutigen Zeitpunkt auch aus bautechnischer Sicht zweckmässig. Die totalen Lagerlängen wurden aus dem Total der jeweils zu lagernden Abfallvolumina bestimmt. Die Lagerlänge für die SMA-Abfälle ist nachvollziehbar und entspricht dem angegebenen Wert für den verwendeten Querschnittstyp K09.

Die Länge der HAA-Einzelstollen von 700 m und der gegenseitige Abstand von 40 m sind zum heutigen Zeitpunkt aus bautechnischer Sicht zweckmässig. Die totale Lagerlänge für HAA hängt von der Anzahl und der Länge der Endlagerbehälter und vom gegenseitigen Sicherheitsabstand in Längsrichtung des Stollens ab, der mit 3 m vorgegeben ist. Aufgrund dieser geometrischen Angaben kann die totale Lagerlänge nachvollzogen werden.

Lagerkonfiguration und laterale Ausdehnung für SMA- und HAA-Lager

Der Flächenbedarf ist nachvollziehbar, beinhaltet aber (neben Abfallmengen aus möglichen zusätzlichen Kernkraftwerken und Reserven für geologische Ungewissheiten) keine Reserverflächen für den Fall der Verkleinerung der Querschnitte der Lagerkavernen. Diese Ungewissheiten werden jedoch mit dem Indikator *Platzangebot untertage* separat beurteilt.

Unter Berücksichtigung der angegebenen Lagerquerschnitte sowie der angenommenen Lagerlängen können die Lagerkonfigurationen als zweckmässig betrachtet werden. Unter diesen Voraussetzungen sind sie auch in der Lage, die vorgesehenen Abfallmengen aufzunehmen. Aus den dargestellten Lagerkonfigurationen ergeben sich laterale Ausdehnungen, welche für die KNE nachvollziehbar sind. Allerdings ist anzumerken, dass das Lager bei ausreichender Mächtigkeit mehrstöckig gebaut werden kann.

Die räumlichen Anforderungen an die SMA- und HAA-Lager sind ein wesentliches Kriterium bei der Identifikation geeigneter Wirtgesteine und der geplanten Konfiguration der Tiefenlager.

2.6 Geochemische Anforderungen an die SMA- und HAA-Tiefenlager

2.6.1 Herleitung der Anforderungen an die geochemischen Eigenschaften durch die Nagra

Die geochemischen Eigenschaften der Wirtgesteine haben einen wichtigen Einfluss auf die Mobilität der Radionuklide. Sie beeinflussen die Beständigkeit der Behälter und der Abfallmatrix sowie die Freisetzung im Nahfeld und im Wirtgestein.

Tabelle 2-3 stellt dar, welche geochemischen Indikatoren für welche Sicherheitsfunktionen berücksichtigt werden (NTB 08-05, Kap. 5). Der *pH-Wert*, die *Salinität* des Porenwassers und die *Redoxbedingungen* des gesamten Milieus (Wasser und Gestein) werden in die Bewertung des Gesteins für alle in der Tabelle genannten Sicherheitsfunktionen einbezogen. Zusätzlich werden die Indikatoren *Mineralogie*, *Mikrobielle Prozesse*, *Chemische Wechselwirkungen* und *Kolloide* beim Transport von Radionukliden im Wirtgestein betrachtet.

Tabelle 2-3: Durch die Nagra berücksichtigte geochemische Indikatoren für die verschiedenen Sicherheitsfunktionen

Indikator	Sicherheitsfunktion			
	Einschluss Behälter und technische Bar- rieren	Verzögerte Frei- setzung Abfallmatrix	Verzögerte Frei- setzung Nahfeld	Verzögerte Frei- setzung Wirtgestein
<i>Mineralogie</i>				√
<i>pH</i>	√	√	√	√
<i>Redoxbedingungen</i>	√	√	√	√
<i>Salinität</i>	√	√	√	√
<i>Mikrobielle Prozesse</i>				√
<i>Kolloide</i>				√
<i>Chemische Wechsel- wirkungen</i>				√

Mineralogie (NTB 08-05, Anhang A1.11)

Aus geochemischer Sicht haben sorbierende Minerale im Wirtgestein eine wichtige Funktion. Die Nagra bewertet die potenzielle Sorptionskapazität eines Wirtgesteins anhand des Gesamtgehalts von Tonmineralen, Glimmern und Zeolithen. Ein Gesamtgehalt von > 40% wird als „sehr günstig“ beurteilt, ein Gehalt zwischen 4 und 40% wird als „günstig“ definiert, < 4% als „bedingt günstig“ und keine solche Minerale als „ungünstig“. Der Wert 40% bezieht sich auf einen „mageren“ Opalinuston und der Wert von 4% wird mit einem Zehntel dieses Werts begründet.

pH (NTB 08-05, Anhang A1.12)

Der pH-Wert einer Lösung hat einen dominierenden Einfluss auf die Sorption von Radionukliden. Im neutralen bis leicht basischen Bereich ist die Sorption von Kationen am stärksten. Der pH-Bereich 7-9 wird als „sehr günstig“ definiert. Zwischen pH 6 und 7 werden die K_d -Werte bei den Sorptionskanten („sorption edge“) von Kationen an Na-Illit um bis zu einem Faktor 10 reduziert, weshalb dieser pH-Bereich als „günstig“ definiert wird. Andere Bedingungen werden als „bedingt“ oder „ungünstig“ klassifiziert.

Redoxbedingungen (NTB 08-05, Anhang A1.13)

Reduzierende Bedingungen wirken mobilitätshemmend, weil reduzierte Spezies eines bestimmten Elementes mit wenigen Ausnahmen weniger löslich sind als die oxidierten Spezies. Als „sehr günstig“ werden reduzierende Bedingungen klassifiziert, gepuffert durch Minerale. Ohne Redoxpuffer werden Bedingungen als „bedingt günstig“ definiert. „Ungünstig“ ist Grundwasser mit > 1 g/L Nitrat (!). Es gibt auch eine Mindestanforderung, dass es „keine ungesättigten oxidierenden Bedingungen“ geben darf.

Salinität (NTB 08-05, Anhang A1.14)

Salinität ist ein wichtiger Indikator, weil ein hoher Salzgehalt die Degradation von Behältern beschleunigen kann und die Quellfähigkeit von Tonen beeinflusst. Generell wird Stahl durch eine passivierte (nicht rostende) Schicht an der Oberfläche geschützt. Diese Schicht kann durch Halogene (z.B. Chlorid) gestört werden und so Oxidationsprozesse beschleunigen (NTB 08-05, S. 166). Aus diesem Grund bewertet die Nagra Grundwässer mit Ionenstärken von 0.005 bis 0.01 mol/L als „sehr günstig“, und solche mit Ionenstärken mit bis zu 0.7 mol/L als „günstig“. Grundwässer mit Ionenstärken <0.005 mol/L oder >0.7 mol/L werden als „ungünstig“ definiert.

Mikrobielle Prozesse (NTB 08-05, Anhang A1.15)

Mikroorganismen katalysieren durch ihre Aktivität chemische Reaktionen. Sind die Bedingungen für mikrobielle Aktivität gut, so bilden sich Biofilme, welche die Sorption bzw. Ausfällung von Radionukliden beeinflussen. Die Rückhaltung der Radionuklide kann dadurch größer oder kleiner werden. Die Bildung von Biofilmen erhöht also die Ungewissheiten. Des Weiteren können organische Verbindungen durch Mikroorganismen abgebaut werden und so zu unerwünschten Produkten, wie Gasen, führen. Die Prozesse sind schwierig zu quantifizieren und vorherzusagen. Deshalb sind mikrobielle Prozesse grundsätzlich unerwünscht. Mikrobielle Prozesse werden nach Porenraum und Nährstoff-Angebot definiert, aber nicht quantifiziert.

Kolloide (NTB 08-05, Anhang A1.16)

Radionuklide können auch an Kolloide gebunden transportiert werden. Kolloidbildung ist deshalb unerwünscht. Die Mobilität ist abhängig vom Porenraum, Huminstoffkonzentration und Ionenstärke und wird deshalb qualitativ definiert.

Chemische Wechselwirkungen (NTB 08-05, Anhang A1.30)

Sie beziehen sich einerseits auf die Bildung einer alkalischen pH-Fahne, die durch die Freisetzung von Alkali- und Erdalkali-Elementen aus Zementstein im Nahfeld eines SMA-Lagers verursacht wird, und andererseits auf die Oxidation durch Sauerstoff von reduzierten Mineralen an den Kavernen- und Stollenoberflächen während der Zeit, in welcher sie offen sind. Die Bewertung ist qualitativ.

2.6.2 Grundlagen der Bewertung der geochemischen Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden Grundlagen dargestellt, die die Bewertung bestimmter Aspekte der in diesem Abschnitt beschriebenen Indikatoren erlauben. Dazu ist es hilfreich, die Zusammensetzung von potenziellen Wirtgesteinen und deren Porenwasser zu betrachten. In den Tabellen 2-4 und 2-5 sind repräsentative Werte für den Opalinuston und die Effinger Schichten dargestellt. Für den „Braunen Dogger“ sind keine entsprechenden Werte verfügbar.

Tabelle 2-4: Mineralzusammensetzung von zwei potenziellen Wirtgesteinen

Mineralgehalt Gew. %	Opalinuston		Effinger Schichten Oftringen*
	Benken	Mont Terri	
Calcit	16	13	40 - 95
Dolomit/Ankerit	1		< 1 - 15
Siderit	4	3	-
Quarz	20	14	1 - 13
Albit	1	1	< 1
Kalifeldspat	2	1	< 1 - 1
Pyrit	1.1	1.1	< 0.1 - 1.9
C(org)	0.6	0.8	< 0.1 - 0.5
Schichtsilikate	54	66	4 - 31
Illit	18	23	2-12
Illit/Smektit	14	11	1-13
Chlorit	5	10	nicht nach- weisbar
Kaolinit	17	22	1-12
CEC meq/100 g	-	-	1.6 - 11.3

*22 Proben, NAB 08-18 (Tabellen 4-2 & 4-3)

Tabelle 2-5: Grundwasserzusammensetzung von zwei potenziellen Wirtgesteinen

	Opalinuston ⁺ Referenz wasser mmol/kg	Effinger Schichten Oftringen ⁺⁺ mmol/L
pH	7.24	7.4-7.66
Ionenstärke	0.36 mol/kg	0.04 mol/L
Na	170	32.5
K	5.7	0.4
Mg	7.5	0.7
Ca	10.5	1.3
Cl	160	10.5
SO ₄	24	7.0
HCO ₃	2.7	0.15 (?)

⁺ NTB 02-03 (Tabelle 5.12-3)

⁺⁺ 4 Proben, NAB 08-18 (Tabelle 11-1)

Ein wichtiger Aspekt für die Sicherheit ist die verzögerte Freisetzung von Radionukliden durch die Bindung an Minerale im Wirtgestein. Radionuklide werden durch chemische Reaktionen an Oxidoberflächen oder durch Ionenaustausch gebunden. Die Oberfläche der Minerale ist massgebend für die Bindungskapazität, welche um eine Grössenordnung variieren kann (siehe Tabelle 2-6). Im Opalinuston und den Effinger Schichten sind Illit, Illit/Smektit und Kaolinit die dominierenden Schichtsilikate. Allerdings weisen die Untersuchungen an 22 Proben der Effinger Schichten auf eine starke Variation hin. Granite vom Felslabor Grimsel enthalten zwar keine Tonminerale, aber dafür Glimmer (ca. 5 Vol% Biotit und etwa 2 Vol% Muskovit). Mit dieser Zusammensetzung wären die Granite vom Felslabor Grimsel etwa vergleichbar zu den Effinger Schichten mit mittlerem „Ton/Glimmer/Zeolith-Gehalt“. Eine bessere Bewertungsskala ist der direkte Vergleich der Kationenaustauschkapazität CEC.

Tabelle 2-6: Kationenaustauschkapazität (CEC) verschiedener Mineralien (nach Schachtschabel et al. 1979; Sparks 2003)

Sekundäre Bodenminerale	Gruppe	CEC meq/100 g
Zeolithe	Zeolithe	200-500
Montmorillonit	Smektite	80-150
Vermiculit	Verwitterte Glimmer	100-200
Muscovit	Glimmer	10-40
Biotit	Glimmer	10-40
Chlorit	Chlorite	10-40
Halloysit	Halloysite	10-40
Illit	Illite	10-40
Kaolinit	Kaolinit-Serpentin	3-15
Talk		<1

Ein anderer Aspekt der Sicherheit ist die Langzeitbeständigkeit der Barrieren. Hier spielt die Porenwasserzusammensetzung eine wichtige Rolle. Die Bewertung der Salinität beruht einerseits darauf, dass ein gewisser Wert für die Hemmung der Bildung von Kolloiden wünschenswert ist, und andererseits darauf, dass die Quellfähigkeit von Tonmineralen in der technischen Barriere in starken Salzlösungen reduziert wird. Dazu kommen noch zusätzliche Faktoren, die nicht direkt in die Definition der Bewertungsskala des Indikators *Salinität* einfließen, aber von der Nagra erwähnt werden.

Ein erhöhter Salzgehalt im Grundwasser kann folgende Auswirkungen haben:

- Beschleunigung der Korrosion von Stahlbehältern (NTB 08-05, S. 166).
- Gelöste Erdalkali-Elemente können die Verwitterung von Gläsern beschleunigen (NTB 08-05, S. 169).
- Erhöhte Salzkonzentrationen in der Lösung können einen Einfluss auf die Rückhaltung von Radionukliden durch Ionenaustausch haben (NTB 08-05, S. 171).

Zusätzlich kann ein hoher Salzgehalt die Eigenschaften des Zements beeinflussen:

- Die Auswirkung von NaCl-haltigen Lösungen auf die Stabilität des Zements über sehr lange Zeiträumen ist uns nicht bekannt. Es kann sich Friedls Salz ($3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) bilden, aber die potenziellen Auswirkungen auf die Langzeitstabilität müssten noch berechnet werden.
- Bei Zement ist die störende Wirkung von Sulfat schon länger bekannt (Mehta 1983; Santhanam et al. 2001). Das Sulfat verursacht eine Umkristallisation von einem Teil der Zementminerale, die ein grösseres Volumen benötigen. Dieser Prozess zerstört das Mineralgefüge. Bei Sulfat-Konzentrationen $< 1000 \text{ mg/L}$ ($\sim 10 \text{ mmol/L}$) bildet sich nur Ettringit, bei höheren Konzentrationen bilden sich zunehmende Mengen von Gips. Im SMA-Tiefenlager ist sulfatresistenter Zement (SRZ) vorgesehen. Dieser beinhaltet eine limitierte Menge von Calciumaluminat, welches für die Bildung von Ettringit benötigt wird und so einer übermässigen Umkristallisation vorbeugen soll.

2.6.3 Bewertung der Anforderungen an die geochemischen Eigenschaften durch die KNE

Die gewählten Indikatoren sind vernünftig. Es gibt bis jetzt aber nur sehr wenige geochemische Daten für den Braunen Dogger und die Effinger Schichten. In Anbetracht der spärlichen Information über die meisten Wirtgesteine stellt die KNE deshalb in Frage, ob relevante Parameter wie zum Beispiel für mikrobielle Aktivität und Kolloidtransport, überhaupt belastbar abgeschätzt werden können. Bei manchen Gesteinstypen erschwert insbesondere die Heterogenität eine Bewertung der unten aufgelisteten Indikatoren. Die relativ grosse Heterogenität der mineralogischen Zusammensetzung der Effinger Schichten (Tabelle 2–4) ist ein gutes Beispiel.

Für Etappe 2 SGT erwartet die KNE eine wirtgesteinspezifische Bewertung, bei der auch der Heterogenität Rechnung getragen wird.

Mineralogie

Mit der Bewertung „sehr günstig“ für einen „Ton/Glimmer/Zeolith“- Gehalt von $< 40\%$ wird der Opalinuston als Referenz gewählt. Dies ist verständlich, da vieles über dieses Gestein bekannt ist und es ein grosses Sorptionspotenzial hat. Die Bewertung „günstig“ (4 – 40 Gew.%) ist ebenfalls nachvollziehbar. Die Nagra hat im Entsorgungsnachweis gezeigt, dass das Schutzkriterium von 0.1 mSv/a mit den pessimistischen K_d -Werten für Opalinuston eingehalten wird (siehe NTB 02-05, S. 332). Vergleicht man die Referenz- K_d -Werte für Opalinuston

mit den pessimistischen K_d -Werten (NTB 02-05, B-18), so fällt auf, dass für die meisten Elemente die pessimistischen K_d -Werte mindestens um Faktor 10 geringer sind. Ausnahmen sind Ra und Th; bei diesen Elementen werden die K_d -Werte nur um Faktor 7 bzw. 5 reduziert. Dies wäre eigentlich ein Nachweis, dass für ein HAA-Lager 10% vom Sorptionspotenzial vom Opalinuston ausreichend ist.

Was noch zu klären bleibt, ist der Fall eines Gesteins mit einem gegenüber dem Opalinuston 10-fach geringeren Sorptionspotenzial und zusätzlich einer 10-fach reduzierten Sorption aufgrund des pH-Werts oder der Auswirkung einer hohen Salinität. Diese kombinierte Auswirkung einer um Faktor 100 reduzierten Sorption wurde von der Nagra in Etappe 1 nicht dargestellt. Daher ist es wichtig, dass in der nächsten Etappe die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption wirtgesteinsspezifisch aufgezeigt wird.

Weiter fordert die KNE, dass die Bewertung des Indikators *Mineralogie* mit der Bewertungsskala „Kationenaustauschkapazität“ durchgeführt wird, um Unsicherheiten zu eliminieren, die durch die unterschiedlichen CEC der Tonminerale, Glimmer und Zeolithen entstehen.

pH und Redoxbedingungen

Die Klassifizierung von pH und reduzierende Bedingungen gepuffert durch Minerale ist vernünftig und nachvollziehbar.

Salinität

Angesichts der Unsicherheit der Auswirkungen der Salinität auf einige Sicherheitsfunktionen sollten Grundwässer mit 0.01 bis 0.7 mol/L als „bedingt günstig“ betrachtet werden. Aus rein geochemischer Sicht wäre es wahrscheinlich vernünftig, eine Unterteilung zwischen „günstig“ (z.B. 0.01 - 0.1 mol/L) und „bedingt günstig“ (z.B. 0.1 - 0.7 mol/L) festzulegen.

Mikrobielle Prozesse, Kolloide und chemische Wechselwirkungen

Obwohl diese Indikatoren zum Transport von Radionukliden beitragen können und deshalb relevant sind, sind die Klassifizierungen *per se* schwierig und erscheinen im Bericht wenig präzise, vor allem in Anbetracht der geringen Kenntnisse über die verschiedenen potenziellen Wirtgesteine. In der nächsten Etappe sollten diese Indikatoren wirtgesteinsspezifisch berücksichtigt werden.

3 Bewertung der Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume

Dieses Kapitel bewertet die Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume für das SMA- und HAA-Lager, d.h. Schritt 3 von Etappe 1 des SGT. Nach einleitenden grundsätzlichen Bemerkungen (Abschnitt 3.1) werden in diesem Kapitel die Anforderungen an die bei der Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume anzuwendenden Kriteriengruppen Langzeitstabilität (Abschnitt 3.2) und Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Abschnitt 3.3) diskutiert. In einem abschliessenden Abschnitt 3.4 werden die Grossräume unter Berücksichtigung aller Kriterien zusammenfassend bewertet. Die Grundlagen zur Erosion wurden bereits in Abschnitt 2.3 dieses Berichtes zusammengestellt und werden hier nicht weiter erläutert.

3.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

Der Schritt 3 des SGT hat zum Ziel, diejenigen geologisch-tektonischen Grossräume zu identifizieren, die für einen Zeitraum von 100'000 Jahren (SMA-Lager) bzw. 1 Mio. Jahren (HAA-Lager) aller Voraussicht nach eine genügende Langzeitstabilität gewährleisten. Zudem muss die tektonische Zergliederung berücksichtigt werden, da nur Grossräume in Frage kommen, in denen ausreichend grosse und mit den existierenden Explorationsmethoden zuverlässig charakterisierbare Gebirgseinheiten vorhanden sind. Besonderes Augenmerk ist nach SGT auf die zu erreichende Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zu richten.

Die von der Nagra in Schritt 3 zur Identifikation und Bewertung verwendeten Kriterien und Indikatoren sind aus Tabelle 3-1 ersichtlich. In folgenden Punkten besteht eine Abweichung von den Vorgaben des SGT:

- Das Kriterium 1.1 *Räumliche Ausdehnung* wird bereits in Schritt 3 verwendet, obwohl es gemäss SGT erst in Schritt 4 zur Anwendung kommen soll.
- Der SGT verlangt eine qualitative 4-stufige Bewertungsskala (z.B. sehr günstig/günstig/bedingt günstig/ungünstig). Bei den Grossräumen wird von der Nagra zusätzlich die Bewertung „ungenügend“ erteilt. Ein einzelnes „ungenügend“ führt dabei zum Ausschluss des entsprechenden Grossraumes.
- Die von der Nagra eingeführten diskreten Zwischenstufen „3.6“ und „3.4“ etc. sind nicht genügend erklärt und verwirrend (vgl. NTB 08-03, S. 383, Fussnote 165).

Die mit den einzelnen Kriterien und den zugehörigen Indikatoren verknüpften Mindestanforderungen sind im NTB 08-04 (S. 76/77, Tab. 3.1-1) zusammengestellt und werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 vertieft diskutiert. Im Text (NTB 08-03, S. 92 ff.; NTB 08-04, S. 58 ff.) wird neben obigen Indikatoren auch auf die Seismizität, die einen weiteren Indikator darstellt, eingegangen. Dieselbe wird jedoch bei der Bewertung der Grossräume nicht weiter mitberücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.2).

Tabelle 3-1: Für die KNE wichtige und in Kapitel 3 im Detail diskutierte Indikatoren und Kriterien zur Beurteilung geologisch-tektonischer Grossräume (Bewertung der Nagra siehe NTB 08-03, S 387)

Indikator	NTB 08-05 (Anhang)	SGT Kriterium
<i>Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik</i>	A1.23	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
		3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
<i>Regionales Störungsmuster und Langzeitverhältnisse</i>	A1.40	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse
<i>Kontinuität der interessierenden Schichten</i>	A1.42	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse
<i>Seismizität</i>	A1.24	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
<i>Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)</i>	A1.26	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
<i>Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum</i>	A1.28	2.2 Erosion

3.2 Beurteilung der Kriterien und Indikatoren der geologischen Langzeitstabilität

3.2.1 Anforderungen an die Langzeitstabilität durch die Nagra

Die Langzeitstabilität der Grossräume wird von der Nagra durch die Indikatoren *Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum*, *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*, *Seismizität* und *Seltene geologische Ereignisse* bewertet. Der Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik* dient dabei zur Beurteilung der Langzeitstabilität der geologischen Tiefenlager innerhalb der Betrachtungszeiträume von 100'000 Jahren für ein SMA-Lager und 1 Mio. Jahren für ein HAA-Lager. Der Indikator *Seismizität* dient ebenfalls zur Beurteilung der Langzeitstabilität, da räumliche Häufungen von Erdbeben Hinweise auf differentielle Bewegungen im geologischen Untergrund geben. Die Grösse des Indikators *Erosion* bestimmt, wie schnell SMA- und HAA-Lager exhumiert und in die Dekompaktionsszone geraten können (Abschnitt 2.3).

An den Indikator *Modellvorstellung zur Geodynamik und Neotektonik* wird folgende qualitative Mindestanforderung gestellt: Es darf keine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität aus Gründen der Geodynamik oder Neotektonik innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 100'000 Jahren (SMA-Lager) bzw. 1 Mio. Jahren (HAA-Lager) auftreten (Kriterium 2.1). Ein Grossraum wird als „günstig“ bis „sehr günstig“ eingestuft, wenn eine grossräumige Gefährdung der geologischen Stabilität innerhalb der für SMA- und HAA-Lager festgelegten Betrachtungszeiträume nicht zu erwarten ist. Kann eine solche Gefährdung nicht ausgeschlossen werden, so wird der Grossraum als „ungünstig“ bis „bedingt günstig“ klassifiziert. Die Nagra verzichtet auf die Definition von Anforderungen an den Indikator *Seismizität*. Dieser Indikator wird nur für die Beschreibung der Grossräume verwendet, nicht aber für ihre Bewertung und Einengung. Eine konfigurationspezifische Bewertung erfolgt erst in Schritt 5 (NTB 08-05, Anhang A1.24).

Die Herleitung der Anforderungen an den Indikator *Erosion* sowie dessen Bewertung durch die Nagra wurden bereits in Abschnitt 2.3 kommentiert. Die Nagra beurteilt Grossräume mit einer flächenhaften Erosion von < 0.4 mm pro Jahr für HAA-Lager als günstig bis sehr günstig mit einer graduellen Abstufung. Grossräume mit einer höheren Erosionsrate werden von

der Nagra für ein HAA-Lager ausgeschlossen. Grossräume mit einer Erosionsrate < 0.4 mm pro Jahr werden von der Nagra für ein SMA-Lager als sehr günstig bewertet. Ungünstige bis bedingt günstige Verhältnisse liegen bei einer Erosionsrate von 1-2 mm pro Jahr vor (NTB 08-05, S. A1-100).

An den Indikator *Seltene geologische Ereignisse (Vulkanismus)* wird die Mindestanforderung gestellt, dass im Betrachtungszeitraum für HAA- und SMA-Lager keine vulkanische Aktivität zu erwarten ist. In diesem Fall wird der Grossraum als sehr günstig bewertet. Weitere Bewertungsstufen entfallen (NTB 08-05, S. 202).

3.2.2 Grundlagen zur Bewertung der Langzeitstabilität

Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*

Differentielle, neotektonische Bewegungen erfolgen häufig entlang reaktivierter Störungen und können zu einer Zerschierung des einschliesswirksamen Gebirgsbereichs und zur Bildung neuer Wasser- und Gaswegsamkeiten führen. Der Erfassung der neotektonischen Störungen kommt deshalb grosse Bedeutung zu. Gleichzeitig gestatten diese Untersuchungen auch Rückschlüsse auf das geodynamische Modell (Einfluss der Plattenbewegungen etc.).

Die neotektonische Entwicklung der Alpen sowie der Schweiz wurde in den letzten Jahrzehnten im Rahmen mehrerer grossräumiger Studien untersucht. Besonders im alpinen Raum versetzen Brüche vielerorts Moränen und Moränenwälle. Im Mittelland sind solche Brüche viel schwieriger zu identifizieren, da wegen des regenreichen Klimas und der intensiven Bewirtschaftung Verstellungen in Lockergesteinen kaum längere Zeit überdauern können. Die detaillierte Analyse des Geländes mit Hilfe hochauflösender Geländemodelle (DHM; LIDAR) stellt für die Verifizierung der bisherigen Erkenntnisse ein neues, willkommenes Hilfsmittel dar.

Nicht alle der beobachteten „neotektonischen“ Brüche und verstellten Moränen sind tatsächlich tektonischer Natur. Solche Phänomene können auch im Zusammenhang mit Massenbewegungen (Rutschungen, Hakenwurf oder Sackungen) oder durch glazioisostatische Ausgleichsbewegungen entstanden sein. Die quartären Brüche des Bedretto- und Urserentals (Renner 1982) liegen z. B. in seismisch ausgesprochen ruhigen Gebieten. Dazu im Gegensatz steht eine von Ustaszewski (2007) am Gemmipass in einer stark seismisch aktiven Region beobachtete und ausgegrabene rezente Störung. Entsprechende neotektonische Störungen zeigen in der Regel nur geringe Versätze (wenige Dezimeter bis Meter).

Zur Zeit wird die Frage diskutiert, ob die basale, unter das Aar-Massiv abtauchende Überschiebung der Alpen auch heute noch aktiv ist (z.B. Strasser et al. 2009). Allerdings ist sich die Fachwelt in ihren Antworten auf diese Frage nicht einig. Das von der Swisstopo etablierte schweizerische GPS-Netzwerk liefert wegen der relativ kurzen Messperiode noch keine eindeutig interpretierbaren, signifikanten Resultate. Generell kann jedoch von einer totalen N-S gerichteten Verkürzung im schweizerischen Alpenraum von wenigen Millimetern (Vektorlänge) ausgegangen werden. Bei Annahme von 1-2 mm Horizontalverschiebung pro Jahr (Caiais et al. 2002) resultiert in 100'000 Jahren eine Verkürzung von 100-200 m. Es ist heute unklar, inwieweit solche Verkürzungen als diskrete Bewegungen an aktiven Störungen auftreten.

Indikator *Seismizität*

Informationen über die Seismizität in der Schweiz sind in den letzten 34 Jahren mit Hilfe eines landesweiten Netzes von Seismographen des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) systematisch erfasst worden. Informationen über die Auswirkung von historischen

Erdbeben liegen für die vergangenen rund tausend Jahre vor und wurden kürzlich vom Schweizerischen Erdbebendienst ausgewertet.

