Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2

Stellungnahme der EGT zum Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete

30. Januar 2017

Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung (EGT)

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2

Stellungnahme der EGT zum Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete

30. Januar 2017

© Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung EGT

www.egt-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 7

1.1 Auftrag 7

1.2 Berichtsaufbau und Experten der EGT 7

1.3 Strategie und Umsetzung der Vorgaben des Sachplanverfahrens 8

1.4 Kommentare zur Berichterstattung der Nagra 10

2. Bewertung der Wirtgesteine und Auswahl prioritärer Wirtgesteine 12

2.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra 12

2.2 Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine für das SMA- und HAA-Lager 13

2.3 Konzeptuelle Modelle und Parameter der SMA-Wirtgesteine für den Radionuklidtransport 16

2.4 Migration und Verdünnung der Radionuklide in der Biosphäre 17

2.5 Wirtgesteins- und Standort-spezifische Dosisrechnungen für das SMA-Lager 19

2.6 Sicherheitsrelevante Auswirkungen geochemischer Prozesse für das SMA-Lager 22

2.7 Langzeitbeständigkeit und Gastransport im EGTS für das SMA-Lager 28

2.8 Gastransport in den SMA- und HAA-Wirtgesteinen 31

2.9 Felsmechanische Eigenschaften der Wirtgesteine für das SMA-Lager 34

2.10 Homogenität und Explorierbarkeit von Heterogenitäten im Opalinuston und 'Braunen Dogger' 37

2.11 Zusammenfassende Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager 39

3. Abgrenzung optimierter Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager 41

3.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra 41

3.2 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf Erosionskriterien 42

3.3 Prozessierung und Belastbarkeit der 2D-Seismik im Tafeljura 58

3.4 Neotektonik und Geodynamische Entwicklung der Nordschweiz 63

3.5 Seismizität der geologischen Standortgebiete 66

3.6 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf der tektonischen Überprägung 68

3.7 Platzbedarf der Tiefenlager in den verschiedenen Standortgebieten 71

3.8 Annahmen zur Auslegung, Vortriebsmethode, Stützung und Versiegelung der SMA- und HAA-Lager 72

3.9 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf bautechnischen Kriterien, insbesondere maximale Tiefenlage 76

3.10 Auswirkungen der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit des SMA- und HAA-Lagers 81

3.11 Abgrenzung der Lagerperimeter 85

4. Sicherheitstechnische Bewertung und Vergleich der geologischen Standortgebiete 91

4.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra 91

4.2 Vergleichende Bewertung aller SMA-Standortgebiete 92

4.3 Vergleichende Bewertung aller HAA-Standortgebiete 94

5. Verwendete Literatur und Berichte 97

6. Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis 105

Verzeichnis der Figuren

Figur 2-1: Konzeptualisierung der Aquifere und Aquitarde in den Wirtgesteinen der Nordschweiz (NTB 14-02-VI) 14

Figur 2-2: Übersicht der wirtgesteinsspezifischen Dosiskurven für das SMA-Lager für verschiedene Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle (hellgrün). Referenzfälle grün, ENSI-Parametervariationen blau, massgebender Fall für die Einengung violett. (aus NTB 14-03)....21

Figur 2-3: Querschnitt der alternativen Verschliessung V5 (NTB 08-07, S. 29) 28

Figur 3-1: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt ebenfalls die Alter, die für diese Sedimente mit Hilfe kosmogener Nuklide gemessen wurden. 47

Figur 3-2: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt die Konsequenzen auf die Tieferlegung des Rheins für den Fall, dass die Lage der Erosionsbasis während mindestens 2 Millionen Jahren vor heute und 1 Million Jahre konstant war. 48

Figur 3-3: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt eine hypothetische Lage der Erosionsbasis für die Höheren Deckenschotter (c. 2 Ma) sowie für die Tieferen Deckenschotter (c. 1 Ma). Aus dieser Rekonstruktion resultiert unweigerlich eine Steilstufe für den Flussverlauf des Rheins. 49

Figur 3-4: Oben: Ausgrenzung durch regionale Störungen und zu meidende tektonsiche Zonen (F. Wenzel). Gezeigt sind die Ausgrenzungen aus den Profilen (blau) und eine mögliche Interpolation. Zum Vergleich unten: Lagerperimeter Nördlich Lägern, Fall SMA-NL-mLE-r (massgebender Lagerperimeter für die Einenegung, mLE, aus NTB 14-01, Anhang Fig. B.3-3) 61

Figur 3-5: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern, Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1, aus NTB 14-01. Fig. 4.2-7) 87

Figur 3-6: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern: Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2, aus NTB 14-01, Fig. 4.2-1). 87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01) 15

Tabelle 2-2: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01) 23

Tabelle 2-3: Das Abfallinventar der SMA, modifiziert nach Nagra (2014). Aufgelistet sind Abfälle mit >0.1 Gew.% des gesamten Inventars....25

Tabelle 2-4: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' und 'Bautechnische Eignung' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01)....37

Tabelle 3-1: Konsolidations- und Quellindices nach NAB 14-01 * Wert nach Nagra mit Vorsicht zu behandeln....83

Tabelle 4-1: Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren für die SMA-Standortgebiete (NTB 14-01, Tab. 5.2-1)....92

Tabelle 4-2: Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren für die HAA-Standortgebiete (NTB 14-01)....95

Zusammenfassung

Die von der Nagra für Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager SGT vorgelegte Berichterstattung ist sehr umfangreich und umfasst 3 Hauptberichte (1'700 Seiten) sowie fast 200 Referenzberichte (15'000 Seiten) und eine umfangreiche Nachlieferung zu den bautechnischen Nachforderungen des ENSI. Die EGT hat sich im Rahmen von 11 Zwischenhaltfachsitzungen (März 2013 bis Juli 2014), eines Fachsymposiums an der ETH Zürich (14. Februar 2014), von 3 Sitzungen zur Grobprüfung (September bis Dezember 2014) und 12 Sitzungen zur Hauptprüfung (März 2015 bis November 2016) intensiv mit diesen Unterlagen befasst.

Die EGT erachtet den fachlichen Tiefgang und die fachliche Breite der von der Nagra für Etappe 2 SGT durchgeführten Untersuchungen als sehr gut, auch im internationalen Vergleich mit anderen Standortauswahlverfahren weltweit. Die Nagra hat in ihren Haupt- und Referenzberichten alle in den Vorgaben des Sachplans (Konzeptteil) und der Prüfbehörde (ENSI) vorgegebenen Anforderungen berücksichtigt, und zusätzlich weitere von anderen Gremien angesprochene Themen und Fragen abgehandelt. Die EGT erachtet das von der Nagra gewählte 5-stufige Vorgehen für die vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete in Etappe 2 SGT als sinnvoll. Die für Etappe 2 neu erhobenen geologischen und hydrogeologischen Daten sind durchwegs von sehr hoher Qualität und für die Standorteinengung in Etappe 2 SGT geeignet. Wichtige Defizite erkennt die EGT in den für Etappe 2 SGT zur Verfügung stehenden felsmechanischen und seismischen Datensätzen und der Überinterpretation der 2D-Seismik.

Die EGT erachtet die Transparenz aller Untersuchungen der Nagra, welche in der allgemeinen Zugänglichkeit aller Auftragnehmerberichte und den offenen Diskussionen im Rahmen der Zwischenhaltfachsitzungen zum Ausdruck kommt, als vorbildlich. Die EGT empfiehlt der Nagra, zukünftig diese Transparenz beizubehalten, aber eine Einschränkung der für die jeweilige SGT Etappe wesentlichen Themen und der mit dem Etappenvorschlag direkt verknüpften Berichte durchzuführen.

Basierend auf den grundsätzlich problematischen Barriereneigenschaften der Effinger Schichten und Helvetischen Mergel und der schwierigen Explorierbarkeit der heterogenen Transportwege des 'Braunen Doggers' unterstützt die EGT die Priorisierung des Opalinustons als einziges SMA-Wirtgestein in der Nordschweiz. Allerdings ist bei dieser Priorisierung darauf hinzuweisen, dass die lagerbedingten Einflüsse (insbesondere die Eigenschaften der Auflockerungszone und die Auswirkungen von Korrosionsgas auf die technischen und geologischen Barrieren) die vorzüglichen Barriereneigenschaften des Opalinustons nicht signifikant und langfristig beeinträchtigen dürfen. Dies erfordert zukünftig eine intensive Auseinandersetzung mit technischen Fragestellungen zur Erstellung und Verfüllung der Lagerhohlräume, da bisher insbesondere der Nachweis der Langzeitfunktionsfähigkeit des Gastransport-Systems EGTS von der Nagra nicht erbracht wurde. Trotz der offenen Fragen geht die EGT nach heutigem Kenntnisstand davon aus, dass diese negativen Auswirkungen der lagerbedingten Einflüsse technisch lösbar sind.

Die EGT kommt zum Schluss, dass die Bewertungen der maximalen Tiefenlage (Optimierungsanforderung) des SMA- und HAA-Lagers aus bautechnischer Sicht auch nach den Nachlieferungen der Nagra nicht vollumfänglich nachvollziehbar sind. Die Auswirkungen grösserer Tiefenlagen (> 600 SMA, > 700 m HAA) auf das Gebirgsverhalten und die Langzeitsicherheit sind heute ungewiss und auch abhängig von den zur Verfügung stehenden Lager- und Baukonzepten (Dimensionen, technische Barrieren, Vortriebskonzepte, Stützmittel u.a.).

Die Unsicherheiten in den geologischen und felsmechanischen Verhältnissen im Standortgebiet Nördlich Lägern haben zur Folge, dass die Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter und die von der Nagra ausgewiesenen Platzangebote nicht belastbar sind. Demzufolge kann die EGT heute der Zurückstellung des Standortgebiets Nördlich Lägern nicht folgen und empfiehlt, dieses Standortgebiet in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchen. Qualitativ betrachtet sind die negativen bautechnischen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit mit dem heutigen Lagerkonzept und den vorgeschlagenen bautechnischen Massnahmen im Standortgebiet Jura Ost vermutlich geringer als an den Standorten Zürich Nordost und insbesondere in Nördlich Lägern.

Die EGT stimmt der Zurückstellung der SMA Standortgebiete Wellenberg, Südranden und Jura-Südfuss zu. Das Standortgebiet Wellenberg ist insbesondere aufgrund der starken tektonischen Überprägung, sowie der Heterogenität, der schwierigen Explorationsverhältnisse, der Erosion und Auflockerung sowie der geodynamischen Situation zurückzustellen. Die Zurückstellung des Standortgebietes Südranden erfolgt auf Grund der von der Nagra ausgewiesenen Erosionsszenarien. Aufgrund der fehlenden Rahmengesteine und der geringen Mächtigkeit des Opalinustons unterstützt die EGT die Zurückstellung des Standortgebietes Jura-Südfuss.

1. Einleitung

1.1 Auftrag

Im Rahmen des Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager (SGT) unterstützt die EGT das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) und nimmt zu erdwissenschaftlichen und bautechnischen Fragen Stellung. Die vorliegende Stellungnahme fasst die Ergebnisse der Überprüfung durch die EGT zusammen, die sich an den im SGT festgehaltenen sechs zentralen Fragen für Etappe 2 orientieren (BFE 2008, S. 64):

1) Haben die Entsorgungspflichtigen die Kriterien hinsichtlich Sicherheit und technischer Machbarkeit gemäss Konzeptteil des Sachplans bei der Erarbeitung der Vorschläge adäquat und stufengerecht berücksichtigt?
2) Ist das Vorgehen der Entsorgungspflichtigen bei der Erarbeitung der Vorschläge transparent und nachvollziehbar?
3) Haben die Entsorgungspflichtigen alle verfügbaren relevanten geologischen Informationen berücksichtigt und sind diese ausreichend für die Zwecke einer provisorischen Sicherheitsanalyse im Hinblick auf das Zwischenergebnis in Etappe 2 SGT?
4) Können die Behörden die Resultate der provisorischen Sicherheitsanalysen nachvollziehen?
5) Können die Behörden die Resultate der Abwägungen aufgrund der qualitativen Sicherheitskriterien nachvollziehen und dem Resultat der gesamtheitlichen Bewertung zustimmen?
6) Können die Behörden den Standortvorschlägen aus der Sicht von Sicherheit und technischer Machbarkeit zustimmen?

1.2 Berichtsaufbau und Experten der EGT

Im vorliegenden Kap. 1 werden das methodische Vorgehen und die Berichterstattung der Nagra generell kommentiert. Entsprechend dem Aufbau des Hauptberichts NTB 14-01 der Nagra werden in Kap. 2 zunächst die zur Auswahl stehenden Wirtgesteine 'Brauner Dogger', Effinger Schichten, Helvetische Mergel und Opalinuston bewertet. Kap. 3 enthält die Bewertungen der optimierten Lagerperimeter für das von der Nagra als prioritär angesehene Wirtgestein Opalinuston in den Standortgebieten der Nordschweiz und für die Helvetische Mergel am Standortgebiet Wellenberg. Schliesslich werden in Kap. 4 die Auswahl und der Vergleich aller geologischen Standortgebiete sicherheitstechnisch bewertet. Dabei werden auch die im Zuge der Nachforderung des ENSI zur Etappe 2 SGT eingereichten Dokumente der Nagra berücksichtigt.

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

1) Prof. Dr. Simon Löw, Geologisches Institut, ETH Zürich, Präsident (Projektleitung, Ingenieurgeologie und Felsmechanik; Kap. 1.3, 2.2, 2.11, 3.9, 3.10, 3.11, 4.2, 4.3)
2) Dr. Annette Johnson†, EAWAG, Forschungsabteilung W&T, Dübendorf (Geochemie und Gesteins-Wasser-Wechselwirkung; Kap. 2.6)
3) Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig, Universität Stuttgart, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung (Transport-Modellierung, 2-Phasen Fluss; Kap. 2.3, 2.7, 2.8)

4) Prof. Dr. Rolf Kipfer, EAWAG, Forschungsabteilung W&T, Dübendorf (Isotopengeochemie und Hydrogeologie; Kap. 1.4, 2.2, 2.4, 2.5)
5) Prof. Dr. Alan Geoffrey Milnes, emeritiert (Tektonik, Regionale Geologie; Kap. 3.4, 3.6, 4.1)
6) Prof. Dr. Fritz Schlunegger, Institut für Geologie, Universität Bern (Fachbereich Exogene Geologie, Geodynamik und Klimaentwicklung; Kap. 3.2)
7) Prof. Dr. Wulf Schubert, Technische Universität Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau (Untertagebau, Geotechnik; Kap. 2.7, 2.9, 3.8)
8) Prof. Dr. Friedemann Wenzel, Karlsruher Institut für Technologie, Geophysikalisches Institut (Geophysikalische Exploration, Seismik; Kap. 1.3, 2.1, 2.10, 3.1, 3.3, 3.5, 3.7)

Die EGT hat sich im Rahmen ihrer Möglichkeiten als nebenamtliche Expertengruppe intensiv mit den von der Nagra vorgelegten Unterlagen auseinandergesetzt. Dazu gehörten 11 Zwischenhalt-Fachsitzungen (März 2013 bis Juli 2014), ein Fachsymposium an der ETH Zürich (14. Februar 2014), eine grossen Anzahl von Fachgesprächen in Subkommissionen, eine externe Bearbeitung einzelner Fachbeiträge im Rahmen von Expertenaufträgen des ENSI, 3 Sitzungen zur Grobprüfung (September bis Dezember 2014) und 12 Sitzungen zur Hauptprüfung (März 2015 bis November 2016). Die Traktanden der ordentlichen EGT-Sitzungen sind auf der Webseite der EGT beschrieben (www.egt-schweiz.ch > Sitzungen). Die EGT wurde durch das Sekretariat des ENSI (Dr. Martin Herfort) bei der Durchführungen dieser Arbeiten und der Berichterstattung tatkräftig unterstützt.

1.3 Strategie und Umsetzung der Vorgaben des Sachplanverfahrens

Basierend auf den behördlichen Vorgaben (BFE 2008; ENSI-G03; ENSI 33/075; ENSI 33/154; ENSI 33/170) hat die Nagra ein schrittweises Vorgehen bei der Auswahl der prioritären SMA- und HAA-Standortgebiete für Etappe 3 gewählt. Dieses Vorgehen bildet das Gerüst für den Nagra-Bericht NTB 14-01 («Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete») und auch für die vorliegende Stellungnahme. Die fünf Bearbeitungsschritte können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Festlegung des Vorgehens gemäss ENSI-Vorlagen (NTB 14-01, Unterkapitel 2.1)
2. Festlegung prioritärer Wirtgesteine (NTB 14-01, Kapitel 3)
3. Abgrenzung optimierter Lagerperimeter (NTB 14-01, Unterkapitel 4.2)
4. Bewertung optimierter Lagerperimeter (NTB 14-01, Unterkapitel 4.3-4.4)
5. Sicherheitstechnischer Vergleich und vergleichende Gesamtbewertung, Standort-Auswahl für Etappe 3 (NTB 14-01, Kapitel 5)

In Schritt 2 wird in Standortgebieten, wo zwei potenzielle SMA-Wirtgesteine vorkommen, das *prioritäre Wirtgestein* bestimmt. In Schritt 3 werden Standortgebiete optimiert, d. h. aufgrund mehrerer Kriterien die *optimalen Abgrenzungen der Lagerperimeter* der prioritären Wirtgesteine in den Standortgebieten festgelegt. In Schritt 4 werden die optimierten Lagerperimeter und Standortgebiete sicherheitstechnisch bewertet und anschliessend in Schritt 5 anhand entscheidrelevanter Merkmale qualitativ und quantitativ verglichen.

1.3.1 Kommentare zu entscheidrelevanten Merkmalen

Vorgehen der Nagra

In ENSI 33/075, S. 8 werden für die provisorische Sicherheitsanalyse u. a. Aussagen zur Barrierenwirkung und Langzeitentwicklung verlangt, welche die lagerbedingten Einflüsse (z. B. Entwicklung der Auflockerungszone) und lagerinduzierten Prozesse (z. B. chemische Wechselwirkungen, Gasentwicklung und -transport) einschliessen. In der Präzisierung der Vorgaben des ENSI zur Methodik (ENSI 33/154, S. 9/10) wird von entscheidrelevanten Merkmalen des sicherheitstechnischen Vergleichs von Standorten verlangt, dass sie beurteilen lassen, ob Gebiete und Gesteine über den zu betrachtenden Zeitraum die geforderte Barrierenwirkung gewährleisten. Die Auflistung der verwendeten Indikatoren für die Bewertung des Wirtgesteins, die Abgrenzung der Lagerperimeter und des sicherheitstechnischen Vergleichs findet sich in NTB 14-01, Tab. 2.3-2. Dort werden die Indikatoren den 4 Kriteriengruppen des ENSI zugeordnet und festgelegt, welche nach Nagra entscheidrelevant sind. Nur die letzteren kommen in der vergleichenden Bewertung der SMA- und HAA-Standorte in Tab. 5.2-1 (SMA) und 5.2-2 (HAA) zum Tragen. Dabei werden die Indikatoren 'Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten', 'Chemische Wechselwirkungen' und 'Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas' als nicht entscheidrelevant eingestuft.

Bewertung der EGT

Die EGT betrachtet die Gewichtung der lagerbedingten Einflüsse auf die Langzeitsicherheit hinsichtlich der Bewertung der Wirtgesteine und des sicherheitstechnischen Vergleichs als nicht mit den Vorgaben des ENSI kompatibel (ENSI 33/154). In den Kapiteln 2.7, 2.8 und 2.9 des vorliegenden Berichts wird dargelegt, dass sich die Wirtgesteine deutlich in ihrer Eignung hinsichtlich lagerbedingter Einflüsse unterscheiden und auch die Gastransporteigenschaften unterschiedlich sind.

1.3.2 Kommentare zum massgebenden Fall für die Einengung

Vorgehen der Nagra

Die Nagra unterscheidet bezüglich der Ungewissheiten (dieser Begriff wird systematisch statt dem üblichen Begriff der Unsicherheit verwendet) zwischen konzeptioneller Ungewissheit (z. B. bei Modellvorstellungen der Erosionsprozesse) und Parameter-Ungewissheit (z. B. für hydraulische Durchlässigkeiten). Für beide gibt es jeweils eine Referenz-Konzeptualisierung (z. B. das erfahrungsgemäss plausibelste Modell) bzw. einen Referenzwert (z. B. der erfahrungsgemäss plausibelste Wert).

Den «massgebenden Fall für die Einengung» (mFE) definiert die Nagra meist als die Kombination der massgebenden Konzeptualisierung mit den Referenzwerten, also nicht notwendigerweise die Kombination der Referenz-Konzeptualisierung mit den Referenzwerten. Auf den mFE beziehen sich dann die qualitativen Bewertungen für Wirtgestein, Lagerperimeter und den sicherheitstechnischen Vergleich.

Bewertung der EGT

Die Definition des Begriffs «massgebender Fall für die Einengung» (mFE) erlaubt es, einen Referenzfall für die Bestimmung von Indikatoren festzulegen, der nicht dem erfahrungsgemäss plausibelsten Fall entspricht. Das eröffnet die Möglichkeit, Indikatoren in eine gewünschte Richtung zu ‚schieben'. Bei der Bewertung des prioritären Wirtgesteins wird der mFE allerdings

sehr plausibel charakterisiert (NTB 14-01, S. 41, Fussnote 33). Bei der Optimierung der Lagerperimeter wird für Nördlich Lägern eine andere maximale Tiefenlage als mFE definiert als für die anderen Nordschweizer Standorte. Zudem wird in den Nachlieferungen der Nagra mit einem geotechnischen Kennwertesatz gearbeitet, welcher aufgrund seiner Konservativität wohl für eine Machbarkeitsstudie, nicht aber für einen Tiefenvergleich als sinnvoll erachtet wird. Mit der Anwendung des mFE-Konzepts verschwindet zudem die Betrachtung der Unsicherheiten in der Bewertung der Indikatoren, in den Tabellen, in denen die Wirtgesteine für SMA und die Standorte für SMA und HAA vergleichend dargestellt werden.

1.3.3 Kommentare zu den Bewertungsskalen

Vorgehen der Nagra

Für die qualitative Bewertung von Indikatoren benutzt die Nagra die im Konzeptteil des SGT und in ENSI 33/075 geforderten Bewertungskategorien 'sehr günstig', 'günstig', 'bedingt günstig' und 'ungünstig' bzw. für den sicherheitstechnischen Vergleich 'sehr geeignet', 'geeignet', 'bedingt geeignet' und 'ungeeignet'. Ein Standort scheidet aus, wenn die sicherheitstechnische Bewertung nicht mindestens 'geeignet' ist, kann aber auch dann zurückgestellt werden, wenn er eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standorten aufweist. Die Bewertungsskalen der Indikatoren folgen in Etappe 2 im Wesentlichen der der Etappe 1.

Bewertung der EGT

Die Bewertungsskalen entsprechen den behördlichen Vorgaben. Die Aggregation der Indikatoren zu den entscheidrelevanten Indikatoren und deren Aggregation zu den entscheidrelevanten Merkmalen ist transparent und erlaubt Gesamtbewertungen der Wirtgesteine, der Lagerperimeter und die Identifizierung eindeutiger Nachteile im sicherheitstechnischen Vergleich. Zu berücksichtigen ist aber, dass sich die Bewertungen auf den massgebenden Fall für die Einengung (mFE) beziehen, dessen Festlegung einige Freiheitsgrade beinhaltet, auf qualitativen Kriterien beruht, und im Einzelfall auch anders definiert werden könnte (siehe Kapitel 1.3.2.

1.4 Kommentare zur Berichterstattung der Nagra

Die Nagra hat systematisch die Datengrundlage und deren Interpretation für die Standorteinengung in Etappe 2 des Sachplanverfahrens in drei Hauptberichten mit rund 1'700 Seiten sowie fast 200 Referenzberichten mit 15'000 Seiten dargelegt - eine Arbeit, deren Umfang und Tiefgang zu würdigen ist. Auf der anderen Seite erschwert dieser Umfang an Informationen eine vollständige und unabhängige Überprüfung der Resultate und Schlussfolgerungen durch die Prüfinstanzen sehr.

Die Dokumentation der für die jeweiligen Schlussfolgerungen verwendeten Datengrundlagen, respektive die Identifikation der entsprechenden Daten- und Analyseberichte, ist für den Leser oftmals schwierig zu eruieren. Die fehlende stringente Vernetzung von Daten, Analysen und Schlussfolgerungen ist sicher auch dem Bestreben der Nagra geschuldet, «rückwärts kompatibel» zu bleiben. Die Nagra scheint sich gezwungen gefühlt zu haben, mit allen von ihr früher getätigten Aussagen und Versuchsresultaten in Einklang zu bleiben. Dies führt dazu, dass frühere und neue Argumente nicht rigoros gegeneinander abgewogen werden, und keine einfache robuste Argumentation basierend auf einem heute gültigen Datensatz vorgelegt wird.

Die EGT erachtet die Transparenz aller Untersuchungen der Nagra mit der allgemeinen Zugänglichkeit aller Auftragnehmerberichte als vorbildlich. Die EGT empfiehlt der Nagra, zukünftig diese Transparenz beizubehalten, aber eine Einschränkung der für die jeweilige SGT

Etappe wesentlichen Themen und Berichte durchzuführen. Die Nagra ist nach Ansicht der EGT nicht gezwungen, in ihrer Berichterstattung für einzelne SGT Etappen auf alle von den verschiedenen Gremien und Kritikern angesprochenen Fragen, Anregungen und Wünsche einzugehen. Die EGT ist der Meinung, dass eine robuste Begründung der vorgeschlagenen Standorteinengung mit deutlich weniger als 200 Referenzberichten möglich gewesen wäre. Dies hätte nicht zu weniger Vertrauen in die Schlussfolgerungen der Nagra geführt, da der Umfang der eingereichten Unterlagen kein Mass für die Belastbarkeit der eingereichten Vorschläge der Standorteinengung ist, und robuste Begründungen auch komplexer Sachverhalte in der Regel einfach dargestellt werden können.

Die Nachlieferung der Nagra zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit - worauf sich die ENSI Nachforderung zur Hauptsache konzentriert - entspricht im Wesentlichen den Erwartungen der EGT hinsichtlich der Analyse und Dokumentation der geotechnischen und bautechnischen Aspekte. Dies gilt nicht durchwegs für die wenigen ergänzenden Kapitel zu bautechnischen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit.