Das Muster der Seismizität für die letzten 34 Jahre sowie die auf diesen und historischen Daten beruhende Extrapolation lässt gewisse regionale Muster erkennen. Auffallend hoch ist die Seismizität im Unterwallis, in Graubünden in der Region Chur, sowie in Basel (z.B. Burkhard & Grünthal 2009). In Graubünden sind aufgrund morphologischer Indikatoren „neotektonische“ Störungen beschrieben worden. Der Nachweis holozäner tektonischer Bewegungen gestaltet sich in diesem Gebiet sehr schwierig (z.B. Persaud & Pfiffner 2004). Im östlichen Aar-Massiv ergeben Detailuntersuchungen an entsprechenden Störzonen (Laws 2001) sowie die Messungen der AlpTransit Gotthard (unpubl.) keine klaren Hinweise auf echte Neotektonik. Die meisten morphologisch ausgeprägten Verstellungen entlang präexistierender Störungen im östlichen Aar- und Gotthard-Massiv sind vermutlich Entlastungsphänomene und Hangbewegungen. Dagegen weisen im Lötschberg-Basistunnel Gleitmikrometer- und Nivellement-Messungen auf aktive neotektonische Störungen im westlichen Aar-Massiv hin.

Im Unterwallis scheint die erhöhte Seismizität mindestens teilweise mit der Rhone-Simplon-Störung im Zusammenhang zu stehen. Eine erhöhte Seismizität ist ebenfalls im Raum Basel im Zusammenhang mit Bewegungen entlang des Rheintalgrabens zu verzeichnen. Auch längs des Alpennordrandes (basale Überschiebung des Aar-Massivs) sowie im östlichen Mittelland ist zum Teil eine erhöhte Seismizität zu beobachten. Geringe Seismizität weisen das Mittelland der Zentralschweiz, das Kristallin der schweizerischen „Zentralalpen“ sowie das Tessin auf.

Die Interpretation der Seismizität und die Bewertung hinsichtlich der Langzeitstabilität gestaltet sich schwierig, weil die meisten Erdbeben in Tiefen von mehreren Kilometern auftreten und daher kaum je eindeutig mit an der Oberfläche kartierten Störungen korreliert werden können (eine Ausnahme scheint hier die Fribourg- und die Randen-Störung zu sein, z.B. NTB 08-04, S.61) und weil sich Zonen mit erhöhter seismischer Aktivität mit der Zeit verschieben können. Erstaunlicherweise deuten die analysierten Herdmechanismen hauptsächlich auf Blattverschiebungen bis Abschiebungen und nur selten auf Überschiebungen hin. Auf den ersten Blick scheint ein Zusammenhang zwischen Hebung/Senkung und Seismizität bzw. Bruchbildung gegeben (z.B. am Westende des Aar-Massivs, entlang der Simplon-Rhône-Abschiebung und im Rheintalgraben sowie im Zusammenhang mit der Blattverschiebung zwischen Rheintal- und Bressegraben), doch gibt es auch grosse Gebiete mit beträchtlicher Hebung und Bruchdichte, die lediglich eine bescheidene Seismizität aufweisen (vgl. NTB 08-04, Fig. 2.7–1a und 2.7–9a). Speziell erwähnenswert ist auch die Subalpine Molasse am Alpennordrand, deren tektonische Überschiebungen in der jüngeren geologischen Vergangenheit (Pliozän) eine Reaktivierung erfahren haben (Cederbom et al., unpublizierte Daten).

Indikator *Seltene geologische Ereignisse*

Die Hegau-Vulkane und insbesondere der Vulkanschlöt von Hofen SH (Hofmann 1962) sind sehr nahe der potenziellen HAA-Lagerstandorte gelegen. Die Frage, ob hier innerhalb der nächsten Million Jahre mit einem erneuten Aufdringen von Magma zu rechnen ist, ist deshalb sehr bedeutsam. Die Fachleute sind sich einig, dass der Hegauvulkanismus seit rund 7 Mio. Jahren erloschen ist (Krafft 1984; Schreiner 1984) und dass keinerlei Anzeichen für eine erneute Aktivität desselben vorliegen.

Indikator *Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum*

Grundlagen für die Beurteilung des Indikators *Erosion* wurden bereits in Abschnitt 2.3 detailliert zusammengestellt. Hier erfolgen weitere, für die Beurteilung der Grossräume wichtige Informationen, die der KNE als Grundlage ihrer Beurteilung dienen.

Die Beurteilung der Erosion basiert auf quantitativen Angaben zu Hebung/Exhumation, Erosion sowie zur tektonischen Entwicklung. Die reine Flusserosion wird durch die Erosionsbasis und damit durch Hebung oder Senkung kontrolliert. Im Falle der Alpen müssen zudem glaziale Prozesse berücksichtigt werden. Die Erosion durch Gletscher ist in den meisten Fällen nicht durch eine tektonisch definierte Erosionsbasis kontrolliert und daher wesentlich schwieriger zu quantifizieren als die Flusserosion. Deshalb sind die glazialen Prozesse im Alpenraum, insbesondere die Tiefenerosion sowie die Variabilität in Raum und Zeit erst relativ spärlich quantitativ untersucht worden. Zwar verfügt man über gute Kenntnisse bezüglich der Ausdehnung der alpinen Vergletscherung und der dazugehörigen Eismächtigkeiten. Weit weniger gut bekannt ist, in welchen Zeiträumen und in welchem Ausmass glaziale Prozesse die generelle topographische Entwicklung der Alpen und des Vorlands verändert haben und wie eine künftige Vergletscherung die Morphodynamik beeinflussen wird.

Ein wichtiger Parameter für die Beurteilung der Erosion stellt die tektonische Hebung und die damit verbundene Exhumation dar. Die Ursache der Hebung ist noch nicht geklärt. Sie kann durch Plattenkonvergenz, durch isostatischen Ausgleich der Erosion, durch glaziale Belastung/Entlastung oder/und durch Mantel-Delamination gesteuert sein. Die Konvergenz zwischen adriatischer und europäischer Platte dürfte in den letzten Millionen Jahren nur unwesentlich zur Hebung und Exhumation beigetragen haben, doch gehen hier die Meinungen auseinander. Falls Plattenkonvergenz eine Rolle spielen sollte, würde ihr Beitrag wahrscheinlich 0.1 - 0.2 mm pro Jahr nicht übersteigen (Champagnac et al. 2009).

Grundsätzlich ist man sich einig, dass die heutige Heraushebung der Alpen, bezogen auf die Mächtigkeit ihrer „Wurzel“, zu gering ist. Wäre der Tiefgang des alpinen Krustenblocks vollständig kompensiert, würde die durchschnittliche Höhe der Alpen rund 3'500 m anstelle der heute gemessenen 2'500 m betragen.

In den letzten Jahren hat sich die Forschung zur Geodynamik auf die geodätisch erfassten Hebungsdaten fokussiert. Dabei sind neue Konzepte über die Wechselwirkung zwischen Hebung und Reliefwachstum, das glaziale Ungleichgewicht der Landschaft und den Zusammenhang mit Klimawechseln formuliert worden (z.B. Wittmann et al. 2007). Es zeigt sich, dass das heute messbare Hebungsmuster viel schwieriger zu interpretieren ist als ursprünglich angenommen. Das gleiche Problem stellt sich bei der Deutung von Denudationsraten, welche mit Hilfe von kosmogenen Nukliden ermittelt werden, aber nur für Zeiträume von einigen Tausend Jahren gültig sind. Es fehlen momentan langfristig erprobte Verfahren, um die Oberflächendynamik für Zeiträume von Zehntausenden und Hunderttausenden von Jahren präzise zu quantifizieren.

3.2.3 Bewertung der Indikatoren zur geologischen Langzeitstabilität durch die KNE

Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*

Das schwierige Thema „Neotektonik“ wurde von der Nagra sehr detailliert und unter Einbeziehung aller damit zusammenhängenden Phänomene und der entsprechenden Fachliteratur bearbeitet. Trotz zahlreicher in Auftrag gegebener Spezialstudien ist die Bedeutung und räumliche Vernetzung der neotektonischen Störungen nach wie vor nicht eindeutig geklärt. Da rezente und zukünftige Bewegungen bevorzugt auf schon bestehenden Schwächezonen

oder Bruch- und Überschiebungsflächen erfolgen, muss auch in tektonisch weniger beanspruchten Grossräumen mit geringeren neotektonischen Bewegungen gerechnet werden. Aus der Sicht der KNE ist die von der Nagra verwendete Beurteilung sinnvoll.

Indikator *Seismizität*

Wie von der Nagra dargestellt und interpretiert, ist der Beobachtungszeitraum für Erdbeben wegen der geringen Wiederkehraten zu kurz, um ein repräsentatives und für Langzeitprognosen hinreichend zuverlässiges Bild über die Seismizität an bestimmten Störungen zu erhalten. Die KNE stimmt dieser Ansicht zu. Es ist aber dennoch von Vorteil, nachweislich stärker aktive Regionen wie den Raum Basel und das Rhônetal zu meiden.

Indikator *Seltene geologische Ereignisse*

Aufgrund potenzieller Gefährdung durch Vulkanismus kann mit Sicherheit keiner der zu bewertenden Grossräume ausgeschlossen werden. Es fragt sich, warum dieser Indikator, im Vergleich zum Indikator *Seismizität*, explizit bewertet wurde. Derselbe wirkt nämlich nicht selektiv, beeinflusst aber die Mittelwertbildung ganz wesentlich (s. Abschnitt 3.1). Man könnte zudem argumentieren, dass nur Gebiete ohne jegliche Anzeichen für neogenen Vulkanismus als „sehr günstig“, alle andern nur als „günstig“ bewertet werden sollten.

3.3 Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen für die Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume

3.3.1 Anforderungen an die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen durch die Nagra

Die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen für die Auswahl geologisch-tektonischer Grossräume wird von der Nagra durch die Indikatoren *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*, *Kontinuität der interessierenden Schichten*, und *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik* beleuchtet und beurteilt. Die Herleitung der Anforderungen an den Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik* durch die Nagra wurde in Abschnitt 3.2 kommentiert und beurteilt.

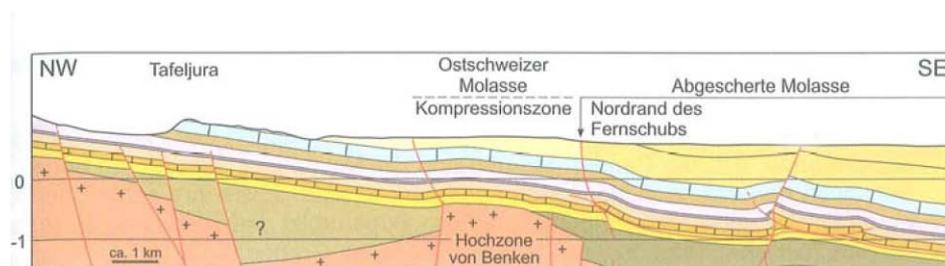
Der Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse* dient als Gradmesser für die Beurteilung der Zergliederung des ursprünglichen Gesteinsverbandes durch Störungen, Faltenbau und Überschiebungen. Diese Zergliederung bestimmt die Grösse der verfügbaren Wirtgesteinsblöcke. Damit ein Grossraum bezüglich dieses Indikators als günstig bis sehr günstig eingestuft wird, müssen darin mehrere ausreichend grosse, wenig zergliederte, gut explorierbare Blöcke aufzufinden sein (NTB 08-05, S. A1-133). Dabei sind für HAA-Lager grössere Bereiche notwendig als für SMA-Lager (Abschnitt 2.5), die zudem möglichst flach gelagert sein sollten.

Der Indikator *Kontinuität der interessierenden Schichten* (NTB 08-05, S. A1-135) ist eng verknüpft mit dem Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*: Je stärker die Zergliederung, umso kleiner die Kontinuität. Die Bewertungsskala der Nagra unterscheidet zwischen „sehr günstig“ (= hoher Grad an Kontinuität), „günstig“ (= mittlerer Grad an Kontinuität) sowie „ungünstig bis bedingt günstig“ (= geringer Grad an Kontinuität).

3.3.2 Grundlagen zur Bewertung der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen

Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*

Hinsichtlich des Störungsmusters lässt sich das Mittelland grob in einen West- und Ostteil unterteilen. Im östlichen Teil der Schweiz erfolgte die Verkürzung der Alpen und insbesondere des Vorlandes vorwiegend im alpinen Kern und innerhalb der Subalpinen Molasse. Die Deformation und Einengung hat sich hier kaum an die nördliche Peripherie verlagert (Figur 3-1). Im westlichen Teil der Schweiz dagegen verlagerte sich der grösste Teil der Vorlandverkürzung in den Jura. Die räumlichen Unterschiede im Verkürzungsmuster mussten durch Querstörungen kompensiert werden. Diese prägten das Störungsmuster der Westschweiz wesentlich mit.



Figur 3-1: Schematisches Profil durch die Nordostschweiz (aus NTB 99-08, S. 133)

Eine wichtige Rolle spielt der Oberrheintalgraben, der sich als „Raurakische Senke“ quer durch den Faltenjura nach Süden bis ins Mittelland und nach Westen zum Bressegraben fortsetzt. Das auffällige Abbiegen der Molasseantiklinalen westlich von Fribourg dürfte in direktem Zusammenhang mit der Fortsetzung der randlichen Störungen des Oberrheintalgrabens stehen. Solche Störungen sind nicht nur mit der Seismik erfasst (Nagra 1994b; Somaruga 1997), sondern z.B. in einem im Raum Fribourg gelegenen Untertagebau auch angefahren worden.

Nicht unerwähnt bleiben darf der im Osten gelegene Hegau-Bodenseegraben mit seinen generell NW-SE streichenden Bruchsystemen. Es ist noch nicht völlig geklärt, inwieweit sich diese Brüche bis in die Ostschweizer Molasse fortsetzen (Verstellung der Bentonithorizonte).

Die bei Schaffhausen durchstreichende Neuhauser Störung konnte in den entsprechenden Seismiklinien bis in die Nähe der Thur verfolgt werden. Dank der detaillierten, im Raum Benken ausgeführten 3D-Seismik darf davon ausgegangen werden, dass die Neuhauser Störung die Westgrenze des eigentlichen Grabenrands markiert, dass aber kleinere NE-SW verlaufende Störungssysteme auch westlich der Neuhauser Störung zu erwarten sind (mündl. Erl. Schnellmann, Nagra, anlässlich eines Fachgesprächs).

Hinsichtlich der Lagerungsverhältnisse sind flach liegende bis leicht geneigte Schichtpakete für die Platzierung eines Lagers und für eine Prognose am besten geeignet. Solche Verhältnisse finden sich vor allem im Tafeljura und im Mittelland. An sich kämen auch im Faltenjura gelegene grössere Antiklinalen und Synklinalen (insbesondere Kofferfalten) als Standorte in Frage. Hier führt aber die von der Nagra festgesetzte Lagergrösse zum Ausschluss der Gebiete (NAB 07-35).

Indikator *Kontinuität der interessierenden Schichten*

Die Alpen werden aus verschiedenen litho-tektonischen Einheiten aufgebaut. Sie bestanden ursprünglich aus dem kristallinen Grundgebirgssockel (inkl. Permokarbon) und den darüber abgelagerten Sedimentserien (Mesozoikum und Känozoikum). Der Werdegang der Alpen

wurde entscheidend von der mesozoischen Beckenentwicklung geprägt und der darauf folgenden kretazisch/tertiären Kontinent-Kontinent-Kollision, die zum heutigen, sehr komplexen Deckengebäude führte. Entsprechend schwierig sind geologische Prognosen für tiefliegende Untertagebauten zu erstellen, wie beispielsweise beim Lötschberg- und Gotthard-Basistunnel. Die tektonische Situation des Mittellandes und des Tafeljuras präsentiert sich wesentlich einfacher. Die Schichten liegen generell flach oder fallen leicht gegen die Alpen ein. Räumliche Veränderungen im Schichtaufbau und in der Mächtigkeit sind, mit Ausnahme der Molasse, meist relativ einfach zu erfassen oder zu prognostizieren.

Indikator *Klimaentwicklung und Landschaftsgeschichte*

Aus der Sicht der KNE sollte ein Indikator *Klimaentwicklung und Landschaftsgeschichte* bei der Bewertung explizit mitberücksichtigt sein, da er eine wichtige Rolle für die Beständigkeit einer Standortregion spielt (SGT-Kriterium 2.1). Dabei könnte zwischen Grossräumen mit einem grossen und kleinen Veränderungspotenzial unterschieden werden.

Die Rekonstruktion der Entwicklung des Gewässernetzes der Nordschweiz (z.B. NTB 99-08, S. 74/75; Ziegler & Fraefel 2009) zeigt, dass es innerhalb der letzten 5 Mio. Jahre wiederholt zu bedeutenden Flussumlegungen gekommen ist, welche das Erosionsszenarium regional stark beeinflusst haben. Besonders im Mittelland muss bei künftigen Vereisungen mit wesentlichen Umgestaltungen des Flussnetzes gerechnet werden. Die grössten Veränderungen sind dabei im Randbereich der Gletscherzungen zu erwarten. Dabei besteht ein enger Zusammenhang zur zukünftigen Klimaentwicklung.

Auch Ereignisse, die am Rande der Alpen ablaufen, könnten das Gewässernetz ganz wesentlich beeinflussen. So verwehrt bei Sargans lediglich eine 6 m hohe Schwelle eines Schwemmfächers ein Abfliessen des Rheins durch das gefällsreichere Seeztal sowie via Walen- und Zürichsee limmatabwärts zur Aare (Hantke 1991).

3.3.3 Bewertung der Indikatoren zur Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen durch die KNE

Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*

Die Nagra stuft den westlichen Tafeljura (inkl. Oberrheingraben), den Faltenjura, die westliche Subjurassische Zone und die Alpen als tektonisch-geologisch komplex ein und bewertet diese Grossräume als „ungünstig“ bzw. mit „1.5“. Dieser Beurteilung der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen (Explorierbarkeit und Prognostizierbarkeit) für ein SMA-Lager mit dem Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse* (NTB 08-03, Tab. C.2-1) kann gemäss der oben dargelegten Sachverhalte zugestimmt werden.

Berechnet man allerdings die Tabelle C.2-1 (NTB 08-03) neu, ohne Verwendung des erst im Schritt 4 vorgesehenen Kriteriums 1.1 (Räumliche Ausdehnung des Wirtgesteins), so ergibt sich für den westlichen Tafeljura (mit Oberrheingraben) eine Gesamtbewertung von „3.0“, was einem „günstig“ entspricht. Für die westliche Subjurassische Zone würde mit „3.2“ ebenfalls ein „günstig“ resultieren. Der Faltenjura und die Alpen dagegen würden „ungünstig-bedingt günstig“ bleiben.

Bezüglich der HAA-Lager werden die genannten vier Grossräume mit einem im SGT nicht vorgesehenen „ungenügend“ bewertet, was gemäss den Regeln der Nagra (NTB 08-03, S. 383) zum definitiven Ausschluss dieser Grossräume führt. Warum diese nicht einfach mit „ungünstig“ bzw. einer „1“ bewertet werden, ist nicht erklärt. Der grössere Flächenbedarf für das HAA-Lager im Vergleich zum SMA-Lager (4 km² bei einer nutzbaren Breite von 1.5 km gegenüber 2 km² bei einer nutzbaren Breite von 1 km, vgl. Abschnitt 2.5) rechtfertigt zwar

eine von der Bewertung der SMA-Lager abweichende Beurteilung, stellt aber keine belastbare Erklärung für den definitiven Ausschluss aufgrund eines einzelnen Indikators dar.

Indikator *Kontinuität der interessierenden Schichten*

Aus Sicht der tektonischen Komplexität weisen die Gebiete des Rheintalgrabens (inkl. seine Fortsetzung ins Mittelland) und des Hegau-Bodenseegrabens sowie der Faltenjura und die Gebiete am Alpenrand eine wesentlich grössere Störungsdichte auf als die dazwischen liegenden Gebiete, wo zu Recht die beste Kontinuität der Schichten erwartet werden darf. Der Bewertung der Nagra bezüglich dieses Indikators kann daher zugestimmt werden.

Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*

Der Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik* wurde schon im Abschnitt 3.2.3 bewertet.

3.4 Zusammenfassende Bewertung der Grossräume für SMA- und HAA-Lager durch die KNE

Allgemeines

Die von der Nagra vorgenommene Unterteilung der Schweiz in geologisch-tektonische Grossräume (NTB 08-03, Fig. 3.2-4) ist auf Grund der tektonischen Situation nachvollziehbar und auch gut begründet. Es stellt sich allerdings die Frage, warum die aus sehr unterschiedlichen Gesteinskörpern aufgebauten Alpen gesamthaft beurteilt werden. So weist etwa das Südalpin einen eigenen tektonischen Baustil auf, ist alpin nicht metamorph überprägt worden und weist vergleichsweise geringe Hebungsraten auf. Auch lassen sich die kristallinen Massive nicht mit den helvetischen Decken und auch nicht ohne Weiteres mit dem Penninikum vergleichen. Die KNE vertritt die Meinung, dass mit einem klar definierten Indikator *Metamorphosegrad* die Standortsuche von Beginn weg auf höchstens anchimetamorph überprägte Gesteine beschränkt hätte werden können. Der alpine Raum würde damit mehrheitlich als „ungünstig“ klassifiziert.

Grossräume für SMA-Lager

Das *westliche und östliche Molassebecken* sowie der *östliche Tafeljura* und die *östliche Subjurassische Zone* weisen gemäss Meinung der KNE für SMA-Lager günstige bis sehr günstige Verhältnisse bezogen auf die Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen auf.

Der *westliche Tafeljura* (mit Oberrheingraben), der *Faltenjura*, die *westliche Subjurassische Zone* und *die Alpen* werden von der Nagra für SMA-Lager als ungünstig bis bedingt günstig eingestuft. Wie oben schon erwähnt, teilt die KNE diese Einschätzung, weist aber darauf hin, dass die Beurteilung durch die Nagra u.a. auf der Verwendung des Kriteriums 1.1 *Räumliche Ausdehnung des Wirtgesteins* basiert. Die Anwendung dieses Kriterium wäre nach SGT für Schritt 4 vorgesehen und nicht für Schritt 3.

Grossräume mit hoher lokaler Seismizität sollten allerdings gemieden werden (Rhônetal und Region Basel), da dort innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 100'000 Jahren mit tektonischen Versätzen zu rechnen ist. Zudem ist im Rhôneal lokal mit tiefgründigen Sackungen zu rechnen, was die Einrichtung eines SMA-Lagers insbesondere im Bereich von Talflanken erschweren kann (tiefgründige Dekompaktionsszone).

Grossräume für HAA-Lager

Die *Alpen* und der *Faltenjura* werden als Grossraum für ein HAA-Lager grundsätzlich ausgeschlossen, und zwar aufgrund ungenügender und ungünstiger Bewertungen für die relevanten Indikatoren (NTB 08-03, S. 106 ff). Die KNE kann diesem Ausschluss zustimmen.

Der *westliche Tafeljura mit Oberrheingraben* und die *westliche Subjurassische Zone* werden für ein HAA-Lager ebenfalls ausgeschlossen. Hier führt die Beurteilung der Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*) zum Ausschluss. Allerdings sei hier darauf hingewiesen, dass eine modifizierte Version der Bewertungsskala (Ersatz von ungenügend durch ungünstig sowie Anwendung des Indikators *Räumliche Ausdehnung* in Schritt 4 anstelle 3) zu bedingt günstigen Verhältnissen für die westliche Subjurassische Zone und den westlichen Tafeljura führen würde (Abschnitt 3.3.1 und 3.3.3). Trotzdem teilt die KNE die Auffassung der Nagra, dass diese beiden Räume für HAA-Lager, insbesondere wegen der Seismizität (westlicher Tafeljura mit Oberrheingraben) und der Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (westliche Subjurassische Zone) nicht weiter zu berücksichtigen sind.

Das *westliche Molassebecken* sowie die *östliche Subjurassische Zone* werden von der KNE hinsichtlich Langzeitstabilität ebenfalls als „günstig“ bis „sehr günstig“ eingestuft. Der nur bedingt günstigen Beurteilung dieser Räume in Bezug auf die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse kann die KNE ebenfalls zustimmen. Gesamthaft resultiert für diese beiden Räume eine Gesamtbewertung, die für HAA-Lager ungünstig bis bedingt günstig ist. Die KNE unterstützt diese Bewertung.

Das *östliche Molassebecken* sowie der *östliche Tafeljura* scheinen der KNE aus Sicht der Langzeitstabilität und der Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen für ein HAA-Lager grundsätzlich geeignet. Es gilt aber, mögliche Komplikationen für die Langzeitstabilität, die sich durch den Hegau-Bodenseegraben und der damit verbundenen Seismizität ergeben könnten, ausreichend zu beachten.

4 Bewertung der Auswahl potenziell geeigneter Wirtgesteine

4.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

Nach der Auswahl geeigneter Grossräume in Schritt 3 werden im Schritt 4 alle Gesteinsformationen der Schweiz einer Prüfung unterzogen, ob sie als Wirtgesteine für ein SMA- oder HAA-Tiefenlager in Frage kommen. Schritt 4 der Etappe 1 wurde von der Nagra in fünf Teilschritte aufgeteilt (NTB 08-03, S. 113/114): (1) Festlegung der Indikatoren und der zugehörigen Mindestanforderungen, die die Identifikation der möglichen Wirtgesteine erlauben, (2) Identifikation der detaillierter zu evaluierenden Gesteinseinheiten, (3) Evaluation *potenziell möglicher* Wirtgesteine anhand von Mindestanforderungen, (4) Auswahl der *bevorzugten Wirtgesteine* anhand der Verschärften Anforderungen und (5) Bewertung der bevorzugten Wirtgesteine aufgrund einer langen Liste von Indikatoren.

Eine Zusammenfassung der in Schritt 4 von der Nagra verwendeten Indikatoren enthält NTB 08-03. Wie die Verschärften Anforderungen für die sehr wichtigen Indikatoren *Hydraulische Durchlässigkeit*, *Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit* und *Homogenität des Gesteinsaufbaus* von der Nagra bewertet wurden, ist im NTB 08-03 in den Tabellen 4.2-2 (SMA) und 4.3-2 (HAA) dargelegt.

Die nach Meinung der KNE für Schritt 4 sehr wichtigen Indikatoren und Hinweise auf zugehörige Detailinformationen sind in Tabelle 4-1 zusammengestellt. Ein Teil dieser Indikatoren wurde schon in Kapitel 2 und 3 erläutert. In diesem Kapitel wird nur auf deren Rolle und Bedeutung bei der Wahl der Wirtgesteine eingegangen. Die bisher nicht besprochenen und als wichtig erachteten Indikatoren *Tongehalt*, *Homogenität des Gesteinsaufbaus*, *Selbstabdichtung*, *Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)*, *Variabilität der Gesteinseigenschaften* werden in diesem Kapitel im Detail erläutert. Nutzungskonflikte mit möglicherweise vorhandenen Rohstoffvorkommen wurden von der KNE nicht bewertet.

Tabelle 4-1: Für die KNE wichtige und in Kapitel 4 im Detail diskutierte Indikatoren und Kriterien zur Beurteilung potenzieller Wirtgesteine

Indikator	NTB 08-05 (Anhang)	SGT Kriterium
<i>Mächtigkeit</i>	A1.5	1.1 Räumliche Ausdehnung
<i>Laterale Ausdehnung</i>	A1.7	1.1 Räumliche Ausdehnung
<i>Tongehalt (= Gehalt an Schichtsilikaten)</i>	A1.21	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung
		1.4 Freisetzungspfade
<i>Selbstabdichtungsvermögen</i>	A1.22	1.4 Freisetzungspfade
		2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften
		2.3 Lagerbedingte Einflüsse
<i>Homogenität des Gesteinsaufbaus (= mesoskale lithologische Variationen)</i>	A1.18	1.4 Freisetzungspfade
<i>Hydraulische Durchlässigkeit (= Grossräumige effektive Durchlässigkeit)</i>	A1.9	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung
<i>Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums</i>	A1.17	1.4 Freisetzungspfade
<i>Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade</i>	A1.20	1.4 Freisetzungspfade
<i>Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)</i>	A1.27	2.1 Beständigkeit der Eigenschaften
<i>Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit</i>	A1.39	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine

Da das Grundwasser als wichtigstes Transportmedium für Radionuklide fungiert, ist das sicherheitstechnisch wichtigste Merkmal eines Wirtgesteins für ein Tiefenlager radioaktiver Abfälle die sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit. Sedimentgesteine, die diese Anforderungen erfüllen, weisen zwei Charakteristika auf:

Fossiles Formationswasser

Die langzeitige Abkoppelung eines potenziellen Wirtgesteins von den lokalen und regionalen Wasserwegsamkeiten und damit eine geringe Durchlässigkeit des Gesteins wird durch das Vorhandensein von fossilem, mehrere Millionen Jahre altem Formationswasser dokumentiert. Es ist nur vorhanden, wenn das Sediment nach der Kompaktion vom Porenwasserfluss im Sedimentbecken, aber auch vom Zufluss meteorischen Wassers weitgehend abgeschlossen war und ist (z.B. NEA 2009). Demnach sind Gesteine mit entsprechend altem Formationswasser als potenzielle Wirtgesteine anzusehen.

Selbstabdichtungsvermögen

Es ist unabdingbar, dass sich nach Ende des Baus eines Lagers für radioaktive Abfälle keine präferenzziellen Freisetzungspfade aus dem Lagerbereich heraus zu umgebenden Aquiferen entwickeln. Bei lückenloser Versiegelung des Lagers ist es für Gesteine mit Selbstabdichtungsvermögen sehr wahrscheinlich, dass sich in einem adäquaten lokalen Spannungsfeld allfällige neue Risse und Störungen unterhalb der von Dekompaktion betroffenen Zone durch Quellungsprozesse und den Überlagerungsdruck wieder so verschliessen, dass die Durchlässigkeit nicht oder kaum erhöht wird.