2. Bewertung der Wirtgesteine und Auswahl prioritärer Wirtgesteine

2.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

2.1.1 Angaben der Nagra

Der erste quantitative Schritt zur Bewertung der Wirtgesteine besteht in den Dosisrechnungen für alle Standorte und den dort vorkommenden Wirtgesteinen. Für das HAA-Lager wurde der Opalinuston als einzig mögliches Wirtgestein bereits in Etappe 1 festgelegt. Für das SMA-Lager zeigen die Dosisrechnungen, ob ein Wirtgestein (a) sofort, ohne Vergleich mit anderen, ausscheidet, falls das Dosisintervall über 0.1 mSv/a liegt und (b) bzgl. des Kriteriums von 0.1 mSv/a zwar geeignet wäre, aber im Vergleich mit anderen Wirtgesteinen eindeutige Nachteile aufweist. Ein eindeutiger Nachteil liegt dann vor, wenn das Dosisintervall von 0.01 mSv/a überschritten wird und der untere Wert der Dosisrechnung höher liegt als der obere Wert anderer Standorte. Die nach dieser quantitativen Betrachtung übrig bleibenden Wirtgesteine sind die prioritären Wirtgesteine. Nach den in NTB 14-01 (Fig. 3.2-2) gezeigten Ergebnissen werden keine Wirtgesteine zurück gestellt.

In dem folgenden Schritt wird eine qualitative vergleichende Betrachtung durchgeführt, die einerseits für den sicherheitstechnischen Vergleich (NTB 14-01, Kapitel 5) benötigt wird, aber auch zum Ausschluss eines Wirtgesteins an Standorten mit mehr als einem Wirtgestein führen kann. Diese sind Jura-Südfuss mit Effinger Schichten (JS-EFF) zusätzlich zum Opalinuston (JS-OPA) sowie Nördlich Lägern und Zürich Nordost mit dem 'Braunen Dogger' (NL-BD, ZNO-BD) zusätzlich zum Opalinuston (NL-OPA, ZNO-OPA). Es wird zunächst die Eignung der Wirtgesteine für den Eingang in die vergleichende Bewertung ermittelt. Grundlage dazu sind allgemein 13 Kriterien, die in 4 Kriteriengruppen (Eigenschaften des Wirtgesteins, Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen, Bautechnische Eignung) strukturiert sind. Die Kriterien werden jeweils mit mehreren Indikatoren «gemessen». Es werden Indikatoren und entscheidrelevante Indikatoren unterschieden. Die Bewertung aller Wirtgesteine an allen Standorten erfolgt zunächst mit allen dafür nach Auffassung der Nagra relevanten Indikatoren. Über verschiedene Verfahren werden die Indikatoren über Kriterien zu Kriteriengruppen und schliesslich zur Gesamtbewertung aggregiert. Die Bewertungsskala für die Indikatoren und die Aggregationen ist 'sehr günstig', günstig', 'bedingt günstig' und 'ungünstig'.

Für das SMA-Lager liegen in der Gesamtbewertung alle 9 Kombinationen von Standort und Wirtgestein bei 'günstig' (geeignet) oder 'sehr günstig' (sehr geeignet, NTB 14-01 Tab. 3.3-1). Damit werden alle Wirtgesteine an Standorten mit mehr als einem Wirtgestein (JS, NL, ZNO) im nächsten Schritt auf eindeutige Nachteile verglichen, mit dem Ergebnis, dass die Effinger Schichten und der 'Braune Dogger' gegenüber dem Opalinuston am gleichen Standort eindeutige Nachteile aufweisen (NTB 14-01 Tab. 3.4-1) und als Wirtgesteine für das SMA-Lager ausgeschlossen werden. Diese Bewertung erfolgt mit den entscheidrelevanten Indikatoren, die nach den entscheidrelevanten Merkmalen (ENSI 33/154) strukturiert werden. Die Aggregation der entscheidrelevanten Indikatoren erfolgt teilweise durch Priorisierung der am wenigsten günstigen Bewertung, und nicht durch arithmetische Mittelwertbildung.

2.1.2 Beurteilung der EGT

Das prinzipielle Verfahren der quantitativen Analyse mit Dosisrechnungen und der qualitativen Betrachtungen mit Indikatoren ist durch das ENSI vorgegeben, insbesondere in ENSI 33/075 und ENSI 33/154, wo eine transparente und nachvollziehbare Methodik gefordert wird. Die

vorgegebene Bewertungsskala für Sicherheit und bautechnische Machbarkeit ist 'sehr günstig', 'günstig', 'bedingt günstig' und 'ungünstig'. Welche Indikatoren für die Bewertung des Wirtgesteins und der Abgrenzung der Lagerperimeter verwendet werden, ist nicht vorgeschrieben, allerdings muss der sicherheitstechnische Vergleich mit den Merkmalen, die von dem ENSI vorgegeben sind (ENSI 33/154) erfolgen.

Aus der Gesamtheit von 40 Indikatoren gehen vorrangig solche ein, die unmittelbar für die Dosisrechnungen und deren Zuverlässigkeit erheblich sind (NTB 14-01, Tabelle 2.3-2). Von den Indikatoren der Kriteriengruppe 'Bautechnische Eignung' ('Gesteinsfestigkeit und Verformungseigenschaften'; 'geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen'; 'natürlich Gasführung im Wirtgestein') wird nur die Gesteinsfestigkeit/Verformungsverhalten berücksichtigt und nur als nicht-entscheidrelevanter Indikator betrachtet (NTB 14-01, Tab. 2.3-2). Folglich enthält der Vergleich der Wirtgesteine, der zum Ausschluss von Effinger Schichten und 'Braunem Dogger' führt, nicht mehr das entscheidrelevante Merkmal bautechnische Machbarkeit. Ebenso wird der Indikator Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas nicht als entscheidrelevant betrachtet. Die Begründungen der Nagra für diese Gewichtung der Kriterien sind für die EGT nicht nachvollziehbar. Auf der anderen Seite erhält der Indikator Selbstabdichtungsvermögen bei der Bewertung der Nagra durch doppelte Wertung (sowohl bei den Merkmalen der Wirksamkeit wie der Langzeitstabilität der geologischen Barriere) eine überproportional grosse Bedeutung.

Der Umgang der Nagra mit den oben genannten technischen Kriterien ist diskussionsbedürftig und sollte in Etappe 3 vor der definitiven Berichtlegung thematisiert werden. Zudem sollte systematischer analysiert werden, ob und inwieweit Indikatoren unabhängig oder korreliert sind, um die Übergewichtung einzelner Indikatoren zu vermeiden oder zumindest transparent zu machen.

2.2 Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine für das SMA- und HAA-Lager

2.2.1 Angaben der Nagra

Gegenüber der Etappe 1 des Sachplans hat die Nagra die Datensätze zum Stofftransport in den möglichen Wirtgesteinen durch neue Messungen ergänzt (siehe NTB 14-02-VI und dort erwähnte Literatur). Insbesondere flossen Daten aus neuen Bohrungen (u. a. Oftringen, Schlattingen, Gösgen), neuen Laborversuchen (u. a. Porositätsmessungen (NTB 14-02-VI, Kapitel 2.3.2.2 und Bestimmungen von Diffusionskoeffizienten NTB 14-02-VI, Kapitel 2.6.2, etc.) in die Analysen der Etappe 2 SGT ein.

Um die Datenlage zwischen Wirtgesteinen/Standorten vergleichbar zu machen und zu rationalisieren, schlägt die Nagra vor, den Tonmineralgehalt einzelner lithostratigraphischer Einheiten als Proxy für die effektiven Stofftransporteigenschaften heran zu ziehen, da zum Tonmineralgehalt zahlreiche Messungen aus allen Wirtgesteinen vorliegen.

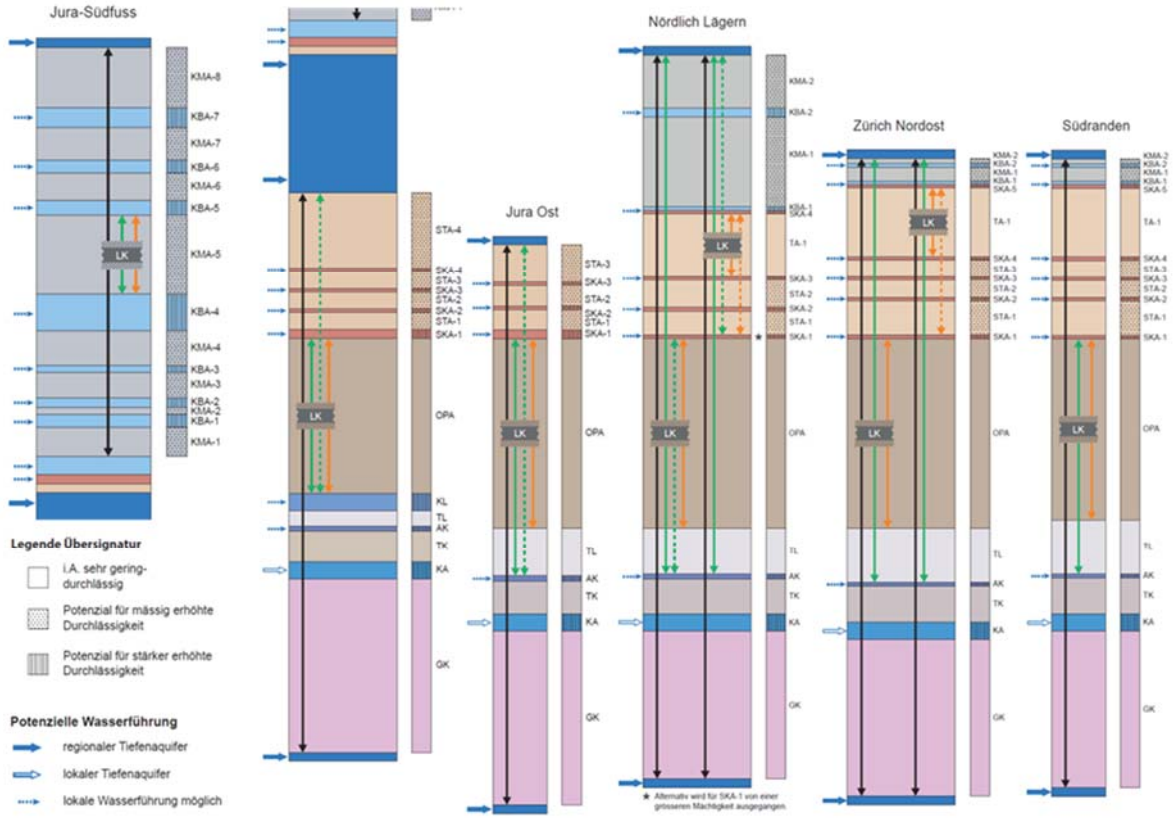
Um die Stoffausbreitung zu konzeptualisieren, orientiert sich die Nagra an der systemanalytischen Vorstellung, dass sich der Stoff- und Nuklid-Transport in 'tonigen' ('duktil/selbstabdichtenden', daher schlechtdurchlässigen) Gesteinslagen - weitgehend - *diffusiv* und in 'kalkigen' ('spröden' und daher gutdurchlässigen) Lithologien *advektiv* erfolgt (Figur 2-1). Der effektive Stofftransport ist dadurch in den als Wirtsgestein sensu stricto wirkenden Gesteinskörpern durch Diffusion, jener in den kalkigen Abfolgen durch Advektion dominiert. Entsprechend lassen sich die einschlusswirksamen Gesteinskörper der vorgeschlagenen Wirtgesteine anhand von vier Kriterien qualitativ bewerten und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit als Barriere für den Radionuklid-Transport klassifizieren:

i. *Mächtigkeit (und Homogenität) der Schicht mit diffusiven Transporteigenschaften, in der SMA-Abfälle eingelagert werden sollen*. In allen Wirtgesteinen sind Einheiten zu finden, worin der Stofftransport weitestgehend diffusiv erfolgt. Da die Transporteigenschaften dieser Schichten vergleichbar sind, ist die Barrierenwirkung der entsprechenden Schicht weitgehend durch deren Mächtigkeit bestimmt.

ii. *Barrierenwirksamkeit der einschliessenden Rahmengesteine*. «Undurchlässige» Rahmengesteine unterbinden die Radionuklidfreisetzung aus dem Tiefenlager in die Biosphäre zusätzlich.

iii. *Transmissive (advektive) hydraulische Eigenschaften (und Homogenität) der die Einlagerungsschicht umfassenden Gesteinskörper.* Hierbei sind der Abstand der Einlagerungsschicht zur nächsten advektiv wirksamen lithostratigraphischen Einheiten und die spröd-tektonische Überprägung des einschliessenden Gesteinskörpers von Bedeutung.

iv. *Überdeckung/Tiefenlage der einschlusswirksamen Schicht*. Da Gesteinsschichten mit zunehmender Nähe zur Erdoberfläche durch Entlastung immer durchlässiger werden, nimmt die Barrierenwirkung jedes Wirtgesteins bei geringer Überdeckung ab.



Figur 2-1: Konzeptualisierung der Aquifere und Aquitarde in den Wirtgesteinen der Nordschweiz (NTB 14-02-VI)

Opalinuston und 'Brauner Dogger' bilden nach Nagra deutliche bessere (diffusive) geologische Barrieren gegenüber der Radionuklidausbreitung (Tabelle 2-1) im Vergleich zu den anderen vorgeschlagenen Wirtgesteinen. Profile natürlicher Tracer belegen nach Nagra, dass sich Opalinuston und 'Brauner Dogger' hinsichtlich der diffusiven Stoffausbreitung als Einheit verhalten. Aufgrund dieser Kriterien schneiden nach Nagra die Helvetischen Mergel und Effinger Schichten im direkten Vergleich zu den Gesteinen des 'Braunen Doggers' und des Opalinustons deutlich schlechter ab. Die generell grössere tektonische Beanspruchung an den Standortgebieten Wellenberg und Jura-Südfuss führt zudem zu Spröddeformationen, welche letzt-

lich zu den grösseren Durchlässigkeiten dieser beiden Formationen führen. Die transportrelevanten Heterogenitäten im 'Braunen Dogger' sind seismisch schlecht zu prognostizieren (siehe Kapitel 2.10).

Aus diesen Gründen schlägt Nagra den Opalinuston als bevorzugtes Wirtgestein für das SMA-Lager vor.

Tabelle 2-1: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Eigenschaften des Wirtgesteins' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR-OPA	SMA-ZNO-OPA	SMA-NL-OPA	SMA-JO-OPA	SMA-JS-OPA	SMA-ZNO-BD	SMA-NL-BD	SMA-JS-EFF	SMA-WLB-MG
KG1	**Eigenschaften des WG/EG**		**4.1**	**4.4**	**4.4**	**4.2**	**3.9**	**4.0**	**4.1**	**3.1**	**3.8**
1.1	**Räumliche Ausdehnung**		**3.5**	**4.5**	**4.5**	**3.5**	**2.5**	**4.1**	**4.5**	**2.5**	**4.5**
5	Mächtigkeit	EG	3.5	4.5	4.5	3.5	2.5	4.1	4.5	2.5	4.5
1.2	**Hydraulische Barrierenwirkung**		**4.3**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.3**	**4.3**	**3.7**	**3.7**
9	Hydraulische Durchlässigkeit	WG-ss	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3	3.7	3.7
1.3	**Geochemische Bedingungen**		**4.3**	**4.3**	**4.3**	**4.3**	**4.3**	**4.3**	**4.3**	**3.6**	**3.6**
11	Mineralogie	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
12	pH	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
13	Redox-Bedingungen	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
14	Salinität	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
15	Mikrobielle Prozesse	WG-ss	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	3.3	3.3
16	Kolloide	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5
1.4	**Freisetzungspfade**		**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**3.4**	**3.4**	**2.7**	**3.2**
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3	3.3	3.1
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3	3.1	3.1
22	Selbstabdichtungsvermögen	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3	3.1	2.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5	2.5	2.5	2.7
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	1.5	1.5	1.5	4.5

2.2.2 Beurteilung der EGT

Obwohl die Datenlage in den vorgeschlagenen Wirtgesteinen weiterhin sehr unterschiedlich ist, lassen sich - wie für Etappe 2 gefordert - die Wirtgesteine hinsichtlich Stofftransport dennoch qualitativ (NTB 14-02-VI) und quantitativ (NTB 14-03) vergleichen. Dass qualitative und quantitative Argumente gleichwertig behandelt werden wird begrüsst.

NTB 14-02-VI zeigt nachvollziehbar auf, dass die wichtigsten physikalischen, hydraulischen und geochemischen Eigenschaften, welche den Stofftransport kontrollieren, eine deutliche Abhängigkeit vom Tonmineralgehalt zeigen. Dies betrifft die hydraulische Durchlässigkeit & Permeabilität von Störungszonen respektive die 'Selbstabdichtung' (Kapitel 2.5.2.1), die Porosität (Kapitel 2.3.2.2), die innere Oberfläche respektive die Kationenaustauschkapazität (Kapitel 2.3.2.6) und den Diffusionskoeffizienten (Kapitel 2.6.2).

Die lithostratigraphischen Einheiten der potenziellen Wirtgesteine werden in drei Klassen mit Tonmineralgehalten von < 20%, 20-40% und > 40% eingeteilt. Dabei wird angenommen, dass der Stofftransport bei Tonmineralgehalten > 40% weitgehend diffusiv, bei Gehalten < 20%

advektiv entlang von «Klüften» erfolgt. Das Einführen der Tonmineralgehaltsklasse > 40% lässt sich aus NTB 14-02-VI rechtfertigen. Die Einteilung in die mittlere und kleine Tonmineralgehaltsklasse kann nicht nachvollzogen werden und es besteht Klärungsbedarf.

Durch die Einteilung der lithostratigraphischen Einheiten in Tonmineralgehaltsklassen und dem Abgleich mit den vorhanden Messwerten zum lokalen Stofftransport (hydraulische Tests, im Labor bestimmte Diffusionskoeffizienten, etc.) werden jeder Schicht charakteristische Transporteigenschaften zugewiesen. Wie diese Zuordnung durch die Nagra im Einzelnen erfolgte, ist nicht nachvollziehbar beschrieben.

Der bestehende Datensatz rechtfertigt die Zurückstellung der Effinger Schichten und Helvetischen Mergel. Die entsprechende Beurteilung ist entsprechend nachvollziehbar und robust. Die Bevorzugung des Opalinustons gegenüber den Gesteinen des 'Braunen Doggers' ist aus den Transporteigenschaften alleine nicht ableitbar und erfordert weitere Kriterien, welche In Kapitel 2.10 behandelt werden.

2.3 Konzeptuelle Modelle und Parameter der SMA-Wirtgesteine für den Radionuklidtransport

2.3.1 Angaben der Nagra

Die Nagra untersucht und bewertet den Radionuklidtransport konzeptuell und modelltechnisch in 3 Schritten: Zunächst wird das Nahfeld mit 2- und 3-dimensionalen Modellen untersucht, welches die Lagerbehälter, die Rückfüllung der Stollen und die Auflockerungszone (AUZ) umfasst. Radionuklide, die aus dem Nahfeld austreten, gelangen in die Geosphäre, bestehend aus dem intakten Wirtgestein und seinen Rahmengesteinen. Über verschiedene Transportmechanismen gelangen die Radionuklide unter immer währendem radioaktivem Zerfall in Aquifere und von dort in die belebte Umwelt, die Biosphäre. Die dort ankommenden Radionuklide verursachen durch ihre Reststrahlung eine Dosis, die auf die Umwelt einwirkt. Der 3-gliedrige Ansatz ermöglicht, die verschiedenen Prozesse auf den jeweiligen relevanten Skalen zu betrachten.

Generell wird davon ausgegangen, dass sich Radionuklide nur im Porenwasser, nicht aber in der Gasphase lösen. Folgende Prozesse werden von der Nagra berücksichtigt: Beginnend bei radioaktivem Zerfall und mit Betrachtung der Zerfallsketten wird davon ausgegangen, dass bei einer vollständigen Korrosion der Abfallbehälter ein Anteil der Radionuklide gemäss deren Löslichkeiten instantan als Lösung in das Nahfeld freigesetzt wird. In den Abfallmatrizen (z. B. Glas) gebundene Radionuklide gehen erst mit fortschreitender Zeit in Lösung. Aus dem Nahfeld gelangen die Radionuklide anschliessend in die Geosphäre und werden dort sowohl advektiv in diskreten, wasserführenden Strukturen mit Berücksichtigung von Dispersion, Sorption bzw. Retardation, Fällung und Lösung respektive, als auch diffusiv in gering durchlässigen Schichten transportiert.

Der Transport in der Geosphäre wird in 1-dimensionalen Modellen betrachtet. Dazu werden geologische Sammelprofile in konzeptuelle Modelle, welche die geologischen Schichtabfolgen vereinfacht wiedergeben, übertragen (Figur 2-1). Den lithostratigraphischen Einheiten werden entsprechend ihrem Tonmineralgehalt Parameter und Prozesse zugeordnet, welche die Stoffausbreitung innerhalb der Schicht physikalisch beschreiben. Die SMA-Lagerkavernen werden mittig im tonreichsten Bereich positioniert, woraus die eingelagerten SMA nur diffusiv entweichen können (Figur 2-1). Ober- und unterhalb der zentralen Einlagerungsschicht werden tonarme advektiv wirkende Schichten ('harte Bänke') identifiziert, entlang derer - so die Annahme - die zuströmenden Nuklide ohne jede weitere Verzögerung in die Biosphäre freigesetzt wer-

den. Für die einzelnen Standortgebiete werden aus den stratigraphischen Sammelprofilen zuerst verschiedene geologische Konzeptprofile und anschliessend Konzeptprofile für die provisorische Sicherheitsanalyse erarbeitet.

Migration und Verdünnung der Radionuklide in der Biosphäre werden in Kapitel 2.4 genauer betrachtet.

2.3.2 Beurteilung der EGT

Die Geosphäre zu einem 1D-Modell zu vereinfachen verursacht grössere Ungenauigkeiten bei den Berechnungen zum advektiven Transport der Radionuklide. Allerdings ist diese Annahme dadurch zu rechtfertigen, dass die laterale Ausbreitung der geologischen Einheiten viel grösser ist als die vertikale. Dadurch dass aber in den einschlusswirksamen Gebirgsbereichen selbst der advektive dem diffusiven Transport untergeordnet ist, liegt der Fokus auf der genauen Beschreibung der Diffusion.

Die effektiven Diffusionskoeffizienten, die in die Simulationen eingehen, werden aus Diffusionskoeffizienten in freiem Wasser und dem erweiterten Archie-Gesetz bestimmt, in das wiederum die Temperatur und die Porosität einfliesst (siehe NTB 12-03). Die freien Diffusionskoeffizienten werden ermittelt, indem sie einer von zwei Gruppen anhand eines Diagramms von Li und Gregory (1974) zugewiesen werden (NTB 12-03). Dies erscheint zunächst ungenau, entspricht aber dem Stand der Technik. Es bleibt jedoch zu beachten, dass die Diffusion hier über sehr lange Zeiträume betrachtet wird und somit kleine Abweichungen von den tatsächlichen Werten grosse Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

Die Diffusion wird weiter mit dem Fickschen Gesetz beschrieben. Streng genommen gilt dieses aber nur für Lösungen mit wenigen Komponenten. Sind mehrere Komponenten in Lösung vorhanden, können diese miteinander in Wechselwirkung treten und zu Abweichungen vom Fickschen Gesetz führen. Einen alternativen Ansatz bildet der Maxwell-Stefan-Ansatz, wie in Taylor und Krishna (1993) beschrieben.

Insgesamt betrachtet scheinen aber die Parameter und Prozesse für den Radionuklidtransport sorgfältig ausgearbeitet, insbesondere die Bestimmung der effektiven Diffusionskoeffizienten, und entsprechen dem Stand der Technik.

2.4 Migration und Verdünnung der Radionuklide in der Biosphäre

2.4.1 Angaben der Nagra

Die Berichte NAB 12-26; NAB 13-04; NAB 13-49; NAB 13-75 beschreiben die Grundlagen zur Biosphärenmodellierung. Die Biosphärenmodellierung hat den Zweck, anhand einer möglichen Freisetzung von Radionukliden eine entsprechende Strahlendosis für die Bevölkerung zu berechnen, die dann mit dem radiologischen Schutzkriterium der Strahlenschutzverordnung verglichen werden kann. Die verwendeten Modellkonzepte entsprechen weitgehend den von der Nagra in der Geosynthese und in der ersten Etappe des Sachplanverfahrens verwendeten Biosphärenmodellen. Allerdings wurden die Rechencodes im zweiten Schritt des Sachplanverfahrens erneuert. So wurden die Daten zur Charakterisierung der Biosphärenszenarien, das Verhalten der Radionuklide in der Umwelt und in der Nahrungskette und die Datensätze der nuklid-spezifischen Radiotoxizität aufdatiert.

Das Verhalten der Radionuklide in der Umwelt und die entsprechende Strahlenexposition der Bevölkerung werden anhand eines zweiteiligen Modells beurteilt. Anhand der modellierten Radionuklidfreisetzung aus der Geosphäre wird zunächst die Verteilung und Dynamik der Radi-

onuklide in der Umwelt («Biosphäre») berechnet. Dazu werden fünf verschiedene Umweltkompartimente und deren Austausch von Wasser und Feststoffen betrachtet, wobei die Radionuklide in gelöster Form im Wasser oder zusammen mit den Feststoffen zwischen den Kompartimenten ausgetauscht werden. Darauf aufbauend wird die Strahlendosis berechnet, indem die verschiedenen Expositionspfade zur Bevölkerung in Bezug auf die modellierten Radionuklidkonzentrationen in den betrachteten Umweltkompartimenten anhand von Transfer- und Dosiskonversionsfaktoren abgeschätzt werden.

Eine Ausnahmestellung kommt dabei ^{14}C zu, welches in der Umwelt zu einem wichtigen Teil als gasförmiges $^{14}CO_2$ vorliegt. Als solches wird ^{14}C über die Atmosphäre und die Photosynthese in die Biomasse von (Nutz-) Pflanzen eingebaut; es ist somit eng an die Nahrungskette geknüpft. Weil das konventionelle Biosphärenmodell nur den passiven Transport von Radionukliden in Wasser oder mit Feststoffen, nicht aber den atmosphärischen Eintragsweg berücksichtigt, wurde für das ^{14}C-Verhalten ein zusätzliches Modell/Modul verwendet, welches den Biosphärenkreislauf von $^{14}CO_2$ und ^{14}C in der Biomasse erfasst. Dieses Zusatzmodell erlaubt es, *virtuelle* Koeffizienten zur Partitionierung von ^{14}C zwischen Böden und den darauf befindlichen Nutzpflanzen zu bestimmen. Unter Verwendung dieser «angepassten» *virtuellen* Verteilungskoeffizienten, die den Austausch über die Atmosphäre parametrisieren, lässt sich das Biosphärenverhalten von ^{14}C wiederum in angemessener Weise mit dem konventionellen Modellkonzept erfassen.

2.4.2 Beurteilung der EGT

Beurteilung – ^{14}C-Biosphärenmodellierung

Die konzeptuelle Grundlage und ein entsprechender Rechencode zur ^{14}C-Modellierung in der Biosphäre wurden bereits in der ersten Etappe des Sachplanverfahrens erarbeitet und verwendet. Dieses ^{14}C-Modell wurde in einem technischen Bericht (NAB 08-01) und einer wissenschaftlichen Publikation (van Dorp und Brennwald 2009) dokumentiert. Jedoch wurde damals das entsprechende ^{14}C-Modell «extern betrieben» und war nicht «direkt» mit dem eigentlichen Biosphären-Rechencode verbunden.