Beide Charakteristika sind bei Tonsteinen und Evaporiten erfüllt. Evaporite kommen als Wirtgesteine in der Schweiz nicht in Frage, da sie an möglichen Standorten ein hohes Verkarstungspotenzial aufweisen, stark tektonisiert sind und/oder zu geringe Mächtigkeit aufweisen. Zudem weisen sie ein nur kleines Sorptionsvermögen auf. Demzufolge stehen für die KNE Tonsteine im Vordergrund der Betrachtung.

Mächtigkeit und laterale Ausdehnung

Die mit den Indikatoren *Mächtigkeit* und *Laterale Ausdehnung* verbundenen Anforderungen garantieren, dass nach Versagen der technischen Barrieren eine genügend starke Rückhaltung der Radionuklide in der Geosphäre erreicht wird. Der Indikator *Mächtigkeit* ist auch eng mit den Indikatoren *Länge der Freisetzungspfade* und *Homogenität des Gesteinsaufbaus* gekoppelt. Die für den Indikator *Laterale Ausdehnung* festgelegten Mindestanforderungen berücksichtigen unter anderem die Grösse und Auslegung der Lagerkammern (Abschnitt 2.5), werden aber teilweise durch die tektonischen Verhältnisse stark eingeschränkt.

Die verschiedenen Indikatoren (z.B. *Tongehalt*, *Selbstabdichtung* und *Homogenität des Gesteinsaufbaus*) umfassen fundamentale und abgeleitete Eigenschaften von Sedimentgesteinen (Griffiths 1967) und gehören daher, hierarchisch betrachtet, verschiedenen Kategorien an. In der Anwendung der Nagra, etwa im NTB 08-05, werden sie aber gleichwertig behandelt. Die Unterscheidung von fundamentalen und abgeleiteten Eigenschaften ist nicht rein akademisch, sondern für das Verständnis elementar: Abgeleitete Eigenschaften weisen stets eine Beziehung zu fundamentalen Eigenschaften auf und sind demnach nicht unabhängig; daher bestehen oft direkte oder indirekte Relationen zwischen den Indikatoren (z.B. NTB 08-05, S. A1-82).

4.2 Zurückgestellte potenzielle Wirtgesteine

4.2.1 Durch die Nagra zurückgestellte potenzielle Wirtgesteine

Die Evaluation der potenziell möglichen Wirtgesteine erfolgte anhand repräsentativer stratigraphischer Sammelprofile, die die ganze Schweiz abdecken (NAB 07-35). Die Nagra stuft Kalke, Dolomite und Sandsteine als generell nicht geeignet ein (NTB 08-04, Tab. 4.2-1). Zudem wird eine gute Explorierbarkeit der Wirtgesteinsverbände gefordert (NTB 08-05). Die Nagra sieht diese Anforderungen für USM, OSM, Bündnerschiefer und Flysch als nicht erfüllt an. Die Mergel-Formationen des Helvetikums (insbesondere Palfris-Formation und Vitznau-Mergel) gelten dagegen nach Einschätzung der Nagra als potenziell geeignete Wirtgesteine.

Im NTB 08-03 zeigen die Tabellen 4.2-1, 4.2-2, 4.3-1 und 4.3-2 die Bedeutung der Indikatoren *Hydraulische Durchlässigkeit* und *Transmissivität* für den Ausschluss gewisser potenzieller Wirtgesteine. Für die folgenden 6 Gesteine, die für ein SMA-Lager betrachtet werden, sind sie der entscheidende Ausschlussgrund schon auf dem Niveau der Mindestanforderungen: Karbonatgestein- und Sandstein-Formationen im allgemeinen, Verrucano (Helvetikum), Aalénien-Tonschiefer (Helvetikum), Effinger Schichten (Faltenjura und westliche Subjurasische Zone), Tonschieferabfolgen der Bündnerschiefer und Flyschformationen (Alpen) im allgemeinen. Bei den Verschärften Anforderungen fallen aus den gleichen hydraulischen Gründen die Untere Süsswassermolasse (USM, Marnes-bariolées der Westschweiz) und die Obere Süsswassermolasse (OSM, Basiszone der Bodenseeschüttung, Ostschweiz) heraus. Diese beiden Formationen und Kristallingesteine wurden von der Nagra auch aufgrund der grossen Variabilität ihrer Eigenschaften (Indikator Anhang A1.39) ausgeschlossen.

4.2.2 Grundlagen der Bewertung zurückgestellter potenzieller Wirtgesteine

Für die Beurteilung der genannten Gesteinseinheiten werden lithologische Aspekte und genetische Überlegungen herangezogen. Sandstein-Schichten sind aufgrund ihres spröden Verhaltens anfällig für die Bildung von permeablen Klüften. Aufgrund des geringen Gehalts an Tonfraktion und Tonmineralen weisen sie zudem ein geringes Selbstabdichtungsvermögen auf, auch wenn die kompetenten Bänke in Tongesteine eingebettet sind. Für die Süsswasser-Molasse zeigen Daten aus geophysikalischen Untersuchungen in Bohrungen und Labor-Analysen einen geringen Gehalt an Tonmineralen und Tonfraktion in den Sandstein-Bänken (Nagra 1994b). Für den Flysch liegen vor allem Daten von Labor-Analysen vor, exemplarisch dafür sind die Untersuchungen von Winkler (1983).

Aus genetischen Überlegungen heraus können alle in einem Gebiet in Pelite eingeschalteten Sandstein-Bänke lateral mit vertikal-gestapelten Sandsteinkörpern in Verbindung stehen: Die in Pelite eingeschalteten Sandstein-Bänke wurden nämlich über ein Zufuhrsystem gebildet, das kanalisiert war: Flussbett (Süsswasser-Molasse: Galloway & Hobday 1996; Keller et al. 1990) oder Tiefsee-'channel' (Flysch; Mutti 1992). Die kanalisierten Abschnitte dieser Systeme werden von Sanden dominiert. Die im kanalisierten Bereich gebildeten Sandsteinkörper können vertikal gestapelt sein, da die hohe Fließkraft im Gerinne Feinmaterial nicht zum Absatz kommen lässt oder bei erneut starker Strömung (Hochwasser, Trübestrom) wieder erodiert (Galloway & Hobday 1996). Dass derartige fluviatile oder turbiditische Ablagerungssysteme Ziel der Exploration nach Kohlenwasserstoffen sind, weist auf hohe Permeabilität oder Transmissivität hin (Galloway & Hobday 1996; Scholle & Spearing 1982).

Die Flysch-Einheiten und Bündnerschiefer im alpinen Bereich sind ausnahmslos tektonisch beansprucht worden (z.B. Pfiffner 2009). Daher sind tektonische Trennflächen und Klüftung stets entwickelt, auch wenn sie lokal verschlossen sind. Zudem haben Flysche und Bündnerschiefer aufgrund ihrer Einbeziehung in den alpinen Gebirgsbau eine hohe Diagenese oder sogar Metamorphose erfahren und sind tektonisch stark beansprucht (z.B. Einsele 2000), wodurch das Selbstabdichtungsvermögen verringert wird (Abschnitt 4.6.).

Die Marnes-bariolées der Unteren Süsswasser-Molasse wurden in einem fluviatilen Milieu gebildet und beinhalten ebenfalls vertikal gestapelte Sandsteinkörper. An sich ist diese tonreiche Abfolge mächtig, es ist aber aufgrund der Genese höchst wahrscheinlich, dass Sandsteinkörper (Rinnengürtel-Sandsteine und Durchbruchsfächer-Sandsteine) eingeschaltet sind. Zudem sind die lithologischen Abfolgen der 'Marnes Bariolées' nur aus wenigen Bohrungen bekannt. Das Auftreten der Sandsteinkörper lässt sich auch geophysikalisch nicht explorieren.

Die grossräumige Durchlässigkeit solcher fluviatiler Abfolgen lässt sich nicht direkt messen, sondern nur modellmässig berechnen. Darum hat im Jahr 2006 die Proseis AG (heute Inter-oil) im Auftrag der HSK (heute ENSI) stochastische Simulationen der Architekturelemente und hydraulischen Durchlässigkeiten für die Marnes-bariolées ausgeführt (Hölker 2006). Die Daten dieser Modellierung basieren auf Keller (1992), Nagra 1994c, Strunck (2001) und NAB 04-09. Basierend auf diesen stochastischen Modellen hat anschliessend die ETH mittlere Blockdurchlässigkeiten und Durchflüsse durch ein modellhaftes HAA-Tiefenlager berechnet (Fidelibus & Löw 2007). Die mittleren vertikalen Durchlässigkeiten von 20 m x 20 m Blöcken in den Marnes-bariolées liegen zwischen $1.6 \cdot 10^{-6}$ und $6.3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Die horizontalen Block-Durchlässigkeiten sind vermutlich noch grösser.

Die Palfris-Formation und die Vitznau-Mergel sind in der Regel ebenfalls stark tektonisiert. Sie enthalten zudem stellenweise mehrere Meter mächtige Kalkbankabfolgen mit drusigen Calcitadern (NTB 96-01, Tab. 4.6-2). Innerhalb der ebenfalls vorhandenen, sehr zahlreichen klastischen Scherzonen (vgl. NTB 96-01, Tab.4.6-5) und innerhalb der Calcitadern ist ein

ausgeprägtes Channeling des Wasserflusses vorhanden (NTB 08-04, S. 177). Die am Wellenberg abgeteuften Bohrungen haben gezeigt, dass die Durchlässigkeiten in Tiefen unterhalb 500-550 m u.T. generell sehr gering sind. Lokal erhöhte Werte sind durchaus möglich. Dies wird von der Nagra wegen der beschränkten Vernetzung der wasserführenden Systeme nicht als kritisch bewertet. Die Nagra sieht die starke Tektonisierung als positive, zum Wirtgestein zu zählende Eigenschaft, da ohne sie zuviele potenziell wasserführende Kalkeinschaltungen und damit potenzielle Fliesshorizonte vorhanden wären (mündl. Aussagen P. Zuidema und A. Gautschi anlässlich Fachgespräch vom 11.12.2009).

4.2.3 Bewertung zurückgestellter potenzieller Wirtgesteine durch die KNE

Die Explorierbarkeit von Einheiten innerhalb der Molasse hat sich als schwierig erwiesen (NAB 04-10). Die Zurückstellung der Molasse-Einheiten ist für die KNE nachvollziehbar, da die Lokalisierung von eingeschalteten Sandsteinkörpern schwierig ist und Sandsteinlagen mit vertikal gestapelten Sandsteinkörpern in Verbindung stehen können. Die 'Marnesbariolées' erfüllen zudem die Verschärften Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit nicht.

Die Flysche im alpinen Raum sind häufig metamorph und haben deshalb ein geringes Selbstabdichtungsvermögen; zudem sind sie tektonisch verschuppt und von vermutlich wasserdurchlässigen Fliesspfaden durchzogen, die sandigen Kanalfüllungen folgen. Die nicht-metamorphen Flyschvorkommen, etwa der Schlieren-Flysch und Gurnigelflysch, sind mächtig, flächenhaft verbreitet, aber sehr sandig. Die pelitischen Abfolgen sind geringmächtig, daher suggerieren die Formations- und Schichtnamen zum Teil fälschlicherweise tonreiche Abfolgen. Durchgängige und Dekameter mächtige Tonlagen sind selten, Hektometer mächtige gar nicht zu erwarten. Die Zurückstellung der Gesteine der Flysch-Einheiten erfolgt deshalb zu Recht, obwohl keine konkreten Bohrresultate oder Bohrlochtests vorliegen.

Die meisten tonreichen Bündnerschiefer-Vorkommen – die kalkreichen werden ausgeschlossen – haben eine grünschieferfazielle oder noch stärkere Metamorphose erfahren. Nur im Gebiet von Valzeina existiert ein anchimetamorphes Vorkommen toniger Bündnerschiefer. Da bereits in der Anchizone quellbare Tonmineralen weitgehend zu Glimmern umgewandelt werden, ist das Selbstabdichtungsvermögen zumindest stark herabgesetzt. Daher befürwortet die KNE eine Zurückstellung dieser Gesteine.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums stellen nur deshalb eine weiter zu verfolgende Option dar, weil lokal Beobachtungen und Bohrresultate existieren (z.B. am Wellenberg), die trotz der komplexen Tektonisierung eine sehr geringe Durchlässigkeit belegen. Hier besteht gemäss Auffassung der KNE eine Abweichung von dem im Alpenvorland angewendeten Auswahl- und Bewertungsverfahren (vgl. Abschnitt 5.1), wo stärker tektonisierte Gebiete von vornherein ausgeschlossen werden.

Die Wasserführung in unverwitterten Kristallingesteinen ist auf Klüfte beschränkt. Bis heute gibt es keine Methoden, Lage und Transmissivität wasserführender Klüfte in Kristallingesteinen zuverlässig und zerstörungsfrei zu prognostizieren oder zumindest auszuschliessen. Die KNE befürwortet daher, die Kristallingesteine der Nordschweiz und der Alpen aufgrund der *Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit* zurückzustellen (NTB 08-03, Tabelle 4.2–2).

4.3 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf hydraulische Barriereneigenschaften

4.3.1 Herleitung der Anforderungen durch die Nagra

Die hydraulischen Anforderungen an ein Wirtgestein sollen einen möglichst geringen Grundwasserdurchfluss und einen entsprechend geringen advektiven Austrag von Radionukliden aus einem Tiefenlager garantieren.

Unter dem Begriff „hydraulische Barriereneigenschaften“ werden hier die Indikatoren in NTB 08-05 (Anhang A1.9, A1.18, A1.17 und A.1.20, siehe auch Tabelle 4-1 dieser Stellungnahme) zusammengefasst, welche die SGT-Kriterien „Freisetzungspfade“ und „Hydraulische Barrierenwirkung“ betreffen. Die Anforderungen der Nagra an die hydraulische Barrierenwirkung wurden in Abschnitt 2.2.1 im Detail erläutert. Bei der Beurteilung des Indikators *Art der Transportpfade* (NTB 08-05, Anhang A1.17) werden homogene, poröse Gesteine mit dominanter Matrixdiffusion und kleinräumiger Klüftung (0.1 bis 10 m) als sehr günstig bis günstig, solche mit Kluffabständen im Bereich > 10-100 m und/oder ausgeprägtem Channeling (Fluss auf linearen Fliesswegen in Klüften) als bedingt günstig oder ungünstig klassifiziert.

4.3.2 Grundlagen zur Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung

Die bekannten K- und T-Werte und ihre Variationen für die verschiedenen Wirtgesteine sind in NTB 08-04 (Tab. 4.4-1) zusammenfassend dargestellt. Die Daten basieren auf den zahlreichen in Bohrungen durchgeführten Packertests und auf Analysen von Tunnelzuflüssen. Wenn für eine Gesteinsformation keine gemessenen K-Werte vorliegen, verwendet die Nagra einen Tongehalt von über 25% um die K-Werte abzuschätzen. Solche Gesteine sind in der Regel schwach durchlässig ($< 10^{-8}$ m/s) und zeigen K-Werte $< 10^{-9}$ m/s; die kleinsten in reinen Tongesteinen messbaren Werte liegen um 10^{-15} m/s.

Die entsprechenden Detailwerte sind in Form von graphischen Darstellungen (K vs Tiefe) in den verschiedenen Wirtgestein-Kapiteln in NTB 08-04 gezeigt. Die Datenlage ist jedoch recht unterschiedlich und die Prognose-Zuverlässigkeit der Werte nimmt in folgender Reihenfolge ab: Opalinuston, kristallines Grundgebirge, Helvetische Mergel am Standort Wellenberg, Molasse-Sedimente, Effinger Schichten, „Brauner Dogger“. Entsprechend unsicher sind präzise Voraussagen im Fall der zuletzt genannten Wirtgesteine.

4.3.3 Beurteilung der hydraulischen Barrierenwirkung durch die KNE

Die Mindestanforderungen und Verschärften Anforderungen führen zur einer Klassifizierung der acht hydraulisch geeigneten Wirtgesteine in „bevorzugte“ und „potenziell möglich“ (zurückgestellte) Wirtgesteine (NTB 08-04, S. 271/272, Tab. 4.5-2 und 4.5-3). Bei der Identifikation der potenziell möglichen Wirtgesteine (NTB 08-03, Tab. 4.2-1) werden die Mindestanforderungen hinsichtlich „Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade“ von den Bündnerschiefer- und Flysch-Abfolgen nicht erfüllt, vor allem aufgrund der geringen Mächtigkeiten der tonigen Abschnitte. Die tonigen Molassegesteine der USM und der OSM werden wegen des Nichterfüllens der Verschärften Anforderungen zurückgestellt. Diese Einschätzungen der Nagra werden von der KNE gemäss Abschnitt 4.2 geteilt.

Für den Opalinuston liegt ein umfassender hydraulischer Datensatz vor, welcher aus der Sondierbohrung Benken und dem Felslabor Mont Terri stammt. Dieser dokumentiert systematisch ab einer Tiefe von 20 m (im Jura) eine sehr geringe Durchlässigkeit. Daneben bestätigen Messprofile für verschiedene Elemente und Isotope in den Porenwässern der Bohrung Benken und des Felslabors Mont Terri, dass der Stofftransport im Opalinuston und teilweise

in seinen Rahmengesteinen diffusionskontrolliert ist. Die exzellente hydraulische Barrierenwirkung des Opalinustons ist unbestritten.

Der „Braune Dogger“ wurde in der Bohrung Benken zusammen mit dem Opalinuston getestet und zeigt dort ähnlich gute hydraulische Barriereigenschaften. Die hydraulischen Eigenschaften der kompetenten Sand- und Kalkstein-Zwischenlagen (u.a. Wedelsandstein) sind im Gebiet der Nordschweiz unsicher. Die zwei Leitbänke des Wedelsandsteins sind seitens der Ölindustrie (BEB, Wintershall) als Speichergesteine in Oberschwaben exploriert worden (unveröffentlicht). Es handelt sich sedimentpetrographisch um sandige Kalke mit einem siliziklastischen Anteil von ca. 30% im Feinsandbereich. Im Wutachgebiet sind die Kalksandsteinbänke lokal einer klufferweiternden Verkarstung ausgesetzt, was zur Ausbildung von Quellen an der Basis des Unteren Wedelsandsteins führt. Die Tiefe der Dekompaktionszone im „Braunen Dogger“ ist unbekannt.

Hydraulische Tests in Bohrungen von Bärengraben, Küttigen, Eppenberg und Jakobsberg ergeben für die Effinger Schichten bis in eine Tiefe von 200 m erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten von 10^{-9} bis 10^{-6} m/s. Zwei Packertests in der Bohrung Benken und sieben Packertests in der Bohrung Oftringen ergeben unterhalb von 200 m u.T. durchwegs sehr geringe horizontale Durchlässigkeiten ($< 10^{-11}$ m/s). Chlorid- und Helium-Profile der Bohrung Oftringen bestätigen die grundsätzlich geringe Durchlässigkeit in entsprechenden Tiefenlagen. Ausreisser in diesen Profilen wie auch vereinzelt erhöhte Transmissivitäten in geklüfteten Kalklagen lassen grundsätzliche Fragen zur hydraulischen Barrierenwirkung der Effinger Schichten unbeantwortet (siehe auch Abschnitt 4.8).

Die Akkumulationen der Mergel-Formationen im Helvetikum wurden vor allem am Standort Wellenberg bezüglich ihrer hydraulischen Eigenschaften untersucht. Eine sehr grosse Anzahl von Packertests zeigt, dass an diesem Standort die „Dekompaktionszone“ ausgesprochen tief reicht. Wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, sind die Mechanismen, welche den Dekompaktionstiefen zu Grunde liegen, differenziert zu betrachten und im Alpenraum deutlich stärker ausgebildet als im flachen Alpenvorland. Am Standort Wellenberg mit sehr ungünstiger Topographie relativ zur Verbreitung der Wirtgesteine überlagern sich Effekte von oberflächlicher Verwitterung, Hangbewegungen und grossräumiger Erosion in ausgeprägter Form. Vermutlich deshalb wurden hier erhöhte Durchlässigkeiten bis in Tiefen von 550 m festgestellt, und vermutlich deshalb reicht hier die Dekompaktionszone mindestens bis auf Niveau des Talbodens (NTB 96-01, Figuren 7.4–x). Unterhalb dieser Tiefe belegen verschiedene Datensätze (Packertests, Wasserchemie, hydraulische Potenziale) eine sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit ($< 10^{-10}$ m/s).

4.4 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf den Gehalt an Schichtsilikaten („Tongehalt“)

4.4.1 Nomenklatorisches und Herleitung der Mindestanforderungen

Der Begriff „Tongehalt“ bezeichnet den Anteil an Partikeln $< 2 \mu\text{m}$, gemeinhin in Gewichts-% ausgedrückt (z.B. Füchtbauer 1988). In der sedimentologischen Literatur werden Gesteine mit einem Anteil von $> 50\%$ an Partikeln $< 63 \mu\text{m}$ als Tonsteine oder Pelite bezeichnet ('mudstones'; Stow 1981). In verfestigten Sedimentgesteinen ist die Grösse der Partikel und damit der Tongehalt weder im Labor noch bohrlochgeophysikalisch genau zu ermitteln. In den Berichten der Nagra bezeichnet der Begriff „Tongehalt“ *meist* den Gehalt an Schichtsilikaten + Akzessorien unabhängig von deren Korngrösse (NTB 08-04, S. 88 Fussnote). Allerdings wird diese Nomenklatur nicht stringent angewendet (z.B. NTB 08-05, S. 171; siehe aber NTB 08-04, S. 257).

Die Nagra gibt einen Grenzwert für den Indikator *Tongehalt* (= Gehalt an Schichtsilikaten) von 25% an. Dieser Grenzwert wurde empirisch festgelegt (Nagra-KNE 2009): Kompaktierte Sedimentgesteine mit einer in etwa gleichförmigen Verteilung der Schichtsilikate weisen ab diesem Gehalt die für Pelite typischen und für ein Wirtgestein gewünschten Eigenschaften, wie etwa geringe Gesteinsdurchlässigkeit und Selbstabdichtungsvermögen, auf. Dieser Indikator wird dann angewendet, wenn keine gesicherten Hinweise auf die Durchlässigkeit vorliegen (NTB 08-04, S. 88 ff; NTB 08-05, S. 205).

4.4.2 Grundlagen zur Bewertung des Gehalts an Schichtsilikaten

Die Korngrössenzusammensetzung eines Sediments ist eine fundamentale Eigenschaft (s. oben). Ton (< 2 µm) kann die Eigenschaften eines Gesteins bestimmen, wenn er in grösseren Mengen vorhanden und in etwa gleichmässig verteilt ist. Empirische Studien zeigen, dass für Tongesteine typische Eigenschaften, unter anderem geringe Permeabilität, plastisches Verformungsverhalten und potenziell hohes Selbstabdichtungsvermögen, dann entwickelt sind, wenn ein feinmaschiges Schichtsilikat-Gerüst vorhanden ist (z.B. Eichhubl et al. 2005; Mitchell 1993). Ab Tongehalten von etwa 25% sind entsprechende Gesteinseigenschaften meist festzustellen und ab 35% bis 40% stets (Dewhurst et al. 1999; Fisher & Knipe 2001).

Auch wenn der Gehalt an Schichtsilikaten nur als Indikator von untergeordnetem Rang (NTB 08-05, S. 171, 194 ff.) aufgeführt wird, der dann zur Anwendung kommen soll, wenn keine Messwerte für die hydraulische Durchlässigkeit vorliegen, repräsentiert dieser Indikator einen für ein Endlager wichtigen Parameter, da er sowohl Aspekte der Selbstabdichtung wie auch der Durchlässigkeit umfasst (z.B. NTB 08-05, S. A1-82). Abweichend von der Einschätzung der Nagra (NTB 08-05, S. 171, 194 ff.) wird diesem Parameter daher von der KNE eine sehr hohe Bedeutung beigemessen.

Der Gehalt an Schichtsilikaten ist nur dann aussagekräftig, wenn die Verteilung der Schichtsilikate innerhalb einer Gesteinsabfolge in etwa gleichmässig ist. Über längere Intervalle gemittelte Werte sind zu wenig informativ. Der Gehalt an Schichtsilikaten und seine Variation ist nur aussagekräftig, wenn er vor einem lithologisch definierten Hintergrundwert angegeben wird.

4.4.3 Beurteilung des Gehalts an Schichtsilikaten durch die KNE

Der Indikator *Tongehalt* (= Gehalt an Schichtsilikaten) ist von grosser Bedeutung, da er wichtige abgeleitete Eigenschaften von Gesteinen beeinflusst, und, wenn er hoch ist, auch bestimmt. Allerdings werden im vorliegenden Auswahlverfahren (NTB 08-03, NTB 08-04, NTB 08-05) oft nur die abgeleiteten Eigenschaften dargestellt und evaluiert, obwohl die tonmineralreichen Gesteine mit einem Gehalt von $\geq 25\%$ an Schichtsilikaten alles in allem eine dominierende Rolle spielen. Der empirisch festgelegte Grenzwert von 25% ist für Bereiche, die von einheitlich ausgebildeten Peliten dominiert sind, angemessen.

Für den Opalinuston ist ein Gehalt an Schichtsilikaten $> 25\%$ (gemittelt über 1 m Mächtigkeit) in den vorgesehenen Standortgebieten aller Voraussicht nach zu erwarten. Die Gesteine des sogenannten „Braunen Doggers“ und die Effinger Schichten weisen in den darin eingeschalteten, zum Teil mehrere Meter mächtigen Kalkstein- und Sandsteinbänken teilweise deutlich geringere Gehalte an Schichtsilikaten auf (NTB 08-04, S. 157 ff). Bei grösserer lateraler Kontinuität über mehrere Kilometer sind derartige Intervalle als problematisch einzustufen, da eine Wasserführung in diesen Kalk- und Sandsteineinschaltungen nicht ausgeschlossen werden kann (NTB 08-04, S. 88 ff, Kap. 4.5.1). Bei den Mergel-Formationen des Helvetikums kann in lithologisch wenig variierenden Intervallen mit einem Schichtsilikatgehalt von $\geq 25\%$

in ungestörten Bereichen auf eine geringe Durchlässigkeit geschlossen werden. Kristalline Gesteine enthalten primär nahezu keine Tonminerale.

4.5 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf mesoskale lithologische Variationen – „Homogenität des Gesteinsaufbaus“

4.5.1 Nomenklatorisches und Herleitung der Mindestanforderungen

„Homogenität“ ist zwar als Begriff definiert, aber für die Charakterisierung von Gesteinsabfolgen wenig praktikabel, da die Variation der Lithologie auf verschiedenen Skalen betrachtet werden kann. Im Rahmen des vorliegenden Auswahlverfahrens geht es um lithologische Variationen, etwa um Kalk- und Sandsteinschichten innerhalb eines tonig-mergeligen Schichtstapels, die einige Meter Mächtigkeit und eine laterale Ausdehnung von Hunderten von Metern aufweisen (NTB 08-03; NTB 08-04; NTB 08-05, A1-72). Solche lithologischen Variationen werden als „mesoskale“ Variationen klassifiziert (z.B. Wetzel 1982). Diese Größenordnung der lithologischen Variationen wurde operationell durch die Länge von 'Packer'-Strecken bei Bohrlochtests festgelegt (Nagra-KNE 2009).

4.5.2 Grundlagen zur Bewertung der lithologischen Variationen

Mesoskale Intervalle, die ganz oder überwiegend aus kompetenten Schichten bestehen, sind prinzipiell als kritisch anzusehen (NTB 08-04, Tab. 4.2-2; NTB 08-05, S. A1-72). Aufgrund der Eigenheiten des fundamentalen Kluftsystems (z.B. Meier & Kronberg 1989) werden deshalb kompetente Sandsteine und Kalksteine als Wirtgesteine für ein Lager radioaktiver Abfälle ausgeschlossen (NTB 08-04, S. 88 ff).

Der Einfluss von mesoskalen Sandstein- und Kalkstein-Einschaltungen auf die Eigenschaften eines mächtigeren Intervalls vorherrschend pelitischer Gesteine wurde empirisch ermittelt (Nagra-KNE 2009). Daher ist es durchaus möglich, dass neue Daten die bisher ermittelten Parameter und Erkenntnisse in Frage stellen können – aber nicht müssen.

Daten von hydraulischen Tests sind für gewisse Wirtgesteine nur in geringer Zahl verfügbar, und die genaue Ermittlung von hydraulischen Werten für mesoskale sandige oder kalkige Einschaltungen ist schwierig. Bisher wurde in den flach gelagerten Schichten des Mittellands und Tafeljuras in Bohrloch-Tests eine nur sehr geringe Durchlässigkeit im Bereich mesoskalen kompetenter Intervalle gemessen, meist in der Größenordnung des umgebenden Gesteins (Nagra-KNE 2009). Das kann darauf beruhen, dass keine Klüfte entwickelt sind, aber auch darauf, dass die kompetenten Gesteine vollständig in pelitische „Matrix“ eingebettet sind und daher kein Wasser fließen kann.

Die laterale Ausdehnung von mesoskalen, kompetenten, in Pelitfazies eingeschalteten Intervallen wird zwar in NTB 08-05 (A1-72) mit Hunderten von Metern angegeben. Es wird nicht klar gesagt, ob eine weitere laterale Ausdehnung als Ausschlussgrund für ein potenzielles Wirtgestein gilt. Die für ein SMA-Lager vorgeschlagenen Wirtgesteine des sogenannten „Braunen Doggers“ und der Effinger Schichten weisen mit dem „Wedelsandstein“ einerseits, und der Gerstenhübel-Schichten sowie der „Unteren“ und „Oberen Kalkbankabfolge“ andererseits Intervalle auf, die eine laterale Ausdehnung von mehreren Zehner Kilometern aufweisen (Nagra 1994a).