Für die aktuellen Biosphärenrechnungen wurde ein neuer Rechencode erarbeitet, vermutlich um die Zusammenführung der verschiedenen Modellrechnungen technisch einfacher zu gestalten. Dieser Rechencode wird aber nicht auf das bestehende ^{14}C-Biosphärenmodell zurückgeführt, sondern beruht scheinbar auf einer neuen Beschreibung des bestehenden alten ^{14}C-Modells. Die Beschreibung der aktuellen ^{14}C-Biosphärenmodells lässt jedoch vermuten, dass das aktuell verwendete Modell - abgesehen vom Rechencode - identisch zum bisherigen etablierten ^{14}C-Modell der ersten Etappe des Sachplanverfahrens ist.

Da jedoch eine eindeutige Rückführung des neuen ^{14}C-Modells auf das bisherige ^{14}C-Modell fehlt, kann die entsprechende Umlegung auch nicht nachvollzogen werden. Es wird empfohlen, den neuen Rechencode unter anderem anhand von Vergleichen mit Ergebnissen des früheren Rechencodes zu validieren.

Die Nagra simuliert die letztlich in der Biosphäre freigesetzte Strahlendosis einerseits für ein Referenzszenario mit heutigem Klima und anderseits für Szenarien mit einem wärmeren/trockeneren Klima und mit einem eiszeitlichen Klima. Hierbei sind die Strahlenbelastungen für das Warmzeitszenario am grössten, jedoch unterscheiden sich die Resultate nicht wesentlich von jenen des Referenzszenarios.

Weiter werden für die potenziellen Tiefenlagerstandorte spezifische ortsabhängige Modelle berechnet, die sich hauptsächlich durch die räumlichen Verhältnisse beim Eintritt der Radionuklide in die Biosphäre (grosses Tal - kleines Tal) und damit auch in der Verdünnung in den

oberflächennahen Wasserströmen (flaches Grundwasser, Fluss) unterscheiden. Entsprechend ist klar, dass das Szenario für ein «kleines Tal mit kleinem Fluss» die höchsten (BK8) und das Szenario «direkter Eintrag in grossen Fluss» (BK1) die kleinsten Strahlendosen zeigen.

Die Nagra hält zu Recht fest, dass für jedes Standortgebiet jedes der untersuchten räumlichen Freisetzungsszenarien möglich ist, da die Entwicklung der zukünftigen Topographie weitgehend offen ist und sich keine genauen Aussagen über den Ort und die räumliche Verhältnisse bei der Nuklidfreisetzung machen lassen.

Die Variabilität der Strahlendosen zwischen den verschiedenen standortspezifischen Modellen ist vergleichbar mit der Variabilität der Strahlendosen für unterschiedliche Klimaszenarien. Deshalb entschliesst sich die Nagra in nachvollzierbarer Weise die Variabilität der in der Biosphäre freigesetzten Radionuklide und damit einhergehen Strahlendosen aus der Variabilität der unterschiedlichen Klimaszenarien abzuleiten (Referenz- und Warmzeitszenarium). Eine wirklich konservative Abschätzung für die letztlich in der Biosphäre freigesetzte Strahlendosis, die sich für ein «kleines Tal» und ein Warmzeitklima ergibt, ist nicht für alle Standorte durchgerechnet worden. Es wird empfohlen, dies nachzuholen.

2.5 Wirtgesteins- und Standort-spezifische Dosisrechnungen für das SMA-Lager

2.5.1 Angaben der Nagra

Für jedes Wirtgestein an jedem Standort werden drei Standardrechenfälle (Referenzfall, günstiger Fall, ungünstiger Fall: 'massgebenden Fall zur Einengung: mFE') definiert, die sich hauptsächlich in der Mächtigkeit (L), des einschlusswirksamen Gesteinsbereichs unterscheiden:

$$L_{günstig} > L_{Refernzfall} > L_{mFE}$$

Nach Einschätzung der Nagra ist der Referenzfall das realistische, der mFE ein konservatives Szenario. Der mFE unterstellt eine deutlich ungünstigere Geometrie des einschlusswirksamen Gesteinsbereichs und bildet jene geologische Situation ab, die massgebend ist, um die Wirtgesteine qualitativ gegeneinander zu werten. Weshalb die Nagra zusätzlich eine günstige Situation (siehe Figur 2-1 und Figuren in Kapitel 6.1.1 von NTB 14-03) betrachtet, ist unklar.

Für den Referenzfall jedes Wirtgesteins an jedem Standort werden systematisch die Schichtmächtigkeiten und die Transportparameter der einzelnen Schichten variiert (Parametervariation). Zusätzlich werden spezielle Fälle, die zu «schneller» Radionuklidfreisetzung führen (z. B. transmissives Störungselement durchschlägt Tiefenlager), berechnet.

Die Resultate zur Strahlenbelastung, die sich aus den unterschiedlichen Rechenfälle für ein Wirtgestein an einem Standort ergeben, werden als «charakteristische Dosisintervalle» ausgegeben (NTB 14-03, Kapitel 5.2), welche durch die Dosis des Referenzfalls (untere Grenze) und den Rechenfall mit der höchsten Dosis (obere Grenze) begrenzt sind.

Alle vier vorgeschlagenen Wirtgesteine an allen Standorten halten nach Nagra das verschärfte Dosiskriterium der Strahlenschutzverordnung (0.01 mSv/a) ein. Weiter überlappen die Strahlendosis des Referenzfalles (untere Grenze) der am «wenigsten geeigneten» Wirtgesteine (Effinger Schichten, Helvetische Mergel) überlappt mit der maximalen Strahlendosis (obere Grenze) des am 'besten geeigneten' Wirtgesteins (Opalinuston). Im Sinne der Vorgaben des Sachplanverfahrens (ENSI 33/075) sind damit nach Nagra alle vier Wirtgesteine geeignet, um ein SMA-Lager aufzunehmen.

Im Rahmen der Antworten zur ENSI Nachforderung (ENSI 33/476) präsentiert die Nagra im NAB 16-41 Dosisberechnungen, welche die Radionuklidfreisetzung aus einem OPA-Endlager

und seinen Zugangsbauwerken berücksichtigen (Details finden sich in NTB 14-10). Andere Wirtsgesteine wurden nicht analysiert. Zur Konzeptualisierung der Nuklidfreisetzung aus dem Endlager greift die Nagra auf ihren PICNIC-TD Code zurück. Hierbei wird das «Röhrensystem» des Endlagers in verschiedene Abschnitte (u.a. Lagerkavernen, Zwischensiegel, Zugangstunnel, Schächte, Rampen) unterteilt, die sich jeweils in ihren Transporteigenschaften unterscheiden. Jedes dieser Lagerelemente gliedert sich in einen homogenen, rückverfüllten Zentralbereich und eine umschliessende, durch den Bau gestörte homogene Auflockerungszone (AUZ) auf. Die einzelnen Elemente werden als «Widerstände so in Serie» angeordnet, dass sich das Endlager und seine Geometrie abbilden lassen. In einem ersten Konditionierungsschritt werden die Wasserflüsse durch das Bauwerk bestimmt, wobei der Austausch zwischen benachbarten Elementen als Boxaustausch beschrieben wird. In einem zweiten Schritt wird der Radionuklidtransport durch das Widerstandnetzwerk simuliert. Die Radionuklide werden dabei aus den Kanistern in den Lagerkavernen freigesetzt (STMAN Code, siehe NTB 14-10) und werden entweder diffusiv ins Wirtgestein (1-D Stofftransport) oder advektiv durch das Endlager transportiert. Sobald die Radionuklide die Zugangsbauwerke oder die Begrenzung des Wirtgesteins erreichen, werden sie unmittelbar über das Biosphärenmodell in die Umwelt freigesetzt. Dadurch lassen sich sowohl die Dosen der Nuklidfreisetzung durch das Wirtgestein (HR: host rock) als auch durch das Endlager (R/S: ramp/shaft) individuell berechnen. Neben dem Basisfall (BC: base case), der dem Referenzfall der oben erwähnten Dosisberechnungen für den OPA als Wirtgestein entspricht, werden unterschiedliche Freisetzungsszenarien betrachtet, die von unterschiedlich pessimistischen Transporteigenschaften der Elemente ausgehen (u.a. höhere Durchlässigkeiten in den Bauwerken, in den Siegeln und im Wirtsgestein, erhöhte Kanisterkorrosion etc.: SA1 - SA7).

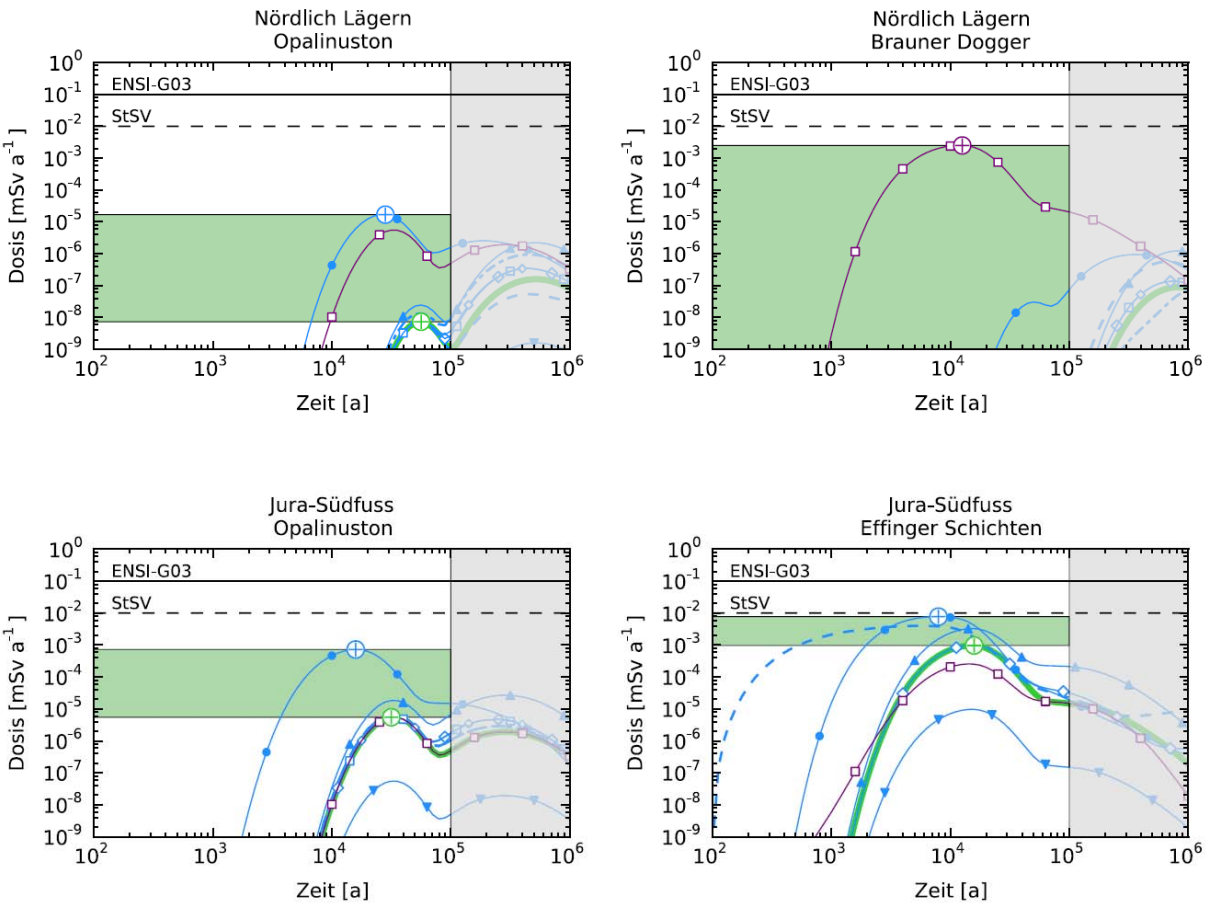
2.5.2 Beurteilung der EGT

Parametervariationen und massgebender Fall für die Einengung

Um Unsicherheiten zu analysieren, werden für den Referenzfall gemäss den ENSI-Vorgaben verschiedene Parameter systematisch variiert. Hierzu werden sogenannte «obere» und «untere» Eckwerte heran gezogen, die die experimentellen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Transportparameter berücksichtigen (ENSI 33/075; NTB 14-03). Weshalb die Parametervariationen nicht auch immer den massgebenden Fall für die Einengung miteinschliessen ist nicht klar. Dadurch entsteht der Eindruck, dass die Parametervariation in einem zu engen Bereich durchgeführt wurde. Dies wirft die Frage auf, weshalb die Nagra nicht bereits in dieser Phase des Sachplanverfahrens ein konservativeres Vorgehen gewählt hat und die Parameter für den mFE variiert hat.

Die charakteristischen Dosisintervalle der für die Wirtgesteine durchgeführten Rechnungen erstrecken sich über mehrere Grössenordnungen (Figur 2-2). Die Dosis des Referenzfalls liegt immer am unteren Rand des Ensemble der berechneten Dosiswerte. Die Resultate für den mFE hingegen liegen oft am oberen Rand der durchgeführten Rechnungen und zeigen teilweise die höchsten Strahlendosen.

Es fällt auf, dass die maximalen Strahlendosen für Effinger Schichten und Helvetische Mergel am Wellenberg um weniger als einen Faktor 2 kleiner sind als das verschärfte Dosiskriterium der Strahlenschutzverordnung (siehe NTB 14-03, Fig. 5.2.2, Fig. 6.1-13). Seismische Untersuchungen zeigen (siehe u.a. Kap. 3.6), dass die Effinger Schichten am Jura-Südfuss stärker tektonisiert (Born-Engelbergstruktur) sind, als in Etappe 1 angenommen wurde. Dadurch sind die Wasserdurchlässigkeit und damit die Dosen wohl entsprechend grösser als in den durchgeführten Rechnungen angenommen.



Figur 2-2: Übersicht der wirtgesteinsspezifischen Dosiskurven für das SMA-Lager für verschiedene Standortgebiete sowie resultierende charakteristische Dosisintervalle (hellgrün). Referenzfälle grün, ENSI-Parametervariationen blau, massgebender Fall für die Einengung violett. (aus NTB 14-03).

Die Dosisrechnungen in den Helvetischen Mergeln gehen von einer hydraulischen Durchlässigkeit von 10^{-13} m/s aus. Messungen zeigen hingegen klar grössere hydraulische Leitfähigkeiten, was die errechneten Dosen zusätzlich erhöhen dürfte.

Werden diese Fakten und die inhärenten Unsicherheiten der Rechnungen berücksichtigt, stellt sich die Frage, ob die Effinger Schichten und Helvetischen Mergel das verschärfte Dosiskriterium wirklich einhalten. Es scheint, als seien die oberen Eckwerte der charakteristischen Dosisintervalle so berechnet worden, damit die Effinger Schichten und die Helvetischen Mergel nicht zurückgestellt werden mussten und so die Erkenntnisse der Etappe 2 mit jenen der Etappe 1 des Sachplanverfahrens kongruent bleiben.

Sensitivität der Modellrechnungen und Diffusionskoeffizienten

Da angenommen wird, dass Radionuklide diffusiv aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich entweichen, folgt, dass die Mächtigkeit der einschlusswirksamen Schicht und die effektiven Diffusionskoeffizienten die Dosisrechnungen massgeblich beeinflussen. Rechenfälle mit kleinerer Mächtigkeit und/oder grösseren Diffusionskoeffizienten, wie auch der Fall, dass ein transmissives (advektives) Element die Lagerkavernen durchschlägt, zeigen mithin die grössten Dosen.

Da der Transport in den Effinger Schichten und den Helvetischen Mergeln eine deutliche advektive Komponente trägt, reagieren die entsprechenden Dosisrechnungen sensitiv auf Veränderungen der hydraulischen Annahmen.

Für die Analyse der diffusiven Nuklidfreisetzung werden in den Rechnungen die Diffusionskoeffizienten der Radionuklide verändert. Hierbei wird nicht klar zwischen molekularen und effektiven Diffusionskoeffizienten unterschieden. Prinzipiell sind mit Experimenten nur die effektiven Diffusionskoeffizienten zugänglich. Entsprechend können Porosität und Diffusionskoeffizienten nicht 'unabhängig' voneinander variiert werden.

Die aus den natürlichen Tracerprofilen abgeleiteten grossräumigen effektiven Diffusionskoeffizienten (ΔD, Δ^{18}O: 10^{-10} m^2s^{-1}, HTO: < ~ 10^{-11} m^2s^{-1}; Cl^-: $5 \cdot 10^{-11}$ m^2s^{-1}, ^{36}Cl: < 10^{-12} m^2s^{-1}, siehe u. a. NTB 02-03, Kap. 4.7.2) sind teilweise höher als die in Laborexperimenten bestimmten Werte. Es ist unklar, ob die Nagra diese Werte der natürlichen Stoffausbreitung bei der Parametervariation miteinbezogen und berücksichtigt hat.

Dosisberechnungen zur Auswirkung bautechnischer Eingriffe und Massnahmen auf die Langzeitsicherheit

Zur Untersuchung der bautechnischen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit, legt die Nagra in NAB 16-41 weitere Radionuklidtransport-Rechnungen mit vereinfachten Röhrenmodellen vor. Die resultierenden Dosen bleiben für alle durchgeführten Rechnungen selbst für sehr pessimistische Annahmen immer unter dem verschärften Schutzziel von 0.1 $mSv \cdot a^{-1}$ (ENSI-G03). Die aus dem Bauwerk freigesetzten Dosen (R/S) bewegen sich in den gleichen Grössenordnungen wie die entsprechenden Wirtgesteinsdosen (HR, NAB 16-41, Fig. 5.6-1 & Fig. 5.6-2). Auffallend ist, dass der Radionuklidtransport durch das Bauwerk selbst unter Annahme extremer Durchlässigkeit innerhalb des Röhrensystems nicht weiter ansteigt. Dieses intuitiv nicht unmittelbar einsichtige Verhalten ist der Tatsache geschuldet, dass die Transporteigenschaften des OPA in letzter Konsequenz den Wasserzufluss ins Endlager begrenzen und so den advektiven Nuklidtransport durch das Bauwerk einschränken. Damit belegen auch diese Rechnungen, dass die Transporteigenschaften des OPA den Nuklidtransport massgeblich kontrollieren. Ausbreitungsszenarien, die dem OPA deutlich grössere hydraulische Leitfähigkeiten (SA4_a) oder klar höhere Diffusionskoeffizienten (SA_b) unterstellen, belegen dies klar, da diese Annahmen zu deutlich erhöhten Dosen führen (NTB 14-10, Fig. 5.2-6, 5.2-7).

Die EGT erachtet die von Nagra beigebrachten Dosisrechnungen zur Nuklidfreisetzung aus einem geplanten Endlagerbauwerk als stufengerecht[1]. Die Einschränkung der Rechnungen auf den OPA ist gerechtfertigt, da letztlich nur der OPA als Wirtsgestein sowohl für ein HAA- als auch für ein SMA-Lager in Frage kommt. Für Etappe 3 des Sachplanverfahrens sind analoge Rechnungen zu fordern, welche die effektive 3D-Geometrie des geplanten Endlagers wirklichkeitsnah wiedergeben. Darüber hinaus erachtet die EGT die angenommene Mächtigkeit des ungestörten OPA, welcher das Endlager einschliesst, von 50 – 55 m als zu hoch.

2.6 Sicherheitsrelevante Auswirkungen geochemischer Prozesse für das SMA-Lager

2.6.1 Angaben der Nagra

Das Multi-Barrieren-Konzept für die SMA-Lager basiert auf der Abfallmatrix, dem Behälter, der Rückverfüllung im Einlagerungsbereich, dem «Engineered Gas Transport System» EGTS und dem Wirtgestein. Die Nagra berücksichtigt zahlreiche geochemische Prozesse bei der Beur-

[1] Es ist darauf hinzuweisen, dass der verwendete PICNIC Ansatz bei sehr kleinen Advektionsgeschwindigkeiten ungültig wird (siehe NTB 14-10, Seite 43). Damit lässt sich aber der Referenzfall (BC), wo die Nuklidfreisetzung nur diffusiv aus den Endlagerkavernen erfolgt, nicht mittels dem PICNIC Code berechnen.

teilung der Sicherheitsfunktionen dieser Barrieren (NTB 14-11), dazu gehören wichtige Isolations- und Rückhaltemechanismen, wie die Bindung von Radionukliden in der Zement/Bitumen-Matrix der Fässer, der Einschluss in Abfallbehälter und die Isolierung mit Verfüllmörtel im Tiefenlager. Zudem wird der Rückhaltung von Radionukliden ein wichtiger Stellenwert gegeben. Angestrebt werden niedrige Auslaugungsraten der Zementmatrix in den Behältern, niedrige Korrosionsraten der metallischen Abfälle, Sorption der Radionuklide in der Zementmatrix und an Tonmineralen und ein geochemisches Milieu mit niedriger Radionuklidlöslichkeit. Die Bewertung der Nagra der chemischen Wechselwirkungen in den verschiedenen SMA-Wirtgesteinen ist in Tabelle 2-2 dargestellt. In NTB 14-11 wird das heutige Verständnis von wahrscheinlichen geochemischen Prozessen, die in einem SMA-Lager in 100'000 Jahren vorkommen könnten, zusammengefasst. Das vorliegende Berichtskapitel behandelt ausgewählte geochemische Prozesse aus NTB 14-11 und nimmt Bezug auf NAB 16-41 und 16-42.

Tabelle 2-2: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Langzeitstabilität' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR-OPA	SMA-ZNO-OPA	SMA-NL-OPA	SMA-JO-OPA	SMA-JS-OPA	SMA-ZNO-BD	SMA-NL-BD	SMA-JS-EFF	SMA-WLB-MG
KG2	**Langzeitstabilität**		**4.2**	**4.2**	**4.2**	**4.2**	**4.2**	**4.1**	**4.1**	**3.4**	**4.0**
2.1	**Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften**		**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.3**	**4.3**	**2.5**	**4.3**
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3	4.3	2.5	4.3
2.3	**Lagerbedingte Einflüsse**		**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.2**	**3.3**
29	Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.1	3.1
30	Chemische Wechselwirkungen	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5	3.5
31	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Gas	WG-ss	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.1	3.3
32	Verhalten des Wirtgesteins bzgl. Temperatur	WG-ss	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.4	**Nutzungskonflikte**		**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**
33	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Das Kapitel 3.4 (NTB 14-11) über Wechselwirkungen zwischen Zement und Abfall behandelt

- den Abbau von organischen Verbindungen (Kapitel 3.4.1),
- den Einfluss von CO_2 auf Zementdegradation (Kapitel 3.4.2)
- den Einfluss von organischen Liganden auf Radionuklidsorption (Kapitel 3.4.3).

Die Degradierung organischer Abfälle in einem Zementlager wird gemäss Nagra vermutlich überwiegend mittels Methanogenese erfolgen, wobei CO_2 und CH_4 freigesetzt werden. Infolge der ungünstigen Lebensbedingungen (hohe pH-Werte) wird die für die Degradierung notwendige mikrobielle Aktivität sehr gering sein. Das freigesetzte CO_2 wird das die Abfälle umgebende Zementmaterial mittels Karbonatisierung degradieren und ausfallen. Die Degradierungsraten der organischen Abfälle sind schwer vorherzusagen, da sie neben dem pH-Wert von weiteren schlecht quantifizierbaren Faktoren wie der Verfügbarkeit von Wasser und bestimmten Nährstoffen wie Phosphor und Stickstoff abhängen. Diese Faktoren wirken auf die mikrobiologisch gesteuerte Degradierung limitierend. Der Einfluss der Radionuklidkomplexie-

rung in einer zementhaltigen Umgebung wird bei der Erstellung der entsprechenden Sorptionsdatenbasis, welche für die provisorische Sicherheitsanalyse angewandt wird, berücksichtigt.

In Kapitel 3.4.4 (NTB 14-11) werden anorganische Stoffe behandelt, vor allem die Bildung von Wasserstoffgas und Korrosionsprodukten durch die Oxidation von Metallen und die Aufnahme von Metallionen bzw. Radionukliden in die Zementmatrix.

Kapitel 4.3.2.2 (NAB 16-42) behandelt die Konditionierung von SMA-/LMA-Abfällen. Pyrolyse von Organika und Einschmelzen von Metallen reduziert die Menge an entstehenden Gases. Die Abfallvolumina werden durch die Behandlung nur unwesentlich reduziert.

In Kapitel 3.4.5 (NTB 14-11) wird die Wechselwirkung von Alkali-Metallen mit Silikaten in den Zuschlagstoffen behandelt (die sogenannte «alkali silica reaction», ASR). Falls Beton kieselsäurehaltige Zuschlagstoffe enthält, können Zementmaterialien durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktionen degradiert werden. Hierbei reagieren kieselsäurehaltige Zuschläge mit Portlandit und bilden C-S-H Phasen. Dieser Prozess führt zum Absinken des pH-Werts im Porenwasser und langfristig zu einer vollständigen Auflösung der Zementmaterialien. Über den längerfristigen zeitlichen Verlauf dieser Reaktion ist wenig bekannt. Die Bewertung bekannter Reaktionsgeschwindigkeiten lässt allerdings den Schluss zu, dass die Zementdegradation durch diesen Prozess relativ schnell, d. h. in einigen hundert bis tausend Jahren erfolgen könnte. Dieser Prozess gilt für alle Betonarten mit kieselsäurehaltigen Zuschlagstoffen wie z. B. Quarz und ist vor allem bei den bereits konditionierten Abfällen mit diesen Zuschlagstoffen oder bei Stilllegungsabfällen relevant, in welchen bereits Beton verarbeitet wurde.

Diese Reaktion ist der Beton- und Bauindustrie bekannt und kann reduziert werden, indem nicht reaktive siliziumdioxidhaltige Zuschlagstoffe verwendet oder sogenannte «pozzolanic reactants» zuggegeben werden. Die «pozzolanic reaction» ist eine Möglichkeit, um einen Niedrig-pH-Zement herzustellen. Ebenfalls können die Zuschlagstoffe für den Verfüllmörtel des SMA-Lagers noch variiert werden. Im Vergleich zum SMA-Lager sieht die Nagra für das HAA-Lager einen Niedrig-pH-Zement als Spritzbeton vor.

Kapitel 3.5 (NTB 14-11) erfasst die von der Nagra als die wichtigsten erachteten Prozesse:

- Mikrobieller Abbau von Organika
- Korrosion von Metallen
- Beton-Degradation
- Karbonatisierung von Zement

Die Autoren erwähnen, dass diese Prozesse von der Anwesenheit von Wasser und voneinander abhängen – Karbonatisierung hängt vom mikrobiellen Abbau ab, die Metallkorrosion hängt vom pH-Wert des Porenwassers ab. Auch galvanische Korrosion in den Fässern wird als möglicher Prozess erwähnt.