Die kompetenten Schichten im sogenannten „Braunen Dogger“ sind seismisch nicht gut explorierbar und ihre Verbreitung ist daher bislang kaum prognostizierbar. Auch die seismische

Exploration und die Korrelation der mächtigeren, von Kalkbänken dominierten Abschnitte der Effinger Schichten ist nur beschränkt möglich (NTB 08-04). Sedimentologische Detailuntersuchungen und Studien, die eine Vorhersage von Gebieten, in denen mehrere Meter mächtige Abfolgen von Kalkbänken auftreten (können), liegen bisher nicht vor.

4.5.3 Beurteilung der lithologischen Variationen durch die KNE

Für die Opalinuston-Formation ist in den vorgeschlagenen Standortgebieten basierend auf den aktuellen sedimentologischen Vorstellungen über die Ablagerungsgeschichte dieser Gesteine (Allia 1996; Wetzel & Allia 2000) wohl kaum mit mesoskalen Einschaltungen kompetenter Schichten zu rechnen.

Nach den Vorgaben des SGT (BFE 2008) und der genannten Bedingung „dass 'bedingt geeignete' Gesteine in der Auswahl zu belassen sind“, sind Effinger Schichten und sogenannter „Brauner Dogger“ nicht auszuschliessen. Dies gilt insbesondere auch deshalb, da alle bisherigen Ergebnisse aus Bohrungen keine Anhaltspunkte dafür geliefert haben, dass die Bergsdurchlässigkeit so erhöht ist, dass die Verschärften Anforderungen an diesen Indikator nicht erfüllt würden. Im ungünstigsten Fall ist die nutzbare Mächtigkeit stark reduziert, weil ein ausreichender Abstand zu den mesoskalen kompetenten Bereichen, dem „Wedelsandstein“ innerhalb des sogenannten „Braunen Doggers“ einerseits und zu den Gerstenhübel-Schichten sowie zur „Oberen“ und „Unteren Kalkbankabfolge“ der Effinger Schichten andererseits, eingehalten werden muss.

Die Effinger Schichten sind wegen der zahlreichen Kalkbänke und der insgesamt kalkigen Lithologie (reine Tonstein-Lagen sind nicht vorhanden) im Vergleich zur Abfolge des sogenannten „Braunen Doggers“ eindeutig weniger gut geeignet. Zudem fehlen ihnen umhüllende Rahmengesteine. In den Gesteinen des Mittleren Jura („Brauner Dogger“) sind aus genetisch-sedimentologischen Gründen Sandstein- und Kalkarenit-Bänke bis etwa 10 cm Mächtigkeit wohl ohne grösseren Einfluss, da sie sehr wahrscheinlich lateral nicht so kontinuierlich entwickelt sind, dass sich grössere Fliesswege entwickeln können. Bei Bänken mit grösserer Mächtigkeit bedarf es einer detaillierten Abklärung ihrer Verbreitung, Genese und Wasserführung. Insbesondere für die Gesteine des „Braunen Doggers“ liegen dazu noch zu wenig belastbare Daten vor.

Der Indikator *Homogenität des Gesteinsaufbaus* (= mesoskale lithologische Variation) ist in Etappe 2 besser zu definieren. Skalenabhängige Methoden zur quantitativen Erfassung und Beschreibung sind zu entwickeln.

4.6 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Selbstabdichtung

4.6.1 Nomenklatorisches und Ableitung der Mindestanforderungen

Selbstabdichtung beschreibt den Aspekt, dass sich nach Öffnung eines Risses oder nach Versatz entlang einer Störung die Oberflächen der begrenzenden Gesteinsdomänen wieder so annähern, dass die Durchlässigkeit nicht von der des Ausgangsgesteins abweicht oder vielleicht sogar geringer ist. Die Gesteinsfestigkeit bleibt dabei herabgesetzt (z.B. Yong 2008). Tonsteine weisen ein hohes Potenzial zur Selbstabdichtung auf; es steigt mit zunehmendem Überlagerungsdruck und nimmt mit abnehmender Porosität ab (z.B. Bock et al. 2009). Das Zerkleinen in feinste Körner, die Verschleppung von Ton entlang von Bewegungsflächen und das Quellen von Tonmineralen können wesentlich zur Selbstabdichtung beitragen.

Selbstabdichtung von Störungen und Rissen wird durch empirische Beobachtungen in oberflächigen Aufschlüssen, Versuche im Felslabor und Literaturstudien evaluiert und zur Lithologie in Beziehung gesetzt (Bock et al. 2009). Pelite haben ein hohes Potenzial zur Selbstabdichtung, sofern Randbedingungen hinsichtlich des Spannungsverhältnisses erfüllt sind (Bock et al. 2009). Nach Angaben der Nagra ist Selbstabdichtung für „homogene“ Gesteine mit „Tongehalten“ > 25% zu erwarten (Nagra-KNE 2009).

4.6.2 Grundlagen zur Bewertung der Selbstabdichtung

Selbstabdichtung ist in der Kohlenwasserstoff-Exploration von grosser Bedeutung und dementsprechend eingehend untersucht (z.B. Koestler & Hunsdale 2002). Mit der Evaluation von Tonsteinen als Wirtgesteine für die Einlagerung radioaktiver Abfälle wurden weitere Studien durchgeführt und das Verständnis über die Prozesse bei der Selbstabdichtung ist gewachsen. Genetische Überlegungen und theoretische Ansätze zu Selbstabdichtung und 'cross formational flow' fokussieren vornehmlich auf Erklärung der jeweiligen empirischen Daten. Theoretische Modelle mit grossem Vorhersage-Potenzial sind rar.

Für die hier durchgeführte Evaluation wurden Daten jurassischer Gesteine unter der Nordsee herangezogen. Selbstabdichtung wird dadurch gefördert, dass bei mehr als 1 km Überlagerung Korn-Zerbrechen als wichtiger Prozess für das Entstehen von Belägen auf Störungen anzusehen ist (Jolley et al. 2007). Bei Gesteinen mit > 25% Tongehalt (Ton = Fraktion < 2 µm) und Versenkungstiefen > 1 km herrscht mechanische Kompaktion vor, bei geringeren Tongehalten hingegen chemische (Fisher & Knipe 2001). Unreine Sandsteine mit Tongehalten von weniger als 15% zeigen keine Reduktion der Permeabilität von Störungen im Vergleich zum Ursprungsgestein. Störungen in unreinen Sandsteinen mit 15 bis 40% Ton-Anteil weisen bei Überlagerung von > 1 km eine signifikante Kompaktion des Belags und Abnahme der Permeabilität auf (Fisher & Knipe 2001). Demgegenüber zeigen empirische Daten von Jolley et al. (2007), dass schon bei Tongehalten knapp über 25 % eine signifikante Verringerung der Permeabilität von Störungen auftritt. Übersteigt der Tongehalt 40%, ist die Durchlässigkeit von Störungen sehr gering (Fisher & Knipe 2001). Entscheidend ist, ob sich im Bewegungsbereich ein Phyllosilikat-Gerüst bildet; wenn ein Phyllosilikat-Gerüst vorhanden ist, dann ist die Transmissivität im Störungsbereich um bis zu 6 Grössenordnungen geringer als die des ursprünglichen Sandsteins (Fisher & Knipe 2001). Unabhängig vom Grenzwert des Tongehalts, oberhalb dessen eine deutliche Abnahme der Transmissivität von Störungen auftritt, zeigen alle genannten Autoren, dass die beschriebenen Effekte mit zunehmender Überlagerung stärker werden.

Für grössere, seismisch erkennbare Störungen ist ein kontinuierlicher Belag mit feinkörnigem Material zu erwarten, wenn das Verhältnis von Versatz zu Tonstein-Schichtmächtigkeit (SSF Shale Smear Factor; Færseth 2006) ≤ 4 ist, ab SSF-Werten von 4 bis 6 wird der Belag diskontinuierlich. Für kleinere Störungen ist ein feinkörniger Belag auch bei höheren SSF-Werten vorhanden, für SSF = 1 bis 50 wird ein kontinuierlicher Belag erwartet, aber sein Vorhandensein ist nicht mit Sicherheit vorhersagbar (Færseth 2006).

Der Zeitpunkt der Bildung von Störungen scheint von erheblicher Bedeutung zu sein. Bilden sich die Störungen während der Versenkung oder bei nahezu maximaler Versenkung, gelten die oben beschriebenen Beobachtungen. Demgegenüber zeigen junge, reaktivierte oder bei Inversion eines Sedimentbeckens entstandene Verwerfungen generell eine Tendenz zur Erhöhung der Permeabilität (Fisher & Knipe 2001).

Der Austritt von Kohlenwasserstoffen an der Erdoberfläche durch pelitische Sedimente hindurch ist in zahlreichen Studien beschrieben, wobei mehrere Hunderte von Metern an Tonsteinen durchquert werden (z.B. Ölbach bei Altkirch im südlichen Rheingraben;

Vonderschmitt 1942). Diese Austritte dokumentieren, dass Selbstabdichtung von Tonsteinen nicht zwangsläufig stattfindet. Störungen fungieren demnach auch als Bahnen für Gas- und Flüssigkeitstransport ('cross-formational flow'; z.B. Verweij 1993). Bewegung von Flüssigkeiten und Gasen entlang von Störungen sind nur schwer vorherzusagen, da ein Wechsel zwischen abdichtendem und durchlässigem Modus auftreten kann, etwa bei Erhöhung des Porendrucks – auch durch Gas (Haney et al. 2005; Wiprut & Zoback 2000). Übersteigt der Porendruck den erforderlichen Kapillarinjektionsdruck, werden selbstabgedichtete Störungen permeabel (Fisher et al. 2001).

In diesem Zusammenhang sind die längs des Alpennordrandes verschiedenenorts beobachteten Gasaustritte wichtig (Wyss 2001); die Gaswegsamkeit geht häufig mit einer ausgeprägten Zerklüftung einher. Inwieweit diese Gasaustritte auf eine erhöhte Gas- und Wasserdurchlässigkeit weisen, bleibt umstritten, da die Herkunft der Gase – vor Ort gebildet oder aus grösseren Tiefen aufgestiegen – bisher nicht eindeutig ermittelt wurde. Gasaustritte aus der Palfris-Formation im Selisbergtunnel dauern schon über Jahre an.

Neben Flüssigkeits- und Porendruck ist der Spannungszustand von grossem Einfluss. Störungen unter kritischen Spannungszuständen (in Bezug auf das Coulomb'sche Bruchkriterium) sind in der Regel permeabler als solche, die Spannungsverhältnisse weit unterhalb eines entsprechenden Reibungskoeffizienten aufweisen (Barton et al. 1995). Die kritischen Spannungszustände für abdichtende und permeable Störungen sind entsprechend auch von der Orientierung der Bruchfläche und den Porenwasserdrücken abhängig (z.B. Wiprut & Zoback 2000). Entsprechende Gebiete sind daher für ein Lager radioaktiver Abfälle weniger geeignet.

4.6.3 Beurteilung der Selbstabdichtung durch die KNE

Im augenblicklichen Verfahrenabschnitt ist die Datengrundlage bezüglich der Selbstabdichtung der bevorzugten Wirtgesteine ausreichend. Die noch offenen wichtigen Fragen zu den verschiedenen, oben genannten Aspekten stellen nicht in Frage, dass Tonsteine ein hohes Potenzial zur Selbstabdichtung haben und daher als Wirtgesteine geeignet sind. Das gilt für die Gesteine der Opalinuston-Formation und die inkompetenten Abschnitte der Gesteine des „Braunen Doggers“, nicht aber für die sehr kalkigen Effinger Schichten.

Die Helvetischen Mergel sind stark kompaktiert und diagenetisch hoch beansprucht. Daher ist das Selbstabdichtungsvermögen geringer als das der Tongesteine des Tafel- und Faltenjuras (s.o.). Da die Helvetischen Mergel tektonisch beansprucht wurden, sind Störungszonen und Klüfte angelegt, auch wenn sie heute verschlossen sind. Diese weisen nichtsdestotrotz das Potenzial zur Öffnung auf, wie Gasaustritte im Seelisberg-Tunnel zeigen (s.o.). Daher werden die Helvetischen Mergel hinsichtlich der Wirksamkeit ihres Selbstabdichtungsvermögens als weniger günstig beurteilt.

Die vollständige Selbstabdichtung von Störungen mag suggerieren, dass sie nur wenig Einfluss auf die Standortwahl haben sollten. Selbstabdichtung von Rissen und Störungen muss aber nicht zwangsweise stattfinden, da die Rahmenbedingungen einen erheblichen Einfluss haben. Daher ist nicht nur das Verständnis für die Selbstabdichtung wichtig, sondern es sind auch die Randbedingungen zu evaluieren, unter denen Selbstabdichtung nicht stattfindet. Umfassende Kenntnis der Prozesse und Faktoren, die den Wechsel von selbstabdichtend zu durchlässig bestimmen, sind für Sicherheitsüberlegungen in Etappe 2 wichtig.

Aufgrund einer möglichen Reaktivierung und der damit verbundenen, möglicherweise erhöhten Transmissivität ist die KNE der Meinung, dass Standorte in tektonisch möglichst einfach gebauten, ruhigen Regionen von der Nagra bevorzugt werden sollten. Die Wahl des Stand-

orts Wellenberg korrespondiert nicht mit diesen Anforderungen (siehe Ausführungen in Abschnitt 5).

4.7 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Mächtigkeit

4.7.1 Ableitung der Mindestanforderungen

Bei den räumlichen Anforderungen an ein Wirtgestein ist neben der lateralen Ausdehnung und der Verbreitung in geeigneter Tiefenlage dessen Mächtigkeit zu berücksichtigen (NAB 07-35, S. 25). Aus früheren Untersuchungen und den orientierenden Sicherheitsbetrachtungen (Abschnitt 2.2) leitet die Nagra eine Mindestanforderung von ≥ 100 m primärer Mächtigkeit für Sedimentgesteine oder ≥ 50 m ab, wenn eine tektonische, mit Verschuppung oder Aufschiebungen verbundene Schichtverdickung (Akkumulation) vorliegt, sowie ≥ 200 m für das Kristallin (inkl. grünschieferfazielle und stärker metamorphe Flysche und Bündnerschiefer).

Verschärfte Anforderungen an die Mächtigkeit der Wirtgesteine werden erst in Schritt 5 des Auswahlverfahrens, bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen, gestellt.

4.7.2 Grundlagen der Bewertung der Mächtigkeit

Der Indikator *Mächtigkeit* ist eng gekoppelt mit den Indikatoren *Länge der Freisetzungspfade* und *Variabilität der Gesteinseigenschaften*. Die wirksame Mächtigkeit eines Wirtgesteins kann durch über- und/oder untergelagernde Rahmengesteine vergrößert sein. Demgegenüber wird die effektive Mächtigkeit durch mehrere Meter mächtige Intervalle aus vorherrschend kompetenten Gesteinen (Sandstein- oder Kalkbänke) vermindert, da sie die Länge der Freisetzungspfade stark reduzieren.

4.7.3 Beurteilung der Mächtigkeit durch die KNE

Die Gesteine der Opalinuston-Formation genügen den Verschärften Anforderungen an die Mächtigkeit (> 100 m) und verfügen zudem über Rahmengesteine.

Die Gesteine des sogenannten „Braunen Doggers“ bestehen aus einer Abfolge von Tonsteinen und Mergeln mit darin eingeschalteten, gemäss den bisherigen Befunden wenig mächtigen Karbonatbänken und Sandsteinen. Deren regionale Verbreitung ist noch nicht ausreichend geklärt. Die Mächtigkeit des „Braunen Doggers“ beträgt im Bereich der Bohrungen Weiach, Benken und Herdern-1 zwischen 77 und 88 m (NTB 08-04, S. 146) und im Gebiet Tengen-Wiechs ca. 117 – 143 m (Hofmann et al. 2002). Da als Rahmengesteine Effinger Schichten und Opalinuston vorhanden sind, sind diese Schichten gemäss den bisherigen Erkenntnissen als potenzielles Wirtgestein für ein SMA-Lager einzustufen.

Die Mächtigkeit der tonigeren Effinger Schichten beträgt wegen der über grössere Distanz nachgewiesenen Gerstenhübel-Schichten, der „Unteren Kalkbankabfolge“ und der „Oberen Kalkbankabfolge“ oft deutlich unter 100 m (NTB 08-04, S. 159, Fig. 4.3–15). Auch die Nagra geht davon aus, dass die eingeschalteten Kalkbankabfolgen „klar reduzierte Barriereigenschaften“ aufweisen (NTB 08-03, S. 168). Zudem verfügen die Effinger Schichten über keine Rahmengesteine. Folglich ist für diese Gesteine die Erfüllung der Mindestanforderung sehr kritisch zu hinterfragen.

Die Mergel-Formationen des Helvetikums sind generell schwieriger zu explorieren als die tektonisch einfacher gebauten Standortgebiete im ausseralpinen Bereich und wurden daher

nur punktuell untersucht. Im Gebiet des Wellenbergs stellen diese Mergel eine ausserordentlich mächtige, tektonische Akkumulation dar, die von zahlreichen Brüchen und Aufschiebungen durchsetzt ist. Bezüglich der Mächtigkeit ist diese Standortregion für ein SMA-Lager aus Sicht der KNE mit recht hoher Wahrscheinlichkeit geeignet. Grosse Fragen ergeben sich aber punkto Tektonisierung (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.8 Evaluation der bevorzugten Wirtgesteine im Hinblick auf Verkarstung

4.8.1 Ableitung der Mindestanforderungen

Lösungsprozesse können in Gesteinen zur Bildung neuer, hoch durchlässiger Flieswege führen, die als Freisetzungspfade für Radionuklide fungieren können. Ein potenzielles Wirtgestein darf gemäss Mindestanforderung kein erhebliches Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten durch Verkarstung aufweisen. Verschärfte Anforderungen wurden nicht formuliert (NTB 08-05, S. A1-98 ff).

4.8.2 Grundlagen der Bewertung der Verkarstung

Das Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeit ergibt sich aus dem Anteil und der Verteilung löslicher Mineralphasen. Die Verkarstungsanfälligkeit von Karbonatgesteinen und Evaporiten nimmt wie folgt zu: Dolomit (kaum verkarstet) < Kieselkalk < Mergelkalk < Kalkstein < Gips < Salz. Auch sandsteinreiche Formationen können, wenn sie karbonatische Zwischenlagen oder ein kalkiges Bindemittel aufweisen, verkarstet sein (z.B. Siebenhengste-Hohgant-Höhlensystem).

Bei kalkigen Formationen, wie etwa den Effinger Schichten, wird die Verkarstung durch Oberflächennähe, starke hydraulische Gradienten und ausgeprägte Topographie stark gefördert. Färbversuche im Faltenjura zeigen einen raschen Wasserfluss quer durch die Effinger Schichten hindurch. Zudem sind hier grössere, begehbare Karsthöhlen innerhalb der Effinger Schichten ausgebildet (NAB 07-28, Anhang A-5). Der Umkehrschluss, dass in flachen Gebieten mit kleinen Gradienten keine Verkarstung eintritt, ist nicht immer zutreffend. Grossräumige Wasserzirkulation, Siphoneffekte und Mischungskorrosion können unter Umständen auch hier zu Verkarstung führen. Ob es sich bei den beschriebenen Beobachtungen um oberflächennahe Effekte handelt (oberste 200 m), ist aufgrund der spärlichen Bohrdaten aus tieferen Bereichen nicht abzuschätzen (NTB 88-25, S. 106). Eine Dokumentation zur Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten ist im NAB 07-28 zu finden.

4.8.3 Beurteilung der Verkarstung durch die KNE

Bei den potenziell möglichen Wirtgesteinen erfüllen gemäss NTB 08-03 (Tab. 4.2-1, 4.3-1) die Karbonatgesteinsformationen verschiedenen Alters, die Evaporit-Abfolgen in den Alpen, die Effinger Schichten und Renggeri-Ton/Terrain à Chailles die Mindestanforderungen nicht oder nur teilweise. Auch die Evaporit-Abfolgen im Tafeljura und in der Subjurasischen Zone dürften entgegen der Angabe der Nagra zumindest teilweise ein erhebliches Verkarstungspotenzial aufweisen.

Die Effinger Schichten im östlichen Tafeljura und in der östlichen Subjurasischen Zone haben infolge des hohen Kalkanteils, der bei mehr als der Hälfte der Schichtfolge mehr als 75% beträgt, ein langfristiges Verkarstungspotenzial, da auch in Gebieten mit flach lagernden Schichten und kleinen Gradienten Verkarstung nicht von vornherein ausgeschlossen werden kann (grossräumige Wasserzirkulation, Siphoneffekte und Mischungskorrosion). Es liegen

gesamthaft noch zu wenige Daten dazu vor. Bei weiteren Untersuchungen in Etappe 2 ist auch auf kleinräumige Lösungsphänomene zu achten. In den Kalken des Geissberg-Members direkt oberhalb der Effinger Schichten gibt es klare Hinweise auf Verkarstung (Beobachtung an Kernen der Bohrung Oftringen). In den Effinger Schichten selbst waren dagegen keine eindeutigen Mikrokarstphänomene festzustellen. Es treten jedoch verschiedentlich Kalzitklüfte mit vermutlich jüngeren Hohlraumfüllungen auf.

Für den Opalinuston und den „Braunen Dogger“ kann die Bildung neuer Wasserwegsamkeiten infolge Verkarstung ausgeschlossen werden.

5 Bewertung der vorgeschlagenen Standortgebiete

5.1 Vorgehen der Nagra

Generelles Vorgehen der Nagra

Bei der Identifikation geeigneter Konfigurationen (Schritt 5 des SGT) geht es darum, in den ausgewählten Grossräumen und den darin evaluierten bevorzugten Wirtgesteinen günstige Standortgebiete für ein SMA- oder HAA-Lager zu lokalisieren. Dazu werden von der Nagra zunächst potenziell mögliche und dann bevorzugte Bereiche identifiziert. Ausgehend von einer gesamtheitlichen Bewertung der bevorzugten Bereiche (NTB 08-03, Tab. C.4-1 bis C.4-12) wird anschliessend eine Prioritätensetzung vorgenommen (NTB 08-03, Tab. C.5-1 u. C.5-2). Zum Schluss erfolgt die Abgrenzung und Bewertung der einzelnen Standortgebiete.

Auswahl potenziell möglicher Bereiche anhand von Mindestanforderungen

Teilschritt 1: Für jedes der aus Schritt 4 resultierenden bevorzugten Wirtgesteine (Opalinuston, „Brauner Dogger“, Effinger Schichten und Mergel-Formationen des Helvetikums) wird untersucht, wo die Mindestanforderungen bezüglich der minimalen und maximalen Tiefenlage, der Mächtigkeit, der flächenhaften Erosion und der Betriebs- und Langzeitsicherheit erfüllt sind. Die Nagra nimmt dabei durch die vorgegebene maximale Tiefenlage bedingte bautechnische Erschwernisse (inkl. resultierender Zeitaufwand und Kosten) in Kauf (NTB 08-03, S. 184). Das Ergebnis wird in Form von Verbreitungskarten dargestellt, wobei zwischen

- flächenhafter Verbreitung (Opalinuston, „Brauner Dogger“, Effinger Schichten) mit einheitlicher maximaler Tiefenlage und
- lokaler Verbreitung (Mergel-Formationen des Helvetikums) mit standortspezifischer Beurteilung der maximalen Tiefenlage

unterschieden wird. Diese Unterscheidung wird gemacht, weil die Mergel-Formationen des Helvetikums bei der Deckenbildung als Gleithorizonte fungierten und demzufolge einerseits lokal stark ausgedünnt, andererseits in tektonischen Akkumulationen angehäuft sind (NTB 08-03, S. 154) und daher mehrheitlich eine komplizierte Geometrie aufweisen.

Teilschritt 2: Bei den Wirtgesteinen mit flächenhafter Verbreitung wird dem Einflussbereich von regionalen Störzonen durch Vorgabe eines Mindestabstand ausgewichen. Für die Wirtgesteine mit lokaler Verbreitung (akkumulierte Mergel-Formationen) werden keine Mindestabstände gefordert.

Teilschritt 3: Unterhalb übertiefer Felsrinnen mit einer Quartärmächtigkeit von 100 m oder mehr hat die Nagra einen einzuhaltenden Mindestabstand definiert, damit selbst bei einer vollständigen Ausräumung einer Rinne durch zukünftige Gletscher eine ausreichende Überdeckung gewährleistet bleibt.

Die Teilschritte 2 und 3 führen zu einer ersten Abgrenzung von Teilflächen innerhalb der Verbreitungsgebiete. Mit dem Indikator *Laterale Ausdehnung* wird dazu überprüft, welche dieser Teilflächen wegen ungenügender Grösse oder ungünstiger Form auszuschliessen sind.

Teilschritt 4: In diesem Teilschritt werden sechs zusätzliche Mindestanforderungen berücksichtigt: Sättigungsverhältnisse, Verkarstungspotenzial (nur bei den Effinger Schichten relevant), Nutzungskonflikte (u.a. Steinsalz, Erdwärme), Abstand zu Mineralquellen und Thermen, ungenügende Explorierbarkeit und Gasvorkommen oder Gaslagerstätten im Wirtgestein.

Teilschritt 5: Teilschritt 4 führt zu einer weiteren Beschneidung der Teilflächen. Mit dem Indikator *Laterale Ausdehnung* wird deshalb nochmals überprüft, welche dieser Flächen wegen ungenügender Grösse oder ungünstiger Form auszuschliessen sind.

Es resultiert eine Verbreitungskarte der „potenziell möglichen Bereiche“ innerhalb der bevorzugten Wirtgesteine, die alle Mindestanforderungen erfüllen und auch bezüglich Form und Grösse für einen Lagerstandort geeignet sind.

Auswahl bevorzugter Bereiche anhand von Verschärften Anforderungen

Die Auswahl bevorzugter Bereiche hat zum Ziel, sicherheitsmässig gleichwertige Varianten zu bestimmen und den Einfluss von grösseren, für die Sicherheit relevanten Ungewissheiten zu reduzieren. Je nach Wirtgestein werden zusätzlich Verschärfte Anforderungen hinsichtlich *Mächtigkeit, Tiefenlage unter Terrain, Tiefenlage unter Oberfläche Fels* und *Platzangebot untertage* sowie in Bezug auf die tektonische Überprägung und das tektonischen Regime gestellt. Ungünstigen, neotektonisch aktiven Zonen sowie Zonen mit Anzeichen für eine erhöhte kleinräumige Zergliederung (NTB 08-03, S. 192) wird ausgewichen. Bei den tektonischen Akkumulationen in den Alpen unterbleibt eine detailliertere Evaluation der tektonischen Überprägung und des tektonischen Regimes (NTB 08-03, Fussnote S. 191).

Die Anwendung der Verschärften Anforderungen führt zu einer weiteren Beschneidung der Teilflächen. Mit dem Indikator *Laterale Ausdehnung* wird deshalb wiederum geprüft, welche dieser Flächen wegen ungenügender Grösse oder ungünstiger Form zurückzustellen sind. Es resultiert eine Verbreitungskarte der „bevorzugten Bereiche“ innerhalb der bevorzugten Wirtgesteine, die alle Verschärften Anforderungen erfüllen und auch bezüglich Form und Grösse für einen Lagerstandort geeignet sind.