2.6.2 Beurteilung der EGT

Abfallinventar des SMA-Lagers

Um zu verstehen, welche Prozesse das Barrieren- und Sicherheitskonzept prägen, ist es notwendig, das Abfallinventar zu betrachten. Tabelle 2-3 zeigt die mengenmässig wichtigsten

Tabelle 2-3: Das Abfallinventar der SMA, modifiziert nach Nagra (2014). Aufgelistet sind Abfälle mit >0.1 Gew.% des gesamten Inventars

Abfall (Tonnen)	Total	Abfallprodukt	Behälterhülle	Füllmaterial	Einbauten
Anorganika (98.5% von 91'750 Tonnen)					
Kies	31'306	346	30'661	299	
::Zementstein -::Zement HTS	16'024	2'830	5'928	7'266	
Beton	11'226	10'797	416	0	13
Quarzsand	10'153	14	0	10'139	
::Zementstein -::Wasser	9'496	2'430	2'477	4'589	
::Schlacke/Glas PA ZWILAG	3'249	3'249	0	0	
::Zementstein -::Micropoz	2'234	185	0	2'049	
Zementstein	1'453	1'453	0	0	
Sand	1'355	10	0	1'345	
Clinoptilolith	1'144	87	0	1'057	
::Zementstein -::Zement OPC	1'053	133	164	756	
::Zementstein -::Trass	515	515	0	0	
Siliciumdioxid SiO_2	485	8	477	0	
Barytbeton	284	284	0	0	
Steinwolle	262	262	0	0	
Korund Al203	179	179	0	0	
Metalle (99% von 65'000 Tonnen)					
Stahl	41'373	41'186	186	0	1
Gusseisen	8'311	1'941	6'369	0	0
Blei Pb	2'725	142	60	0	2'524
Stahl III SIA 162	2'053	0	2'053	0	0
Stahl 12.03	1'862	156	1'661	0	45
CrNi-Stahl	1'832	1'803	3	0	26
Stahl rostfrei	1'545	1'523	21	0	0
Baustahl	1'299	1'295	0	0	4
Kupfer Cu	955	955	0	0	0
Eisen Fe	937	897	23	0	18
Stahl 37	716	3	644	0	70
Stahl 1.4301	434	354	62	0	17
Aluminium Al	321	321	0	0	0
Organika (80% von 3'000 Tonnen)					
PVC	781	781	0	0	0
Polystyrol-Sulfonat/Kation	555	555	0	0	0
Bitumen	304	303	0	1	0
Polystyrol-quatAmin/Anion	284	284	0	0	0
Kunststoffe	155	154	0	0	0
PS-quatAmin/Anion thermol.	149	149	0	0	0
PS-Sulfonat/Kation thermol.	149	149	0	0	0

Abfälle (>0.1 Gew.% des gesamten Inventars) in 3 Kategorien. Die Kategorie «Anorganika» besteht hauptsächlich aus Zementmaterialien und Stoffen wie Kies, Sand, Zuschlagstoffen oder Schlacke. Die Kategorie «Metalle» besteht aus verschiedenen Stählen, Eisen, Kupfer,

Blei und Aluminium. Die organischen Verbindungen machen 2 Gew.% des gesamten Abfallinventars aus.

Ein weiterer Punkt ist die Bewertung von Abfällen nach ihrer Toxizität. Im Inventar sind toxische Stoffe wie Asbest, Beryllium oder Antimon und volatile Stoffe wie Formaldehyd oder Methanol gelistet, aber sie sind in kleinen Mengen vorhanden und werden in ihrer Wirkung wahrscheinlich gegenüber der Radioaktivität von untergeordneter Bedeutung sein.

Zement-Ton-Interaktionen und Degradation von Beton

Die geochemischen Modelle zu den Zement-Ton Wechselwirkungen entsprechen dem aktuellen Stand der Technik. Die Autoren des NTB 14-11 merken an, dass die Resultate von der Modelldiskretisierung und von der Auflösungskinetik der gewählten Minerale im pH-Bereich von 11-13.5 (Metcalfe und Walker 2004), vor allem Montmorillonit, abhängen. Ähnliche Aussagen werden über Modelle mit advektivem Fluss getroffen. Es wird daher empfohlen, in Etappe 3 SGT die oben genannten Probleme mit der Diskretisierung zu behandeln. Dazu wird es notwendig sein, die Auflösungskinetik von Silikaten zu verstehen. Es fragt sich, ob so detaillierte Modelle eine Genauigkeit vortäuschen, wenn die Entwicklung des Porenwasser-pH-Werts nicht bekannt ist. Die Auflösung von Silikaten in Sand, Zuschlagstoffen, silikatreichen Abfällen usw., reduziert die Alkalinität und somit die Reaktivität des Zementmörtels und führt zu einer veränderten Mineralogie. Es wird auch notwendig sein, die möglichen Sekundärphasen zu überprüfen. Es wird daher empfohlen, die Ergebnisse mit Experimenten zu vergleichen und zu bestätigen. Die verschiedenen Prozesse sind bei der Wahl der Materialien gegeneinander abzuwägen.

Gasbildung durch Degradation organischer Stoffe und Metallkorrosion

Die Biodegradation unter Entstehung von Kohlendioxid und Methan kann in einem SMA-Lager stattfinden:

$$2(CH_2O) \rightarrow CH_4 + CO_2$$

Es wird von der Nagra angenommen, dass das CO_2 in die Zementmatrix eingebunden wird. Die Datenbasis über die Kinetik des Abbaus von organischem Material ist veraltet und braucht zusätzliche Labordaten. Eine der offenen Fragen ist die Zugänglichkeit von Fe(III) und SO_4^{2-} im Zement zu reduzierenden Mikroorganismen.

Die Nagra diskutiert in verschiedenen Berichten, wie Wasserstoffgas durch Metallkorrosion gebildet werden kann, zum Beispiel durch folgende Reaktionen:

$$3\ Fe + 4\ H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4\ H_2$$

$$Al + 3\ H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 1.5\ H_2$$

Die Nagra gibt im NTB 14-03 an, dass die gesamt gebildete Gasmenge für das SMA Lager $4.0 \cdot 10^7\ m^3$ beträgt.

Metallkorrosion ist wegen der Wasserstoffbildung ein sehr wichtiger Prozess, ebenso der Einfluss der Korrosionsprodukte auf das SMA-Nahfeld. In NAB 14-11 werden allerdings folgende Aspekte nicht behandelt:

- die pH-Abhängigkeit der Oxidationsrate von Eisen und Aluminium,
- der Einfluss des durch Eisenoxidation in grossen Mengen gebildeten Magnetits auf die Stabilität von Zement,
- die Entwicklung des gebildeten und im Gleichgewicht mit Magnetit stehenden Fe(II), ob es diffusiv transportiert und ausgefällt wird und ob dies zu Blockierungen des Porenraums führt.

Der pH-Wert des Zementporenwassers wird höchstwahrscheinlich durch ASR-Prozesse sinken, aber dazu kommen Pozzolane in den Fässern und die Karbonatisierung. Zusammen werden diese Prozesse Einfluss auf die Zement-Ton Wechselwirkungen haben.

Die Oxidation von Eisen wird durch die Passivierung von der Oberfläche behindert. Andererseits ist Aluminium unter alkalischen Bedingungen sehr reaktiv und könnte mit der hydratisierten Zementpaste reagieren, sobald Abfälle und Zementpaste angemischt wurden. Wie viel Aluminium reagieren könnte, hängt vom Masse/Oberflächen-Verhältnis ab. Allerdings sind die Gesamtmengen von Aluminium (<1%, Tabelle 2-3) im Vergleich zu Eisen klein.

Der nächste Punkt, der berücksichtigt werden muss, ist der pH-Wert des Porenwassers. Eine Senkung führt zu erhöhten Korrosionsraten von Eisen. Neutralisations-Prozesse werden durch i) Auswaschung von Basen (durch die hoch-pH-Fahne erkennbar), ii) Oxidationsprozesse (ausser den Metallen unwahrscheinlich), iii) Neutralisation (zum Beispiel durch CO_2) und iv) durch die Verwitterung von silikatreichen Mineralen. Letztere gehören zu den Anorganika im Abfallinventar und betreffen Schlacke/Asche der Plasmaanlage der ZWILAG, Mikropozzolane, Trass (vulkanische Asche) und Steinwolle. Diese Stoffe können eine grosse Oberfläche haben und können auch zum Teil glasig sein. Sie könnten schneller reagieren als Zuschlagsstoffe und auch zur ASR-verursachten Reduktion der Alkalinität beitragen. Wegen ihres Einflusses auf die Eisenkorrosionsrate könnten die obengenannten Reaktionen bedeutend sein. Angenommen, der Calciumgehalt vom HTS-Zement sei 10 mol/kg (Messungen von A. Johnson an der EAWAG) und dass «Zementstein HTS» Zementklinker entspräche, dann wäre der gesamte CaO-Gehalt $1.6 \cdot 10^8$ mol. Die Gesamtmenge an CO_2 wäre vergleichsweise $5.8 \cdot 10^7$ mol. Bei Annahme eines Gehalts von 8 mol/kg Si (200 mg/g) für die Schlacke/Aschen usw. ergäbe sich eine Konzentration von reaktivem Si von $4.6 \cdot 10^7$ mol.

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} + 2H_2O$$

$$Ca(OH)_2 + H_4SiO_4 \leftrightarrow CaH_2SiO_4 + 2H_2O$$

Einem gesamten CaO-Gehalt von $1.6 \cdot 10^8$ mol wird so ein gesamtes Neutralisationspotenzial von $1.0 \cdot 10^8$ mol gegenüber gestellt. Dazu kommt die Schätzung, dass nach 500 Jahren Reaktionen mit Zuschlagstoffen zu einem Porenwasser von pH 10 führen könnten. Ausgehend von den groben Schätzungen und einfachen Modellrechnungen ist zu vermuten, dass eine hohe Alkalinität des Porenwassers nicht über lange Zeiträume zu erwarten ist. Wie schnell sich die Alkalinität ändert, hängt von Degradationsraten und vom Wassergehalt ab.

Wenn CO_2 bereits kurz nach der Füllung der Fässer gebildet wird, könnte der Porenwasser-pH-Wert ebenfalls sinken.

Direkt nach der Mischung von Abfall mit Zementmörtel wird der pH wahrscheinlich zu hoch sein für eine signifikante Eisenkorrosionsrate. Allerdings kann galvanische Korrosion von verschiedenen Metallen im gemeinsamen Endlagerbehälter nicht ausgeschlossen werden. Die galvanische Korrosion kann die Korrosionsraten bestimmter Metalle im Abfall beschleunigen. Auf die gesamte Gasmenge hat es aber keinen Einfluss, da die Abschätzung der Gesamtgasmenge auf dem Metallinventar basiert und kinetische Aspekte nicht berücksichtigt werden (NAB 17-01).

Es gibt einige fundamentale Fragen über die Reaktivität der Inhaltstoffe der Fässer. Wenn man mit solch komplexen Systemen konfrontiert wird, ist es hilfreich, einfache experimentelle Messungen als Anhaltspunkte zu haben. Gasmessungen an frisch gefüllten Fässern mit repräsentativen Stoffen (nicht radioaktiv) unter ähnlichen Bedingungen wie in ein einem geologischen Tiefenlager wären zu empfehlen. Es wäre auch möglich, den Zutritt von Wasser/Feuchtigkeit

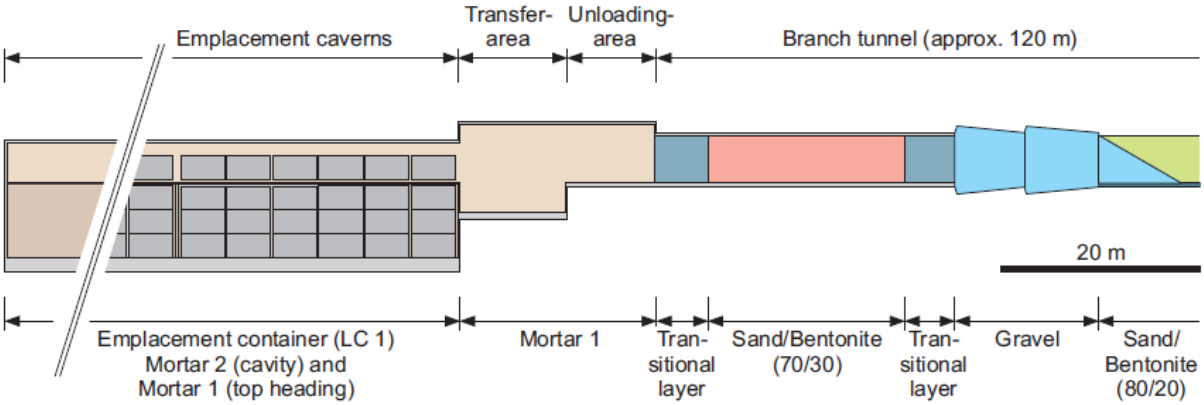
oder Niedrig-pH-Bedingungen zu simulieren. So könnten auch ohne grosse Investitionen nützliche Information im Laufe der nächsten Dekaden erhoben werden. Reaktionsraten wichtiger Prozesse könnten auch im Labor in Modellsystemen ermittelt werden.

Schliesslich enthält das System enorme Mengen an Eisen, aus denen später Eisenkorrosionsprodukte entstehen. Welchen Einfluss dies auf Durchlässigkeit, Zement- und Tonstabilität haben wird, ist unklar.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die von Eisen und Stahl dominierte Gas-Produktion ein wichtiger Prozess sein wird. Die Korrosionsraten werden vom pH-Wert und der Feuchtigkeit beeinflusst.

2.7 Langzeitbeständigkeit und Gastransport im EGTS für das SMA-Lager

2.7.1 Angaben der Nagra



Figur 2-3: Querschnitt der alternativen Verschliessung V5 (NTB 08-07, S. 29)

Wasserstoffgas (H_2) entsteht im SMA-Lager durch anaerobe Korrosion der Metalle, hauptsächlich Stahl, Eisen und Aluminium und durch Radiolyse. Auch Biodegradation von organischem Kohlenstoff mit Produktion von CO_2 und CH_4 ist zu erwarten (vgl. Kap. 2.6.2). Zur Berücksichtigung von steigendem Gasdruck durch H_2 und CH_4 durch Korrosions- und Abbauprozesse im SMA-Lager wird der Indikator 'Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas' als Sicherheitsaspekt betrachtet. Dieses Gas soll über ein Engineered Gas Transport System (EGTS) gezielt abgeführt werden, dessen Langzeitbeständigkeit und Gastransport anhand der Arbeitsberichte NAB 14-16 und NAB 13-92 bewertet werden. Das EGTS soll die im SMA-Lager durch Korrosion entstehenden Gase gezielt abführen, dadurch den Druckanstieg begrenzen und die Sicherheit des SMA-Lagers gewährleisten.

Das Konzept des kontrollierten Transports von Gasen durch die Zugangsstrukturen des Lagers ist in der Auswahl von Rückfüllmaterialien und Dichtungen integriert (Figur 2-3). Zementmörtel mit hoher Durchlässigkeit sollen in den Lagerkavernen selbst verwendet werden, während Sand/Bentonit-Mischungen für die Rückfüllung von Zugangsbauwerken vorgesehen sind. Wegen möglicher chemischer Wechselwirkungen ist es sehr wichtig, die Bildung von Sekundärmineralphasen zwischen dem Porenwasser von «Mortar 1» (siehe Figur 2-3), einem Mörtel einer einheitlichen Korngrösse, und Sand/Bentonit-Mischungen zu verhindern, weil diese den Porenraum in der Kontaktzone verschliessen können. Im Extremfall könnte der Porenraum undurchlässig für Gas werden. Diffusionsgetriebener, gelöster Stofftransport und anschliessende Ausfällungen könnten die Gastransport-Effizienz des EGTS behindern. Eine hoch poröse Übergangsschicht («transitional layer» in Figur 2-3) soll dem entgegenwirken.

Der Bericht NAB 14-16 adressiert mögliche mineralogische Veränderungen, die zu einer Reduktion der Porosität an den Grenzflächen «Mortar 1»-Übergangsschicht und Übergangsschicht-Sand/Bentonit führen könnte. Die Autoren betrachten Kalkstein als nichtreaktives Material der Übergangsschicht, was zu einer Abnahme der Konzentrationsgradienten im Porenwasser führt. Sie führen 1D-Rechnungen für wassergesättigte Bedingungen und 2D-Rechnungen für teilweise gesättigte Bedingungen, inklusive advektivem Transport, durch. Die Modellierung berücksichtigt Reaktionen innerhalb und an den Grenzflächen von Rückfüllmaterialien, aber nicht mit dem Wirtgestein.

2.7.2 Beurteilung der EGT

Gastransport

Einige Annahmen, die den Modellen in NAB 14-16 über mineralogische Veränderungen zugrunde liegen, sowie die Anfangs- und Randbedingungen bedürfen aus Sicht der EGT einer genaueren Betrachtung:

Die vorhandene Gasphase wird durch die Richards-Gleichung beschrieben (siehe NAB 14-16 S. 20 ff), der die Annahme einer unendlich mobilen Gasphase bei konstantem Gasdruck zugrunde liegt. Diese Annahme widerspricht aber der Tatsache, dass im SMA-Lager gerade ein solcher Druckanstieg durch korrosive und biologische Abbauprozesse erfolgen kann. Der Druckanstieg wird in den Darstellungen des Berichts darüber hinaus beim Fluidtransport gegenüber der Diffusion vernachlässigt.

Weiterhin sind die Anfangsbedingungen des 2D-Modells zu hinterfragen. Obwohl davon ausgegangen wird, dass Wasser durch das EGTS erst in das anfänglich trockene Lager infiltriert, wird bereits von Anfang an kapillares Gleichgewicht vorausgesetzt. Woher kommt dieses Wasser und warum wurde nicht mit trockenem SMA-Lager als Anfangsbedingung gerechnet? Die als «rather arbitrary, but not unrealistic» bezeichnete Darcy-Flussrandbedingung auf Seite des EGTS erscheint spekulativ. Warum wird hier kein konstanter Druck vorgegeben, der je nach Druck- und Sättigungsbedingungen im SMA-Lager zu einem Einströmen führt? Aus Sicht der EGT sind die getroffenen Annahmen nicht überzeugend als konservativ im Sinne der Fragestellung zu werten.

Das EGTS-System geht weiter in die Berechnung der Modelle in NAB 13-92 ein, in dem die unterschiedlichen Operationsphasen des SMA-Lagers im Hinblick auf die Gasentwicklung und –ausbreitung rechnerisch untersucht werden. In den Simulationsergebnissen in NAB 13-92 der Nagra ist ersichtlich, dass das EGTS seine gewünschte Wirkung zeigt und weiterem Druckanstieg entgegenwirkt.

Bei den Simulationsergebnissen ist allerdings zu beachten, dass die sich entwickelnde Gasphase während der Simulation die Modellränder erreicht. Damit beeinflussen die gewählten Randbedingungen die Rechenergebnisse erheblich. Je nach Art der Randbedingung kommt es dadurch zu erhöhtem Druck, Aufstau der Gasphase oder erhöhte Fliessgeschwindigkeiten, was nicht der Realität entspricht. Durch ein ausreichend grosses Modellgebiet kann und sollte dies verhindert werden. Weiterhin sollte überprüft werden, ob die Diskretisierung ausreichend fein ist, oder ob im Bereich grosser Gradienten in den Grössen Sättigung/Druck eine Gitterverfeinerung zu deren Abbildung notwendig ist. Die EGT empfiehlt daher einen Nachweis der Gitterkonvergenz.

Zur Berechnung der Gasausbreitung wurden in den Modellen aus NAB 13-92 vorwiegend die Eigenschaften von H_2 verwendet. Wasserstoff entsteht in erster Linie durch Metallkorrosion. Einige Simulationen wurden aber auch mit Luft als Gasphase durchgeführt, was nicht zuletzt deshalb nahe liegt, da Luft durch die Lagerarbeiten in den anfänglichen Operationsphasen

eingeschlossen wird. Der Argumentation der Nagra, Luft anstelle von H_2 zu verwenden sei konservativ, kann allerdings nicht uneingeschränkt zugestimmt werden. Zwar ist die Annahme Luft zu verwenden konservativ in Bezug auf die Druckentstehung, nicht aber in Bezug auf das Ausbreitungsverhalten, da sich durch die unterschiedlichen Dichten jeweils andere Auftriebskräfte einstellen.

Anhand der Simulationsergebnisse in den Berichten NAB 14-16 und NAB 13-92 ist davon auszugehen, dass das EGTS seine Funktion über den vorgesehenen Betriebszeitraum behält. Allein eine immer währende Gasphase verhindert das vollständige Verstopfen des EGTS durch Fällungsreaktionen. Ob das EGTS aber auch bei unterschiedlichen Sättigungszuständen seine Funktionsfähigkeit behält, wurde von der Nagra nicht untersucht. Damit ist der heute vorliegende Nachweis der dauerhaften Wirksamkeit des EGTS unvollständig. Alternativen zur Bewältigung des Gasproblems (inklusive Transport via AUZ) sollten intensiver erarbeitet und diskutiert werden.

Chemische Reaktionen

Ein hoher chemischer Gradient, zum Beispiel an der Grenzfläche zwischen Porenwässern unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, führt zu hoher Reaktivität. An der Grenzfläche eines Mörtel- und eines Sand/Bentonit-Porenwassers werden Tonminerale und Zementminerale wegen der hohen Alkalinität des Mörtelporenwassers umgewandelt und ändern so ihre Eigenschaften. Mit einem nichtreaktiven Material der Übergangsschicht dazwischen wird der Gradient reduziert und verlangsamt die Reaktionen und den Austausch zwischen den beiden Porenwässern. Trotzdem finden Umwandlungen wegen der hohen Hydroxid- und Aluminium-Gehalte im Porenwasser, und wegen des reaktiven Calciums und Silikats im noch reaktionsfähigen Zementklinker statt (NAB 14-16, Tabelle A-2).

Es bilden sich Calcium-Silikat-Hydrat (C-S-H) mit Ettringit ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.xH_2O$), welches sich am Rande des Zementmörtels mit dem hinzudiffundierenden Sulfat bildet. Magnesium bildet entweder Brucit ($Mg(OH)_2$), Hydrotalkit ($Mg_2Al(OH)_7$ oder $Mg_2Al(OH)_6 0.5(CO_3, SO_4)$). In Gegenwart von Silikat- und Aluminiumionen werden Aluminosilikate gebildet sowie das Zeolith Phillipsit (Mordenit oder Laumonit; NAB 14-16, S. C-7), oder das Schichtsilikat Strätlingit. Die Schlussfolgerungen stimmen mit anderen Modellen weitgehend überein. Eine Ausnahme könnte Katoit sein ($Ca_3Al_2(SiO_4)_{3-x}(OH)_{4x}$), welches von Gaucher et al. (2004) als zusätzliche Sekundärmineralphase vorgeschlagen wurde. In Gegenwart von Natriumionen könnte auch Analcim gebildet werden (Fernandez et al. 2006).

Für das Material der Übergangsschicht ist Calcit eine gute Wahl, weil es im Zementporenwasser unlöslich und im Sand/Bentonit ohnehin vorhanden ist. Quarz könnte wegen der bekannten «Alkali Silica Reaction» (ASR) ziemlich reaktiv sein. Wegen der zur Verfügung stehenden kleinen Wassermengen halten sich auch die mineralogischen Umwandlungen in Grenzen. Insofern sich der Bericht mit Calcit als Material der Übergangsschicht befasst hat, war die Auswahl der entstehenden Minerale gut und die Modellierung Stand des Wissens. Der Bericht behandelt einen Teil des EGTS-Konzepts, welches noch in Entwicklung ist.

Aus Sicht der EGT sind noch einige geochemische Fragen zur Funktion und Langzeitbeständigkeit des EGTS zu klären:

- Inwiefern werden die Korrosionsprodukte von Eisen die Mineralbildung und den Porenraum im EGTS beeinflussen?
- Könnten durch Redoxgradienten zwischen Fe_3O_4 und Fe(II) Eisensulfide und -karbonate entstehen?

- Welche Stützmittel sind in den Verfüllstrecken mit Sand/Bentonit-Gemischen in den Zugangsbauwerken vorgesehen und wie würden diese das geochemische Milieu beeinflussen?
- Wie viel Alkalinität ist den Abfällen und Behältern und wie viel dem EGTS zuzuschreiben. Wie viel Beton wird bis zur Einlagerung schon karbonatisiert?
- Wieso wird Niedrig-pH-Zement nicht als mögliches Material in Erwägung gezogen?

Geomechanische und bautechnische Aspekte

Die Dokumente der Nagra enthalten keine Angaben zur mechanischen Beurteilung des EGTS oder zur Auswirkung der Verfüllung auf die Hohlraumstabilität. Es ist auch nicht klar, ob im Bereich des EGTS eine von der Regelstützung abweichende Hohlraumsicherung vorgesehen ist. Eine satte Rückfüllung der offenen Hohlräume ist für das Funktionieren des EGTS erforderlich und verbessert die Beständigkeit des Bauwerks. Diese vollständige Verfüllung ist nach Ansicht der EGT allerdings schwierig, zumal mit losem Material. Ist eine vollständige Verfüllung mit pumpfähigem Material (z. B. Innenschalenbeton bei Tunneln) nur durch zusätzliche Verpressung des unweigerlich entstehenden Firstspalts zu erreichen, ist dies bei Verwendung von losem Material nur durch ein sehr regelmässiges Tunnelprofil ohne wesentliche geometrische Abweichung und nach Quellen des Bentonits sicherzustellen. Bevor ein gänzlicher Kontakt durch das Quellen des Bentonits erreicht ist, ist jedenfalls nicht mit einer satten Verfüllung zu rechnen.

2.8 Gastransport in den SMA- und HAA-Wirtgesteinen

2.8.1 Angaben der Nagra

Das Gesteinsverhalten bezüglich Gas wurde in umfangreichen Versuchen getestet. Arbeitsbericht NAB 13-83 fasst Messwerte und deren abgeleitete gasbezogene Gesteinsparameter (Porosität, Kapillardruck, relative Permeabilität und intrinsische Permeabilität) zusammen, die anschliessend in Simulationen zur Gasausbreitung einfliessen. Basierend auf den im Arbeitsbericht NAB 13-83 zusammengefassten gasbezogenen Gesteinsparametern wird die Gasausbreitung im SMA-Lager (NAB 14-98) und im HAA-Lager in Opalinuston (NAB 14-10) mit unterschiedlichen Gasproduktionsraten mit Hilfe eines 2D-Modells berechnet. Ergänzend dazu werden im NAB 13-92 3D-Modellberechnungen für SMA-Lager vorgestellt.