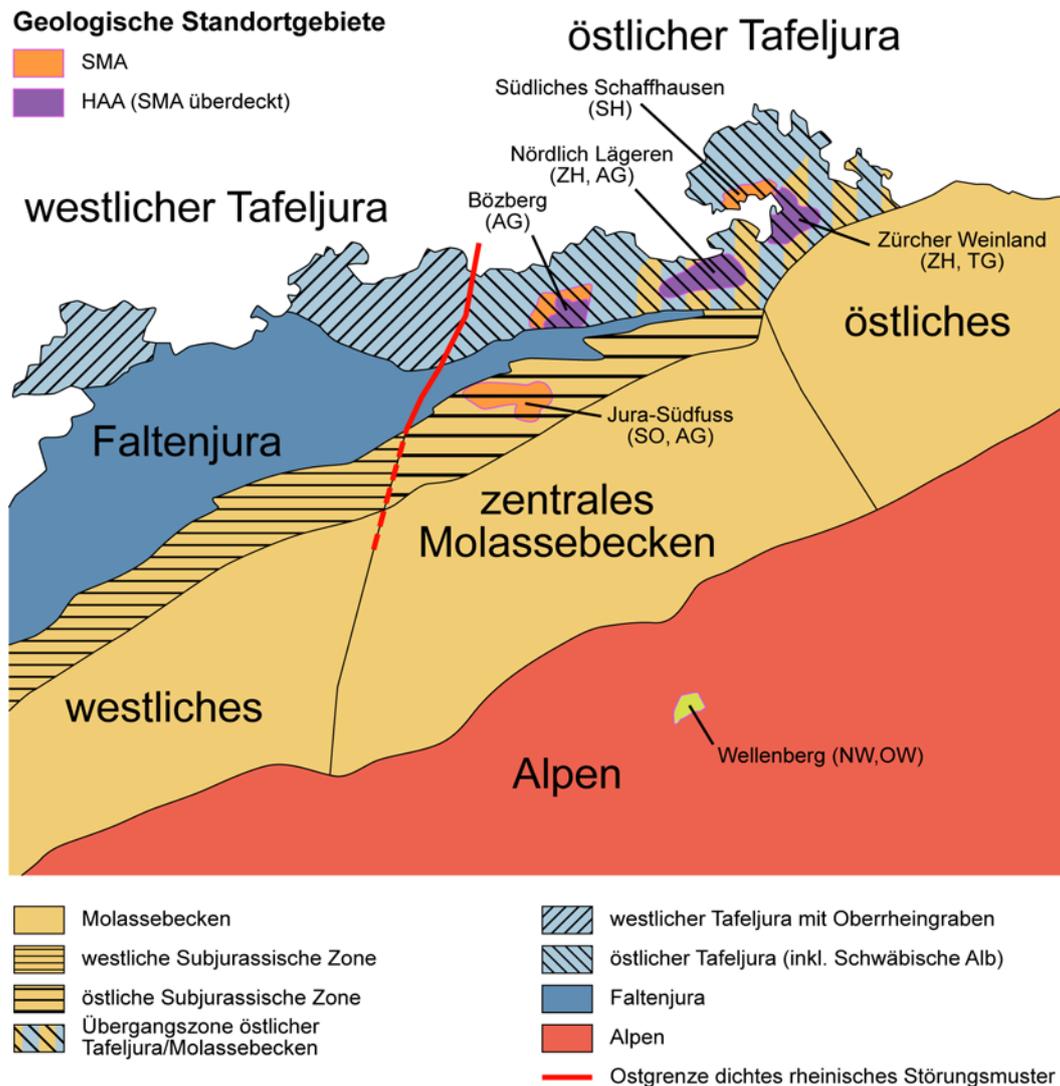
Bewertung und Prioritätensetzung der bevorzugten Bereiche

Die Bewertung erfolgt auf vier hierarchischen Stufen: Bewertung der Indikatoren, der Kriterien, der Kriteriengruppen und eine zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche und der geologischen Standortgebiete (NTB 08-03, S. 193). Dabei wird gemäss Nagra eine SGT-konforme, vierstufige Bewertungsskala sehr günstig (4) - günstig (3) - bedingt günstig (2) - ungünstig (1) verwendet (NTB 08-03, S. 193). Die Gesamtbewertung basiert auf wiederholten Mittelwertbildungen. Die arithmetische Aggregation erfolgt mit gleicher Gewichtung der verwendeten Indikatoren und Kriterien. Die arithmetische Aggregation der Bewertung der verschiedenen Kriteriengruppen zu einer gesamtheitlichen Bewertung wird dagegen noch durch eine qualitative Bewertung (Prioritätensetzung) ergänzt (NTB 08-03, S. 193 und Tab. 5.6-1/2).

Es resultieren für jedes potenzielle Wirtgestein ein oder mehrere „prioritäre Bereiche“, welche die Grundlage für die Abgrenzung der geologischen Standortgebiete bilden, sowie „weitere bevorzugte Bereiche“, welche in die Standortgebiete integriert werden können (NTB 08-03, Fig. 5.6-1/2).

Festlegung von Vorschlägen für Standortgebiete

Bei der Abgrenzung der geologischen Standortgebiete werden neben den prioritären Bereichen zusätzlich auch überlappende Bereiche mit anderem Wirtgestein oder in der Nähe liegende Bereiche mit gleichem oder anderem Wirtgestein einbezogen (NTB 08-09, S. 331). Dabei wird den Ungewissheiten in den bereichsbegrenzenden Daten speziell Rechnung getragen. Die Nagra schlägt abschliessend die folgenden Standortgebiete (bzw. Prioritäre und Weitere Bereiche) vor (Figur 5-1):



Figur 5-1: Von der Nagra vorgeschlagene Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager

SMA-Lager (NTB 08-03, S. 331): Südliches Schaffhausen (SMA-OPA-TJ-N); Zürcher Weinland (SMA-OPA-TJ-S & SMA-BD-TJ); Nördlich Lägeren (SMA-OPA-VZ-O & SMA-BD-VZ-O & SMA-BD-VZ-W); Bözberg (SMA-OPA-VZ-W); Jura-Südfuss (SMA-OPA-SJ-O & SMA-EFF-SJ-O); Wellenberg (SMA-MG-HEL).

HAA-Lager (NTB 08-03, S. 332): Zürcher Weinland (HAA-OPA-TJ); Nördlich Lägeren (HAA-OPA-VZ-O & HAA-OPA-VZ-M); Bözberg (HAA-OPA-VZ-W).

Generelles zur Bewertung durch die KNE (Tabellen auf S. 74 bis 90)

Die Bewertung der einzelnen Indikatoren mit Punkten ist aus Gründen der Aggregation der Bewertungen und des Vergleichs mit NTB 08-03 unumgänglich. Die scheinbare Genauigkeit dieser Werte darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass ein gewisser Ermessensspielraum besteht. Generell sind bei der Bewertung der einzelnen Indikatoren erst Differenzen von > 0.5 bedeutungsvoll bzw. signifikant. Dies muss auch bei der Gesamtbewertung (Gesamtsumme, Tabellen 5-17 bis 5-21) gelten, da sich unterschiedliche Bewertungen einzelner Indikatoren unter Umständen gegenseitig aufheben.

5.2 Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die hydrogeologischen Verhältnisse

5.2.1 Anwendung der Anforderungen an die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Nagra

Die gemäss SGT (NAB 07-35, S. 28/29 und NTB 08-03, Tab. 5.1–1) bei der Evaluation berücksichtigten „hydrogeologischen“ Indikatoren und die damit verknüpften Anforderungen sind in Tabelle 5-1 aufgelistet.

Die Beurteilung dieser Indikatoren durch die Nagra ist für das SMA-Lager aus den Tabellen 5-2 und 5-4, und für das HAA-Lager aus den Tabellen 5-3 und 5-5. ersichtlich. Diese Bewertung ist auf zahlreiche frühere NTB's und NIB's abgestützt, die im Rahmen der Erforschung der zentralen Nordschweiz im Allgemeinen und dem Projekt Opalinuston zwischen der Lägern und dem Zürcher Weinland (z.B. NTB 02-03 und darin aufgeführte Berichte) sowie dem Projekt Wellenberg (NTB 94-06) im Speziellen erstellt wurden.

Mit dem Indikator *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation* fasst die Nagra verschiedene physikalische und isotopen-geochemische Fakten zusammen, die auf geringen Stofftransport auf langen Zeitskalen schliessen lassen: abnorme Porendrucke, hydrogeochemische Zonierung und Grundwasserstockwerke, Einschluss alter Porenwässer, in-situ Tracerprofile, u.a.m.

Besonders Tracerprofile sind zur Beurteilung des Vermögens von Gesteinen zur Langzeitisolation äusserst wichtig. Isotopen-geochemische in-situ Daten erfassen die tatsächlich wirksamen Transportprozesse (Diffusion, Advektion) und deren relevante Zeit- und Raumskalen. Sie erlauben, die Radionuklidenausbreitung unter natürlichen Bedingungen standortspezifisch in den möglichen Wirt- und Rahmengesteinen physikalisch und biogeochemisch angemessen und modellhaft zuverlässig zu beschreiben.

Tabelle 5-1: Übersicht über die mit der Hydrogeologie in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikator	Anmerkung
Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.2 Hydraulische Barrierenwirkung	<i>Hydraulische Durchlässigkeit</i> (NTB 08-05, S. A1-34)	MA(SMA): $K_v \leq 10^{-9}$ m/s (für AZ) und $K_v \leq 10^{-10}$ m/s (für RZ) MA(HAA): $K_v \leq 10^{-10}$ m/s
			VA(SMA): $K_h \leq 10^{-9}$ m/s (für AZ) und $K_h \leq 10^{-10}$ m/s (für RZ) VA(HAA): $K_h \leq 10^{-10}$ m/s
			Bei fehlenden hydraulischen Testdaten erfolgt eine Abschätzung anhand des Tonmineralgehalts ($\geq 25\%$) oder genereller Erfahrungen.
	1.4 Freisetzungspfade	<i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion</i> (NTB 08-05, S. A1-10)	MA(SMA): ≥ 200 m u.T. MA(HHA): ≥ 400 m u.T.
VA(SMA)-OPA: ≥ 200 m bzw. ≥ 300 m u.T. VA(SMA)-BD+EFF: ≥ 300 m u.T. VA(SMA)-MG-HEL: ≥ 400 m u.T. VA(HAA)-OPA: ≥ 400 m bzw. ≥ 500 m u.T.			
		<i>Grundwasserstockwerke</i> (NTB 08-05, S. A1-38)	Beurteilung der Barrierenwirkung des Wirtgesteins.
		<i>Länge der Freisetzungspfade</i> (NTB 08-05, S. A1-74) <i>Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade</i> (NTB 08-05, S. A1-78)	Beurteilung der vertikalen Distanz von den Lagerkammern zur Ober- und Untergrenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung einer möglichen Radionuklidfreisetzung entlang höher durchlässiger Schichten der Rahmengesteine (NTB 08-05, S. A1-75). Dies beinhaltet nach Auffassung der KNE auch die Distanz zum Vorfluter.
Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	<i>Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation</i> (NTB 08-05, S. A1-145)	Einschluss alter Porenwässer, hydrochemische Zonierung, Tracerprofile, anormale hydraulische Drücke.
Bautechnische Eignung	4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	<i>Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen</i> (NTB 08-05, S. A1-151)	Aus hydrogeologischer Sicht wird vor allem das Karst- und Wassereintrichrisiko beim Bau sowie die Gasführung beurteilt.

K_v , K_h = vertikale und horizontale Durchlässigkeit, RZ, AZ = Referenz-Zuteilung und alternative Zuteilung der Abfälle, OPA = Opalinuston, EFF = Effinger Schichten, BD = „Brauner Dogger“, MG-HEL = Mergel-Formationen des Helvetikums

5.2.2 Grundlagen zur Bewertung der hydrogeologischen Verhältnisse

Indikator *Hydraulische Durchlässigkeit*

Dieser Indikator wird hier vor allem in Beziehung zur spezifischen tektonischen Überprägung im jeweiligen Standortgebiet gebracht. Es wird die gleiche Bewertungsskala wie bei der Beurteilung der Wirtgesteine verwendet (siehe Abschnitte 2.2 und 4.3). Die KNE-Beurteilung der Durchlässigkeiten der bevorzugten Wirtgesteine wurde in Abschnitt 4.3.3 beschrieben.

Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion*

Dekompaktionseffekte können eine Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit im Wirtgestein bewirken und damit die Durchflussrate und die Radionuklidfreisetzungsraten aus dem Lagergebiet erhöhen. Die Erhöhung der Durchlässigkeit hängt u.a. vom Gesteinstyp, der lokalen Entspannung (z.B. durch Massenbewegungen in Hanglagen) sowie dem Grad der grossräumigen Hebung/Erosion ab (siehe Abschnitte 2.2.2 und 4.3.3). Die von der Nagra den Mindestanforderungen zugrunde gelegten Tiefenangaben basieren auf den in Bohrlöchern beobachteten Durchlässigkeitsverteilungen.

Indikator *Grundwasserstockwerke*

Das Vorhandensein oder das Fehlen von getrennten Grundwasserstockwerken wird als unabhängiger Hinweis auf die hydraulische Barrierenwirkung des Wirtgesteins sowie auf die vorherrschenden Transportprozesse benutzt. Sind über dem ausgewählten Wirtgesteinsbereich oben und unten hydraulisch getrennte Grundwasserleiter (Aquifere) vorhanden, ist dies ein Hinweis auf eine geringe vertikale Durchlässigkeit des gewählten Bereichs. Umgekehrt werden auch alle Hinweise geprüft, die auf eine mögliche hydraulische Verbindung zwischen solchen Aquiferen hinweisen („cross-formational flow“) und somit die potenziellen Freisetzungspfade verkürzen und damit die Freisetzungsraten erhöhen könnten (z.B. durch Advektion). Demzufolge wird bei der Bewertung ein erwarteter ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau als „günstig“, eine mögliche Verbindung zwischen denselben als „ungünstig“ oder „bedingt günstig“ eingestuft.

Indikator *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation*

Zur Zeit liegen entsprechende Daten nur sehr vereinzelt vor. Dies gilt sowohl für mögliche Wirtgesteine als für mögliche Standortgebiete. Belastbare Tracer-Datensätze sind insbesondere nur für den Opalinuston und seine Rahmengesteine in Benken und am Mont Terri und für die Effinger Schichten in Oftringen bekannt. Abnorme Porendrucke und alte Porenwässer sind auch für den Wellenberg bekannt, jedoch sind diese unabhängigen Evidenzen weniger aussagekräftig respektive belastbar als jene des Opalinustons bei Benken.

Indikatoren *Länge der Freisetzungspfade und Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade*

Neben der Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade (entlang Störungen, Klüften, Kalkbänken) wird auch die Länge der Freisetzungspfade in Betracht gezogen, d.h. die vorhandene Überdeckung durch Rahmengesteine (NTB 08-03, Tab. 5.1-1), inkl. Distanz zu potenziellen Exfiltrationsgebieten. Zusätzlich werden auch die Ausdehnung der Lagerkam

mern (inkl. der baubedingten Auflockerungszone) und das Vorhandensein ausgeprägter horizontaler potenzieller Fliesspfade berücksichtigt.

Die im Rahmen des Schritts 1 des SGT publizierten NTB-Berichte beschreiben die vorgeschlagenen Standortgebiete anhand von detaillierten geologischen Karten, welche die prognostizierte Ausdehnung der gewählten Wirtgesteine wiedergeben, sowie mit geologischen Übersichtsprofilen, die auf Seismik und Bohrlochdaten basieren. Eine detaillierte Darstellung der Hydrogeologie liegt für die Standortgebiete nicht vor.

Einen guten Überblick über die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse der Nordschweiz ist jedoch im NTB 02-03 (Synthesebericht zum Projekt Opalinuston: S. 103-122 und 381-425) enthalten. Neben einer Übersicht über alle Aquifere der Nordschweiz finden sich darin auch detaillierte Beschreibungen der K-Werte und der gemessenen und modellierten Druckhöhen (hydraulischen Potenziale) der verschiedenen Formationen. Dies erlaubt, sich ein gutes Bild über mögliche Fliesspfade innerhalb der Wirtgesteine und der umgebenden Aquifere zu machen und die Distanzen zu den nächstgelegenen Aquiferen und Vorflutern oder Exfiltrationsgebieten abzuschätzen.

Für das Zürcher Weinland und das Gebiet Nördlich Lägeren liegen für folgende Einheiten interpolierte, respektive modellierte Isopotenzialkarten vor:

- 1) Überliegender kalkig ausgebildeter Malm-Aquifer (Vorfluter und potenzielles Exfiltrationsgebiet: Rhein)
- 2) Wedelsandstein des Wirtgesteins „Brauner Dogger“ (Vorfluter: Rhein)
- 3) Unterliegender Arietenkalk des Rahmengesteins Lias (Vorfluter: Wutach, Rhein)
- 4) Unterliegender Sandstein-Aquifer des Keuper (Vorfluter: Wutach, Rhein)
- 5) Unterliegender Muschelkalk-Aquifer (Vorfluter: Rhein, evt. Neckar)

Die Modellrechnungen zeigen, dass eine mögliche Exfiltration von Radionukliden in die Aquifere und eine Freisetzung in die Vorflut erst sehr spät in der betrachteten Zeitperiode eines Tiefenlagers eine gewisse Bedeutung erhalten werden. Dies ist durch die erwarteten geringen hydraulischen Gradienten und Durchlässigkeiten in den vorgeschlagenen Wirtgesteinen bedingt.

Für mehrere der vorgeschlagenen Standortgebiete ist auch die Aare ein möglicher Vorfluter (Jura-Südfuss, Bözberg, Nördlich Lägeren). Dazu gibt es jedoch noch keine Detailbetrachtungen in den vorliegenden Nagra-Berichten. Das ENSI hat deshalb die Nagra gebeten, die Sammelprofile der verschiedenen Standorte mit hydrogeologischen Angaben zu ergänzen (Dr. von Moos AG 2009). Diese Angaben standen der KNE als Grundlage für die vorliegende Beurteilung ebenfalls zur Verfügung.

Im Falle des Wellenbergs sind die Grundwasserverhältnisse im Synthesebericht NTB 96-01 detailliert dargestellt und modelliert.

Indikator *Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen*

Aus hydrogeologischer Sicht geht es um die Abschätzung des Karst- und Wassereinbruchrisikos beim Bau der Zugangsbauwerke und um mögliche Erdgaszutritte in die Lagerzone. Es handelt sich nur um eine grobe, generelle Bewertung, da weder die Art der Erschliessung (Zugangsstollen und/oder Schächte) noch die genaue Lage der Portalbereiche zum jetzigen Zeitpunkt festgelegt werden können. Gebiete, in denen die Festgesteine über dem Wirtgestein weder verkarstet noch gasführend sind und in denen kein erhöhtes Wassereinbruchrisiko erwartet werden muss, werden als „sehr günstig“ eingestuft.

5.2.3 Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse durch die KNE

Beurteilung des Vorgehens der Nagra

Das Vorgehen der Nagra bezüglich der Beurteilung der hydrogeologischen Verhältnisse ist SGT-konform. Betrachtet man ihre Bewertung der Kriterien „Hydraulische Barrierenwirkung“ und „Freisetzungspfade“ (NTB 08-03, Tabellen 5.6–1 und C.4-x), so werden alle Bereiche diesbezüglich als „sehr günstig“ oder „günstig“ beurteilt und haben deshalb auf die Gesamtbewertung der vorgeschlagenen Standortgebiete wenig Einfluss. Daher empfiehlt die KNE für Etappe 2, eine differenziertere Beurteilungsmethode anzuwenden.

Bewertung des Indikators *Hydraulische Durchlässigkeit*

Die Standortgebiete mit dem Wirtgestein Opalinuston werden punkto hydraulischer Durchlässigkeit richtigerweise als sehr günstig beurteilt, weil sich sehr gering durchlässige Werte ergeben und ein hoher Anteil an quellfähigen Tonmineralen vorhanden ist.

Die Standortgebiete mit dem Wirtgestein „Brauner Dogger“ sind lithologisch heterogener. Als Fliesswege kommen vor allem Klüfte in den kompetenten Zwischenlagen in Frage. Diese Gebiete sind im Vergleich zum Opalinuston etwas weniger günstig zu bewerten und werden, in Übereinstimmung mit der Nagra, als günstig – sehr günstig taxiert.

Aus hydraulischer Sicht weniger gut zu bewerten sind die Effinger Schichten, da sie sehr kalkig ausgebildet sind. Eine Wasserzirkulation längs der darin eingeschalteten, geklüfteten Kalkbankabfolgen kann anhand der heute verfügbaren, vergleichsweise bescheidenen Datenbasis nicht vollständig ausgeschlossen werden (NTB 08-03, S. 151). Unter Berücksichtigung dieser Aspekte wird die Durchlässigkeit der Effinger Schichten von der KNE lediglich mit bedingt günstig bewertet.

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums mit dem einzigen vorgeschlagenen Standort Wellenberg zeigen die früheren Untersuchungen der Nagra (NTB 94-06) und Figur 4.3–24 in NTB 08-04, dass die tiefen K-Werte ($K < 10^{-10}$ m/s) erst in ca. 550 m Tiefe angetroffen werden, darüber sich jedoch eine tiefgreifende Dekompaktionszone mit deutlich höheren Werten befindet. Wenn das Lager in grösserer Tiefe (> 550 m u.T.) erstellt wird, kann mit einer sehr geringen Durchlässigkeit gerechnet werden. Unter Berücksichtigung der sehr zahlreichen spröden Störungen und möglicher Fremdgesteinsschuppen schätzt die KNE die hydraulische Durchlässigkeit konservativerweise etwas schlechter als die Nagra ein, aber dennoch als günstig.

Bewertung des Indikators *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion (SMA- und HAA-Lager)*

Die Standorte mit dem Wirtgestein Opalinuston werden von der Nagra durchwegs als günstig bis sehr günstig bewertet. Die Bereiche Tafeljura Nord und insbesondere Vorfaltenzone West schneiden leicht schlechter als die übrigen Gebiete ab, da sie eine geringere Überdeckung aufweisen. Die KNE kann dieser Einschätzung folgen.

Die Standortgebiete mit dem Wirtgestein „Brauner Dogger“ und den „Effinger Schichten“ werden von der KNE analog zur Nagra bewertet. Am Standortgebiet Wellenberg ist gemäss den Packertests die Dekompaktion ausgesprochen tiefreichend entwickelt, was vermutlich mit der extremen topographischen und geometrischen Situation der Palfris-Mergel an diesem Standort zu erklären ist (Abschnitt 4.3.3). Da hier trotz tiefer Dekompaktionszone noch ausreichend Platz für ein Lager besteht, erfolgt nur eine moderate Rückstufung der Bewertung dieses Indikators (günstig).

Bewertung des Indikators *Grundwasserstockwerke*

Die Standortgebiete mit dem Wirtgestein Opalinuston werden punkto Grundwasserstockwerke richtigerweise als sehr günstig bis günstig beurteilt. Die Verhältnisse konnten in den Gebieten Tafeljura-Süd (Bohrung Benken) und Vorfaltenzone Ost (Bohrung Weiach) direkt anhand von Bohrresultaten beurteilt werden. Unklar ist, warum das Gebiet Tafeljura-Nord von der Nagra besser als die Gebiete VZ-W, SJ-O und SJ-W eingestuft wird. Die KNE taxiert dieses Gebiet ebenfalls nur mit einer „3“. Auch das Gebiet „Brauner Dogger der Vorfaltenzone West“ (SMA-BD-VZ-W) wird, analog dazu, nur mit einer „3“ bewertet.

Noch weniger günstig in dieser Hinsicht schneiden die Effinger Schichten ab, die direkt unter dem Malmaquifer liegen und über keine Rahmengesteine verfügen. Die KNE beurteilt diese Konstellation als „bedingt günstig“, insbesondere auch im Vergleich zum Opalinuston und zum „Braunen Dogger“, die über gute Rahmengesteine verfügen.

Für die Mergel-Formationen des Helvetikums mit dem vorgeschlagenen Standort Wellenberg zeigen die früheren Untersuchungen der Nagra (NTB 94-06) und Figur 4.3–24 in NTB 08-04, dass unterhalb von 500 m Tiefe alte Na-Cl Wässer zu vermuten sind. Der Bewertung der Nagra kann deshalb zugestimmt werden.

Bewertung des Indikators *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation*

Belastbare Isotopen- und Tracerdaten zeichnen die wenigen Standorte und Bohrungen aus, an denen diese Daten erhoben wurden, und heben sie zur Zeit qualitativ klar gegenüber anderen Standorten und Bohrungen ohne entsprechende Daten ab. Deshalb ist nachzuvollziehen, weshalb die Nagra den Indikator *Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation* im Schritt 1 des Sachplanverfahrens nur qualitativ berücksichtigt.

In den weiteren Schritten wird dieser Indikator sicherheitstechnisch immer wichtiger und ist entsprechend stärker zu gewichten. Darum ist es wichtig, dass in allen Bohrungen, die in den folgenden Etappen des Sachplanverfahrens abgetieft werden, unabhängige Evidenzen zur Langzeitisolation speziell bewertet und entsprechende qualitativ hochstehende isotopen-geochemische Daten aufgenommen und interpretiert werden. Denn nur so lassen sich die Grundlagen zur Beurteilung der Standorte / Gesteine im Hinblick auf die Langzeitsicherheit auf das von Sachplanverfahren geforderte Niveau 'gleichwertiger Optionen' bringen und auf robuste Weise miteinander vergleichen.

Bewertung des Indikators *Länge der Freisetzungspfade*⁶

In den Standortgebieten mit Opalinuston beträgt der Abstand zum liegenden Arietenkalk lediglich 15 – 30 m, zum Muschelkalk-Aquifer ca. 160 – 170 m. Die Distanzen zum Malm-Aquifer im Hangenden sind wegen der überlagernden Rahmengesteine („Brauner Dogger“ und „Effinger Schichten“) vergleichsweise gross. Da bis heute im liegenden Arietenkalk keine Wasserzuflüsse beobachtet wurden, stuft die KNE diese Gebiete als sehr günstig ein.

In den Standortgebieten mit dem Wirtgestein „Brauner Dogger“ stellt der liegende Opalinuston eine 100 m mächtige Barriere dar. Gegen oben bilden die kalkigen Effinger Schichten das Rahmengestein. Im Gebiet Tafeljura (BD-TJ) beträgt deren Mächtigkeit ca. 20 m, im Gebiet Vorfaltenzone-Ost (BD-VZ-O) ca. 60 – 100 m und im Gebiet Vorfaltenzone-West (BD-VZ-W) ca. 90 – 150 m. Die Distanzen zum hangenden Malm-Aquifer sind hier im Vergleich zum Opalinuston bedeutend kürzer. Die KNE taxiert das Gebiet Tafeljura als bedingt günstig und die beiden andern Gebiete als günstig.

⁶ Betrifft kleingeschriebene Zahl in den Tabellen 5-4 u. 5-5

Die Standortgebiete mit Effinger Schichten verfügen gegen oben über keine Rahmengesteine und weisen damit die vergleichsweise kürzesten Transportpfadlängen zum Malm-Aquifer auf. Vergleichbar damit sind die helvetischen Mergel am Wellenberg, die ebenfalls über keine Rahmengesteine mit einem signifikanten Beitrag zur Barrierenwirkung verfügen. Hier muss zudem bedacht werden, dass sich einige der zahlreichen Störzonen zu Wasserfließpfaden entwickeln könnten, die eine mehr oder weniger direkte Verbindung zu den vorgelagerten Kalken der Drusberg-Decke schaffen würden (NTB 96-01, Fig. 7.7–28). Für die KNE bilden die Gebiete mit Effinger Schichten und helvetischen Mergeln deshalb lediglich bedingt günstige Optionen.

Bewertung der Distanz zur Vorflut

Die Nagra berücksichtigt bei der Beurteilung der Freisetzungspfade hauptsächlich den vertikalen Abstand vom Lager zu den hangenden und liegenden Aquiferen und, obwohl im NTB 08-05, S. A1–75 erwähnt, kaum die mögliche Radionuklidfreisetzung in horizontaler Richtung entlang von diesen Aquiferen in die Vorfluter. Die KNE ist der Ansicht, dass dieser Punkt für die diversen Standortgebiete in die globale Beurteilung der Länge der Freisetzungspfade einbezogen werden sollte. Folgende Daten aus den von der Nagra publizierten geologischen Profilen (NTB 08-03 und NTB 08-04) wurden dabei verwendet und dann zusammen mit den Abständen der Wirtgesteine zu den Aquiferen bei der Beurteilung berücksichtigt:

SMA-OPA-TJ-N (Südranden): Der Rhein als mögliches Exfiltrationsgebiet des Malm-Aquifers liegt hier sehr nahe (0-10 km), was von der KNE als bedingt günstig (Note „2.5“) angesehen wird.

SMA-OPA-TJ-S und SMA-BD-TJ sowie HAA-OPA-TJ (Zürcher Weinland): Hier sind Rhein (Distanz zum Malm-Aquifer ca. 2-3 km, zum Wedelsandstein ca. 25 km, zum Sandsteinkeuper ca. 15 km) und Neckar (evtl. Muschelkalkaquifer: Distanz 30 km) mögliche Vorfluter bzw. Exfiltrationsgebiete. Die KNE taxiert diese Konstellation als günstig (Note „3“).

SMA-BD-VZ-O, SMA-BD-VZ-W und SMA-OPA-VZ-O sowie HAA-OPA-VZ-O und HAA-OPA-VZ-M (Nördlich Lägeren): Es herrschen ähnliche Verhältnisse wie im Zürcher Weinland.

SMA-OPA-VZ-W sowie HAA-OPA-VZ-W (Bözberg): Im Osten wird der Malm-Aquifer schon heute vom Aaretal angeschnitten. Im Süden wird die Aare als mögliches Exfiltrationsgebiet durch eine tektonisch komplexe Zone vom Standortgebiet getrennt. In beiden Fällen beträgt die Distanz zum Vorfluter 1 bis 5 km. Die KNE stuft diese Verhältnisse als bedingt günstig (Note „2.5“) ein.

SMA-EFF-SJ-O und SMA-OPA-SJ-O (Jura-Sudfuss) sowie SMA-OPA-SJ-W und SMA-EFF-SJ-W: Hier liegt die Aare als potenzielles Exfiltrationsgebiet mitten drin. Zudem sind die beiden Wirtgesteine Opalinuston und Effinger Schichten durch einen potenziellen Aquifer (Kalke des Hauptrogensteins) voneinander getrennt, was ein übergreifendes SMA-Lager in Frage stellt. Die KNE beurteilt dies als bedingt günstig (Note „2.5“).

SMA-MG-HEL (Wellenberg): Hier bildet die Engelberger Aa einen nahegelegenen, potenziellen Vorfluter, der mit dem Wirtgestein über die Rutschmasse von Altzellen in Verbindung treten könnte. Gemäss den früheren Modellierungen der Nagra (NTB 96-01), die von einer Platzierung des Tiefenlagers oberhalb der Talsohle ausgingen, ist eine direkte Exfiltration in die Rutschmasse aber unwahrscheinlich. Die Situation wird daher von der KNE gesamthaft als bedingt günstig (Note „2.5“) beurteilt, da gemäss heutiger Planung das Lager wohl unterhalb der Vorflut erstellt würde.