NAB 14-98 vergleicht die verschiedenen Wirtgesteine für das SMA-Lager (Opalinuston flach und tief, 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Helvetische Mergel) in Bezug auf die Druckentstehung durch Gasentwicklung. Der Vergleich des Gasdruckaufbaus in den verschiedenen geologischen Situationen erfolgt unter Berücksichtigung der wirtgesteinsspezifischen Referenzparameter zur Gastransportkapazität. Um die Verhältnisse in den verschiedenen Lagersituationen vergleichen zu können, wird hierzu der maximale Gasdruck in den Lagerkavernen mit dem lithostatischen Druck auf Lagerebene normiert. Laut den Berechnungsergebnissen eignen sich alle vorgeschlagenen SMA-Wirtgesteine in Bezug auf den Druckanstieg durch Gasentstehung. Der Druckanstieg liegt in allen Modellen unterhalb des Werts von 80% des lithostatischen Drucks, der von der Nagra als kritischer Wert für «pathway-dilation», d. h. Öffnung von präferenziellen Fliesswegen, angenommen wird. Die berechneten maximalen Überdrücke in den Lagerkavernen treten, für alle Lagersituationen vergleichbar, nach ca. 1'000 bis 10'000 Jahren auf. Die Nagra zeigt, dass es erst nach ca. 500 Jahren zu einem erheblichen Druckanstieg kommt. Anfangs herrscht durch den Ausbruch verursachter atmosphärischer Druck. Wird durch Abbau und Korrosion der Lagerbehälter und Abfälle mehr Gas freigesetzt als über das EGTS (Engineered Gas Transport System) abgeführt werden kann, wird von der Nagra angenommen, dass sich Wegsamkeiten im umliegenden Gestein öffnen.

In NAB 14-10 werden unterschiedliche Szenarien in Bezug auf die Druckentstehung durch Gasentwicklung bei HAA-Lagern im Opalinuston vorgestellt. Die Modellkonzepte entsprechen dem Vorgehen zum SMA-Lager. Wird durch Korrosion der Lagerbehälter und Abfälle mehr Gas freigesetzt als über das EGTS (Engineered Gas Transport System) abgeführt werden kann, wird von der Nagra angenommen, dass sich Wegsamkeiten im umliegenden Gestein öffnen. Die Untersuchungen im NAB 14-10 zeigen nach Nagra auf, dass der Gasdruck allein über das Wirtsgestein abgebaut werden kann, daher wird nicht auf die Wirkungsweise eines EGTS eingegangen. Anzumerken ist, dass im NAB 16-42 alternative Behältermaterialien zur Reduktion der Gasbildungsrate diskutiert werden.

2.8.2 Beurteilung der EGT

Die Daten zu den Gesteinsparametern in NAB 13-83 und die Simulationsergebnisse aus NAB 14-98 sind aus Sicht der EGT nicht ausreichend für eine weiterführende Bewertung der Wirtgesteine oder gar für den Ausschluss eines Gesteins als Wirtgestein. Dies liegt unter anderem an den Annahmen, die sowohl den SMA- als auch den HAA-Modellen zu Grunde liegen und nachfolgend diskutiert werden.

Problematisch bei der Bewertung der Gesteine bezüglich Gas ist einerseits, dass die Nagra zwar einige Parameter mit der Begründung der Konservativität wählt, den ungünstigsten anzunehmenden Fall aber nicht genauer definiert. Der erhöhte Gasdruck kann erhöhte Fliessgeschwindigkeit verursachen und bereits im Wasser gelöste Radionuklide in Bereiche höherer Durchlässigkeit transportieren (wie in NTB 08-07 beschrieben). Dringt aber Gas unter Druckabbau als Gasphase ins Gestein, öffnet dies neue Wegsamkeiten, in denen anschliessend auch Radionuklide transportiert werden können. So ist zu unterscheiden zwischen konservativer Betrachtung in Bezug auf den Druck, und damit auf die Integrität der geologischen Barriere, und Konservativität in Bezug auf die Gasausbreitung. Es müssen aber beide Fälle für die Gewährleistung der Sicherheit der SMA- und HAA-Lager genau betrachtet werden und die Bewertung der SMA-Wirtgesteine sollte auf einem Verständnis der physikalischen Prozesse beruhen.

Die Untersuchungsmethoden zum Verhalten der Gesteine bezüglich Gas in NAB 13-83 sind aufschlussreich und entsprechen dem Stand der Technik. Allerdings wurden Bohrproben und in-situ-Tests nur an wenigen Stellen je Wirtgestein untersucht. Bohrproben, mit denen Quecksilberporosimetrie und Kapillardruck-Sättigungsbeziehungen erstellt wurden, stammen aus Benken, Mont Terri und Schlattingen für den Opalinuston, aus Schlattingen für den 'Braunen Dogger' und aus Oftringen und Schlattingen für die Effinger Schichten. Proben für die Helvetischen Mergel stammen aus den Bohrungen am Wellenberg. Auch wenn die Messwerte aufschlussreich und gut dokumentiert sind, kann durch die geringe Anzahl keine Streuung und damit keine Abweichung vom Referenzwert angegeben werden. Croisé et al. 2006 weisen auf eine grosse Unsicherheit insbesondere des Gaseindringdrucks hin. Unbekannt ist zudem die räumliche Streuung der Parameter, die deshalb in NAB 14-98 geostatistisch erzeugt werden muss. Die geostatistischen Ansätze sind aber für eine Berücksichtigung in der Beurteilung unzureichend dokumentiert.

In den Modellen zur Gasausbreitung (NAB 14-10 für ein HAA-Lager sowie NAB 14-98 und NAB 13-92 für ein SMA-Lager) wird anschliessend mit Parametern aus NAB 13-83 (Referenzwerte) gerechnet, sowie mit Parametern aus der Literatur (alternative Werte). In NAB 14-98 sind zwar Alternativparameter aufgeführt, es wird aber ausschliesslich mit den Referenzwerten gerechnet. Vergleichsrechnungen wären aber auch hier hilfreich, um eine Vorstellung von der Sensitivität der Parameter zu bekommen. Dies entspricht einem deterministischen Vorgehen, das sich jedoch nicht als systematische, quantitative Analyse eignet. Es bleibt unbekannt, wel-

cher Parameter die grösste Unsicherheit beinhaltet und welche Abweichung die Berechnungen am meisten beeinflusst. Stattdessen bleiben sogenannte nicht reduzierbare Unsicherheiten, deren Auswirkungen nicht eingegrenzt werden können. Eine Quantifizierung der Sensitivitäten ist von grosser Bedeutung für die Verlässlichkeit der Modellergebnisse. Um zu einer systematischen und umfassenden Analyse zu gelangen, ist sicherlich eine Verwendung komplexer Modelle ein zeitaufwendiges (vor allem in Bezug auf die Rechenzeit) Vorhaben. Die EGT empfiehlt daher, auch vereinfachte Modellansätze zu prüfen, mit denen für gegebene Fragestellungen eine Sensitivitätsanalyse auf der Basis von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden kann (z. B. Oladyshkin et al. 2011).

Eine Auffälligkeit in den Wirtgesteinsparametern ergibt der Vergleich von Opalinuston und 'Braunem Dogger' in NAB 13-83. Obwohl der Opalinuston eine geringere Permeabilität aufweist, ist sein Gaseindringdruck geringer als im 'Braunen Dogger' bei höherer Permeabilität. Dies erscheint zunächst unphysikalisch, muss aber keine Unstimmigkeit sein. Weitere Untersuchungen dazu sollten die Verlässlichkeit dieser Parameter besser begründen.

Weiterhin wird in allen Modellen der Berichte NAB 14-10, NAB 14-98 und NAB 13-92 je ein einziges Gitter verwendet, um das Modellgebiet zu diskretisieren. Einige Parameter, insbesondere der Gaseindringdruck, reagieren sensitiv auf die räumliche Mittelung. Es ist zu vermuten, dass bei feinerer Diskretisierung kleinräumig grössere Drücke entstehen würden und so die «pathway dilation» bereits früher einsetzt. Dies ist zwar konservativ in Bezug auf den Druckaufbau, nicht jedoch auf die Gasausbreitung. Eine Gitterkonvergenzstudie würde eine Aussage über die Unsicherheiten ermöglichen, die durch die räumliche Diskretisierung entstehen.

Der Fluidtransport wird in den Modellen durch die Zwei-Phasengleichung von Darcy beschrieben, sowohl für das SMA- als auch das HAA-Lager. Dieser Ansatz entspricht prinzipiell dem Stand der Technik. Jedoch muss beachtet werden, dass sehr kleine Permeabilitäten, wie sie in den beschriebenen Gesteinen vorliegen, dessen Gültigkeit beschränken. In diesem Zusammenhang sollte auf die Knudsen-Diffusion eingegangen werden, die speziell die Gasausbreitung bei sehr kleinen Permeabilitäten beeinflusst. In sehr kleinen Poren und bei geringen Drücken kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die Geschwindigkeit am Rand der Pore gleich Null ist; das Geschwindigkeitsprofil in der Pore ist anders als das, was der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes zu Grunde liegt, sodass der mit nach Darcy ermittelte Fluss in solchen Fällen zu einer Unterschätzung des tatsächlichen Flusses führt.

Übersteigt der Druck im Gestein bestimmte Kriterien, öffnet das Gas präferenzielle Fliesswege. In den Modellen wird dieser Effekt als «pathway dilation» beschrieben. Obwohl dieses Phänomen bekannt ist, ist es aus unserer Sicht nicht genügend verstanden, um präzise Abschätzungen zu geben oder wirklich zu bestimmen, was in einem solchen Fall einen sinnvoll gewählten «Worst-Case» charakterisiert. Es ist daher anzuzweifeln, ob dieses komplexe geologische Phänomen über eine einfache empirische Beziehung, die allein die Permeabilität bei hohem Druck (relativ zur lithostatischen Spannung) erhöht, zufriedenstellend abgedeckt ist. Alternativ untersuchen Xu et al. (2013) einen Ansatz der Permeabilitätsveränderung basierend auf Druckanstieg und Scherverformung mit Dilatanz. Auch die Spannungsverhältnisse am ehemaligen Ausbruchsrand (zum Zeitpunkt der Gasfreisetzung) und die Bedingungen für Scherreaktivierung durch erhöhte Gasdrücke sollten differenzierter betrachtet werden.

In allen betrachteten Modellen (in NAB 14-10, NAB 14-98 und NAB 13-92) wird Isothermie angenommen, obwohl in den HAA-Lagern noch erheblich Wärme produziert wird. Die Temperatur hat aber auch einen erheblichen Einfluss auf die Porenwasserdrücke und damit auf die Wiederaufsättigung im Bentonit und der Auflockerungszone (AUZ). Kull et al. (2007) beschreiben erheblichen Druckanstieg im Gestein durch Temperaturanstieg. Würde dieser Druck durch zusätzlichen Gasdruck aufgrund von Gasentstehung durch Korrosion überlagert, würde die

verstärkte Dilatanz die Barrierenwirkung des Wirtgesteins negativ beeinflussen. Eine gekoppelte Betrachtung wäre eher als konservativ zu betrachten als die hier vorgenommene getrennte Untersuchung der Phänomene. Selbst wenn der Annahme zugestimmt wird, dass die radioaktiven Abfälle beim Auftreten der untersuchten Phänomene bereits abgekühlt sind, muss beachtet werden, dass der Druckanstieg auch einen Temperaturanstieg bedingt. Ein Temperaturanstieg wirkt sich wiederum auf die Transporteigenschaften, insbesondere Fluidviskosität und Gasdiffusion aus. Ausserdem ist zu erwarten, dass der Korrosionsfortschritt und somit der Druckanstieg von der Temperatur beeinflusst wird.

Insgesamt betrachtet entsprechen Messmethoden und Modellierung dem Stand der Technik. Für das SMA-Lager zeigen 'Brauner Dogger', Effinger Schichten und Helvetische Mergel bezüglich der Gasproblematik etwas geeignetere Eigenschaften als Opalinuston. Die EGT weist auf zahlreiche Unsicherheiten hin, die sich aus der schlechten Datenlage der Gesteinsparameter, sowie den Annahmen in den numerischen Simulationen und dem zugehörigen Prozessverständnis ergeben. Unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten wird eine grössere Streuung der Berechnungsergebnisse erwartet.

Beim HAA-Lager ist ein geringerer Druckanstieg als beim SMA-Lager zu erwarten. Ob über den zu betrachtenden Zeitraum der notwendige Druckabbau gewährleistet ist, so dass kein EGTS notwendig ist, wurde durch die Nagra nicht ausreichend belegt. Die langfristige Wirksamkeit des EGTS wurde bisher nicht vollständig nachgewiesen. Deshalb wird empfohlen, Alternativen zum EGTS systematischer zu entwickeln.

2.9 Felsmechanische Eigenschaften der Wirtgesteine für das SMA-Lager

2.9.1 Angaben der Nagra

Opalinuston

Zum Opalinuston liegen umfangreiche fels- und bodenmechanische Laborversuche und Kennwerte vor, welche aus wenigen Tiefbohrungen und insbesondere aus dem Felslabor Mont Terri stammen. Die wichtigsten Datensynthesen finden sich in NTB 14-02-IV, NAB 16-43, sowie in Wild (2016). Die Laborversuche umfassen Ödometer Tests, Brazilian Tests, UCS Tests und Triaxial Tests. Zur Ermittlung der Anisotropie wurden die Kerne überbohrt, wodurch sich Kerndurchmesser von rund 25 mm ergaben, oder grössere Proben vor Ort direkt in unterschiedliche Richtungen erbohrt.

Gemäss NAB 13-18 ergaben die UCS Tests Spitzenfestigkeiten zwischen rund 10 MPa und 30 MPa, je nach Orientierung zur Schichtung. Die Einstufentriaxialversuche ergaben, je nach Belastungsgeschwindigkeit, Spitzenfestigkeiten zwischen rund 55 MPa und 65 MPa, sowie Restfestigkeiten zwischen knapp unter 40 MPa und rund 60 MPa.

Die Auswertung erfolgte unter anderem nach einem bilinearen Mohr-Coulomb-Kriterium. Beim niedrigen Spannungsniveau wurden von der Nagra Reibungswinkel im Bereich von 14° bis 36° und eine Kohäsion von rund 2 MPa bis 3 MPa ermittelt, wogegen im höheren Spannungsniveau Reibungswinkel zwischen rund 10° und 25° bei einer Kohäsion von rund 7 MPa bis 9 MPa ausgewertet wurden. Die Steifigkeit wurde mit einem Bereich von rund 6 GPa bis rund 20 GPa ermittelt.

Bei den geomechanischen Kennwerten der Standortgebiete unterscheidet die Nagra in NAB 16-43 zwischen drei verschiedenen Gebirgsmodellen (GMmax, GMref, GMmin). Angesichts

der geringen experimentellen Datenbasis in den bevorzugten OPA-Standortgebieten und entsprechenden Tiefenlagen wird ein breites Spektrum an geomechanischen Parametern vorgeschlagen.

Effinger Schichten

Die in Laborversuchen (NAB 08-25, zusammengefasst in NAB 08-48) ermittelten Gesteinsfestigkeit liegen im Bereich 50 MPa bis 90 MPa. Für den Elastizitätsmodul werden aus Laborversuchen zwischen rund 10 GPa und 20 GPa ermittelt. Das Verhältnis der Steifigkeit parallel/normal zur Schichtung beträgt bei den untersuchten Proben etwa 3/2. Der Reibungswinkel wurde mit Werten von rund 31° bis 37° (Tonmergel), bzw. 49° (Kalkmergel) und für die Kohäsion 13 MPa bis 20 MPa (Tonmergel) und 16 MPa (Kalkmergel) ermittelt.

Die für die Versuche verwendeten Proben wurden mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Länge von 60 mm parallel und normal zur Schichtung gebohrt.

Bei den Triaxialversuchen wurden die Proben allseitig bei gleichem Druck bis zur gewünschten Höhe des Umschliessungsdrucks beansprucht («konsolidiert»). Dann wurde der Axialdruck bei konstantem Umschliessungsdruck bis zum Bruch gesteigert, und im Anschluss der Versuch bis zum Erreichen der Restfestigkeit fortgesetzt. Es wurden Einstufenversuche mit jeweils 5 Proben durchgeführt. In der Triaxialzelle wurde auch die Permeabilität unter Umschliessungsdruck bestimmt.

Daten von Laborversuchen 2011 (NAB 11-08; NTB 14-02-IV) zeigen Druckfestigkeiten zwischen etwa 50 MPa bis ca. 60 MPa, mit Reibungswinkeln von ca. 40° bis ca. 50°, einer Kohäsion von ca. 8 MPa bis 14 MPa (peak) und einem Elastizitätsmodul von ca. 10 GPa bis ca. 20 GPa.

Helvetische Mergel

Für diese Formation liegen Bauerfahrungen mit Überlagerungen bis 800 m vor. Die einaxialen Druckfestigkeiten würden zwischen 20 und 100 MPa schwanken, mit grossräumigen Durchschnittswerten von 50 bis 70 MPa, wobei kaum Unterschiede zwischen den Belastungsrichtungen parallel/normal zu erkennen sind. Die Elastizitätsmoduln wurden mit rund 13 bis 30 GPa ermittelt. Die Reibungswinkel schwanken zwischen 19° und 36°, die Kohäsion zwischen 11 MPa und 17 MPa (NAB 08-48). Für die Tonmergel werden die geringsten Steifigkeiten und Festigkeiten, für die Sandmergel die höchsten festgestellt. Die Anisotropie in der Steifigkeit beträgt rund 2/1 für die Orientierung parallel/normal zur Schichtung. Ein sprödes Verhalten wurde bei den Versuchen festgestellt.

'Brauner Dogger'

Die Nagra bewertet die Festigkeits- und Verformungseigenschaften der Tongesteinsabfolge 'Brauner Dogger' ähnlich wie jene des Opalinustons. Die Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften werden für die Standorte Zürich Nordost und Nördlich Lägern als 'günstig' bezeichnet. Ebenso wird die Gesamtbewertung der Bautechnischen Eignung von der Nagra bei Beschränkung der maximalen Tiefe als 'günstig' bewertet.

Einige Ödometertests und Quellversuche wurden durchgeführt (NAB 12-50). Bei den Quellversuchen ergaben sich im Standardödometer Quelldrücke um 1 MPa und Quelldehnungen um 8%. Bei den Hochdrucköodometerversuchen an gesättigten Proben wurden Quelldrücke zwischen 0.26 bis 1.1 MPa ermittelt. Der ermittelte Steifemodul ist stark spannungsabhängig und wurde in einem Bereich von rund 400 MPa bei 1 MPa effektiver Vertikalspannung bis rund 15'000 MPa bei effektiver Vertikalspannung von 100 MPa ermittelt.

Zusätzlich wurde an Proben der Bohrung Schlattingen die einaxiale Druckfestigkeit mit Hilfe von «Scratch Tests» und drei einaxialen Druckversuchen ermittelt (NAB 12-47; NTB 14-02-IV, Anhang A). Dabei ergaben sich aus den «Scratch Tests» ermittelte einaxiale Druckfestigkeiten von rund 50 MPa bis rund 60 MPa; die Ergebnisse der einaxialen Druckversuchen liegen im Bereich von rund 36 MPa bis rund 66 MPa.

Die Gesteinseigenschaften und Verformungseigenschaften werden von der Nagra für den Opalinuston und den 'Braunen Dogger' mit 'günstig', für die Effinger Schichten und die Helvetischen Mergel als 'sehr günstig' bewertet (NTB 14-01, Tabelle 3.3-1).

2.9.2 Beurteilung der EGT

Die Versuchsprozeduren der Triaxialversuche aus den Jahren 2007, 2011, 2013 und 2016 unterscheiden sich stark und dokumentieren eine intensive Auseinandersetzung mit dem komplizierten hydro-mechanisch gekoppelten Materialverhalten des Opalinustons. Unter anderem wurden die früheren Proben nicht zur Gänze konsolidiert, was grosse Auswirkungen auf die Ergebnisse hatte. Die neuesten Kennwertsätze der Nagra (NAB 16-43) basieren nur noch auf Laborversuchen, welche den komplexen Anforderungen an die Versuchsdurchführung genügen. Eine detaillierte Beurteilung der Nagra-Versuche an Opalinuston ist in ENSI 33/461 und ENSI 33/531 zu finden.

In Anbetracht der nur spärlich vorhandenen Versuchsdaten des 'Braunen Doggers' erscheint eine Bewertung der felsmechanischen Eigenschaften als 'günstig' gewagt und ist jedenfalls durch Daten nicht zu belegen. Sowohl die Effinger Schichten als auch die Helvetischen Mergel weisen eine stärkere Heterogenität auf, was sich auch in den unterschiedlichen Steifigkeiten und Festigkeiten der unterschiedlichen Lagen zeigt. Bautechnisch sind heterogene Gebirgsarten als eher ungünstig zu beurteilen, da es zu Spannungskonzentrationen in den steiferen Lagen und damit zu vermehrten (Spröd-)Brüchen in diesen Lagen kommen kann. Eine detaillierte Analyse der bautechnischen Auswirkungen solcher Wechsellagerungen wurde von der Nagra nicht vorgenommen. Die bautechnische Bewertung als 'sehr günstig' wird offensichtlich nur auf Grund der höheren Festigkeiten und Steifigkeiten des Gebirges vorgenommen und Aspekte der Auswirkungen von Wechsellagerungen auf das Gebirgsverhalten nicht berücksichtigt. Eine Beurteilung ist daher nicht zweifelsfrei möglich.

Im Gegensatz zur Nagra ist für die EGT zwingend, dass die bautechnischen Eigenschaften für die Auswahl der prioritären Wirtgesteine der SMA Lager als entscheidrelevant angesehen werden, stellen sie doch ein wesentliches Kriterium für Tiefenlage und Auswahl der Standortgebiete dar.

Tabelle 2-4: Bewertung der SMA-Standortgebiete und Wirtgesteine bezüglich der Kriteriengruppe 'Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen' und 'Bautechnische Eignung' für den massgebenden Fall der Einengung (aus NTB 14-01)

Nr.	Kriteriengruppe / Kriterium / Indikator	Bewertungsobjekt	SMA-SR-OPA	SMA-ZNO-OPA	SMA-NL-OPA	SMA-JO-OPA	SMA-JS-OPA	SMA-ZNO-BD	SMA-NL-BD	SMA-JS-EFF	SMA-WLB-MG
KG3	**Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen**		**4.4**	**4.4**	**4.4**	**4.4**	**4.4**	**3.4**	**3.4**	**3.1**	**3.0**
3.1	**Charakterisierbarkeit der Gesteine**		**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**3.6**	**3.6**	**2.8**	**3.3**
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	WG-ss	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.1	2.5	2.5
40	Erfahrungen	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1	3.1	3.1	4.1
3.2	**Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse**		**4.1**	**4.3**	**4.3**	**4.3**	**4.1**	**2.5**	**2.5**	**2.5**	**1.5**
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	WG	4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	2.5	2.5	2.5	1.5
3.3	**Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen**		**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.5**	**4.1**	**4.1**	**4.1**	**4.3**
46	Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	WG	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.1	4.1	4.1	4.3
KG4	**Bautechnische Eignung**		**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**4.3**	**4.3**
4.1	**Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen**		**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**3.5**	**4.3**	**4.3**
47	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	WG-ss	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	4.3	4.3
KG1-4	**Gesamtbewertung**		**4.0**	**4.1**	**4.1**	**4.1**	**4.0**	**3.8**	**3.8**	**3.5**	**3.8**

2.10 Homogenität und Explorierbarkeit von Heterogenitäten im Opalinuston und 'Braunen Dogger'

2.10.1 Angaben der Nagra

Das Wirtgestein 'Brauner Dogger'

Der 'Braune Dogger' ist ein potenzielles Wirtgestein für SMA-Lager in den Standortgebieten Nördlich Lägern und Zürich Nordost. Er ist ausserdem das obere Rahmengestein zum Wirtgestein Opalinuston in den Standortgebieten Nördlich Lägern, Südranden und Zürich Nordost. Er liegt zwischen Top Opalinuston und Basis Malm.

Das potenzielle Wirtgestein 'Brauner Dogger' wird in NTB 14-01 (S. 153 ff) als eindeutig nachteilig gegenüber dem Opalinuston hinsichtlich der entscheidrelevanten Merkmale 'Homogenität des Gesteinsaufbaus' (Indikatorwert 2.5 gegenüber 4.5 bzw. 'bedingt günstig' gegenüber 'günstig'), 'Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund' (Indikatorwert 2.5 gegenüber 4.3 bzw. 'bedingt günstig' gegenüber 'günstig') und 'Länge der massgebenden Freisetzungspfade' (Indikatorwert 1.5 gegenüber 4.5 bzw. 'ungünstig' gegenüber 'günstig') eingestuft.

Die Bewertung bzgl. der Homogenität des Gesteinsaufbaus ergibt sich aus den kalkigen Schichtelementen mit potenziell höherer Durchlässigkeit, mehreren Metern Mächtigkeit und lateralen Ausdehnungen von Hunderten von Metern.

Die Bewertung bzgl. der Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund ergibt sich aus dem Umstand, dass die Gesteinsverhältnisse variabler sind als im Fall des Opalinustons und die vorhandenen 'harten Bänke' und kleinen Versätze auch mit 3D-Seismik nicht nachgewiesen werden können. Wegen der lateralen Variabilität können lokale Erkenntnisse (aus Bohrungen) nicht extrapoliert werden.

Die Bewertung der Länge des massgebenden Freisetzungspfads erfolgt wesentlich über die Mächtigkeit der tonreichsten Formation (TA1) Sie wird für Nördlich Lägern mit 37 m (Variation: 25 bis 60 m) und für Zürich Nordost mit 40 m (Variation: 30 bis 60 m) angegeben (NTB 14-01, Tab. 3.1-2, 3.1-3). Fast unmittelbar (2 m) über Oberkante TA1 liegen die oberen Rahmengesteine. Das erscheint deutlich ungünstiger im Vergleich zum Opalinuston mit Mächtigkeit in Nördlich Lägern und Zürich Nordost von 110 m (Variation: 80 bis 130 m).

Die reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers' (NAB 14-58) konzentriert sich auf die Region der Standortgebiete Nördlich Lägern bis Zürich Nordost. Wesentliches Ziel ist die Dokumentation der Mächtigkeit und lithologischen Ausbildung der einzelnen Formationen und Schichten sowie die laterale Kontinuität von 'harten Bänken' (sandig-kalkige Einschaltungen, Eisenoolithe). Diese sollten sich, sofern sie vertikal aufgelöst werden können und lateral homogen genug sind, in der 2D-Seismik widerspiegeln und mit Bohrlochdaten korrelierbar sein. Dazu wird versucht, Korrelationen der Bohrlochlogs mit der faziellen Abfolge zu etablieren und weitere seismische Hilfshorizonte zwischen dem Markerhorizont Basis Malm (BMa) und dem Hilfshorizont Near-Top Opalinuston (nTOp) zu identifizieren. Der Bericht verfolgt noch andere Ziele (S. 1, 2), die aber für die Charakterisierung des Wirtgesteins in NTB 14-01 von geringer Bedeutung sind.

Als Datengrundlage dienen 14 Bohrungen (NAB 14-58, S. 7) von denen 12 die gesamte Stratigrafie des 'Braunen Doggers' erfassen. Dazu kommen Profile der reprozessierten 2D-Seismik und der 2D-Seismik von 2011/2012, die in Fig. 1 des NAB 14-58 gezeigt sind. Dort werden als wesentliche Ergebnisse festgehalten:

- Eine Unterteilung des 'Braunen Doggers' durch zusätzliche Hilfshorizonte ist nicht durchwegs möglich. Die Kartierung der BMa- und nTOp-Horizonte ist oft und besonders in den tektonisch beanspruchten Gebieten schlecht.
- Eine detaillierte Log-Korrelation mit den lithostratigraphisch definierten Formationen lässt sich mithilfe von zugeordneten Logkriterien nicht vornehmen.
- Allerdings erlaubt ein Vergleich der seismischen Daten mit den bohrlochgeophysikalischen Daten aber innerhalb des seismischen Auflösungsvermögens (ca. 15 bis 20 m vertikal) die Zuordnung von lithologischen Abfolgen zu seismischen Fazieseinheiten mit charakteristischen Reflexionseigenschaften, welche sich lateral bei guter seismischer Abbildungsqualität verfolgen lassen.

2.10.2 Beurteilung der EGT

Die Schlussfolgerungen der reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers' (NAB 14-58) sind im Bericht gut belegt und können als zuverlässig betrachtet werden. Die EGT zieht aus diesem Bericht folgende weiteren Schlussfolgerungen:

In der Seismik interpretierbare Fazieswechsel (NAB 14-58, Fig. 12, 13) lassen auf eine laterale Variabilität dieser Fazies auf der Skala von 50 m schliessen. Die nicht vorhandene Korrelation der Logs mit den lithostratigraphischen Einheiten und die Schwierigkeit, diese seismisch zu «sehen», deutet ebenfalls auf ein hohes Mass an lateraler Variabilität der Gesteine hin. Die vertikale und laterale Inhomogenität des 'Braunen Doggers' erscheint also höher als im Opali-

nuston. Im Rahmen der SGT Vorgaben zeigt der 'Braune Dogger' also - aus der Seismik belegbare - Nachteile gegenüber dem Opalinuston hinsichtlich Charakterisierbarkeit der Gesteine (Kriterium 3.1) und Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse (Kriterium 3.2).

2.11 Zusammenfassende Bewertung der Wirtgesteine für das SMA-Lager

Die Bewertung der Wirtgesteine durch die Nagra gibt Tabelle 2.4 wieder. Die hydraulischen Eigenschaften der SMA-Wirtgesteine sind sowohl von der mineralogischen Zusammensetzung, der Heterogenität wie der tektonischen Überprägung abhängig. Auch reine Kalksteine oder Mergel wirken ohne tektonische Überprägung als sehr dichte Stauer und werden deshalb in internationalen Tiefenlagerprogrammen (Kanada, Deutschland) auch als Wirtgesteine für SMA-Lager in Betracht gezogen. In der Schweiz sind die kalkreicheren SMA-Wirtgesteine hingegen an allen potentiellen Standorten tektonisch überprägt, und sie lassen sich mit der Situation in Kanada und Deutschland nicht vergleichen. Da bei Tonsteinen und Tonmergeln die tektonischen Auswirkungen aufgrund einer empirisch nachgewiesenen Selbstabdichtung kaum mehr eine Rolle spielen, erachtet auch die EGT den Opalinuston als ein Wirtgestein mit vorzüglicher Barrierenwirkung. Die hydraulische Barrierenwirkung des 'Braunen Doggers' ist aufgrund von häufigen kleinräumigen Einschaltungen von sandig-kalkigen Bänken und Eisenoolithen (Kalkbänken) als weniger günstig zu bezeichnen. Zudem sind diese Bänke schlecht explorierbar. Für die Effinger Schichten und Helvetischen Mergel müssen aufgrund des häufigen Auftretens von geklüfteten und teilweise zerscherten Kalkbänken ungünstige Barriereneigenschaften erwartet werden. Werden diese Fakten und die inhärenten Unsicherheiten der Radionuklidtransport-Rechnungen berücksichtigt, stellt sich die Frage, ob die Effinger Schichten und Helvetischen Mergel das verschärfte Dosiskriterium wirklich einhalten.

Während die hydraulische Barrierenwirkung und Freisetzungspfade des Opalinustons von der EGT gegenüber den anderen SMA-Wirtgesteinen als deutlich vorteilhafter bewertet werden, weist der Opalinuston hinsichtlich seiner bautechnischen und Gastransport-Eigenschaften gegenüber den SMA-Wirtgesteinen Effinger Schichten und Helvetische Mergel eindeutige Nachteile auf. Diese Nachteile sollten explizit aufgezeigt und in der Bewertung berücksichtigt werden. Die Einstufung der gesamten Kriteriengruppen 'Bautechnische Eignung' und 'Lagerbedingte Einflüsse' als «nicht-entscheidrelevant» kann die EGT - auch im Hinblick auf die Vorgaben des ENSI für Etappe 2 (ENSI 33/154) - nicht nachvollziehen.

Eine Einstufung des Indikators «Verhalten des Wirtgesteins bezüglich Gas» als nicht-entscheidrelevant bedingt einen eindeutigen Nachweis der dauerhaften Funktionstüchtigkeit des «Engineered Gas Transport Systems» (EGTS). Das EGTS ist eine technische Konstruktion im SMA-Lager, welche die durch Korrosion entstehenden Gase gezielt abführen kann, dadurch den Gasdruckanstieg begrenzt und die Integrität der geologischen Barriere des SMA-Lagers gewährleistet. Gasausbreitungsrechnungen mit einem nicht validierten Modell deuten darauf hin, dass das EGTS seine Funktion erfüllen könnte. Es kann jedoch auf keine Erfahrungswerte und umfassenden Modellrechnungen zurückgegriffen werden. Aus Sicht der EGT sind zudem noch verschiedene geochemische und bautechnische Fragen zur Funktion und Langzeitbeständigkeit des EGTS zu klären. Der Nachweis der Langzeitfunktionsfähigkeit des EGTS Systems wurde bisher von der Nagra nicht erbracht.

Wie in den Kapiteln 3.9 und 3.11 gezeigt werden wird, spielen bautechnische Aspekte bei der Optimierung der Lagerperimeter und schliesslich auch beim Standortvergleich eine entscheidende Rolle. Die bautechnischen Eigenschaften des Opalinustons bewertet die EGT nicht als 'günstig' sondern als 'bedingt günstig'. Die bautechnischen Eigenschaften der Effinger Schich-

ten und Helvetischen Mergel sind günstiger als jene des Opalinustons. Aus wenigen Versuchen ergibt sich der Hinweis, dass die felsmechanischen und bautechnischen Eigenschaften des 'Braunen Doggers' mit jenen des Opalinustons vergleichbar sein könnten.

Basierend auf den grundsätzlich problematischen Barriereneigenschaften der Effinger Schichten und Helvetischen Mergel und der schwierigen Explorierbarkeit des 'Braunen Doggers' unterstützt die EGT die Priorisierung des Opalinustons als einziges SMA-Wirtgestein in der Nordschweiz. Allerdings ist bei dieser Priorisierung darauf hinzuweisen, dass die lagerbedingten Einflüsse (insbesondere Auflockerungszonen und Gasbildung) nicht die vorzüglichen Barriereneigenschaften des Opalinustons signifikant und langfristig beeinträchtigen dürfen. Dies erfordert zukünftig eine intensive Auseinandersetzung mit technischen Fragestellungen zur Erstellung und zum Verschluss der SMA-Lagerhohlräume (inkl. alternativer Szenarien für die Behandlung der Gasproblematik).

3. Abgrenzung optimierter Lagerperimeter für das SMA- und HAA-Lager

3.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

3.1.1 Angaben der Nagra

Die Abgrenzung der Lagerperimeter erfolgt in den Standortgebieten durch eine Optimierung von (1) Distanzen zu regionalen tektonischen Elementen (regionale Störungen und zu meidende tektonische Zonen), (2) Anforderungen an die minimale Tiefe, die sich aus zukünftigen Erosionsprozessen mit entsprechender Dekompaktion ergeben und (3) Anforderungen an die maximale Tiefe, die sich aus der bautechnischen Eignung ergeben. Bei der Optimierung der maximalen Tiefenlage wird das Ziel verfolgt, das Gebirge möglichst wenig zu verletzen, und gleichzeitig nur eine beschränkte Menge von Stützmitteln einzusetzen. Die maximalen Tiefen beziehen sich auf die Lagerebene - in mittlerer Höhe der Opalinuston-Formation - und die Geländeoberkante, die minimalen Tiefen auf die obere Begrenzung (Top) der Opalinuston-Formation und verschiedene Referenzniveaus wie die Geländeoberkante, die heutige Erosionsbasis und die Tiefenlage des Felsuntergrunds. Die untere Begrenzung der Opalinuston-Formation (= Top Lias, TLi) ist ein seismischer Markerhorizont, der in reprozessierten und 2011/2012 neu gemessenen Reflexionsprofilen interpretiert wurde, dessen Tiefenlage aber nur mit Unsicherheiten angeben werden kann, welche die Nagra mit typischerweise 50 bis 100 m um die mittlere Tiefenlage berechnet. Die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation wird aus Bohrlochdaten abgeschätzt und variiert in den Standorten zwischen 90 und 110 m. Je nach Standort spielen die drei Faktoren eine unterschiedlich wichtige Rolle. Die Bewertungsskalen für die minimalen und maximalen Tiefen werden in NTB 14-01 sowie in NAB 16-41 festgelegt und begründet. Sie weichen von den Werten der Etappe 1 ab, etwa wenn die Maximaltiefen des HAA-Lagers in Etappe 2 mit 700 m als wünschenswert definiert werden, im Vergleich zu 900 m in Etappe 1.

Um sicherzustellen, dass die in Etappe 1 des SGT vorgegebenen Mindestanforderungen und Verschärften Anforderungen (MA/VA) an die Lagerperimeter nach wie vor erfüllt sind, wird ein Zwei-Schritt-Verfahren angewandt. Zunächst werden die MA/VA auf die Isohypsen, wie sie sich aus den «neuen» Reflexionsdaten ergeben, angewandt. Dies ergibt überall ein Platzangebot, das den Platzbedarf deutlich übersteigt. Im zweiten Schritte wird ein massgebender Fall definiert. Dieser besteht darin, dass die zu meidenden tektonischen Zonen eine zusätzliche Einschränkung der nutzbaren Standortfläche erzeugen sowie spezifische Vorgaben über die minimale (Erosion, Dekompaktion, glaziale Rinnen) und die maximale Tiefe (Bautechnik) gemacht werden. Die Vorgaben an die Tiefe werden auf die mittlere Tiefenlage der Isohypsen des TLi angewandt. Technisch geschieht dies in einem Geographischen Informationssystem GIS. Damit wird der «optimierte Lagerperimeter» gewonnen, der aber teilweise noch «manuell» modifiziert wird. Zusätzlich werden als alternative Fälle eine Reihe von Möglichkeiten betrachtet, in denen Vorgaben an die Tiefen und/oder deren Anwendung auf die um die Tiefenfehler flacher oder tiefer gelegten Isohypsen variiert werden. Diese Parametervariationen dienen der Bewertung der Sensitivität des optimierten Lagerperimeters gegenüber veränderten Anforderungen.

3.1.2 Beurteilung der EGT

Die EGT hält diese Herangehensweise für prinzipiell gut, weil sie den Bezug zur Etappe 1 des SGT klar herstellt und insgesamt zu einem transparenten Verfahren für die Bewertung der Kriterien des Platzangebots untertags (im Verhältnis zum Platzbedarf) führen kann. Das ist

wichtig, weil das mangelnde Platzangebot (und die damit korrelierte Tiefenlage hinsichtlich bautechnischer Machbarkeit) eine erhebliche Rolle bei der Zurückstellung von Standorten wie z. B. des Gebiets Nördlich Lägern sowohl für ein SMA- als auch für ein HAA-Lager spielt. Auch der Vorschlag das Gebiet Südranden als Standort für ein SMA-Lager zurückzustellen wird wesentlich mit der Tiefenlage, in diesem Fall der minimalen, begründet.

3.1.3 Aufbau von Kapitel 3

In den folgenden Unterkapiteln werden die Anforderungen im Einzelnen aus wissenschaftlicher Sicht bewertet: Kapitel 3.2 analysiert die Anforderungen an die minimale Tiefenlage, die für die Optimierung der SMA-Lagerperimeter in den Gebieten Südranden und Jura Ost bzw. für das HAA-Lager in Zürich Nordost und Jura Ost erheblich sind. Die Kapitel 3.3 und 3.6 beschäftigen sich mit der Zuverlässigkeit der Aussagen, die auf der Reflexionsseismik fussen: Lage der regionalen Störungen, Ausdehnung der zu meidenden tektonischen Zonen, Tiefenlage des TLi sowie die Qualität und Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Standorte. Kapitel 3.4 und 3.5 behandelt allgemeine tektonische und seismische Aspekte, welche zwar nicht in die Optimierung der Lagerperimeter aber dennoch in die Bewertung der Standortgebiete einfliessen. In Kapitel 3.7 wird das Verfahren zur Bestimmung des Platzbedarfs für SMA- und HAA-Lager, in das neben den bautechnischen Parametern und den Volumina der zu entsorgenden radioaktiven Abfälle auch zu erwartender zusätzlicher Platzbedarf durch nicht detektierte aber anordnungsbestimmende Störungen sowie Niederbrüche und damit verbundenem Ausfall einzelner Kavernen oder Kavernenstrecken führt. Kap. 3.8 befasst sich mit den Annahmen zur Auslegung der SMA- und HAA-Lager, was für die Beurteilung der maximalen Tiefenlage aber auch für die Beurteilung des Platzbedarfs erheblich ist. Die Anforderungen an die maximale Tiefenlage aus Sicht der bautechnischen Machbarkeit, relevant für die Optimierung der SMA-Lagerperimeter in Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura Ost bzw. für HAA-Lager in Zürich Nordost und Nördlich Lägern wird in Kapitel 3.9 behandelt. Kapitel 3.10 beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit des SMA- und HAA-Lagers und in Kapitel 3.11 wird die Abgrenzung der Lagerperimeter in den Standorten beurteilt.

3.2 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf Erosionskriterien

3.2.1 Lage der Erosionsbasis

Angaben der Nagra

Die Nagra verwendet in Etappe 2 SGT neu eine «lokale Erosionsbasis», an welcher sich zahlreiche Erosionsprozesse wie flächenhafte Erosion, die Möglichkeit zur Bildung neuer Durchbruchsrinnen und glaziale Tiefenerosion orientieren. Dabei definiert die Nagra die lokale Erosionsbasis als *Fläche, welche durch die Höhenlage der Achsen der Haupttäler aufgespannt wird. Die Abtragung der lokalen Seitentäler und Hänge stellt sich auf dieses Niveau ein. Substantielle Erosion unter die lokale Erosionsbasis ist nur durch glaziale Tiefenerosion möglich* (NTB 14-02-III, S. 50). Dabei wird von den tiefsten fluviatilen Paläorinnen ausgegangen, die zum Teil tiefer als das heutige Flussniveau liegen. Damit können mögliche Unterschätzungen der vergangenen Vertiefungen vermieden werden. Diese Vorgehensweise basiert auf der generell akzeptierten Annahme, dass die Abtragung einer Oberfläche hauptsächlich durch die Lage der fluviatilen Erosionsbasis bestimmt wird (z. B. Whipple 2004). Flussprozesse übertragen damit Veränderungen in den klimatischen und tektonischen Rahmenbedingungen in rela-

tiv kurzer Zeit auf eine gesamte Landschaft. Diese Mechanismen kontrollieren dann schliesslich, in welcher Form und mit welcher Geschwindigkeit tiefer liegende Gesteinsschichten exhumiert werden. Obwohl die Nagra (NTB 14-02-III) diese Zusammenhänge nicht explizit so erwähnt, fliessen entsprechende Überlegungen und Konzepte implizit bei der Definition und Anwendung der lokalen Erosionsbasis ein.

Die Lage der heutigen Erosionsbasis wurde in NAB 12-35 hergeleitet. Diese Rekonstruktion basiert auf der Felsoberflächenkarte aus NAB 14-02, welche mit Hilfe von Bohrungen rekonstruiert wurde. Um die Lage der Erosionsbasis ableiten zu können, wurden Stützpunkte entlang der grösseren Talachsen manuell auf dieses Felsmodell gelegt und in Form von 50-m-Isohypsen dargestellt (illustriert z. B. in NAB 12-35). NAB 14-25 zeigt anhand unterschiedlicher Herleitungen, dass bei der Rekonstruktion dieser Isohypsen ein gewisser Interpretationsspielraum besteht. So führen die Wahl der Interpolationsmethode sowie Ermessensspielräume beim Umgang mit übertieften Abschnitten zu Unsicherheiten und damit zu Unschärfen in der Bestimmung der lokalen Erosionsbasis. Dies war offenbar auch der Grund, wieso die Rekonstruktion der Erosionsbasis durch zwei verschiedene geologische Büros durchgeführt wurde (NAB 12-35; NAB 14-02). Die daraus resultierenden Unterschiede sind in NAB 14-25, S. 25 für das Untersuchungsgebiet dargestellt; sie bewegen sich um einen Mittelwert von ca. 25 m.

Beurteilung der EGT

Als Bewertungsgrundlagen dienen einerseits Konzepte aus der tektonischen Geomorphologie, welche im Rahmen mehrerer wissenschaftlicher Arbeiten erarbeitet wurden. Diese führen zur Erkenntnis, dass (i) die Höhenlage der grösseren Flüsse die regionalen Erosionsprozesse und -geschwindigkeiten bestimmen und damit die Abtragung der Oberfläche steuern, (ii) diese Lage durch tektonische und klimatische Rahmenbedingungen verändert werden, und (iii) entsprechende Anpassungen die Exhumation tiefer liegender Gesteinsschichten über längere Zeiträume von Hundertausenden bis Millionen von Jahren steuern. Dabei wird ebenfalls davon ausgegangen, dass Flussprozesse Veränderungen in den klimatischen und tektonischen Rahmenbedingungen in relativ kurzer Zeit auf eine gesamte Landschaft übertragen. Die theoretischen Grundlagen, die zu diesen Überlegungen führen, sind in Whipple (2004) zusammengestellt.

Dass die Nagra ihren Fokus auf die lokale Erosionsbasis richtet, ist sinnvoll. Allerdings wird aus den Informationen in NTB 14-02-III nicht ganz klar, wie der Begriff *lokal* zu verwenden sei und wie eine solche Erosionsbasis sich allenfalls von einer *regionalen* Erosionsbasis unterscheiden würde. Diese Frage könnte im Rahmen von Etappe 2 offen gelassen werden, da alle Standortregionen in etwa im gleichen Umfang davon betroffen sind. Bei der detaillierteren Bearbeitung der Landschaftsentwicklung im Zusammenhang von Etappe 3 sollte aber auf die Unterscheidung zwischen regionaler und lokaler Erosionsbasis eingegangen werden. Des Weiteren führen neue, noch nicht publizierte Datierungen der Höheren und Tiefere Deckenschotter (Fig. 3-1) dazu, dass die Karte der Erosionsbasis für diese Terrassenarchive (NTB 14-02, III) in Etappe 3 SGT überarbeitet werden sollte (s. auch unten).

Die EGT erachtet es als nachvollziehbar, dass bei der Unterscheidung zwischen Übertiefung und fluviatil kontrollierter Erosionsbasis ein gewisser Interpretationsspielraum besteht, und dass Felskoten unterschiedlich interpoliert werden können. Die Unsicherheiten sind marginal und bewegen sich im Bereich von ungefähr 25 m. Abweichungen von mehr als 10-20 m von diesem Mittelwert sind nicht ausgewiesen. Auf eine weitere mögliche Unsicherheit wird aber nicht eingegangen, und diese liegt in der Dichte der verfügbaren Bohrungen sowie im Informationsgehalt der Bohrungsaufnahmen. Diese bestimmen schliesslich die Präzision der Felsoberflächenkarte, welche wiederum als Grundlage für die Kartierung der lokalen Erosionsbasis dient. Dürst Stucki et al. (2010) haben bei der Erstellung einer solchen Felsoberflächenkarte

für den Raum Bern die Erfahrung gemacht, dass diese Randbedingungen die Qualität einer solchen Karte massgeblich beeinflussen, insbesondere bei der Erfassung der Felskote in glazial übertieften Bereichen. Die Autoren des NAB 14-02 gehen zwar detailliert auf Änderungen zu einer früheren Rekonstruktion der Felsoberflächenkarte ein (NAB 14-02, Abb. 15 ff). Sie dokumentieren ebenfalls, wie neue Felsisohypsen in den bestehenden Datensatz aufgenommen wurden und Konturlinien auf der Basis neuer Bohrungen angepasst wurden. Trotzdem fehlt eine abschliessende Diskussion über die Unsicherheiten und damit verbundenen Unschärfen, die sich aus den Bohrdaten, der Interpolationsmethode sowie der Datendichte ergeben. Die EGT hätte es begrüsst, wenn die Nagra zu diesem Punkt eine kurze Stellungnahme verfasst und mögliche Konsequenzen für die Prognose langfristiger Exhumationsszenarien erläutert hätte. Dies wäre aus Sicht der EGT angebracht, weil die Felsoberflächenkarte eine zentrale Grundlage für weiterführende Analysen darstellt (Bestimmung der Erosionsbasis, Erfassung der glazialen Übertiefung, Rekonstruktion der Erosionsszenarien seit ca. 2 Millionen Jahren vor heute, Prognosen für die zukünftige Tieferlegung der Erosionsbasis, z. B. NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12).

Für die Standortgebiete ist die Wahl der jeweiligen lokalen Erosionsbasis zentral. Dies zeigt sich insbesondere in NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12. Allerdings ist die Tiefenlage der lokalen Erosionsbasis durch eine relative grosse Variabilität beziehungsweise Bandbreite charakterisiert, welche sogar im Massstab der einzelnen HAA- und SMA-Standortgebiete beobachtet werden kann. So ist die Erosionsbasis eine geneigte und zum Teil gewellte Fläche. Damit erstrecken sich z. B. die Standortgebiete Nördlich Lägern und Jura Ost über eine gewisse Bandbreite an Höhenlagen der Erosionsbasis. Ob diese Unschärfe relevant ist oder nicht, wird in NTB 14-02-III nicht diskutiert. Für das HAA- Standortgebiet Jura Ost käme z. B. eine Lage der Erosionsbasis um 300 ± 15 m ü. M. in Frage. Für das Standortgebiet Nördlich Lägern müsste der Bereich zwischen mindestens 325 m ü.M. und 350 m ü.M. in Betracht gezogen werden (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-2). In den übrigen Abbildungen und Berechnungen werden aber feste Höhenlagen ohne Variabilitäten verwendet (z. B. NTB 14-02-III, Abb. 4.4-4, Abb. 4.4-8 und Abb. 4.4-12). Die Unschärfen, die sich aus den unterschiedlichen Lagen der Erosionsbasis ergeben, sollten aber bei den Szenarien über die zukünftige Entwicklung der Standortgebiete berücksichtigt werden. Dieser Punkt müsste abschliessend geklärt werden.

Die Unschärfen in der Tiefenlage der lokalen Erosionsbasis haben allerdings unterschiedliche Konsequenzen für die Bestimmung der Tiefenlage eines HAA- und SMA-Lagers. Dies betrifft insbesondere die HAA-Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost, wo die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein durch die Vorgabe der Erosionsszenarien bestimmt wird (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Unproblematisch ist die Situation diesbezüglich für das HAA-Lager Nördlich Lägern (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Für die SMA-Standortgebiete Südranden und Jura Ost werden die minimalen Tiefenlagen der Oberkante Wirtgestein (Opalinuston) ebenfalls durch die rekonstruierte Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis vorgegeben. Damit fliessen Unschärfen in der Bestimmung der Felsoberfläche und der Tiefenlage der lokalen Erosionsbasis direkt in die Bestimmung der minimalen Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein für diese Lager ein. Der Opalinuston für die SMA-Lager Zürich Nordost, Nördlich Lägern und Jura-Südfuss liegen tief und werden damit von diesen Unschärfen nicht betroffen.

Die EGT erachtet es als nötig, dass die oben erwähnten Unschärfen im Rahmen von Etappe 3 nachgerechnet und dokumentiert werden. Zudem sollten sie bei der Szenarienentwicklung und der Festlegung der minimalen Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein im Rahmen von Etappe 3 zwingend berücksichtigt werden.

Zusammenfassung

Die Einführung des Konzeptes der lokalen Erosionsbasis ist nachvollziehbar und sinnvoll. Erst eine weitere Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis durch Flusserosion führt schliesslich zur Exhumation tiefer liegender Gesteinsserien. Zudem überträgt die Nagra dieses Konzept auch auf unterschiedliche räumliche Skalen (von der lokalen zur regionalen und schliesslich zur landesübergreifenden Erosionsbasis). Die entsprechenden Herleitungen sind nachvollziehbar und entsprechen dem heutigen Stand der Kenntnisse. Eine wichtige Datengrundlage dazu bildet die Felsoberflächenkarte der Nordostschweiz. Eine solche Karte herzuleiten ist nicht trivial und mit grösseren Unsicherheiten verbunden. Leider werden die vertikalen Ungewissheiten in der Höhenlage der Felsoberfläche nicht ausgewiesen, weder in den Texten noch in der Zusammenstellung der Erosionsszenarien. Diese sollten in zukünftigen Berichten der Nagra besser diskutiert werden und, falls relevant, in die Rekonstruktion der Langzeitszenarien einfliessen. Die EGT erachtet es allerdings nicht als zwingend, dass diese Klärung im Rahmen von Etappe 2 zu erfolgen hat, denn die Unschärfen und daraus resultierenden Unsicherheiten in den Prognosen über die Landschaftsentwicklung betrifft alle Standortgebiete im etwa gleichen Ausmass. Weil sich aber die Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein zwischen den HAA-Lagern und auch den SMA-Lagern unterscheidet, sind die Konsequenzen für die Bestimmung der minimalen Tiefenlagen dieser Oberkanten je nach Standortgebiet unterschiedlich (messbare Konsequenzen für die HAA-Strandortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost sowie für die SMA-Standortgebiete Jura Ost und Südranden). Bei der weiteren Auswahl und einem weiteren Vergleich der Standortgebiete im Rahmen von Etappe 3 sollten aber die Unschärfen in der Felsoberflächenkarte und die daraus resultierenden Szenarien über die Landschaftsentwicklung zwingend berücksichtigt werden. Des Weiteren sollte, ebenfalls im Rahmen von Etappe 3, geklärt werden, wie der Begriff lokal zu verwenden sei, wie eine solche Erosionsbasis sich allenfalls von einer regionalen Erosionsbasis unterscheiden würde, und welches die Konsequenzen für eine detaillierte Festlegung der minimalen Tiefenlage eines HAA- und SMA-Lagers wären.