Bewertung des generellen Karst- und Wassereintruchrisikos beim Bau

Die Beurteilung des generellen Karst- und Wassereintruchrisikos (Vergleich/Beurteilung anhand der Profile des NTB 08-04) führt zusammen mit der Beurteilung der natürlichen Gasführung zu einer Bewertung, die weitgehend mit derjenigen der Nagra identisch ist. Eine kleine Diskrepanz besteht bezüglich der natürlichen Gasführung am Wellenberg (SMA-MG-HEL). Diese wird durch die Nagra als bedingt günstig bewertet. Basierend auf den Erfahrungen im Seelisbergtunnel (erhebliche Behinderung der Ausbruchsarbeiten, Explosionen infolge von Gasaustritten) stuft die KNE die Gasführung hier als ungünstig ein, weshalb die „Untertägige Erschließung und Wasserhaltung“ gesamthaft von der KNE mit einer „2.5“ bewertet wird.

Tabelle 5-2: Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung für SMA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Hydraulische Durchlässigkeit		Ausdehnung der Dekompaktionszone		Grundwasserstockwerke		Hydraulische Barrierenwirkung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SMA-OPA-TJ-N	4	4	3.4	3.4	3.4	3	3.6	3.5
SMA-OPA-TJ-S	4	4	4	4	4	4	4	4
SMA-OPA-VZ-O	4	4	4	4	4	4	4	4
SMA-OPA-VZ-W	4	4	3.6	3.6	3	3	3.5	3.5
SMA-OPA-SJ-O	4	4	4	4	3	3	3.7	3.7
SMA-OPA-SJ-W	4	4	4	4	3	3	3.7	3.7
SMA-BD-TJ	3.6	3.6	3.4	3.4	4	4	3.7	3.7
SMA-BD-VZ-O	3.6	3.6	4	4	4	4	3.9	3.9
SMA-BD-VZ-W	3.6	3.6	4	4	3.4	3	3.7	3.5
SMA-EFF-SJ-O	3	2.5	3.6	3.6	3	2.5	3.2	2.9
SMA-EFF-SJ-W	3	2.5	4	4	3	2.5	3.3	3
SMA-MG-HEL	3.4	3	4	3	4	4	3.8	3.3

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. Grau hinterlegt: Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

Tabelle 5-3: Bewertung der hydraulischen Barrierenwirkung für HAA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Hydraulische Durchlässigkeit		Ausdehnung der Dekompaktionszone		Grundwasserstockwerke		Hydraulische Barrierenwirkung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
HA-OPA-TJ	4	4	4	4	4	4	4	4
HAA-OPA-VZ-O	4	4	4	4	4	4	4	4
HAA-OPA-VZ-M	4	4	4	4	3.4	3.4	3.8	3.8
HAA-OPA-VZ-W	4	4	4	4	3	3	3.7	3.7

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. Grau hinterlegt: Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

Tabelle 5-4: Bewertung der untertägigen Erschliessung für SMA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Länge der Freisetzungspfade (Länge+Distanz zur Vorflut)		Karst- und Wassereintrichsrisiko (+ Gasführung)		Untertägige Erschliessung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SMA-OPA-TJ-N	3	3.3 (4.0+2.5)	4	4	4	4
SMA-OPA-TJ-S	4	3.5 (4.0+3.0)	3	3	3.5	3.5
SMA-OPA-VZ-O	4	3.5 (4.0+3.0)	2.5	2.5	3.3	3.3
SMA-OPA-VZ-W	3.4	3.3 (4.0+2.5)	3.6	3.6	3.8	3.8
SMA-OPA-SJ-O	3.4	3.3 (4.0+2.5)	2.5	2.5	3.3	3.3
SMA-OPA-SJ-W	4	3.3 (4.0+2.5)	2.5	2.5	3.3	3.3
SMA-BD-TJ	3	2.8 (2.5+3.0)	3	3	3.3	3.3
SMA-BD-VZ-O	4	3.0 (3.0+3.0)	2.5	2.5	3.1	3.1
SMA-BD-VZ-W	4	3.0 (3.0+3.0)	3	3	3.3	3.3
SMA-EFF-SJ-O	3.6	2.5 (2.5+2.5)	2	2	2.5	2.5
SMA-EFF-SJ-W	3.6	2.5 (2.5+2.5)	2	2	2.5	2.5
SMA-MG-HEL	4	2.5 (2.5+2.5)	3.4	3.4 (+1.5)	3	2.5

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. Grau hinterlegt: Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

Tabelle 5-5: Bewertung der untertägigen Erschliessung für HAA-Standort-Bereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Länge der Freisetzungspfade (Länge+Distanz zur Vorflut)		Karst- und Wassereintrichsrisiko		Untertägige Erschliessung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
HA-OPA-TJ	4	3.5 (4.0+3.0)	3	3	3.5	3.5
HAA-OPA-VZ-O	4	3.5 (4.0+3.0)	2.5	2.5	3.3	3.3
HAA-OPA-VZ-M	4	3.5 (4.0+3.0)	3	3	3.5	3.5
HAA-OPA-VZ-W	4	3.3 (4.0+2.5)	3.6	3.6	3.8	3.8

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. Grau hinterlegt: Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

5.3 Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die tektonischen und neotektonischen Verhältnisse

5.3.1 Anwendung der Anforderungen an die tektonischen Verhältnisse durch die Nagra

Die gemäss SGT (NAB 07-35, S. 28/29 und NTB 08-04, Tab. 5.1–1) bei der Evaluation berücksichtigten „tektonischen“ Indikatoren und die damit verknüpften Anforderungen sind in Tabelle 5-6 aufgelistet.

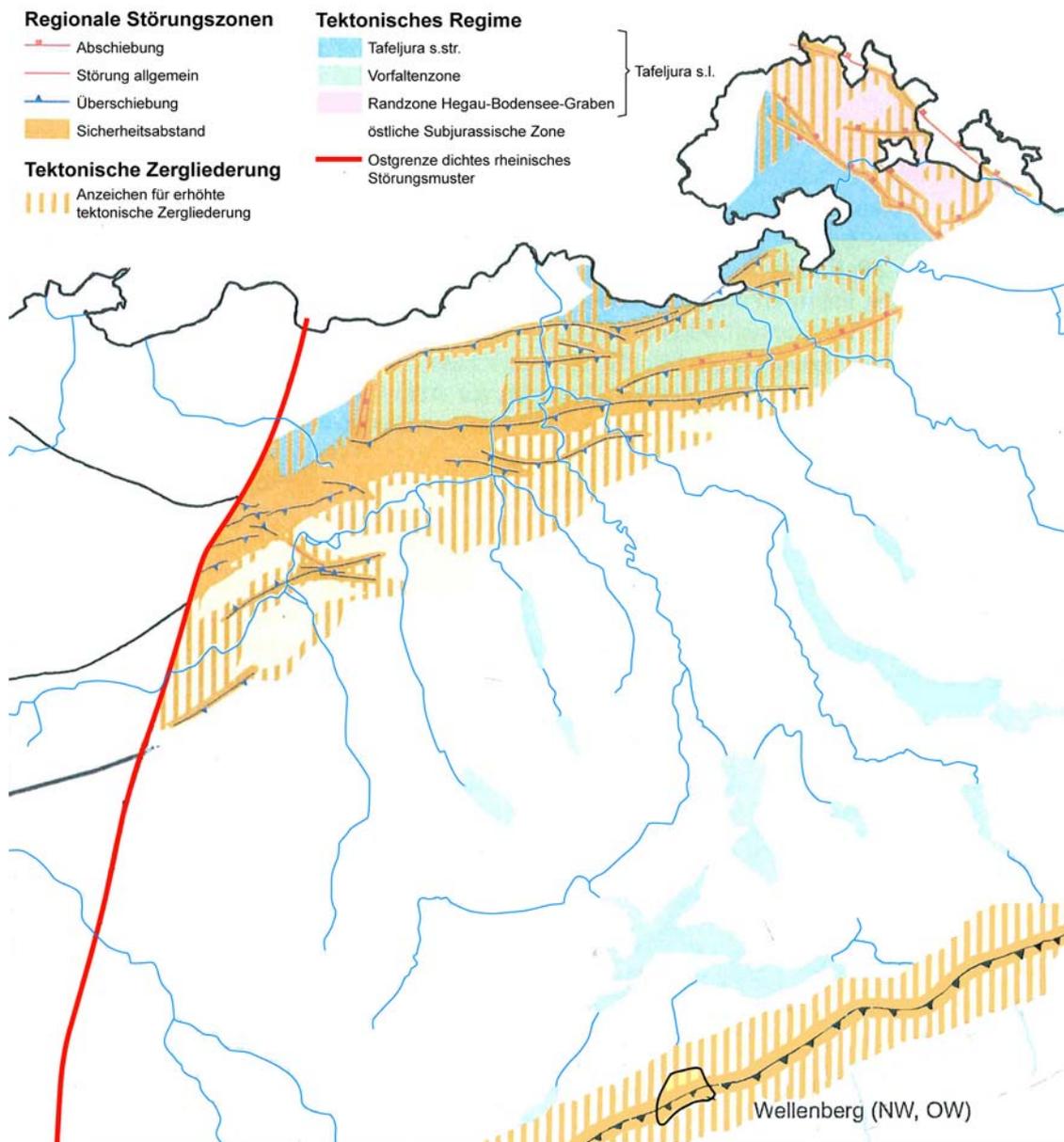
Tabelle 5-6: Übersicht über die mit der Tektonik/Neotektonik in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikator	Anmerkung
Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.1 Räumliche Ausdehnung	<i>Abstand zu regionalen Störungszonen</i> (NTB 08-05, S. A1-24)	MA: ≥ 200 m Abstand
		<i>Diffus gestörte Zonen</i> (NTB 08-05, S. A1-126)	VA: Zonen mit Anzeichen einer erhöhten tektonischen Zergliederung sind zu meiden.
		<i>Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)</i> (NTB 08-05, S. A1-143)	VA: Randzone Hegau-Bodensee-Graben wird wegen möglicher tekt. Aktivität gemieden
Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standorteigenschaften	<i>Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik</i> (NTB 08-05, S. A1-87)	MA: Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 J. (SMA) bzw. 1 Mio J. (HAA) ist keine generelle Gefährdung der geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich zu erwarten.
Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	<i>Kontinuität der interessierenden Schichten</i> (NTB 08-05, S. A1-135)	Sehr günstig: Ohne signifikante Deformation (Typ Tafeljura s.str.) Günstig bis sehr günstig: „mittlere“ Deformation (Typ Vorfaltenzone) Günstig: „erhebliche“ Deformation (Typ Östl. Subjurassische Zone)
	3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	<i>Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik</i> (NTB 08-05, S. A1-87)	MA: Innerhalb des Betrachtungszeitraums von 100'000 J. (SMA) bzw. 1 Mio J. (HAA) sind zuverlässige Prognosen zur geologischen Stabilität im bevorzugten Bereich möglich.

5.3.2 Grundlagen zur Bewertung der tektonischen Verhältnisse

Indikator *Abstand zu regionalen Störungszonen*

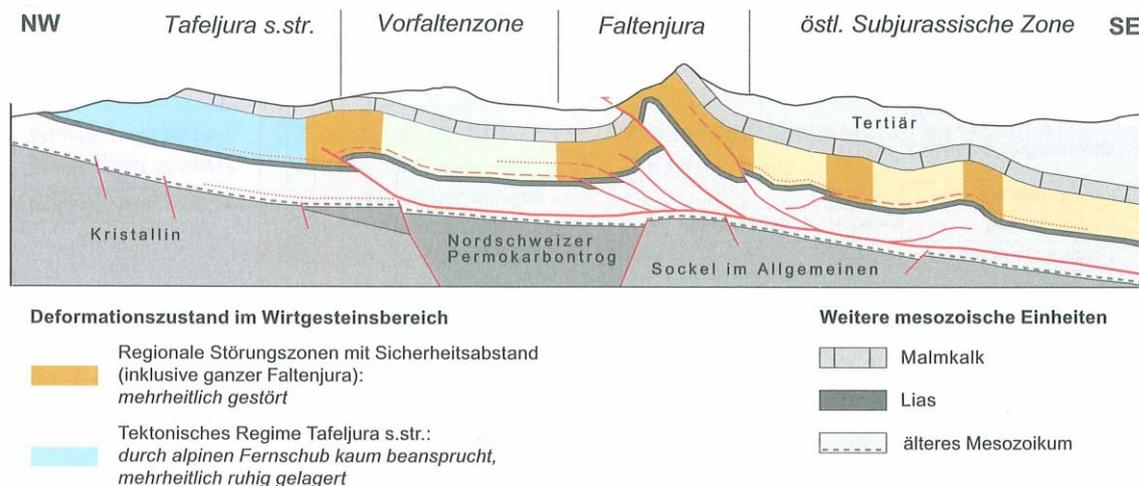
Die regionalen Störungszonen im Bereich der bevorzugten Wirtgesteine sind aus der Karte (Figur 5-2) ersichtlich. Diese Karte stellt im Bereich der zentralen Nordschweiz eine Kompilation aller aktuellen Hinweise auf vorhandene Störungen (inkl. unpublizierter Seismikdaten) dar. Spezielles Augenmerk wurde auf neotektonische Aktivität gelegt. Die Nagra hat in der zentralen Nordschweiz einen Sicherheitsabstand zu den regionalen Störungszonen vorgegeben und hier nur Standortgebiete vorgeschlagen, die ausserhalb der Gebiete mit Anzeichen für eine erhöhte tektonische Zergliederung und möglichst geringer neotektonischer Aktivität liegen.



Figur 5-2: Karte der regionalen Störungen und tektonisch stärker zergliederten Teilgebiete (NTB 08-03, Fig. 5.1-5, ergänzt mit dem Gebiet Wellenberg.)

Das Gebiet der helvetischen Mergel (Standortgebiet Wellenberg) stellt eine tektonische Akkumulation am Alpenrand dar und ist von zahlreichen Brüchen und Überschiebungen durchsetzt (Figur 5-2 stark schematisiert dargestellt).

Die sich über Thalheim – Hausen – Schinznach längs des Südrandes des Nordschweizer Permokarbondrogens hinziehende Jura-Hauptüberschiebung besteht neben der eigentlichen Hauptüberschiebung noch aus mehreren sekundären Auf- und Überschiebungen. Der basale Abscherhorizont verläuft in den Trias-Evaporiten nahe der Basis des älteren Mesozoikums (Figur 5-3). Sekundäre Abscherhorizonte sind u.a. auch im Opalinuston, in den Effinger Schichten der Vorfaltenzone sowie vereinzelt im Opalinuston des angrenzenden Tafeljuras zu erwarten. Diese sekundären Abscherhorizonte können unter Umständen bis weit in die Vorfaltenzone hineinreichen.



Figur 5-3: Schematische Darstellung der generellen tektonischen Überprägung in Tafeljura sensu stricto, Vorfaltenzone, Faltenjura und Subjurasischer Zone (NTB 08-03, Fig. 5.1-6)

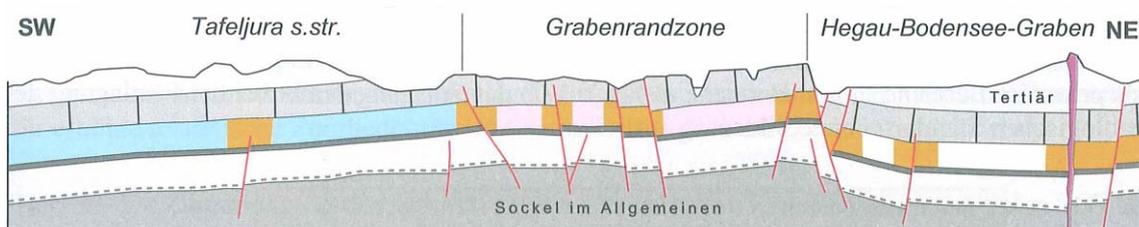
Die Frage, ob der Fernschub in den nächsten 1 Mio. Jahren zu Bewegungen an der bestehenden Hauptüberschiebung oder zur Neubildung zusätzlicher, namhafter Überschiebungen in der Vorfaltenzone führen wird, kann nicht abschliessend beantwortet werden, da ein Zusammenschub auch in der subalpinen Molasse und unter dem Nordrand des Aar-Massivs kompensiert werden könnte (Burkhard 1999).

Indikator *Diffus gestörte Zonen*

Das Vorgehen der Nagra bei der Abgrenzung der Gebiete mit Anzeichen für eine erhöhte tektonische Zergliederung ist gut verständlich erklärt (NTB 08-04, S. 308 ff.) und nachvollziehbar. Da die Seismikinterpretation eine Schlüsselrolle spielt, ist der Leser allerdings kaum imstande, die vorgenommene Abgrenzung der diffus gestörten Zonen umfassend zu verifizieren. Doch lässt der Text in Verbindung mit den Lokalkenntnissen einzelner KNE-Mitglieder auf eine sorgfältige Abklärung schliessen.

Indikator *Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)*

Im Randbereich des Hegau-Bodensee-Grabens sind auf dem Reiat und im Raum Büsingen - Stammheim zwei grössere Flächen ohne erhöhte Zergliederung vorhanden. Bei letzterem handelt es sich um ein vollständig mit Quartär bedecktes Gebiet. Mit Bezug auf den Indikator *Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)* werden die beiden erwähnten Gebiete gemieden. Da der Hegau-Bodensee-Graben ein Gebiet mittlerer Seismizität darstellt und in seiner Randzone nachweislich neotektonisch aktive Brüche aufweist, ist dies nachvollziehbar und die Schaffung eines speziellen, nur auf das Bodensee-Gebiet angewendeten Indikators akzeptabel.



Figur 5-4: Schematische Darstellung der generellen tektonischen Überprägung im Bereich des Hegau-Bodensee-Grabens (NTB 08-03, Fig. 5.1-6). Dieses Schema ist bzgl. tektonischem Stil auch auf die Situation randlich des Rheintalgrabens anwendbar

Der Rheintalgraben stellt eine weitere Zone dar, der ausgewichen wird. Er setzt sich als „Raurakische Senke“ quer durch den Faltenjura bis ins schweizerische Mittelland fort. Seine Ostgrenze ist identisch mit der von der Nagra definierten Westgrenze des Untersuchungsperimeters (= Ostgrenze des dichten rheinischen Störungsmusters). Diese Grenzziehung ist nachvollziehbar, da das Gebiet westlich dieser Linie tatsächlich stärker und kleinräumiger tektonisiert ist als östlich davon. Im Profil Oensingen – Langenthal scheint der Randbereich westlich des Untersuchungsperimeters weitgehend ungestört (NTB 08-04, Beil. 5.2-8). Eine Auswertung zusätzlicher Seismikprofile der Interoil (Nagra 1994b) bestätigt aber die postulierte höhere Bruchdichte westlich des angenommenen Untersuchungsperimeters.

Indikator *Kontinuität der interessierenden Schichten*

Mit diesem Indikator wird die Kontinuität der Schichten innerhalb der wenig zergliederten Bereiche und damit die Zuverlässigkeit geologischer Prognosen beurteilt. Dieser Indikator ist eng verknüpft mit dem Indikator *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*. Dies bedeutet, dass je grösser die tektonische Komplexität und je kleinräumiger der ursprüngliche Gesteinsverband zergliedert ist, umso geringer wird die Kontinuität der entsprechenden Schichten.

Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*

Mit dem Indikator *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik* werden die für einen Lagerstandort in Betracht kommenden potenziellen Standortgebiete bezüglich ihrer tektonischen Stabilität und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen bewertet und verglichen. Die aktuellen Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik sind in mehreren NTB's ausführlich und klar dargelegt (z.B. NTB 08-04; NTB 99-08).

5.3.3 Beurteilung der tektonischen Verhältnisse durch die KNE

Beurteilung des Vorgehens der Nagra

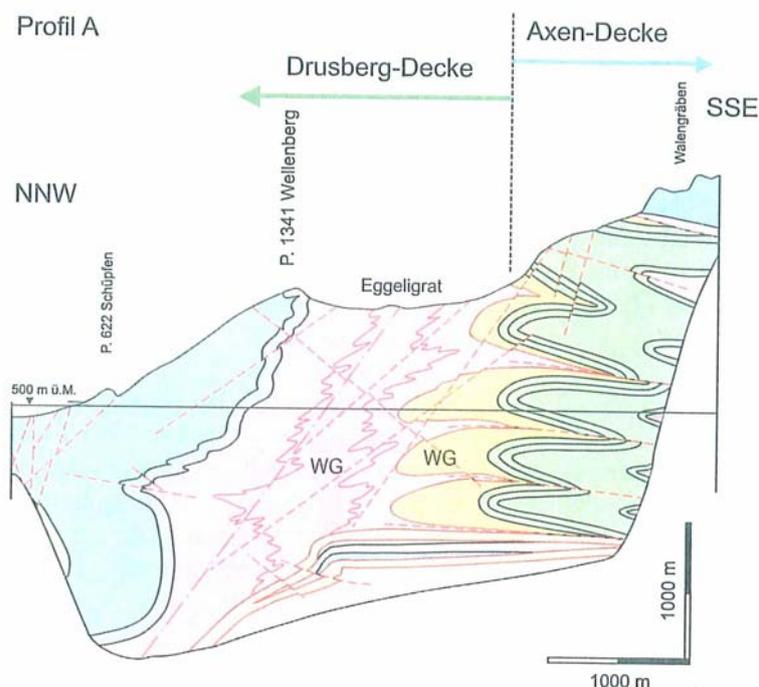
Durch die Identifizierung und Ausgrenzung der regionalen Störungszonen, der diffus gestörten Bereiche und konzeptionell zu meidender Zonen (Gräben) werden die für ein SMA- oder HAA-Lager potenziell geeigneten Regionen lokalisiert. Dieses Vorgehen ist gut erläutert und, soweit dies ohne detailliertere Kenntnis der Seismik beurteilbar ist, in der zentralen Nordschweiz auch einwandfrei umgesetzt. Die KNE anerkennt zwar, dass nicht alle Indikatoren der Kriterien Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse und räumliche Ausdehnung direkt von der Nordschweiz auf die Alpen übertragen werden können. Sie legt aber dennoch grossen Wert auf ein für alle Standortgebiete möglichst einheitlich angewendetes Auswahlverfahren. Insbesondere scheint es der KNE in diesem Zusammenhang wichtig, dass nur schwach tektonisierte Gebiete mit möglichst unbedeutender neotektonischer Aktivität als potenzielle Standortregionen in Betracht gezogen und weiterverfolgt werden.

Bewertung der Indikatoren *Abstand zu regionalen Störungszonen, Diffus gestörte Zonen und Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)*

Die Evaluation geeigneter Standortregionen durch die Vorgabe eines Mindestabstandes von regionalen Störungszonen (Teilschritt 2, vgl. Abschnitt 5.1) ist, gesamthaft gesehen, gut dargestellt und für die KNE nachvollziehbar. Den von der Nagra vorgeschlagenen SMA- und HAA-Standortgebieten in der zentralen Nordschweiz kann beigestimmt werden.

Beim Standortgebiet Wellenberg (SMA-MG-HEL) bestehen bezüglich der Beurteilung der tektonisch-neotektonischen Verhältnisse jedoch erhebliche Differenzen, insbesondere hin

sichtlich der Einheitlichkeit des Auswahlverfahrens. Dieses Standortgebiet zeichnet sich durch eine mächtige, tektonisch angehäuften Akkumulation von Ton- und Kalkmergeln mit darin ursprünglich eingeschalteten Kalkbankabfolgen aus. Der Wellenberg liegt in der Front einer stark zerschuppten Deckenstirn und im Zwischenbereich zweier Decken, also inmitten eines tektonisch sehr komplexen Gebiets. Es gilt auch zu beachten, dass in diesem alpinen Raum eine ausreichend genaue seismische Explorierung nicht möglich ist (Figur 5-5). Im Standortgebiet Wellenberg ist die Existenz zahlreicher spröder Brüche und Aufschiebungen durch Bohrungen bestätigt (vgl. NTB 96-01, Tab. 4.6-5). Würde auch hier analog zu den in der zentralen Nordschweiz gelegenen Gebieten konsequent ein Sicherheitsabstand zu allen regionalen Störungszonen (Deckenbasis und Aufschiebungen im Stirnbereich der Axen-Decke) von mindestens 200 m eingehalten, so wäre kein Wirtgesteinsblock von ausreichender Grösse für ein SMA-Lager vorhanden. Auch ein für tektonische Akkumulationen adaptierter Indikator „Abstand zu regionalen Aquiferen“ in der Axen- und Drusberg-Decke (nach ENSI 33/43) reduziert das vorhandene Platzangebot stark (siehe auch Kapitel 5.6.3).



Figur 5-5: Querschnitt durch den Standort Wellenberg (aus NTB 08-03)

Die Nagra verzichtet beim stark tektonisierten Gebiet Wellenberg nicht nur auf die Einhaltung von Grenzabständen, sondern auch auf die Beurteilung der Indikatoren *Diffus gestörte Zonen* und *Tektonisches Regime (konzeptionell zu meidende Zonen)* sowie *Kontinuität der interessierenden Schichten*. Dies wird von der Nagra damit begründet, dass die tektonischen Akkumulationen der Mergel-Formationen des Helvetikums und nicht die Formation der Palfris-Mergel als Wirtgestein betrachtet werden (Antwort der Nagra auf Frage des ENSI). Am Standort Wellenberg sind gemäss Nagra regionale Störungszonen und diffus gestörte Zonen integraler Bestandteil des Wirtgesteins. Die starken tektonischen Verformungen haben dazu geführt, dass „die mächtigen Kalkbankabfolgen zerrissen sind und keine kontinuierlichen Fliesspfade bilden“, d.h. die tektonische Überprägung wird hier teilweise auch als positive Eigenschaft des Wirtgesteins bewertet (Antwort der Nagra auf Frage des ENSI). Die KNE kann dieser Erklärung nicht folgen, da die tektonische Überprägung in anderen Gebieten einen wichtigen Ausschlussgrund darstellt. Durch diese Sonderbehandlung des Standortes Wellenberg wird der Ausschluss oder die Zurückstellung anderer alpiner Gebiete, der

Randzonen des Rheintal- und des Hegau-Bodenseegrabens und der Tonstein-Akkumulationen im Faltenjura fragwürdig und allein von der Existenz lokaler positiver Bohrresultate abhängig gemacht.

Das von Haldimann 2008 (NAB 08-03) mit Verweis auf NTB 08-04 für ein SMA-Lager als geeignet und ausreichend gross eingestufte Gebiet um Wartau ist tektonisch einfacher gebaut als der Wellenberg. Haldimann (2008) waren die Verschärften Anforderungen aber offensichtlich noch nicht bekannt. Der Standort wurde von der Nagra ohne genauere Erläuterungen zurückgestellt (NTB 08-04, S. 345). Ein auf Verlangen der swisstopo- und KNE-Experten nachgereichtes, detailliertes 3D-Modell zeigte, dass das vorhandene Mergelvolumen für die Platzierung eines mehrstöckigen SMA-Lagers zwar ausreichen dürfte, das Platzangebot insgesamt aber bei Annahme mittelsteil und regelmässig einfallender Faltenachsen kleiner ist als am Wellenberg. Zudem lägen bei Wartau die am besten geeigneten Lagerniveaus über dem Vorfluter, während am Wellenberg das Lager unter dem Vorflutniveau erstellt werden könnte.

Bewertung des Indikators *Kontinuität der interessierenden Schichten*

Die KNE stimmt den Bewertungen der Nagra hinsichtlich der ausseralpinen SMA-Standortregionen zu. Bei den tektonischen Akkumulationen (Fall Wellenberg) nimmt die Nagra keine Bewertung dieses Indikators vor, da es sich um Bereiche ohne Schichtung handle. Die *Kontinuität der interessierenden Schichten* ist ein Indikator für tektonische Komplexität (nicht der hydraulischen Barriereigenschaften) und Explorierbarkeit. Deshalb bewertet die KNE diesen Indikator beim Standort Wellenberg mit „ungünstig“ oder „1.5“. Diese Bewertung steht in Einklang mit der Bewertung des gesamten alpinen Raums (NTB 08-03, Tab. C.2-1), wo die Nagra die „Kontinuität der interessierenden Schichten“ mit „1.5“ bewertet hat. Die normalerweise ebenfalls zu beurteilenden „Explorationsbedingungen an der Oberfläche“ (Seismik und Bohrungen) werden im Vergleich zu den mittelländischen Standorten von der KNE mit einem „bedingt günstig“ oder „2.5“ bewertet. Zusammen mit dem Indikator *Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund* (NTB 08-03, Tabelle C.4-12) ergibt das für die Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse eine (Σ) „2.2“.

Die drei von der Nagra vorgeschlagenen HAA-Standortbereiche HAA-OPA-VZ-O, HAA-OPA-VZ-M und HAA-OPA-VZ-W scheinen aus Sicht der tektonischen Indikatoren und Kriterien gleichwertig. Die Nagra setzt zwar einen Minuspunkt bei der Explorierbarkeit der Zone HAA-OPA-VZ-M (NTB 08-03, Tab. C.4-15) und erteilt dem Bereich HAA-OPA-VZ-W ein leichtes Plus (NTB 08-03, Tab. C.4-16) aufgrund einer etwas besseren Kontinuität der interessierenden Schichten. Der begleitende Text liefert dazu jedoch keine Details. Zudem sind die geologischen Kenntnisse nicht nur im Abschnitt Mitte sondern auch im Abschnitt West vergleichsweise beschränkt.