3.2.2 Geologische Langzeitentwicklung unter Berücksichtigung von Hebung und exogenen Prozessen

Angaben der Nagra

Die Szenarien der Nagra hinsichtlich der geologischen Langzeitentwicklung sind auf Seite 80 von NTB 14-02-III zusammenfassend dargestellt und im Text entsprechend erläutert. Diesen Szenarien liegt die Rekonstruktion der Erosionsbasis während der letzten ca. 2 Millionen Jahre zu Grunde. Wichtige Informationen bilden die heutige Felsoberflächenkarte sowie Szenarien über zukünftige Vergletscherungen im Alpenraum und dem nördlich angrenzenden Vorland. Bei den entsprechenden Rekonstruktionen werden ebenfalls Überlegungen zum Drainagemuster, zur Verschiebung von Einzugsgebieten sowie zu neotektonischen Bewegungen in Betracht gezogen.

Die Angaben über die Hebung basieren weitgehend auf geodätischen Messungen relativ zum Referenzpunkt in Laufenburg AG (NAB 14-38), auf Kartierungen mit Hilfe hochauflösender LiDAR-Geländemodelle, sowie Apatit-Spaltspurdaten, gemessen an Material aus Bohrungen. Für die Standortgebiete in der Nordostschweiz ergeben sich über längere Zeiträume Hebungsraten von bis zu 0.2 mm pro Jahr (z. B. Baran et al. 2014).

Exogene Prozesse in der Nordschweiz werden insbesondere hinsichtlich Flussanzapfungen und damit verbundenen Tieferlegungen der lokalen Erosionsbasis diskutiert. Es erfolgt ebenfalls eine Erörterung über Durchbruchsrinnen und glaziale Übertiefungen während vergangener und zukünftiger Vergletscherungen. Schliesslich analysiert die Nagra die Bedeutung von

Stufen in Flusslängsprofilen und deren zeitliche Weiterentwicklung. Des Weiteren bilden Terrassensysteme (Höhere und Tiefere Deckenschotter sowie Hoch- und Niederterrassen) eine wichtige Grundlage, um die Denudationsgeschichte und die Tieferlegung der Erosionsbasis in der Vergangenheit zu bestimmen. Die Rekonstruktion der Basis dieser Sedimentkörper ist in NAB 12-35 beschrieben und begründet. Die Resultate dieser Studie zeigen sehr klar, dass die stratigraphische, chronologische und fazielle Korrelation zwischen den Schotterkörpern nicht trivial ist. Unsicherheiten ergeben sich infolge schlechter Aufschlussverhältnisse, Moränenablagerungen und regionaler Unterschiede in der jeweiligen Zuteilung einzelner Schottervorkommen. Die Autoren diskutieren in NAB 12-35 diese Schwierigkeiten anhand ausgewählter Beispiele. Sie dokumentieren die geologischen Quellen, die zur Ableitung der Erosionsbasis während der Bildung der Höheren und Tieferen Deckenschotter und der Hoch- und Niederterrassen führten. Basierend auf diesen Daten und Überlegungen hinsichtlich landschaftsbildender Prozesse leitet die Nagra drei Szenarien über die Tieferlegung der Erosionsbasis für die kommende Million Jahre ab (NTB 14-02-III, S. 67):

- *Optimistischer Fall*: Weitere Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis um 75 m für die nächste Million Jahre für alle HAA-Standortgebiete. Dieser Fall geht davon aus, dass die zukünftigen Eintiefungsraten etwa im gleichen Bereich liegen wie während der Zeit zwischen der Ablagerung der Hoch- und Niederterrassen (NTB 14-02-III, S. 67).
- *Basisfall*: Weitere Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis von 125 m für die nächste Million Jahre (NTB 14-02-III, S. 67). Dieser Wert, der ebenfalls für alle HAA-Standortgebiete verwendet wird, richtet sich an den durchschnittlichen Erosionsraten im unteren Aaretal während der letzten 1-2 Millionen Jahre (NTB 14-02-III).
- *Pessimistischer Fall*: Grösste zusätzliche Vertiefung der lokalen Erosionsbasis um 175 m für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre beim HAA-Standortgebiet Jura Ost; weitere Tieferlegung von je 200 m für die nächste Million Jahre (NTB 14-02-III, Abbildung 4.4-12) für die HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost. Diese Prognosen richten sich an den Höhenlagen zwischen der Basis der Tieferen Deckenschotter (Alter ca. 1 Million Jahre) und der lokalen Erosionsbasis.

Damit bilden die Alter der Schotter- und Terrassenarchive eine zentral Grundlage, um Prognosen über die weitere Tieferlegung der Erosionsbasis abzuleiten. Dies betrifft sowohl die Rekonstruktion der Erosionsszenarien während der nächsten Million Jahre für die HAA-Standortgebiete (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12), als auch Voraussagen über die Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis für den Betrachtungszeitraum eines SMA-Lagers (100'000 Jahre). Hier bedingen aber neue Terrassen-Alter, die auf der Technologie der kosmogenen Nuklide basieren, dass die Erosionsszenarien modifiziert werden. Dies ist im folgenden Kapitel dargelegt.

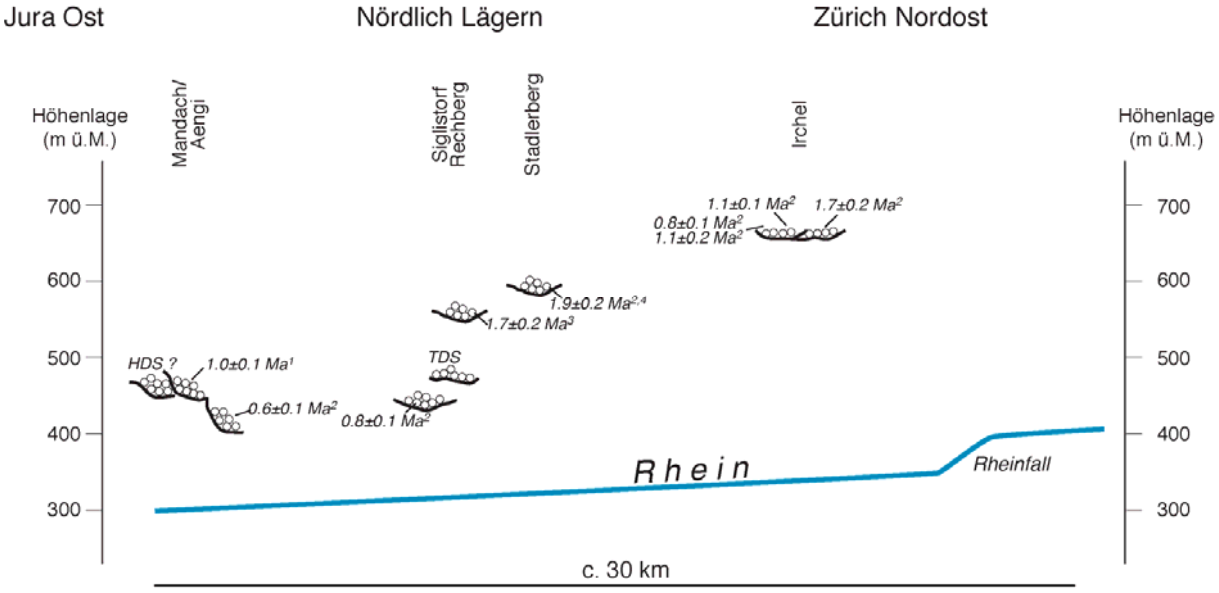
Bezüglich des Standortgebietes Wellenberg erachtet es die Nagra als schwierig, den gesamten Betrag einer zukünftigen glazialen Vertiefung für die nächsten 100'000 Jahre zu quantifizieren. Für die Herleitung zukünftiger Erosion in diesem Standortgebiet werden drei Szenarien betrachtet, bei denen die Felssohle um 50 m, 100 m und im pessimistischsten Fall um 200 m tiefer gelegt wird. Als Grundlagen dienen rekonstruierte Übertiefungen im Engelbergertal. Die Wirkung für das Standortgebiet Wellenberg resultiert aus tiefgründigen Rutschungen, die je nach Vertiefung der Felsoberfläche zu anderen Erosionsszenarien führen könnten. Die daraus abgeleiteten Unterschiede sind in NTB 14-02-III, Abb. 4.5-2 zusammengefasst.

Beurteilung der EGT

Als Rahmenbedingungen für die Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung dienen die Resultate der Arbeiten von Cederbom et al. (2004); Cederbom et al. (2011) sowie Mazurek et al. (2006) über den Zeitbereich, als die flächenhafte Erosion im nördlichen Vorland einsetzte. Die Altersabschätzungen dieser Studien unterscheiden sich, was die Nagra auch würdigt und

durch entsprechend konservative Einschätzungen berücksichtigt. Diese oben zitierten Arbeiten waren im Zusammenhang von Etappe 1 zentral, haben aber bei der Prognose über die zukünftige Landschaftsentwicklung im Rahmen von Etappe 2 offenbar ein geringeres Gewicht. So fliessen die Unterschiede, die aus den oben genannten Untersuchungen resultieren, nicht in die Erarbeitung der zukünftigen Entwicklung der lokalen Erosionsbasis ein, wie sie in NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12 dargestellt ist. Unter Berücksichtigung, dass NTB 14-02-III im Rahmen von Etappe 2 erstellt wurde, scheint der EGT das Vorgehen der Nagra vernünftig und stufengerecht zu sein. Wichtiger in diesem Zusammenhang ist die Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis, wie sie in jüngeren Archiven (Höhere und Tiefere Deckenschotter, Hoch- und Niederterrassen) aufgezeichnet ist. Hier kommt der Datierung dieser Archive eine grosse Bedeutung zu. So basiert die altersmässige Einstufung der Höheren Deckenschotter auf Säugertierfunden (die Bestimmung der Fauna und deren altermässigen Einstufung von Bolliger et al. (1996) wurden in der Zwischenzeit bestätigt), der magnetischen Polarität der zeitgleich abgelagerten Feinstsedimente sowie Isotopenmessungen (zusammengestellt in NTB 14-02-III).

Neue Alter, die insbesondere auf der Technik der kosmogenen Nuklide beruhen, implizieren aber, dass einige Einstufungen revidiert werden müssen. So liegen aus der Dissertation von Anne Claude (Claude 2016) zur Zeit noch nicht veröffentlichte Daten über die Alter der Terrassensysteme vor (Höhere und Tiefere Deckenschotter), welche dazu führen, dass die gängigen Modelle über die Erosionsgeschichte der letzten 2 Millionen Jahre überdacht werden müssten. Die Dissertation kann ab ca. Mitte Oktober eingesehen werden; deshalb hat die Nagra bis jetzt noch keinen Zugang zu diesen Daten erhalten. Da die Arbeiten mit Unterstützung des ENSI am Institut für Geologie der Universität Bern durchgeführt wurden und die EGT deshalb bereits Zugang zu den Resultaten hat, werden die wichtigsten Ergebnisse, illustriert in Figur 3-1, kurz zusammengestellt.



HDS: Höhere Deckenschotter; TDS: Tiefere Deckenschotter
1: Akçar et al. (2014); 2: Claude (2016); 3: Akçar et al. (in review); 4: Claude et al. (2017)

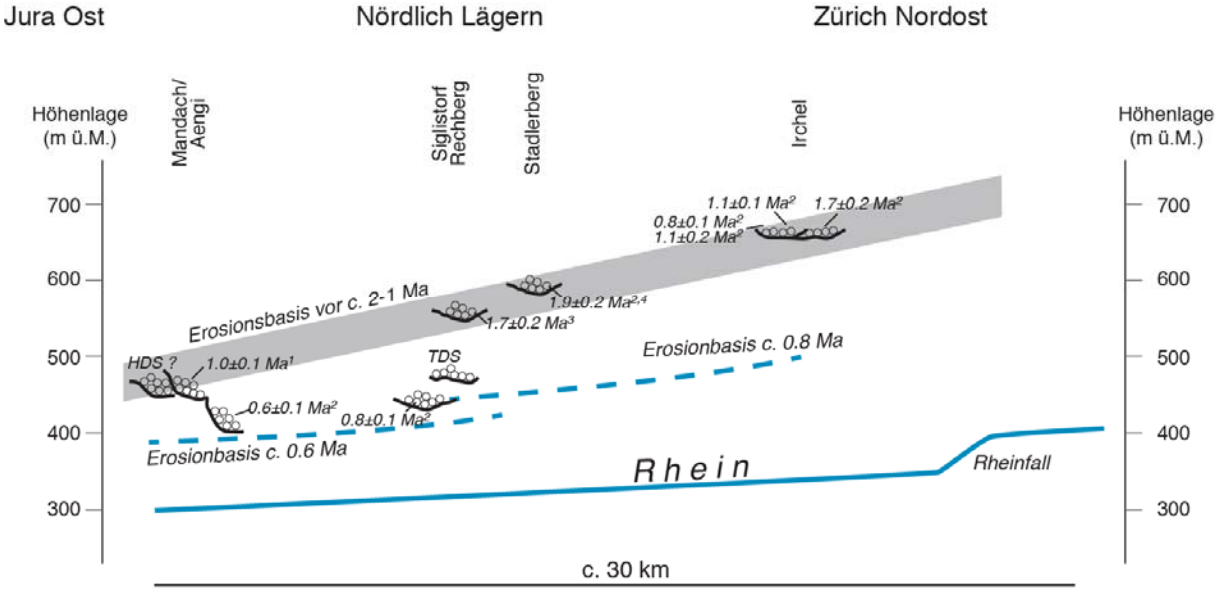
Figur 3-1: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt ebenfalls die Alter, die für diese Sedimente mit Hilfe kosmogener Nuklide gemessen wurden.

Figur 3-1 illustriert die topographische Lage der neu datierten Terrassen in Bezug auf die regionale Erosionsbasis, hier definiert durch die Höhenlage des Rhein, welche auf die Strecke zwischen Schaffhausen und Koblenz projiziert ist. Die Figur zeigt ebenfalls die mit Hilfe kosmogener Nuklide gemessenen neuen Alter für die Terrassenarchive (Akçar et al. 2014; Akçar

et al. 2016, in review; Claude 2016; Claude et al. 2017), welche zum Teil noch zu publizieren sind.

Korrelation zeitäquivalenter Terrassen

Die Implikationen dieser Alter für die Prognose der zukünftigen Erosionsszenarien hängen massgeblich davon ab, wie zeitäquivalente Terrassen und die darunterliegende Felsoberfläche miteinander verbunden werden. Die EGT sieht diesbezüglich zurzeit drei Möglichkeiten: (i) konstante Lage der Erosionsbasis während mindestens zwei Millionen Jahre vor heute bis vor ca. 1 Million Jahre, gefolgt von einer vorerst schnellen, dann sukzessiver langsameren Absenkung der Erosionsbasis (Figur 3-2). Eine solche Entwicklung hätte keine Konsequenzen für die von der Nagra abgeleitete Tiefenlage (NTB 14-02-III, Fig. 4.4-12) der Oberkante Wirtgestein für die HAA-Standortgebiete Jura Ost sowie Nördlich Lägern. Allerdings müsste ein HAA-Lager im Standortgebiet Zürich Nordost in tiefere Lagen versetzt werden (s. auch Szenarium iii).



HDS: Höhere Deckenschotter; TDS: Tiefere Deckenschotter
1: Akçar et al. (2014); 2: Claude (2016); 3: Akçar et al. (in review); 4: Claude et al. (2017)

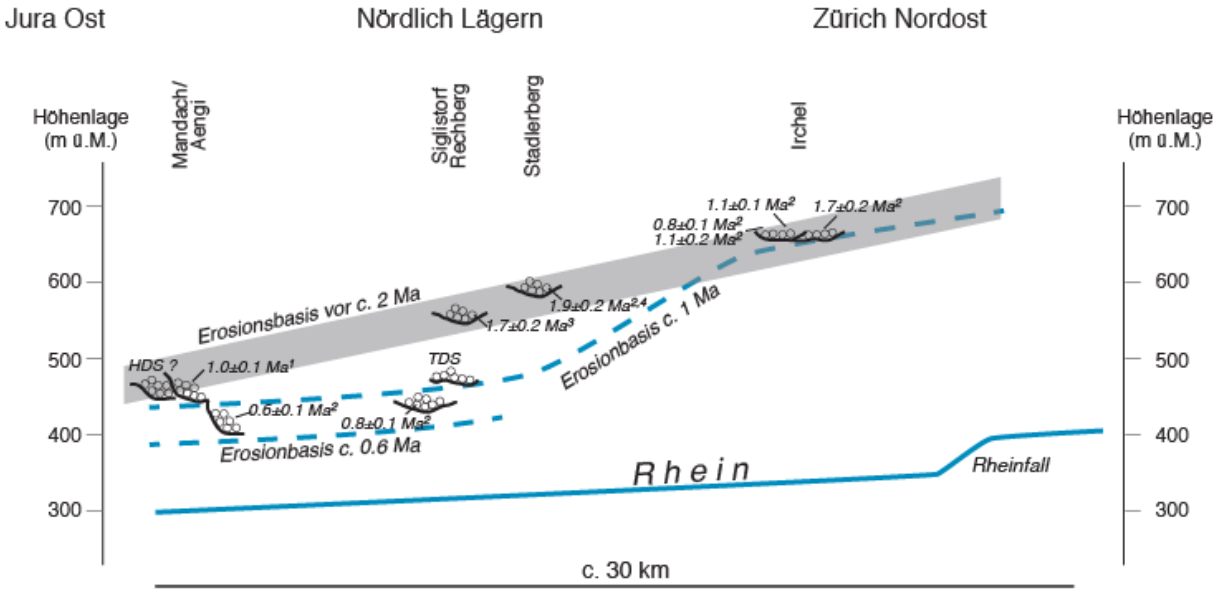
Figur 3-2: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt die Konsequenzen auf die Tieferlegung des Rheins für den Fall, dass die Lage der Erosionsbasis während mindestens 2 Millionen Jahren vor heute und 1 Million Jahre konstant war.

Im zweiten Fall (Szenarium ii) lag die Erosionsbasis bereits in einer tieferen Lage, im Extremfall sogar so tief wie der heutige Rhein. Die Terassensysteme würden in diesem Falle zyklisch sich wiederholende Akkumulations- und Erosionsphase aufzeichnen, ohne dass sich die Lage der Oberkante Festgestein in grössere Tiefen verlagert hat. Die Festlegung der Oberkante Wirtgestein, wie von der Nagra in NTB 14-02-III, Fig. 4.4-12 dargestellt, würde dieses Szenarium abdecken.

Im pessimistischsten Fall (Szenarium iii) könnte sich die Lage der Erosionsbasis entwickelt haben, wie in Figur 3-3 dargestellt ist. Diese zeigt eine hypothetische Lage der Erosionsbasis vor ca. 2 Millionen Jahren (grauer Balken) sowie vor 1 Million Jahre (blaue gestrichelte Linie), abgeleitet durch Korrelation zeitäquivalenter Archive. Die Abbildung impliziert, dass das E-W Gefälle der Erosionsbasis vor ca. 2 Millionen Jahren steiler war als heute. Dies könnte einerseits durch lokale Tektonik erklärt werden (NTB 14-02-III). Andererseits entwässerte der Alpenrhein vor ca. 2 Millionen Jahren vor heute noch via Donau in Richtung Schwarzes Meer. Die Umlenkung zum heutigen Hochrhein und damit die Entwässerung zur Nordsee fand vor

ca. 1 Million Jahre vor heute statt. Mit dem grösseren Abfluss könnte auch eine Verflachung des Gefälles verbunden sein.

Verbindet man dagegen die sedimentären Archive, welche vor ca. 1 Million Jahre abgelagert wurden, dann resultiert daraus unweigerlich eine Rampe, oder Knickzone, für den Längsverlauf der Erosionsbasis zwischen den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost und Nördlich Lägern. Diese Versteilung könnte als Vorstufe zum heutigen Rheinfall betrachtet werden. Knickzonen bilden sich dann, wenn die Absenkung der Flusssohle nicht kontinuierlich erfolgt, sondern in Schüben und Pulsen. Dies könnte offenbar war während der letzten 2 Millionen Jahre der Fall gewesen sein.



HDS: Höhere Deckenschotter; TDS: Tiefere Deckenschotter
1: Akçar et al. (2014); 2: Claude (2016); 3: Akçar et al. (in review); 4: Claude et al. (2017)

Figur 3-3: Projizierter Verlauf des Rheins zwischen Schaffhausen und Koblenz sowie Höhenlage der angrenzenden Schotterarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter). Die Abbildung zeigt eine hypothetische Lage der Erosionsbasis für die Höheren Deckenschotter (c. 2 Ma) sowie für die Tieferen Deckenschotter (c. 1 Ma). Aus dieser Rekonstruktion resultiert unweigerlich eine Steilstufe für den Flussverlauf des Rheins.

Ursachen von Erosionsschüben

Die Ursache solcher Erosionsschübe ist noch nicht geklärt. Möglich sind neotektonische Bewegungen, wie in NTB 14-02-III oder auch in NAB 16-41 postuliert wird. Andererseits können auch glaziologische Prozesse und die Umlenkung der Drainagesysteme für die Ausbildung einer solchen Rampe in Betracht gezogen werden. So ist weitgehend bekannt, dass vor ca. 2 Millionen Jahren die ersten Gletscher weit ins alpine Vorland vorstiessen. Gletscher können zudem die abgedeckten Bereiche weitgehend vor Erosion schützen. Des Weiteren wurde der Alpenrhein um ca. 1 Million Jahre vor heute nach Westen und damit in Richtung Nordsee umgelenkt, was den Abfluss unterhalb Schaffhausen massgeblich vergrösserte. Die Kombination dieser beiden Effekte, d.h. (i) Abdeckung der Landschaft durch Gletscher oberhalb Schaffhausen und damit verzögerte Erosion verglichen mit den Bereichen unterhalb des Gletschertors, und (ii) verstärkter Abfluss nach 1 Million Jahre infolge Umlenkung des Drainagesystems könnte zur Ausbildung dieser Knickzone geführt haben (s. auch Korup und Montgomery 2008, für eine ähnliche Situation im Himalaya).

Implikationen hinsichtlich Langzeitstabilität für den pessimistischsten Fall

Figur 3-3 impliziert, dass sich für die HAA-Standortgebiete Jura Ost und Nördlich Lägern hinsichtlich erosionsbedingter minimaler Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein (NTB 14-02-III)

nichts ändert, d.h. Basisfall (125 m zusätzliche Absenkung der lokalen Erosionsbasis bei allen Standortgebieten) sowie pessimistischer Fall (175 m und 200 m zusätzliche Absenkung der lokalen Erosionsbasis für Jura Ost und Nördlich Lägern, respektive) stehen nicht im Widerspruch zur Hypothese einer pulsartigen Absenkung der Erosionsbasis in den letzten 2 Millionen Jahren. Es stellt sich dagegen die Frage, ob für das HAA-Standortgebiet Zürich Nord von einer weiteren Eintiefung von ca. 250 m für die nächste Million Jahre ausgegangen werden müsste. In diesem Fall müssten die Minimalanforderungen an die Erosionsszenarien für das Standortgebiet Zürich Nordost weiter verschärft werden.

Eine Abweichung der bereits publizierten Alter insbesondere für die Höheren und Tieferen Deckenschotter (ca. 2 und 1 Ma Jahre), aber auch für die Hoch- und Niederterrassen, hat also einen messbaren Einfluss auf die von der Nagra entwickelten Szenarien. Falls sich die neuen Alter bestätigen lassen (s. Zusammenfassung unten), dann würde für das Standortgebiet Zürich Nordost im pessimistischsten Fall das ungünstigste Erosionsszenarium resultieren, d.h. man müsste mit einer partiellen Freilegung eines Lagers in diesem Standortgebiet nach ca. 700'000-800'000 Jahre rechnen, falls die pessimistischsten Erosionsszenarien zutreffen werden (Figur 3-3) und falls an der minimalen Tiefenlage für die Oberkante Wirtgestein, wie in Abb. 4.4-12 in NTB 14-02-III dargestellt ist, festgehalten wird. Die vorhandene Datenlage führt aber zu keiner Veränderung der Beurteilung der Langzeitstabilität für das HAA-Standortgebiet Jura Ost (Figur 3-1). Allerdings sei darauf hingewiesen, dass für dieses Standortgebiet die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein ebenfalls durch die Erosionsszenarien festgelegt wird, und dass in diesem Gebiet eine weitere Optimierung kaum mehr möglich ist. Im schlimmsten Falle kann ein HAA-Lager in diesem Standortgebiet nach dem Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre freigelegt sein. Eine ähnliche Situation dürfte für die SMA-Standortgebiete Südranden und Jura Ost zutreffen. Dort wird die Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein von der Nagra bezüglich Erosion und Dekompaktion optimiert (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Die EGT erachtet es als stufengerecht, wenn die neuen Ergebnisse allerdings erst in Etappe 3 berücksichtigt werden.

Die Datengrundlagen, welche in NTB 14-02-III für die zukünftige Abtragung im Standortgebiet des Wellenbergs verwendet werden, führen nach Ansicht der EGT zu realistischen Szenarien über die zukünftige Landschaftsentwicklung dieser Region. Damit ergeben sich konservative Einschätzungen hinsichtlich der Langzeitstabilität.

Zusammenfassung

Die von der Nagra rekonstruierten Langzeitszenarien basieren auf dem neusten Stand der Kenntnisse, welche öffentlich zugänglich waren, als die Berichte NTB 14-02-III und NAB 14-38 verfasst wurden. Die EGT weist ausdrücklich darauf hin, dass die Nagra noch keinen Zugang zu den neuen Altersdaten hat. Entsprechend erachtet die EGT die Herleitung der Szenarien der Landschaftsentwicklung durch die Nagra als nachvollziehbar, gut begründet und ausgewogen.

Die Szenarien über die Erosionsgeschwindigkeiten ändern sich, wenn sich die Alter der Archive, wie in Figur 3-1 dargestellt, bestätigen lassen. Dies könnte Implikationen für die relative Einstufung der Standortgebiete haben. So besteht für das Standortgebiet Jura Ost ein geringer Spielraum bezüglich der Tiefenlage eines HAA-Lagers, während Nördlich Lägern grössere Flexibilitäten in der Tiefenlage haben (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Kritisch könnte es allerdings für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost werden, falls sich die pessimistische Entwicklung der Erosionsbasis in diesem Gebiet bestätigen liesse, wie in Figur 3-3 dargestellt. Bezüglich der SMA-Lager liegen Zürich Nordost, Nördlich Lägern sowie Jura-Südfuss eher auf der tiefen Seite. Geringere Reserven hinsichtlich Tiefenlage bestehen für die SMA-Lager Südranden und

Jura Ost. Um die Situation hinsichtlich Schutz vor weiterer Tieferlegung der Erosionsbasis abschliessend zu klären, empfiehlt die EGT, folgende Fragen in Etappe 3 zu klären:

- *Sind die Alter der Höheren und Tieferen Deckenschotter, wie in Fig. 3-1, reproduzierbar?* Hier sei darauf hingewiesen, dass die Ableitung eines Alters aus Konzentrationen kosmogener Nuklide in Terrassensystemen (Technik der Tiefenprofildatierung sowie Isochron-Einbettungsdatierung) durch komplexe Monte Carlo Simulationen erfolgte, bei denen drei Variablen zu berücksichtigen waren. Die EGT erachtet es als sinnvoll, dass diese Berechnungen nachgeprüft werden, und zwar durch eine unabhängige Instanz.
- *Erfolgte die Tieferlegung der Erosionsbasis im Bereich des HAA-Standortgebietes Zürich Nordost kontinuierlich oder vorerst schnell und dann sukzessive langsamer?* Figur 3-3 impliziert, dass die Tieferlegung der Erosionsbasis durch rückschreitende Erosion erfolgte, bei der eine Rampe, oder Versteilung im Flusslängsprofil, sukzessive abflachte. In der Regel erfolgt eine solche Verflachung vorerst schnell und dann sukzessive langsamer. Trifft dieses Szenarium zu, dann erübrigt sich eine Tieferlegung des HAA-Lagers im Standortgebiet Zürich Nordost um weitere ca. 50 Meter. Die Datierung weiterer tieferliegender Terrassen wird hier Klarheit verschaffen.