Bewertung der Indikatoren *Modellvorstellungen zur Geodynamik und Neotektonik*

Dieser Indikator fliesst in die Bewertung der Beständigkeit der Lager- und Gesteinseigenschaften und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen ein. Die nördlich des Faltenjuras gelegene Vorfaltenzone (Figur 5-3) ist in den vier vorgeschlagenen Standortgebieten SMA-OPA-VZ-O, SMA-BD-VZ-O, SMA-BD-VZ-W und SMA-OPA-VZ-W gemäss Nagra nur mässig tektonisiert und würde auch künftig durch den anhaltenden Fernschub nur mässig beansprucht. Die südlich des Faltenjuras gelegene Subjurassische Zone mit den vier Bereichen SMA-OPA-SJ-O, SMA-EFF-SJ-O, SMA-OPA-SJ-W und SMA-EFF-SJ-W ist gemäss Nagra dagegen relativ stark tektonisch beansprucht (NTB 08-03, S. 232), würde bei künftigem, fortschreitendem Fernschub aber ebenfalls nur mässig beansprucht.

Infolge der geringeren Mächtigkeit der überlagernden Molasse könnte die Vorfaltenzone künftig zumindest lokal stärker zerschert werden als die insgesamt als steifer Block agierende Subjurassische Zone. Die Vorfaltenzone und die Subjurassische Zone sollten deshalb punkto heutiger und künftiger Tektonisierung insgesamt gleich taxiert werden. Bei einer konservativen Beurteilung mit der im SGT vorgegebenen, vierstufigen Bewertungsskala mit den Eckpunkten „Tafeljura s.str. = nicht signifikant tektonisiert = sehr günstig bzw. 4“ und „Faltenjura und Alpennordrand = erheblich tektonisiert = günstig bzw. 3“ (NTB 08-03, Tabelle C.2-1) ergibt dies gemäss KNE für die Vorfaltenzone und die Subjurassische Zone ein „abschnittsweise signifikant tektonisiert = günstig,“ bzw. eine „3.4“ (vgl. Tabelle 5-7).

Für die im Vergleich zum Faltenjura stärker tektonisierte, am Alpennordrand gelegene Standortregionen (SMA-MG-HEL) ergibt sich folglich eine Bewertung von „bedingt günstig“ bis „ungünstig“ bzw. „2“.

Tabelle 5-7: Bewertung der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen für SMA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Σ)		Modellvorstellung zu Geodynamik und Neotektonik		Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Σ)		Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SMA-OPA-TJ-N	3.5	3.5	4	4	3.9	3.9	4	4
SMA-OPA-TJ-S	3.7	3.7	4	4	3.9	3.9	4	4
SMA-OPA-VZ-O	3.4	3.4	3.6	3.4	3.8	3.7	3.8	3.7
SMA-OPA-VZ-W	3.5	3.5	3.6	3.4	3.8	3.7	3.8	3.7
SMA-OPA-SJ-O	2.8	2.8	3.4	3.4	3.7	3.7	3.7	3.7
SMA-OPA-SJ-W	2.8	2.8	3.4	3.4	3.7	3.7	3.7	3.7
SMA-BD-TJ	3.5	3.5	4	4	3.8	3.8	3.5	3.5
SMA-BD-VZ-O	3.3	3.3	3.6	3.4	3.7	3.6	3.3	3.2
SMA-BD-VZ-W	3.2	3.2	3.6	3.4	3.7	3.6	3.3	3.2
SMA-EFF-SJ-O	2.8	2.8	3.4	3.4	3.3	3.3	3.4	3.4
SMA-EFF-SJ-W	2.7	2.7	3.4	3.4	3.3	3.3	3.4	3.4
SMA-MG-HEL	2.5	2.2	3	2.0	3.3	3.0	3.3	2.8

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. Grau hinterlegt: Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

Tabelle 5-8: Bewertung der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften und der Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen für HAA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Σ)		Modellvorstellung zu Geodynamik und Neotektonik		Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften (Σ)		Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
HAA-OPA-TJ-N	3.7	3.7	3.6	3.6	3.7	3.7	3.8	3.8
HAA-OPA-VZ-O	3.5	3.5	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5
HAA-OPA-VZ-M	3.3	3.3	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5
HAA-OPA-VZ-W	3.5	3.5	3	3	3.5	3.5	3.5	3.5

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. **Grau hinterlegt:** Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

5.4 Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion

Hinsichtlich der Erosion (SGT-Kriterium 2.2) wird auch das Vorhandensein und die räumliche Ausdehnung glazial übertiefter Talrinnen mitbeurteilt und zwar mit dem Indikator *Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion*. Die damit verknüpften Minimalanforderungen (MA) und Verschärften Anforderungen (VA) sind aus der Tabelle 5-9 ersichtlich.

Tabelle 5-9: Übersicht über die mit der glazialen Tiefenerosion in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren (EG = einschlusswirksamer Gebirgsbereich; u.F. = unter der Felsoberfläche)

Kriterien- gruppe	Kriterium	Indikator	Anmerkung
Erosion	2.2 Glaziale Tiefenerosion	<i>Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion</i> (NTB 08-05, S. A1-17)	<p><u>Im Bereich der übertieften Felsrinnen</u> MA(SMA): Top EG \geq 200 m u.F. MA(HAA): Top EG \geq 400 m u.F.</p> <p>VA(SMA): Top EG \geq 300 m u.F. VA(HAA): Top EG \geq 500 m u.F.</p> <p>-----</p> <p><u>Ausserhalb der übertieften Felsrinnen</u> VA(SMA): Top EG \geq 200 m u.F. VA(HAA): Top EG \geq 400 m u.F.</p>

Sehr günstige Verhältnisse liegen vor, wenn die verschärften Anforderungen um mehr als 100 m übertroffen werden oder der bevorzugte Bereich ausserhalb der Haupttäler (Rhein-, Aare- Thur-, Glattal) liegt. Günstig sind Standorte, wo die Verschärften Anforderungen um mindestens 100 m übertroffen werden (NTB 08-05, Anhang A1.4).

Die meisten bevorzugten Bereiche werden von der Nagra als „sehr günstig“ eingestuft. Einzig die Bereiche SMA-OPA-TJ-N und SMA-MG-HEL erhalten nur ein „günstig“. Dies hängt damit zusammen, dass der Bereich SMA-TJ-N z.T. an die glazial übertiefte Klettgaurinne (NTB 08-03, S. 239) grenzt und der Bereich SMA-MG-HEL in der Nähe des glazial mehrfach übertieften Engelbergertals liegt. Bei den bevorzugten Bereichen für ein HAA-Lager werden die Bereiche HAA-OPA-VZ-O und HAA-OPA-TJ wegen ihrer Nähe zum Glatt- bzw. Thurtal

ebenfalls nur als „günstig“ bewertet, während die beiden übrigen bevorzugten HAA-Bereiche als „sehr günstig“ eingestuft werden.

Der von der Nagra vorgenommenen Bewertung der bevorzugten Bereiche in Bezug auf die glaziale Tiefenerosion kann zugestimmt werden. Da hinsichtlich des maximalen, zukünftigen Tiefenschurfs eine erhebliche Unsicherheit besteht, ist die Verschärfte Anforderung an den Grenzabstand zur Felsoberfläche im Bereich glazial übertiefer Felsrinnen konservativerweise von 100 m auf 150 m zu erhöhen (Abschnitt 2.3). Einige der ausgewählten bevorzugten Bereiche könnten dadurch etwas verkleinert werden (z.B. HAA-OPA-VZ-O, HAA-OPA-TJ, SMA-OPA-TJ-S, SMA-BD-TJ, SMA-OP-VZ-O, SMA-BD-VZ-O).

5.5 Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit

5.5.1 Anwendung der Anforderungen an die bautechnische Machbarkeit durch die Nagra

Die Gesamtbewertung des SGT-Kriteriums „Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen“ stützt sich auf die Bewertungen der Indikatoren *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* und *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* ab. Die damit verknüpften Minimalanforderungen (MA) und Verschärfte Anforderungen (VA) sind aus Tabelle 5-10 ersichtlich.

Tabelle 5-10: Übersicht über die mit der den felsmechanischen Eigenschaften und Bedingungen in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren (u.T. = unter Terrain)

Kriterien- gruppe	Kriterium	Indikator	Anmerkung
Bautechni- sche Eig- nung	4.1 Felsmechani- sche Eigen- schaften und Bedingungen	<i>Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautech- nische Machbarkeit</i> (NTB 08-05, S. A1- 5)	<u>Lagerebene auf</u> MA(SMA): ≤ 800 m u.T. (Sedimente) ≤ 1200 m u.T. (Kristallin) MA(HAA): ≤ 900 m u.T. (Sedimente) ≤ 1200 m u.T. (Kristallin) ----- <u>Tafeljura s.str., Vorfaltenzone und Alpen</u> keine VA <u>Östliche Subjurassische Zone</u> VA(SMA)-OPA: ≤ 700 m u.T. VA(SMA)-EFF: keine VA(HAA)-OPA: ≤ 800 m u.T.
		<i>Gesteinsfestigkei- ten und Verfor- mungseigenschaf- ten</i> (NTB 08-05, S. A1-147)	MA(SMA/HAA) Sehr günstig: UCS > 100 MPa Günstig: UCS 20 – 100 MPa Ungünstig-bedingt günstig: UCS 5- 20 MPa. ----- <u>Mitberücksichtigung von tektonischer Überprägung und Trennflächengefü- ge</u> Tafeljura s.str.: kein Abzug Vorfaltenzone: Abzug von 0.5 Pkt. Östl. Subj. Zone: Abzug von 1.0 Pkt. Alpen: keine Erwähnung

UCS = Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit

5.5.2 Grundlagen zur Bewertung der bautechnischen Machbarkeit

Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit*

Die Anforderungen, das Bewertungsschema sowie die Beurteilung der Vorgehensweise wurden bereits im Abschnitt 2.3 dargelegt. Eine detaillierte Beurteilung kann dem Expertenbericht der ETH (Amann & Löw, 2009) entnommen werden.

Indikator *Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften*

Für den Indikator *Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften* werden Mindestanforderungen definiert, die aus tunnelbautechnischer Sicht in Bezug auf die zu bewältigenden Tiefenlagen als notwendig betrachtet werden. Formationen, die die entsprechenden Mindestanforderungen nicht erfüllen, werden nicht weiter behandelt. Verschärfte Anforderungen (VA) werden nicht festgelegt.

Die Bewertungsskala basiert auf den einaxialen Zylinderdruckfestigkeiten (UCS), mit Abzügen für Anisotropie, lithologische Heterogenitäten bzw. verminderte Festigkeit in den Schicht- und Schieferungsfugen und für Wasserzutritte. Die im Schritt 4.3 durch die Nagra vorgenommene Beurteilung der potenziellen Wirtgesteine wird im Schritt 5.3 durch die Beurteilung des Gebirges an den jeweiligen Standorten ergänzt. Dazu werden weitere Abzüge definiert,

welche den Grad der tektonischen Überprägung und das zu erwartende Trennflächengefüge (Klüftung, Scherzonen, Schichtfugen) berücksichtigen (Tab. 5.4-1).

5.5.3 Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit durch die KNE

Beurteilung des Vorgehens der Nagra

Die Beurteilung der Anforderungen und der Bewertungsskala des Indikators *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* aus Sicht der KNE wurde bereits in Abschnitt 2.4 dargelegt.

Der Indikator *Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften* stellt auch das Bindeglied zwischen der im Labor bestimmten Gesteinsfestigkeit und der für den Lagerstollenbau effektiv massgebenden Gebirgsfestigkeit dar. Letztere hängt insbesondere stark von der Zerklüftung und Zerschierung des Gebirges ab. Es erstaunt daher, dass in NTB 08-05 (S. A1-150) beim „Tektonischen Regime“ das Helvetikum mit der Standortregion Wellenberg keine Erwähnung findet. Die KNE ist der Ansicht, dass die durch zahlreiche Störungszonen ausserordentlich stark zergliederten Mergel des Helvetikums (Palfris-Schiefer, Viznau-Mergel) - alle 30-70 m wurde mindestens eine grössere Kataklastizone erbohrt - ebenfalls mit einem Abzug belegt werden müssen.

Indikator *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit*

Die Anwendung des Indikators *Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit* nach NTB 08-03 erfolgt sowohl für HAA- wie SMA-Tiefenlager in Übereinstimmung mit den der KNE (Tabelle 5-11).

Indikator *Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften*

Wie im Expertenbericht der ETH (Amann & Löw, 2009) dargelegt wird, bestehen bezüglich der Bewertung der Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften abweichende Auffassungen im Vergleich zu den Ausführungen der Nagra im NTB 08-03. Dies betrifft insbesondere die Berücksichtigung der Gesteinsanisotropie (Opalinuston, Tonsteine des „Braunen Dogger“) sowie der Heterogenitäten bzw. Wechsellagerungen mit Lithologien verschiedener felsmechanischer Eigenschaften im dm- bis m-Bereich (Tonsteine des „Braunen Dogger“, Effinger Schichten, Palfris-Mergel). Werden diese wirtgesteinsspezifischen Eigenschaften berücksichtigt, führt dies zu einer ungünstigeren Bewertung. Gemäss Amann & Löw (2009) sollte für den Opalinuston und die Tonsteine des „Braunen Doggers“ die Bewertung aufgrund der ausgeprägten Gesteinsanisotropie um einen halben Skalenschritt reduziert werden. Das Gleiche gilt für die Effinger Schichten aufgrund der lithologischen Heterogenitäten. Im Falle der Palfris-Schiefer sollte die Bewertung der Nagra aufgrund der zahlreichen kataklastischen Störungszonen um einen ganzen Skalenschritt reduziert werden. Dies folgt auch aus dem Vergleich mit der Bewertung der Subjurassischen Zone Ost (vgl. Tabelle 5-11).

Tabelle 5-11: Bewertung bautechnischer Eigenschaften für SMA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit		Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften		Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SMA-OPA-TJ-N	3	3	3	2.5	3	2.8
SMA-OPA-TJ-S	3	3	3	2.5	3	2.8
SMA-OPA-VZ-O	2	2	2.5	2	2.3	2
SMA-OPA-VZ-W	3	3	2.5	2	2.8	2.5
SMA-OPA-SJ-O	2.5	2.5	2	1.5	2.3	2.0
SMA-OPA-SJ-W	2	2	2	1.5	2	1.8
SMA-BD-TJ	3	3	3	2.5	3	2.8
SMA-BD-VZ-O	2	2	2.5	2	2.3	2
SMA-BD-VZ-W	2	2	2.5	2	2.3	2.5
SMA-EFF-SJ-O	3	3	2.5	2	2.8	2.5
SMA-EFF-SJ-W	3	3	2.5	2	2.8	2.5
SMA-MG-HEL	3	3	3	2	3	2.5

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. **Grau hinterlegt:** Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

Tabelle 5-12: Bewertung bautechnischer Eigenschaften für HAA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit		Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften		Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
HAA-OPA-TJ-N	2	2	3	2.5	2.5	2.3
HAA-OPA-VZ-O	2	2	2.5	2	2.3	2
HAA-OPA-VZ-M	2	2	2.5	2	2.3	2
HAA-OPA-VZ-W	3	3	2.5	2	2.8	2.5

Fettdruck: Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. **Grau hinterlegt:** Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte

5.6 Evaluation der bevorzugten Bereiche im Hinblick auf die räumliche Ausdehnung

5.6.1 Anwendung der Anforderungen an die räumliche Ausdehnung durch die Nagra

Die Gesamtbewertung der „Räumlichen Ausdehnung“ (SGT-Kriterium 1.1) stützt sich auf die Bewertungen der Indikatoren *Mächtigkeit* und *Platzangebot untertage* ab. Dabei wird das potenziell nutzbare Lagervolumen in Bezug zur vorgesehenen maximal benötigten Lagerkapazität gebracht. Die damit verknüpften Minimalanforderungen (MA) und Verschärften Anforderungen (VA) sind aus Tabelle 5-13 ersichtlich.

Tabelle 5-13: Übersicht über die mit dem Platzbedarf/Platzangebot in Verbindung stehenden Kriterien und Indikatoren

Kriteriengruppe	Kriterium	Indikator	Anmerkung
Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	1.1 Räumliche Ausdehnung	<i>Mächtigkeit</i> (NTB 08-05, S. A1-20)	<u>Nutzbare Mächtigkeit:</u> MA(SMA+HAA): ≥ 100 m VA(SMA)-OPA: ≥ 100 m VA(SMA)-BD: ≥ 150 m VA(SMA)-EFF: ≥ 200 m VA(SMA)-HEL: ≥ 200 m ----- VA(HAA)-OPA: ≥ 100 m
		<i>Platzangebot untertage</i> (NTB 08-05, S. A1-30)	<u>Günstig (zugleich Verschärfte Anforderung):</u> Potenzielles Platzangebot für ≥ 2 -faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für umhüllendes Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung. <u>Sehr günstig:</u> Potenzielles Platzangebot für ≥ 4 -faches umhüllendes Abfallinventar und Platzangebot ausreichend für ≥ 2 -faches Abfallinventar unter Berücksichtigung geologischer Ungewissheiten und bei günstiger Lageranordnung.

5.6.2 Grundlagen zur Beurteilung der räumlichen Ausdehnung

Indikator *Mächtigkeit*

Einige grundlegende Anmerkungen zur nutzbaren Mächtigkeit der potenziellen Wirtgesteine finden sich in den Kapiteln 2.2 und 4.7. Die KNE verzichtet hier deshalb auf eine zusätzliche Diskussion der lokalen Mächtigkeitsverhältnisse.

Indikator *Platzangebot untertage*

In einem ersten Teilschritt wird innerhalb der einzelnen Bereiche das *potenzielle* Platzangebot für SMA- und HAA-Lager mittels der für Schritt 5 festgelegten Mindestanforderungen für die laterale Ausdehnung bestimmt. Die Mindestanforderungen an die *Laterale Ausdehnung* betragen für SMA-Lager 3 km^2 mit einer nutzbaren Mindestbreite von 1 km und für HAA-Lager 6 km^2 mit einer nutzbaren Mindestbreite von 1.5 km.

In einem zweiten Teilschritt mit Verschärften Anforderungen wird das *robuste* Platzangebot beurteilt. Der robuste Bereich bezeichnet innerhalb eines bezüglich des potenziellen Platzangebotes geeigneten Bereichs diejenige Teilfläche, die für die Anordnung der Lagerkammern auch dann geeignet ist, wenn für alle als relevant betrachteten, raumwirksamen geologischen Elemente ungünstige Annahmen getroffen werden, um die diesbezüglichen Unsicherheiten zu berücksichtigen (NAB 09-29).

5.6.3 Beurteilung der räumlichen Ausdehnung durch die KNE

Beurteilung des Vorgehens der Nagra

Dem Vorgehen der Nagra kann prinzipiell zugestimmt werden. Die Ermittlung des potenziellen und des robusten Platzangebotes sowie deren Bewertung in den bevorzugten Bereichen

ist nachvollziehbar dargestellt. Allerdings wird anhand der NTB's 08-03, 08-04 und 08-05 nicht ersichtlich, welche geologischen Elemente (Tiefenlage, mögliche kleinräumige Elemente, Fremdgesteinseinschlüsse, etc.) tatsächlich für die Bewertung in den jeweiligen Gebieten relevant sind und miteinbezogen wurden. Diese Einflüsse auf das Platzangebot der SMA- und der HAA-Bereiche werden von der Nagra im Detail in Nagra 2009b im Rahmen der Untersuchung der Sensitivitäten für jeden robusten Bereich dargestellt.

Indikator *Platzangebot untertage*

Zur Verifizierung der Beurteilung dieses Indikators durch die Nagra wurde auf Nagra 2009b zurückgegriffen. Die Ermittlung des potenziellen und des robusten Platzangebotes sowie deren Bewertung in den bevorzugten Bereichen ist nachvollziehbar dargestellt. Aus Sicht der KNE kann der Bewertung grundsätzlich zugestimmt werden.

Für die von der Nagra bevorzugten Bereiche SMA-BD-VZ-W und HAA-OPA-VZ-M werden die verschärften Anforderungen an den Indikator *Platzangebot untertage* nur erfüllt, wenn Sonderregelungen bezüglich der effektiv wirksamen Überlagerungshöhe eingeführt werden. Dazu verwendet die Nagra als Bezugshöhe (Terrain) zur Berechnung der maximalen Tiefenlage nicht das Niveau der maximalen Überlagerung (Höhenzüge), sondern ein mittleres Niveau der Geländetopographie von 500 m ü.M. Aus bautechnischer Sicht ist dieses Vorgehen nicht problematisch. Durch die so reduzierte Tiefenlage kommen grössere Flächen innerhalb der robusten Bereiche in den bautechnisch machbaren Tiefenbereich zu liegen. Die Abbildungen in Nagra 2009b, S. 45 (SMA-BD-VZ-W) bzw. S. 112 (HAA-OPA-VZ-M) zeigt die Vergrößerung der robusten Bereiche und das damit vergrösserte Platzangebot.

Aufgrund dieser Überlegungen kommt die Nagra für beide Bereiche zu einer Bewertung günstig. Weil gegenüber den anderen Bereichen aber zusätzliche Annahmen erfüllt sein müssen, um die Verschärften Anforderungen an den Indikator *Platzangebot untertage* zu erfüllen, bewertet die KNE das *Platzangebot untertage* für die Bereiche SMA-BD-VZ-W und HAA-OPA-VZ-M nur als „bedingt günstig“. Zusammen mit der grossen Mächtigkeit kommt die KNE für das Kriterium „Räumliche Ausdehnung“ zur Bewertung „günstig“ im Gegensatz zu „sehr günstig“ der Nagra.“

Für das gesamte Gebiet „Nördlich Lägeren“, sowohl für SMA wie für HAA, reduziert sich dadurch die Bewertung von „sehr günstig“ auf „günstig“.

Ebenfalls diskutierbar ist das tatsächliche Platzangebot am Wellenberg. Unter der Kriterien-Gruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches' ist nach Ansicht der KNE der Indikator *Platzangebot untertage* sorgfältig abzuschätzen, da je nach bautechnischen Eigenschaften vor Ort allenfalls die maximal geeignete Grösse der Lagerkavernen zu beschränken ist (Emch+Berger AG 2010). Ausserdem bezieht die Nagra den Tiefenbereich 400 m bis 500 m unter Terrain, in welchem nach Ansicht der KNE noch mit entlastungsbedingter Dekompaktion zu rechnen ist (ENSI 33/43, Kapitel 3.4), in die Ermittlung des robusten Platzangebots mit ein (Nagra 2009b). Das robuste Platzangebot wäre nach Meinung der KNE mit rund 290'000 m³ unter dem zweifachen Platzbedarf.

In Analogie zum Indikator *Abstand zu regionalen Störungszonen* hält die KNE einen lateralen Abstand zu den potenziell durchlässigen Kalksteinen der Axen- und Drusbergdecke, welche eine erhöhte Wasserführung aufweisen könnten, von jeweils 200 m für notwendig, um den Ungewissheiten im genauen Verlauf dieser Deckengrenzen Rechnung zu tragen. Weitere Ungewissheiten bestehen ferner auch bezüglich möglicher Fremdgesteinseinschlüsse. All diese Gründe führen dazu, dass das Platzangebot weiter eingeschränkt wird. Der Indikator *Platzangebot untertage* wird von der KNE daher nur als „bedingt günstig“ beurteilt. Zusam-

men mit der grossen Mächtigkeit kommt die KNE für das Kriterium „Räumliche Ausdehnung“ zur Bewertung „günstig“ im Gegensatz zu „sehr günstig“ der Nagra (Tabelle 5-14).

Tabelle 5-14: Bewertung der räumlichen Ausdehnung für SMA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Berechnetes Platzangebot untertage		Bewertung des Platzangebots untertage		Mächtigkeit		Räumliche Ausdehnung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SMA-OPA-TJ-N	4x	4x	4	4	3.4	3.4	3.7	3.7
SMA-OPA-TJ-S	4x	4x	4	4	4	4	4	4
SMA-OPA-VZ-O	1x	1x	3	3	4	4	3.5	3.5
SMA-OPA-VZ-W	7x	7x	4	4	3.4	3.4	3.7	3.7
SMA-OPA-SJ-O	1x	1x	3	3	3	3	3	3
SMA-OPA-SJ-W	1x	1x	3	3	3	3	3	3
SMA-BD-TJ	5x	5x	4	4	3.6	3.6	3.8	3.8
SMA-BD-VZ-O	2x	2x	3	3	4	4	3.5	3.5
SMA-BD-VZ-W	1x ¹⁾	0.3x	3	2	4	4	3.5	3
SMA-EFF-SJ-O	1x	1x	3	3	3	2.5³⁾	3	2.8
SMA-EFF-SJ-W	1x	1x	3	3	3	2.5³⁾	3	2.8
SMA-MG-HEL	2x	1x	4 ²⁾	2	4	4	4	3

¹⁾mit Berücksichtigung einer mittleren Terrainkote von 500 m ü.M. (Nagra 2009b, S. 44); ²⁾mögliche einschränkende Elemente nicht berücksichtigt; ³⁾vgl. Abschnitt 4.7.3; **Fettdruck:** Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. **Grau hinterlegt:** Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte.

Für die Bewertung des Platzangebotes für das SMA- und HAA-Lager gemäss der Bewertungsskala in Nagra 2009b, Seite 10 ist bis auf eine Ausnahme immer das in den Tabellen 5–14 und 5–15 angegebene robuste Platzangebot massgebend. Beim Gebiet SMA-BD-VZ-O basiert die Bewertung der Nagra auf dem potenziellen Platzangebot (Nagra 2009b, Tab. 4.2–1, S. 16).

Tabelle 5-15: Bewertung der räumlichen Ausdehnung für HAA-Standortbereiche. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig

Bevorzugter Bereich	Berechnetes Platzangebot untertage		Bewertung des Platzangebots untertage		Mächtigkeit		Räumliche Ausdehnung (Σ)	
	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
HAA-OPA-TJ-N	2x	2x	4	4	4	4	4	4
HAA-OPA-VZ-O	1x	1x	3	3	4	4	3.5	3.5
HAA-OPA-VZ-M	1x ¹⁾	0.2x	3	2	4	4	3.5	3
HAA-OPA-VZ-W	1x	1x	3	3	4	4	3.5	3.5

¹⁾gemäss Nagra 2009b; **Fettdruck:** Von der Nagra abweichende Beurteilung durch die KNE. **Grau hinterlegt:** Signifikante Abweichung > 0.5 Punkte.

5.7 Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche und Standortgebiete

Die Bewertung der bevorzugten Bereiche durch die Nagra wurde dem NTB 08-03 (Tab.C.4–1 bis C.4–16) entnommen und in den Tabelle 5-17 bis 5-21 der Einschätzung der KNE gegenübergestellt. Die Bewertung der einzelnen Indikatoren mit Punkten ist aus Gründen der Aggregation der Bewertungen und des direkten Vergleichs mit NTB 08-03 unumgänglich. Die scheinbare Genauigkeit dieser Werte darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass ein gewisser Ermessensspielraum besteht. Generell sind bei der Bewertung der einzelnen Indikatoren erst Differenzen von > 0.5 bedeutungsvoll bzw. signifikant. Sinngemäss gilt dies auch bei der Gesamtbewertung (Gesamtsumme ohne Mittelwertbildung, Tabellen 5-17 bis 5-21), da sich unterschiedliche Bewertungen einzelner Indikatoren unter Umständen gegenseitig aufheben. Gemäss Nagra sollen wirtgesteinsspezifische Aspekte, welche durch die lokale Situation (z.B. lokal stärkere, geologische Überprägung) beeinflusst sein können, nochmals unter Berücksichtigung der lokalen Situation geprüft und bei Bedarf modifiziert werden (NTB 08-03, S. 230). Die Bewertung der Nagra folgt im Wesentlichen den Vorgaben des SGT, mit Ausnahme der folgenden Punkte:

- Das Kriterium 1.3 „Geochemische Bedingungen“ soll gemäss SGT (NAB 07-35, S. 25/26) nur einmal in Schritt 4 (Identifikation potenziell geeigneter Wirtgesteine) zur Anwendung kommen. Dies gilt umso mehr, als die Bewertung von Schritt 4 unverändert übernommen wird und somit nicht lokalen Abweichungen Rechnung trägt. Für das Kriterium 2.3 „Lagerbedingte Einflüsse“ gilt das Gleiche. Diese beiden Kriterien werden daher in den Tabelle 5-17 bis 5-21 von der KNE nicht bewertet. Auch beim Kriterium 1.4 „Länge der Freisetzungspfade“ werden alle Indikatoren wirtgesteinsspezifisch beurteilt (NTB 08-03, S. 238 u.a.). In SGT Schritt 5 ist also nur die in den einzelnen Bereichen unterschiedliche Länge der Freisetzungspfade zu bewerten.
- Die im SGT geforderte vierstufige Bewertungsskala wird gemäss Nagra (NTB 08-03, S. 383) mit der Skala sehr günstig (4); günstig (3); bedingt günstig (2) und ungünstig (1) umgesetzt. In NTB 08-03 (Tab. C.4–1 bis C.4–16) werden neben ganzzahligen Zahlenwerten auch Zwischenwerte von 3.6, 3.4 und 2.5 verwendet. Deren Begründung ist nicht nachvollziehbar. Zudem kommt die Wertung „ungünstig bzw. 1“ nirgends zur Anwendung. Um den Vergleich zu gewährleisten, verzichtete die KNE aber darauf, die Dezimalzahlen der Bewertungen durch ganze Zahlen zu ersetzen.

Die am Ende des Bewertungsprozesses vorgenommene „Bestimmung der Bereiche 1. Priorität und weiterer bevorzugter Bereiche“ ist im Sachplan nicht vorgesehen. Sie verändert die Rangfolge, die aufgrund der errechneten Gesamtbewertung ermittelt worden ist. Eine Begründung dafür fehlt in den publizierten NTB's. Gemäss mündlicher Aussage von P. Zuidema (Nagra) soll damit erreicht werden, dass neben dem Opalinuston noch weitere alternative Wirtgesteinsoptionen zur Verfügung stehen. Dieser Meinung kann die KNE im Grundsatz zustimmen.

Tabelle 5-16: Legende zu den Tabellen 5-17 bis 5-21 mit Beurteilungen der Nagra bzw. der KNE

4 bis 3.5	3.4 bis 3	2.9 bis 2	< 2	
sehr günstig	günstig	bedingt günstig	ungünstig	Wert von KNE nicht überprüft

Tabelle 5-17: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-OPA (1/2). Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig. Legende siehe Tabelle 5-16

KRITERIUM SGT		SMA-OPA- TJ-N		SMA-OPA- TJ-S		SMA-OPA- VZ-O		SMA-OPA- VZ-W	
		Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
	Arithm. Mittel Gesamttotal (ohne MW)	3.6 39.1	39.1	3.8 41.4	40.7	3.5 38.6	37.6	3.6 39.1	38.5
1.1	Räumliche Ausdehnung	3.7	3.7	4	4	3.5	3.5	3.7	3.7
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	3.6	3.5	4	4	4	4	3.5	3.5
1.3	Geochemische Bedingungen (nur im Schritt 4)								
1.4	Freisetzungspfade (nur „Länge“ in Schritt 5)	3	3.3	4	3.5	4	3.5	3.4	3.3
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.9	3.9	3.9	3.9	3.8	3.7	3.8	3.7
2.2	Erosion	3.3	3.3	4	4	4	4	3.8	3.8
2.3	Lagerbedingte Einflüsse (nur im Schritt 4)								
2.4	Nutzungskonflikte	3.1	3.1	3.3	3.3	2.5	2.5	3	3
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	4	4	4	4	4	4	4	4
3.2	Explorierbarkeit der räumli- chen Verhältnisse	3.5	3.5	3.7	3.7	3.4	3.4	3.5	3.5
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	4	4	4	4	3.8	3.7	3.8	3.7
4.1	Felsmechanische Eigen- schaften und Bedingungen	3	2.8	3	2.8	2.3	2	2.8	2.5
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	4	4	3.5	3.5	3.3	3.3	3.8	3.8
	Tabelle in NTB 03-03:	C.4-1		C.4-2		C.4-4		C.4-7	

Tabelle 5-18: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-OPA (2/2). Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig, Legende siehe Tabelle 5-16

KRITERIUM SGT		SMA-OPA- SJ-O		SMA-OPA- SJ-W	
		Nagra	KNE	Nagra	KNE
	Arithm. Mittel Gesamttotal (ohne MW)	3.4 37.4	37.0	3.4 37.7	36.8
1.1	Räumliche Ausdehnung	3	3	3	3
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	3.7	3.7	3.7	3.7
1.3	Geochemische Bedingungen (nur im Schritt 4)				
1.4	Freisetzungspfade (nur „Länge“ in Schritt 5)	3.4	3.3	4	3.3
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.7	3.7	3.7	3.7
2.2	Erosion	4	4	4	4
2.3	Lagerbedingte Einflüsse (nur im Schritt 4)				
2.4	Nutzungskonflikte	3.5	3.5	3.5	3.5
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	4	4	4	4
3.2	Explorierbarkeit der räumli- chen Verhältnisse	2.8	2.8	2.8	2.8
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	3.7	3.7	3.7	3.7
4.1	Felsmechanische Eigen- schaften und Bedingungen	2.3	2	2	1.8
4.2	Untertägige Erschließung und Wasserhaltung	3.3	3.3	3.3	3.3
	Tabelle in NTB 03-03:	C.4-8		C.4-10	

Tabelle 5-19: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-BD. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig, Legende siehe Tabelle 5-16

KRITERIUM		SMA-BD-TJ		SMA-BD-VZ-O		SMA-BD-VZ-W	
		Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SGT							
	Arithm. Mittel Gesamttotal (ohne MW)	3.4 37.2	36.8	3.2 36.1	34.6	3.2 36.4	34.2
1.1	Räumliche Ausdehnung	3.8	3.8	3.5	3.5	3.5	3
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	3.7	3.7	3.9	3.9	3.7	3.5
1.3	Geochemische Bedingungen (nur im Schritt 4)						
1.4	Freisetzungspfade (nur „Länge“ in Schritt 5)	3	2.8	4	3	4	3
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.8	3.8	3.7	3.6	3.7	3.6
2.2	Erosion	3.8	3.8	4	4	4	4
2.3	Lagerbedingte Einflüsse (nur im Schritt 4)						
2.4	Nutzungskonflikte	3.3	3.3	2.5	2.5	2.9	2.9
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
3.2	Explorierbarkeit der räumli- chen Verhältnisse	3.5	3.5	3.3	3.3	3.2	3.2
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	3.5	3.5	3.3	3.2	3.3	3.2
4.1	Felsmechanische Eigen- schaften und Bedingungen	3	2.8	2.3	2	2.3	2
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	3.3	3.3	3.1	3.1	3.3	3.3
	Tabelle in NTB 03-03:	C.4-3		C.4-5		C.4-6	

Tabelle 5-20: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche SMA-EFF und SMA-HEL. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig, Legende siehe Tabelle 5-16

KRITERIUM		SMA-EFF-SJ-O		SMA-EFF-SJ-W		SMA-MG-HEL (WELLENBERG)	
		Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SGT							
	Arithm. Mittel Gesamttotal (ohne MW)	3.1 34.8	32.9	3.1 34.5	32.6	3.2 37.0	31.9
1.1	Räumliche Ausdehnung	3	2.8	3	2.8	4	3
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	3.2	2.9	3.3	3	3.8	3.3
1.3	Geochemische Bedingungen (nur im Schritt 4)						
1.4	Freisetzungspfade (nur „Länge“ in Schritt 5)	3.6	2.5	3.6	2.5	4	2.5
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3
2.2	Erosion	3.9	3.9	4	4	3	3
2.3	Lagerbedingte Einflüsse (nur im Schritt 4)						
2.4	Nutzungskonflikte	3.5	3.5	3.1	3.1	3.8	3.8
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	2.8	2.8	2.8	2.8	3.3	3.3
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	2.8	2.8	2.7	2.7	2.5	2.2
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	3.4	3.4	3.4	3.4	3.3	2.8
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	2.8	2.5	2.8	2.5	3	2.5
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	2.5	2.5	2.5	2.5	3	2.5
	Tabelle in NTB 03-03:	C.4-9		C.4-11		C.4-12	

Tabelle 5-21: Zusammenfassende Bewertung der bevorzugten Bereiche HAA-OPA. Bewertungsstufen: 3.5 – 4: sehr günstig, 3.0 – 3.4: günstig, 2.0 – 2.9: bedingt günstig, < 2.0: ungünstig, Legende siehe Tabelle 5-16, S. 91

KRITERIUM		HAA-OPA TJ		HAA-OPA VZ-O		HAA-OPA VZ-M		HAA-OPA VZ-W	
		Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE	Nagra	KNE
SGT									
	Arithm. Mittel Gesamttotal (ohne MW)	3.6 40.0	39.3	3.4 37.6	36.8	3.5 38.3	36.5	3.5 39.0	38.0
1.1	Räumliche Ausdehnung	4	4	3.5	3.5	3.5	2.5	3.5	3.5
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	4	4	4	4	3.8	3.8	3.7	3.7
1.3	Geochemische Bedingungen (nur im Schritt 4)								
1.4	Freisetzungspfade (nur „Länge“ in Schritt 5)	4	3.5	4	3.5	4	3.5	4	3.3
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	3.7	3.7	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
2.2	Erosion	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4	3.7	3.7
2.3	Lagerbedingte Einflüsse (nur im Schritt 4)								
2.4	Nutzungskonflikte	3.3	3.3	2.5	2.5	2.9	2.9	3	3
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	4	4	4	4	4	4	4	4
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	3.7	3.7	3.5	3.5	3.3	3.3	3.5	3.5
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	3.8	3.8	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
4.1	Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	2.5	2.3	2.3	2	2.3	2	2.8	2.5
4.2	Untertägige Erschließung und Wasserhaltung	3.5	3.5	3.3	3.3	3.5	3.5	3.8	3.8
	Tabelle in NTB 03-03:	C.4-13		C.4-14		C.4-15		C.4-16	

Die Tabellen 5–17 bis 5–21 geben einen Überblick über die durch die KNE detailliert überprüften Kriterien/Indikatoren (gefärbte Felder). Bei den von der KNE nicht bewerteten Kriterien/Indikatoren (nicht eingefärbte Felder) wurde die Bewertung der Nagra übernommen.

Die Unterschiede zwischen den Bewertungen der Nagra und der KNE sind in den Abschnitten 5.2 bis 5.6 erläutert. Zentral für die Bewertung der Standortgebiete sind die Verschärften Anforderungen und die Gesamtbewertungen. Die zahlreichenden Unterschiede dieser Tabellen mögen einen Nicht-Spezialisten auf den ersten Blick erstaunen. Sie stellen in den meisten Fällen primär den Ermessensspielraum bei der Beurteilung der erdwissenschaftlichen Eigenschaften des geologischen Untergrundes dar. Da die heutigen und zukünftigen geologischen Verhältnisse nicht exakt bestimmbar sind, sondern auch auf dem jeweiligen Erfahrungsspektrum der Begutachter beruhen, sind kleinere abweichende Bewertungen (≤ 0.5) bei den einzelnen Indikatoren nicht signifikant.

In Anbetracht der zahlreichen zu beurteilenden Aspekte und der komplexen Zusammenhänge ist es beeindruckend, dass nur sehr wenige signifikante Abweichungen gefunden wurden. Dies bestätigt die Robustheit der von der Nagra erarbeiteten geologisch-hydrogeologischen Datengrundlage und Analyse.

Bei der Bewertung der Gesamtsummen gilt es zu beachten, dass die Langzeitsicherheit nicht durch die Summe der geologischen und bautechnischen Kriterien erfasst werden kann. Die-

se Bewertung erfolgt in zukünftigen Etappen durch standortspezifische Sicherheitsanalysen. Wenn man von der Prioritätensetzung absieht und sich auf die anhand der Bewertung der Kriterien berechneten Gesamttotale abstützt, ergeben sich die nachstehenden Schlussfolgerungen:

SMA-Lager

Für ein SMA-Lager werden von der Nagra die Bereiche (bzw. Standortgebiete) SMA-OPA-TJ-S (Zürcher Weinland), SMA-OPA-TJ-N (Südliches Schaffhausen) und SMA-OPA-VZ-W (Bözberg) vorgeschlagen und gegenüber den übrigen OPA-Bereichen favorisiert. Dem kann seitens der KNE zugestimmt werden. Nach den bei der Bewertung obenaus schwingenden Opalinuston-Gebieten folgen die Gebiete mit „Braunem Dogger“ auf dem zweiten, Gebiete mit Effinger Schichten auf dem dritten und Gebiete mit helvetischen Mergeln auf dem vierten Platz. Die dritt- und viertklassierten Gebiete und Gesteine sind wegen ihres hohen Kalkgehalts (Effinger Schichten) oder der sehr starken Tektonisierung (Palfris-Schiefer) grundsätzlich schlechter geeignet. Der Grenzabstand zur Felsoberfläche im Bereich übertiefer Felsrinnen sollte konservativerweise von 100 m auf 150 m erhöht werden.

Die Evaluation der potenziellen Bereiche für SMA-Lager im alpinen Raum dagegen ist für die KNE zum Teil diskutabel und bezüglich einiger zentraler Indikatoren nicht in letzter Konsequenz durchgeführt. So schafft die Nagra für die stark tektonisierten Mergel-Akkumulationen des Helvetikums am Alpennordrand Sonderregelungen, insbesondere hinsichtlich der Bewertung der Kriterien „Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse“ und „räumliche Ausdehnung“ (Indikatoren *Abstand zu regionalen Störungszonen*, *Diffus gestörte Zonen* und *Regionales Störungsmuster und Lagerungsverhältnisse*). Dabei wird von der Nagra die intensive Tektonisierung der Mergel-Akkumulationen (mit sehr zahlreichen erbohrten, mächtigen kataklastischen Bruchzonen) als primäre, zum Teil positive Gesteinseigenschaft bewertet. Die KNE anerkennt zwar, dass nicht alle Indikatoren direkt von der Nordschweiz auf die Alpen übertragen werden können. Sie legt aber dennoch grossen Wert auf ein für alle Standortgebiete möglichst einheitlich angewendetes Auswahlverfahren. Insbesondere scheint es der KNE in diesem Zusammenhang wichtig, dass nur schwach tektonisierte Gebiete mit möglichst unbedeutender neotektonischer Aktivität als potenzielle Standortregionen in Betracht gezogen und weiterverfolgt werden. Dies führt dazu, dass die KNE das Standortgebiet Wellenberg trotz einiger sehr positiver Eigenschaften (grosse Mächtigkeit und gute Barriereneigenschaften in einer Tiefe von > 550 m u.T.) als deutlich weniger geeignet einstuft als die bevorzugten Standortgebiete in der Nordschweiz.

Hinsichtlich des *Platzangebotes untertage* wird der bevorzugte Bereich SMA-BD-VZ-W (Nördlich Lägeren) durch die KNE schlechter bewertet als durch die Nagra. Ebenfalls diskutierbar ist das tatsächliche Platzangebot am Standort Wellenberg.

HAA-Lager

Für ein HAA-Lager werden von der Nagra die Bereiche HAA-OPA-TJ (Zürcher Weinland), HAA-OPA-VZ-W (Bözberg) und HAA-OPA-VZ-O (östlicher Teil Nördlich Lägeren) als Standortgebiet vorgeschlagen. Diesem Vorschlag kann seitens der KNE zugestimmt werden. Beim Gebiet HAA-OPA-VZ-M (mittlerer Teil Nördlich Lägeren) kann die Frage nach der räumliche Ausdehnung anhand der heute verfügbaren Daten nicht mit ausreichender Sicherheit beantwortet werden.

6 Verwendete Literatur und Berichte

- Allia V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Dissertation aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel, Nr. 10.
- Amann F., Löw S. (2009): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien. Expertenbericht ENSI 33/65, ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Zürich.
- BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil. Bundesamt für Energie, Bern.
- Bock H., Dehandschutter B., Martin C.D., Mazurek M., de Haller A., Skoczylas F., Davy C. (2009): Self-sealing of Fractures in Argillaceous Formations in Context with the Geological Disposal of Radioactive Waste. Nuclear Energy Agency Publication. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, OECD/NEA [final draft, unpublished].
- Bucher S., Loew S. (2009): Unloading joints in the central Aar granite of the Schöllenen Gorge (canton Uri, Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences* 102, 403-421.
- Burkhard M. (1999): Strukturgeologie und Tektonik im Bereich AlpTransit, *In* Löw S., Wyss R. (eds.): Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg. Balkema, Rotterdam.
- Burkhard M., Grünthal G. (2009): Seismic source zone characterization for the seismic hazard assessment project PEGASOS by Expert Group 2 (EG1b). *Swiss Journal of Geosciences* 102, 149-188.
- Calais E., Nocquet J., Jouanne F., Tardy M. (2002): Current strain regime in the Western Alps from continuous Global Positioning System measurements 1996 - 2001. *Geology* 30, 651-654.
- Cederbom C.E., Sinclair H.D., Schlunegger F., Rahn M.K. (2004): Climate-induced rebound and exhumation of the European Alps. *Geology* 32, 709-712.
- Champagnac J.-D., Schlunegger F., K. N., von Blanckenburg F., L.M. A., Schwab M. (2009): Erosion-driven uplift of the modern Central Alps. *Tectonophysics* 474, 236-249.
- Dewhurst D.N., Yang Y., Aplin A.C. (1999): Permeability and fluid flow in natural mudstones. *In*: Aplin, A.C., Fleet, A.J., Macquaker, J.H.S. (eds.): *Muds and Mudstones*. Geological Society London, Special Publication 158, 23-43.
- Dr. von Moos AG (2009): Standortgebiete: Prüfung der Grundwasserverhältnisse im Hinblick auf die bautechnische Erschliessung. Entwurf des Expertenberichts ENSI 33/69 vom 10.07.2009. Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Zürich.
- Eichhubl P., D'Onfro P.S., Aydin A., Waters J., McCarty D.K. (2005): Structure, petrophysics, and diagenesis of shale entrained along a normal fault at Black Diamond Mines, California – implications for fault seal. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 89, 1113-1137.
- Einsele G. (2000): *Sedimentary Basins*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Emch+Berger AG (2010): Beurteilung der Anforderungen and die bautechnische Machbarkeit und deren Umsetzung im Standortauswahlverfahren SGT Etappe 1. Expertenbericht ENSI 33/68. Emch+Berger AG, Bern.
- ENSI-G03: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis (Richtlinie). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, 2009.
- ENSI 33/43: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Beurteilung der für das Einengungsverfahren verwendeten Indikatoren und der von der Nagra festgelegten Mindestanforderungen und Bewertungsskalen (Entwurf Aktennotiz). Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.
- Færseth R.B. (2006): Shale smear along large faults: continuity of smear and the fault seal capacity. *Journal of the Geological Society London* 163, 741-751.
- Fidelibus C., Löw S. (2007): Groundwater flux through radioactive waste repository in the USM West. ETH Report 3465/54, Engineering Geology, ETH Zurich.

- Fisher Q.J., Harris S.D., McAllister E., Knipe R.J., Bolton A.J. (2001): Hydrocarbon flow across faults by capillary leakage revisited. *Marine and Petroleum Geology* 18, 251-257.
- Fisher Q.J., Knipe R.J. (2001): The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf. *Marine and Petroleum Geology* 18, 1063-1081.
- Füchtbauer H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine*. Stuttgart, Schweizerbart.
- Galloway W.E., Hobday D.K. (1996): *Terrigenous Clastic Depositional Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- Griffiths J.C. (1967): *Scientific Methods in Analysis of Sediments*. McGraw-Hill, New York.
- Haney M.W., Snieder R., Sheiman J., Losh S. (2005): A moving fluid pulse in a fault zone. *Nature* 437, 46.
- Hantke R. (1991): *Landschaftsgeschichte der Schweiz und ihrer Nachbargebiete*. Ott Thun.
- Hay W.W., Wold C.N., Herzog J.M. (1992): Preliminary mass-balanced 3D reconstructions of the Alps and surrounding areas during the Miocene, *in* Pflug R., and Harbaugh J.W., eds., *Computer graphics in geology, threedimensional computer graphics in modeling geologic structures and simulating geologic processes*. Lecture Notes Earth Sci, Volume 41, 99-100.
- Hekel U. (1994): *Hydrogeologische Erkundung am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium)*, Dissertation Tübinger geowiss. Arb. C18, Eberhard-Karls-Universität Tübingen.
- Hinderer M. (2001): Late Quaternary denudation of the Alps, valley and lake fillings and modern river loads. *Geodinamica Acta* 14, 231-263.
- Hofmann F. (1962): Ein jungtertiärer Vulkan-Schlot bei Hofen (Kanton Schaffhausen). – *Mitt. natf. Ges. Schaffhausen* 27, 185-191.
- Hofmann F., Schlatter R., Weh M. (2002): Erläuterungen zum Bl. 8217 Tengen-Wiechs a.R. der Geologischen Karte von Baden-Württemberg 1:25'000. – Landesamt Geol. Rohst. Bergbau Baden-Württemberg, Freiburg i.Br.
- Hölker A. (2006): *Lower Freshwater Molasse: Stochastic Modelling of Hydraulic Conductivity*. Report Proseis AG, Zurich.
- Jolley S.J., Dijk H., Lamens J.H., Fisher Q.J., Manzocchi T., Eikmans H., Huang Y. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models (Brent Province, northern North Sea). *Petroleum Geoscience* 13, 321-340.
- KEG (2003): *Kernenergiegesetz*. Schweiz, SR 732.1.
- Keller B. (1992): Hydrologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 611-651.
- Keller B., Bläsi H.-R., Platt N.H., Mozley P.S., Matter A. (1990): *Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse*. LH6-Berichte 13, Landeshydrologie und -geologie, Bern.
- Klemenz W. (1974): Die Hydrogeologie des Gebirges im Obergestelnstollen. *Gas-Wasser-Abwasser* 54, 287-289.
- Koestler A.G., Hunsdale R. (2002): *Hydrocarbon Seal Quantification*. Norwegian Petroleum Society, Special Publications 11.
- Krafft M. (1984): *Führer zu den Vulkanen Europas. Teil 2: Deutschland und Frankreich*. – Enke Stuttgart.
- Kuhlemann J., Frisch W., Dunkl I., Szekely B. (2001): Quantifying tectonic versus erosive denudation by the sediment budget; the Miocene core complexes of the Alps. *Tectonophysics* 330, 1-23.
- Laws S. (2001): *Structural, Geomechanical and Petrophysical Properties of Shear Zones in the Eastern Aar Massif*, Doctorate thesis Diss. ETH No. 14245, ETH Zurich, Zurich, Switzerland.
- Mazurek M., Hurford A.J., Leu W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *Basin Research* 18, 27-50.
- Mehta P.K. (1983): Mechanisms of sulfate attack on portland cement concrete - another look. *Cem. Concr. res.* 13, 401-406.
- Meier D., Kronberg P. (1989): *Klüftung in Sedimentgesteinen*. Enke, Stuttgart.

- Mitchell J.K. (1993): Fundamentals of Soil Behavior (2nd ed.). Wiley & Sons, New York.
- Mutti E. (1992): Turbidite Sandstones. AGIP, San Donato Milanese.
- Nagra-KNE (2009): Nagra-KNE Fachgespräch "Tongehalt". Aktennotiz (8 pp). ENSI, Brugg.
- Nagra (1994a): Faziesstudie Oberer Keuper bis Malm: Petrophysikalische Auswertung und geologische Interpretation der Fremd- und Eigenbohrungen in der Nordostschweiz und dem näheren Ausland. Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (1994b): Untere Süsswassermolasse des westlichen Mittellandes - Regionale Interpretation bestehender Seismik und petrophysikalische Untersuchungen. Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (1994c): Untere Süsswassermolasse des zentralen und östlichen Mittellandes. Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2000): Endlager BE/HAA/LMA - Opalinuston, Konzeptstudie Anlagen und Betrieb - Felsmechanische Berechnungen und Dimensionierung der Ausbruchsicherung zum Nachweis der baulichen Machbarkeit. Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2003): Opalinuston, Felsmechanische Untersuchungen. Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2009a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager: Grundlagen und Umsetzung der Indikatoren 'Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' sowie 'Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften' (Bericht zu Behördenanfrage). Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- Nagra (2009b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager: Interne Arbeitsnotizen zu den Grundlagen und zur Umsetzung des Indikators 'Platzangebot untertags' (Bericht zu Behördenanfrage). Nagra Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- NAB 04-09: Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2005.
- NAB 04-10: Explorierbarkeit der USM mit 3D-Seismik. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2004.
- NAB 05-15: Felsmechanische Modellierungen Opalinuston im Rahmen EP-05. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2009.
- NAB 06-26: Stratigrafie, Mächtigkeit und Lithofazies der mesozoischen Formationen in der Nordschweiz. Eine Kompilation von Bohrungen, Übersichts- und Aufschlussprofilen. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 07-15: EP-05 EWS Küttigen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht). Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2007.
- NAB 07-28: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jura-südfuss - Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttigen 1, Küttigen 2 und Oftringen. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2007.
- NAB 07-35: Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2009.
- NAB 08-02: NOK EWS-Bohrung Oftringen: Geologische, mineralogische und bohrlochgeophysikalische Untersuchungen (Rohdatenbericht). Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-03: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums. Nagra

- Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-05: VPAC - A numerical model for groundwater flow and radionuclide transport. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-07: Tectonics of the Molasse Basin of Western Switzerland: An Overview. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-09: Analyse des Tongehalts in den Effinger Schichten anhand von Bohrlochmessungen. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-18: Borehole Oftringen: Mineralogy, Porosimetry, Geochemistry, Pore Water Chemistry. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-43: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Ton- und Mergel-Formationen im Faltenjura und angrenzenden Gebieten. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-45: Comparative rock-mechanical modeling of ILW caverns in different host rocks. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 08-48: Felsmechanische Eigenschaften möglicher Wirtgesteine für geologische Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NAB 09-07: Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3 - Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2009.
- NAB 09-29: Fragen des ENSI und zugehörige Antworten der Nagra, Projekt 33KGX.SGTE1. Nagra Arbeitsbericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2010.
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2002.
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente; verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2002.
- NTB 02-05: Project Opalinus Clay: Safety Report Demonstration of Disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2002.
- NTB 02-06: Project Opalinus Clay: Models; Codes and Data for Safety Assessment – Demonstration of disposal feasibility for spent fuel; vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2003.
- NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager - Geologische Grundlagen. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NTB 08-05: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die

- Geologie; Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2008.
- NTB 88-25: Sedimentstudie - Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz; Textband. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 1988.
- NTB 93-22: Kristallin-I – Safety assessment report. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 1994.
- NTB 94-06: Endlager für schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA) – Bericht zur Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen; NW). Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 1994.
- NTB 96-01: Geosynthese Wellenberg 1996: Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 1997.
- NTB 99-08: Geologische Entwicklung der Nordschweiz; Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Technischer Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen, 2002.
- NEA (2009): Natural Tracer Profiles Across Argillaceous Formations: The CLAYTRAC Project. Research report NEA No. 6253. OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- Persaud M., Pfiffner O.A. (2004): Active deformation in the eastern Swiss Alps: post-glacial faults, seismicity and surface uplift. *Tectonophysics* 385, 59-84.
- Pfiffner A.O. (2009): *Geologie der Alpen*. Haupt, Bern, Stuttgart, Ulm.
- Phillips O. (1991): *Flow and reactions in permeable rocks*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pusch R. (2001): The microstructure of MX-80 clay with respect to its bulk physical properties under different environmental conditions, SKB Technical Report SKB TR-01-08, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Stockholm.
- Renner F. (1982): Beiträge zur Gletschergeschichte des Gotthardgebietes und dendroklimatologische Analysen an fossilen Hölzern. Diss. Univ. Zürich.
- Santhanam M., Cohen M.D., Olek J. (2001): Sulfate attack research - whither now?
- Schachtschabel P., Blume H.-P., Hartge K.H., Schwertmann U. (1979): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Enke, Stuttgart.
- Scholle P., Spearing D. (1982): Sandstone Depositional Environments. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 31.
- Schreiner A. (1984): Hegau und westlicher Bodensee. *Samml. Geol. Führer* 62. Bornträger, Stuttgart.
- Somaruga A. (1997): Geology of the Central Jura and the Molasse Basin: New insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Mém. Soc. Neuchât. Sci. Nat.* 12.
- Sparks D.L. (2003): *Environmental Soil Chemistry*. Academic Press Limited, London.
- Stow D.A.V. (1981): Fine-grained sediment: terminology. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 14, 243-244.
- Strasser M., Anselmetti F.S., Fäh D., Giardini D., Schnellmann M. (2009): Magnitudes and source areas of large prehistoric northern Alpine earthquakes revealed by slope failures in lakes. *Geology* 34, 1005-1008.
- Strunck P. (2001): The Molasse of Western Switzerland. PhD Thesis, University of Berne.
- Tacher L., Bonnard C., Laloui L., Parriaux A. (2005): Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity. *Landslides* 2, 3-14.
- Ustaszewski M. (2007): Neotectonics in the central and western Swiss Alps. PhD Thesis, University of Berne.
- Vernon A.J., van der Beek P., Sinclair H.D. (2009): Spatial correlation between long-term exhumation rates and present-day forcing parameters in the western European Alps. *Geology* 37, 859-862.

- Verweij J.M. (1993): Hydrocarbon Migration Systems Analysis. Developments in Petroleum Science 35. Elsevier, Amsterdam.
- Vonderschmitt L. (1942): Die geologischen Ergebnisse der Bohrungen von Hirtzbach bei Altkirch (Ober-Elsass). *Eclogae geol. Helv.* 35, 67-99.
- Wetzel A. (1982): Cyclic and Dyscyclic Black Shale Formation. In: Einsele, G. & Seilacher, A. (eds.): *Cyclic and Event Stratification*. Springer Berlin, Heidelberg, New York.
- Wetzel A., Allia V. (2000): The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones: an example from the Middle Jurassic of Switzerland. *Journal of Sedimentary Research* 70, 170-180.
- Winkler W. (1983): Stratigraphie, Sedimentologie und Sedimentpetrographie des Schlieren-Flysches (Zentralschweiz). Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, Neue Folge, 105. Schweizerische Geologische Kommission, Bern.
- Wiprut D., Zoback M.D. (2000): Fault reactivation and fluid flow along a previously dormant normal fault in the northern North Sea. *Geology* 28, 595-598.
- Wittmann H., von Blanckenburg F., Kruesmann T., Norton K.P., Kubik P.W. (2007): Relation between rock uplift and denudation from cosmogenic nuclides in river sediment in the Central Alps of Switzerland. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* 112.
- Wyss R. (2001): Der Gasausbruch aus einer Erdsondenbohrung in Wilen (OW). *Bulletin für Angewandte Geologie* 6, 25-40.
- Yong S. (2008): A Three-Dimensional Analysis of Excavation-Induced Perturbations in the Opalinus Clay at the Mont Terri Rock Laboratory. Diss. ETH No. 17575, ETH Zurich.
- Ziegler P.A., Fraefel M. (2009): Response of drainage systems to Neogene evolution of the Jura fold-thrust belt and Upper Rhine Graben. *Swiss Journal of Geosciences* 102, 57-76.