Falls die oben erwähnten Alter durch eine unabhängige Instanz bestätigt werden und weiterführende Datierungen tieferliegender Archive zeigen, dass die Verflachung der Steilstufe kontinuierlich erfolgte, dann resultiert für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost eine messbare ungünstigere Situation hinsichtlich Schutz vor Erosion. In diesem Fall müssten die Anforderungen an die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein um ca. 50 m auf insgesamt 250 m angehoben werden. Ist dies nicht möglich, dann ist damit zu rechnen, dass Teile des Endlagers in diesem Gebiet bereits nach ca. 700'000 bis 800'000 Jahren vor heute in den Einflussbereich der Bio- und Hydrosphäre gelangen könnte. Aus der Sicht der EGT ist hinreichend, wenn diese Fragen im Rahmen von Etappe 3 geklärt werden.

3.2.3 Denudationsraten und Sedimentbudgets

Angaben der Nagra

Die Angaben über die Denudationsraten in den Standortgebieten (0.1-0.2 mm pro Jahr) basieren hauptsächlich auf Daten, die mit Hilfe kosmogener Nuklide erarbeitete wurden. Eine wichtige Informationsquelle bildet dabei der Aufsatz von Wittmann et al. (2007). Diese Autoren leiteten eine kausale Beziehung zwischen geodätisch gemessenen Hebungsraten und kosmogen ermittelten Denudationsraten in den Alpen sowie dem nördlich angrenzenden Vorland ab. Da keine Informationen über kosmogen gemessene Denudationsraten für die Nordostschweiz vorliegen, wurden Denudationsgeschwindigkeiten für diese Region indirekt abgeleitet. Diese basieren auf der Beziehung zwischen geodätisch gemessener Hebung und Abtragung im Alpenraum und dem nördlich angrenzenden Vorlandbecken (Wittmann et al. 2007). Diese Berechnungen und daraus resultierende Schlussfolgerungen waren vor allem im Rahmen von Etappe 1 relativ zentral. Sie spielen aber für die Herleitung der Abtragungsszenarien der Standortgebiete im Rahmen von Etappe 2 eine untergeordnete Rolle (siehe auch NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Des Weiteren wurden Rekonstruktionen der Landschaftsentwicklung der Nordschweiz während der letzten 5-10 Millionen Jahre sowie die Analyse der topographischen und geologischen Situation in den Standortgebieten berücksichtigt. Die Nagra hat hier hauptsächlich ein Literaturstudium durchgeführt; die Resultate werden in NAB 12-20, NAB 12-35, NAB 14-02 sowie NAB 14-25 präsentiert und diskutiert. Auch diese Resultate flossen nur indi-

rekt in die Rekonstruktion der zukünftigen Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis für die Betrachtungszeiträume von 100'000 (SMA-Lager) und 1 Million Jahre (HAA-Lager) mit ein, welche in NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12 dargestellt sind.

Für den Alpenraum und insbesondere die Region rund um den Wellenberg bildet NAB 13-71 eine wichtige Grundlage. Die Nagra verwendet diese Studien und Kompilationen, um die Entwicklung der Tiefenlage des Wirtgesteins relativ zur lokalen Erosionsbasis zu bestimmen (Abb. 4.4-12 in NTB 14-02-III). In diese Rekonstruktionen fliessen ebenfalls Überlegungen über die zukünftige Klima- und Vergletscherungsgeschichte sowie neotektonische Bewegungen ein. Zudem werden Informationen über thermochronologische Untersuchungen (Abtragungsraten während der letzten 5-10 Millionen Jahre) sowie Bestimmungen flächenhafter Abtragung mittels kosmogener Nuklide (Abtragung während der letzten paar Tausend Jahren) und Sedimentbudgets (Zeiträume von Einzelereignissen, Dekaden bis Millionen Jahre) berücksichtigt.

Beurteilung der EGT

Die mit Hilfe kosmogener Nuklide erarbeitete Denudationsgeschichte der Alpen und des angrenzenden Mittellandes basiert aktuell lediglich auf einer Handvoll lokaler Untersuchungen, welche quer über die Alpen verteilt sind (Chittenden et al. 2014; Cruz Nunes et al. 2015; Norton et al. 2011; Norton et al. 2010; Norton et al. 2008; Van den Berg et al. 2012; Wittmann et al. 2007). Lokale Stufen in Flusslängsprofilen und Landschaften sowie Unterschiede in der Beschaffenheit des geologischen Untergrundes können relativ schnell zu Variationen in den mittels kosmogener Nuklide bestimmten Raten führen. Dies dürfte insbesondere in der Nordostschweiz unterhalb des Rheinfalls der Fall sein, welcher eine erosive Stufe oder auch Knickzone darstellt. Die Entwicklung der Seitenbäche in diesem Bereich dürfte von der Absenkung der Flusssohle des Rheins unterhalb des Wasserfalls beeinflusst worden sein, und so sind Denudationsraten zu erwarten, welche die 0.1-0.2 mm pro Jahr übersteigen dürften, insbesondere für kürzere Zeiträume von ein paar Zehntausenden von Jahren. Dabei müsste allerdings überprüft werden, ob unterhalb des Rheinfalls der topographische Ausgleich zu dieser rückschreitenden Erosion bereits stattgefunden hat. Relativ steile Hänge rund um das Rheintal unterhalb des Wasserfalls implizieren, dass dem noch nicht so ist. Oberhalb des Rheinfalls würde das Rückschreiten der Geländestufe in Zukunft ebenfalls zu kurzfristig erhöhten Denudationsraten führen (s. auch Figur 3-1 und Erläuterungen in Kap. 3.2.2). Dieser Aspekt und mögliche Implikationen für zukünftige Denudationsszenarien und die Landschaftsentwicklung werden von der Nagra kaum diskutiert (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Allerdings teilt die EGT die Ansicht der Nagra, dass die Aussagekraft dieser mittels kosmogener Nuklide ermittelten Raten in Bezug auf die vergangene und zukünftige Entwicklung der Landschaft beschränkt ist, weil flächenhafte Denudation hauptsächlich zu einer Veränderung des lokalen Reliefs führen kann. Dies dürfte insbesondere für kürzere Zeiträume, also für die SMA-Standortgebiete, eine Rolle spielen. So weisen die SMA-Standortgebiete Südranden und Jura Ost je das grösste lokale Relief (bezogen auf die Tiefenlage der lokalen Erosionsbasis) auf und bieten damit hinsichtlich möglicher Veränderungen des lokalen Reliefs die ungünstigsten Voraussetzungen.

Im Hinblick auf die Bestimmung zukünftiger Landschaftsentwicklungen kommt der Vertiefung der lokalen Erosionsbasis eine grössere Bedeutung zu als den Geschwindigkeiten der flächenhaften Abtragung. Die Rekonstruktion entsprechender Szenarien hängt, wie oben schon diskutiert, massgeblich von der Felsoberflächenkarte, den Basalflächen der verschiedenen Terrassenebenen, sowie der chronologischen Erfassung dieser Archive ab. Hier weisen die SMA-Standortgebiete Jura Ost sowie Südranden sowie die HAA-Standortgebiet Jura Ost und Zürich Nordost (je nach Beantwortung der Fragen in Kap. 3.2.2) die ungünstigsten Voraussetzungen auf. Allerdings könnte für beide SMA-Standortgebiete die Tiefenlage Oberkante Wirtgestein

zusätzlich in grössere Tiefen optimiert werden, wobei das SMA-Standortgebiet Südranden hier deutlich weniger Reserven aufweist als das SMA-Standortgebiet Jura Ost (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Für die oben erwähnten HAA-Standortgebiet ist eine weitere Optimierung bezüglich Erosion und Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis wahrscheinlich kaum mehr möglich (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Entsprechend detailliertere Betrachtungen sollten im Rahmen von Etappe 3 erfolgen. Für die Festlegung der Minimaltiefe der Oberkante Wirtgesteine in den SMA-Standortgebieten Zürich Nordost, Nördlich Lägern, Jura Südfuss sowie für das HAA-Standortgebiet Nördlich Lägern haben unterschiedliche Szenarien über Denudationsraten und Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis keinen Einfluss.

Die Sedimentbudgets wurden jeweils von verschiedenen Autoren durchgeführt (zusammengefasst in Hinderer et al. 2013). Die Ableitung der entsprechenden Resultate ist leider nicht hinreichend transparent, und dies trifft fast auf jede Sedimentbudget-Studie zu, welche sich auf die Alpen und angrenzende Sedimentbecken fokussiert. Allerdings werden die entsprechenden Arbeiten hinsichtlich Implikationen für die Landschaftsentwicklung in NTB 14-02-III auch nicht allzu stark gewichtet, so dass dieser Aspekt die Aussagen und Schlussfolgerungen der Nagra nicht negativ beeinflusst.

Zusammenfassung

Die Nagra hat alle verfügbaren Daten über Denudationsraten und Sedimentbudgets vollständig kompiliert und in einen nachvollziehbaren Gesamtkontext gestellt. Rückschreitende Erosion unterhalb des Rheinfalls dürfte zu Denudationsraten führen, welche lokal die angenommenen Raten von 0.1-0.2 mm pro Jahr unterhalb der Rheinfall-Stufe überschreiten dürften. Dies könnte insbesondere für die Zuflüsse und die angrenzenden Hügelzonen zutreffen. Lokal auftretende höhere Raten können aber mangels vorhandener Daten weder belegt noch ausgeschlossen werden. Diese würden aber nur die Abtragung der lokalen Topographie betreffen und nicht die Absenkung der lokalen Erosionsbasis. Diesbezüglich fehlt eine Diskussion in den Unterlagen der Nagra. Im Rahmen von Etappe 3 sollte diese Diskussion und mögliche Implikationen für weitere Einengungsschritte geführt werden. Für die jetzt anstehende Entscheidungsfindung im Rahmen von Etappe 2 reichen die vorhandenen Informationen über Denudation und daraus abgeleitete Landschaftsentwicklung der Nagra aus. Die publizierten Berechnungen von Sedimentbudgets (z. B. zusammengefasst in Hinderer et al. 2013) lassen sich nicht vollständig nachvollziehen. Der Fehler liegt hier aber bei den Autoren der entsprechenden Studien, die sich vorwiegend auf die Präsentation von Schlussresultaten und Interpretationen konzentrierten. In der Tat fehlen in diesen Arbeiten detaillierte Angaben darüber, wie diese Budgets berechnet wurden (Karten mit Mächtigkeitsangaben der budgetierten Sedimente, Bohrungen, Datierungen etc.). Die EGT sieht aber keine Veranlassung, dass dieser Informationsstand im Rahmen von Etappe 2 verbessert werden sollte.

3.2.4 Unterschiede zwischen den einzelnen Standortgebieten hinsichtlich flächenhafter Erosion

Angaben der Nagra

Eine Zusammenfassung der Exhumationsszenarien, oder der flächenhaften Erosion, pro Standortgebiet wird in NTB 14-02-III (S. 80) präsentiert. Für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren (HAA) ergeben sich regionale Differenzen bezügliche dieser Variablen aufgrund unterschiedlicher Höhendifferenzen zwischen der Basis der Tieferen Deckenschotter und der lokalen Erosionsbasis. Damit begründet die Nagra den *pessimistischen* Fall, bei dem eine weitere Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis von 200 m für die HAA-Standortgebiete

Zürich Nordost und Nördlich Lägern, sowie 175 m für das HAA-Standortgebiet Jura Ost prognostiziert wird (NTB 14-02-III). Für Erosionsszenarien, welche von einem *Basisfall* ausgehen, wird eine Tieferlegung der Erosionsbasis von 125 m für alle HAA-Standortgebiete berechnet. Dieser Wert entspricht ungefähr den durchschnittlichen Erosionsraten während der letzten 1-2 Millionen Jahre. Diese sind für alle HAA-Standortgebiete etwa gleich gross. Beim Szenarium für den *optimistischen* Fall wird von einer Vertiefung von 75 m für alle HAA-Standortgebiete ausgegangen (NTB 14-02-III). Dieser Wert basiert auf der Annahme, dass zukünftige Vertiefungen etwa gleich schnell ablaufen werden, und dass diese der Höhendifferenz zwischen den Ablagerungen der Hoch- und Niederterrassen entsprechen. Des Weiteren präsentiert die Nagra drei Möglichkeiten, wie diese Erosionsszenarien ablaufen könnten. Im ersten Fall wird von einer konstanten Vertiefungsrate ausgegangen. In einem zweiten Szenarium betrachtet die Nagra eine exponentielle Abnahme der Erosionsgeschwindigkeit, und in einer Serie von Einschneidungsphasen berücksichtigt die Nagra episodische Tieferlegungen der lokalen Erosionsbasis.

Für den kürzeren Betrachtungszeitraum eines SMA-Lagers (100'000 Jahre) sind ebenfalls günstigere und ungünstiger Szenarien berücksichtigt. Abweichungen von den Standardfällen (Basisfall, optimistische und pessimistische Szenarien) ergeben sich insbesondere im Falle einer zukünftigen Vergletscherung, oder im Hinblick auf Änderungen des Erosionspotenzials des Rheins, nachdem dieser den Bodensee mit Sediment gefüllt hat. In diesem Falle würde die Erosionsgeschwindigkeit erhöht, weil zusätzliche Sedimentpartikel in der Bodenfracht als Abrasionsmittel dienen könnten.

Beurteilung der EGT

Aus den Resultaten dieser Erosionsszenarien (Figur 3-3, Kap. 3.2.2) resultieren erkennbare Unterschiede in der Festlegung der Oberkante Wirtgestein für die HAA-Standortgebiete. So liegt die Oberkante Wirtgestein im HAA-Standortgebiet Jura Ost relativ nahe an der Höhenlage der rezenten Erosionsbasis (80-90 m). Die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein wird also durch die Festlegung der Erosionsszenarien massgeblich beeinflusst (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Dies gilt auch für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost je nach Erosionsszenarium (s. oben) und Annahmen über das Ausmass einer zusätzlichen glazialen Übertiefung. Falls sich also die neuen Altersdaten bestätigen (Figur 3-1) lassen und die Abflachung der Steilstufe im Längsprofil des Rheins kontinuierlich erfolgt ist (s. Kap. 3.2.2), dann resultiert daraus allerdings eine Verschärfung der minimalen Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost. Die Konsequenzen sind folgende:

- *Basisfall*: Keine Änderung zu NTB 14-02-III, das heisst weitere Tieferlegung der lokalen Erosionsbasis von 125 m für die nächste Million Jahre für alle HAA-Standortgebiete.
- *Pessimistischer Fall*: Grösste zusätzliche Vertiefung der lokalen Erosionsbasis von 175 m für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre beim HAA-Standortgebiet Jura Ost; weitere Tieferlegung von 200 m für die nächste Million Jahre das HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern; zusätzliche Tieferlegung von ca. 250 m für die nächste Million Jahre das HAA-Standortgebiete Zürich Nordost.

Aus den unterschiedlichen Erosionsszenarien resultieren Konsequenzen für die SMA-Standortgebiete Jura Ost und Südranden, deren Festlegung der Tiefenlage Oberkante Wirtgestein entsprechend optimiert wird. Für die übrigen SMA-Standortgebiete liegt das Wirtgestein Opalinuston tief genug, so dass die Erosionsszenarien keinen Einfluss auf die Bestimmung der Tiefenlage des Lagers hat, falls der Opalinuston als Wirtsgestein in Frage kommt (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12).

Die Ursachen für diese Unterschiede könnten auch anders liegen als in differenziellen neotektonischen Bewegungen, wie in NTB 14-02-III interpretiert worden ist. So haben Untersuchungen im Himalaya gezeigt, dass Vergletscherungen zu einer reduzierten Tieferlegung der Erosionsbasis im Bereich der Gletschermasse führen können (Korup und Montgomery 2008). Fluviatiles Einschneiden findet dann hauptsächlich unterhalb des Gletschertors statt. Die Mechanismen, die diese Beobachtung erklären könnten, sind aber noch nicht verstanden und sind Gegenstand laufender Untersuchungen. Die östlichen und nordöstlichen Standortgebiete Zürich Nordost sowie Nördlich Lägern waren während der letzten Vergletscherungen flächendeckend mit Eis bedeckt, während das Standortgebiet Jura Ost insbesondere während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM) eisfrei war (Bini et al. 2009). Damit waren die beiden östlichen Regionen und insbesondere Zürich Nordost während der letzten Vereisungen eventuell vor einer Tieferlegung der Erosionsbasis weitgehend geschützt. Falls diese Hypothese zutreffen sollte, könnten daraus regionale Unterschiede in der Entwicklung der Erosionsbasis resultieren (s. auch Kap. 3.2.2). Es wäre deshalb angebracht, wenn diese Überlegungen in die Erarbeitung der Erosionsszenarien einfliessen würden. Eine stufengerechte Betrachtung und Diskussion solcher Szenarien sollte in Etappe 3 erfolgen.

Der Basisfall richtet sich hauptsächlich auf die durchschnittliche Absenkung der Erosionsbasis während der letzten 1-2 Millionen Jahre. Hier hängen die Raten massgeblich von der altersmässigen Einstufung der Referenzarchive (Höhere und Tiefere Deckenschotter) ab. Die EGT erachtet es als stufengerecht, wenn die Resultate der Datierungen (Figur 3-1) in Etappe 3 berücksichtigt werden.

Die Verwendung der optimistischen Szenarien, welche auf den Unterschieden zwischen den Höhenlagen von Hoch- und Niederterrassen basieren, findet die EGT wenig sinnvoll. Hier könnten eventuell starke transiente Effekte, hervorgerufen durch differentielle rückschreitende Erosion, eine Rolle spielen. Obwohl die drei unterschiedlichen Erosionsszenarien (exponentielle Abnahme der Erosionsraten, konstante Werte, episodische Erosion) nicht überzeugend begründet sind und deshalb leicht willkürlich wirken, zeigen sie doch den pessimistischsten Fall aller möglicher Szenarien (d. h. wenn die Erosion zuerst schnell erfolgt und die Raten abschliessend abnehmen, NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Im Hinblick auf den Entscheidungsprozess im Rahmen von Etappe 2 sind die zur Verfügung stehenden Informationen und daraus abgeleiteten Szenarien hinreichend. Detailliertere Angaben über die zukünftige Entwicklung der lokalen Erosionsbasis (konstante Tieferlegung oder exponentiell abnehmende Erosionsrate) sollten aber in die Diskussion im Rahmen von Etappe 3 einfliessen.

Unterschiede in den Denudationsszenarien für SMA-Standortgebiete würden bedingen, dass die Erosionsszenarien auf Zeiträume von 100'000 Jahre heruntergebrochen werden könnten. Allerdings ist unklar, wann genau die nächste Vereisung zu erwarten ist. Ebenso sind Abschätzungen über die Zeit, wann der Bodensee mit Sediment aufgefüllt sein wird, mit Ungenauigkeiten behaftet. Dies hängt insbesondere vom zukünftigen Klimaverlauf sowie von anthropogenen Einflüssen ab. Deshalb erscheinen der EGT die unterschiedlichen Szenarien über die landschaftliche Entwicklung der SMA-Standortgebiete der Nordschweiz schwierig zu begründen, insbesondere wenn der Fokus auf der flächenhaften Abtragung liegt. Da aber die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein der SMA-Standortgebiete Jura Ost und Südranden direkt von den Erosionsszenarien abhängen, wäre eine Klärung der oben erwähnten offenen Fragen im Rahmen von Etappe 3 angebracht. Diesbezüglich gibt es im SMA-Standortgebiet Jura Ost genügend Reserven, um das Lager in grösseren Tiefen zu realisieren. Im SMA-Standortgebiet Südranden sind dagegen die Möglichkeiten beschränkt, wie in NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12 gut zum Ausdruck kommt.

Im Standortgebiet Wellenberg erfolgt die flächenhafte Erosion hauptsächlich durch glaziale und fluvioglaziale Prozesse während Vergletscherungen und durch grossflächige Rutschungen während eisfreier Zeiten. Die entsprechenden Szenarien sind vollständig durchdacht und diskutiert. Es zeigt sich, dass die zukünftige Landschaftsentwicklung des Engelbergertals schwierig zu prognostizieren ist. Die EGT ist mit dieser Einschätzung einverstanden.

Zusammenfassung

Die dokumentierten Unterschiede zwischen den drei HAA-Standortgebieten hinsichtlich Abtragung und Tieferlegung der Erosionsbasis, wie in NTB 14-02-III dargelegt, sind nachvollziehbar. Allerdings könnten sich die Bedingungen ändern, wenn die Altersangaben für die Terrassenarchive (Figur 3-1) bestätigt werden, und wenn weitere Datierungen zu modifizierten Modellen über die Langzeiterosion führen sollten. So implizieren die neuen Alter ein eher ungünstigeres Bild für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost hinsichtlich Schutz vor Erosion (pessimistisches Szenarium in Figur 3-3). Allerdings sollte die chronologische Erfassung der Terrassenarchive durch eine unabhängige Instanz überprüft werden. Zudem sollten auch tieferliegende Terrassenarchive datiert werden. Die Begründung (Tektonik in NTB 14-02-III versus glazigene Konditionierung in diesem Bericht) könnte Gegenstand weiterer Diskussion sein, die im Rahmen von Etappe 3 zu führen ist.

Aus den vorliegenden Daten resultieren erkennbare Unterschiede in der Festlegung der Oberkante Wirtgestein für die HAA-Lager. So liegt die Oberkante Wirtgestein im HAA-Standortgebiet Jura Ost relativ nahe an der Höhenlage der rezenten Erosionsbasis (80-90 m). Die minimale Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein wird also durch die Festlegung der Erosionsszenarien massgeblich beeinflusst (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12). Dies gilt auch für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost, aber nur für den Fall einer zusätzlichen glazialen Übertiefung und für den Fall, dass die Hypothese einer Rampe im Flusslängsprofil zutrifft (Figur 3-3).

Aus den unterschiedlichen Erosionsszenarien resultieren ebenfalls Konsequenzen für die SMA-Standortgebiete Jura Ost und Südranden, deren Festlegung der Tiefenlage Oberkante Wirtgestein entsprechend optimiert wird. Allerdings ist die Situation für das SMA-Standortgebiet Jura Ost günstiger als für das Gebiet Südranden, weil dort grössere Reserven vorliegen. Für die übrigen SMA-Standortgebiete liegt das Wirtgestein Opalinuston tief genug, so dass die Erosionsszenarien keinen Einfluss auf die Bestimmung der Tiefenlage des Lagers hat (NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12).

3.2.5 Unterschiede zwischen den Standortgebieten hinsichtlich Vergletscherungen und Bildung von Durchbruchsrinnen

Angaben der Nagra

Gemäss NTB 14-02-III kann es im Zusammenhang mit Vergletscherungen zu fundamentalen und raschen Umstellungen des lokalen Gewässernetzes kommen. Dabei können durch Moränenbildungen, Entstehung von Eisstauseen und/oder Aufschotterungen im Gletschervorfeld existierende Täler verschlossen und an anderen Stellen neue Täler gebildet werden (S. 72, NTB 14-02-III). Die unter diesen Umständen neu gebildeten Täler oder Durchbruchsrinnen sind nicht oder nur schwach übertieft. Gemäss Angaben der Nagra (NTB 14-02-III) sind die Standortgebiete Südranden und Jura Ost im Hinblick auf die Entstehung von Durchbruchsrinnen am sensitivsten, weil das Wirtgestein bezüglich der lokalen Erosionsbasis relativ untief liegt. Für die anderen Standortgebiete müssen diese Komplikationen wegen der grossen Tiefenlage des Wirtgesteins nicht betrachtet werden. Ganz im Gegensatz zum Standortgebiet Südranden gibt es im Gebiet Jura Ost keine existierenden verfüllten Felsrinnen oder Trockentäler. Des Weiteren blieb der grobe Verlauf des N-S orientierten Aaretals mehr oder weniger

lagestabil (1 Million Jahre alte Terassenschotter bei Mandach, Akçar et al. 2014). Die Nagra stuft deshalb die Möglichkeit für die Entstehung einer neuen Durchbruchsrinne im Standortgebiet Jura Ost für die nächsten Vergletscherungen als sehr unwahrscheinlich ein. Als weiteres Argument dient die relative hohe Lage des Bözbergplateaus von > 200 m oberhalb der lokalen Erosionsbasis. Für den Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre wird aber die Bildung einer neuen Durchbruchsrinne nicht ausgeschlossen.

Im Hinblick auf die Entstehung von Durchbruchsrinnen optimiert die Nagra die Abgrenzung von Lagerperimetern und die Tiefenlage des Wirtgesteins in der Art, dass auch bei der Entstehung einer Durchbruchsrinne durch den Lagerperimeter bis aufs Niveau der zukünftig abgesenkten regionalen Erosionsbasis das Lager nicht freigelegt wird (NTB 14-02-III, S. 73).

Beurteilung der EGT

Die Unterschiede, welche die Nagra hinsichtlich Bildung von Durchbruchsrinnen für zukünftige Landschaftsentwicklungen beschreibt, basieren insbesondere auf Rekonstruktionen und Interpretationen von abflusslosen, hängenden Tälern, welche auch als ‚Trockentäler' oder ‚Windgaps' in der Literatur beschrieben werden. Dabei handelt es sich um Täler oder lineare Durchbrüche in Landschaften, welche in der geologischen Vergangenheit geschaffen wurden und zurzeit kein Oberflächenwasser führen. Um solche Einschnitte zu bilden, braucht es einerseits eine lokale Topographie, in welche sich solche Rinnen vertiefen können. Andererseits braucht es auch einen Mechanismus (Vergletscherungen), der dazu führt, dass Flüsse in entsprechende Richtungen umgelenkt werden, damit der Abfluss dann zum Einschneiden solcher Täler führt. Deshalb sind solche Rinnen in Regionen mit topographischen Erhebungen und dem Einflussbereich zukünftiger Vergletscherungen zu erwarten. Die Nagra trägt diesen Aspekten gebührend Rechnung, indem jedes Standortgebiet hinsichtlich dieser Variablen detailliert beschrieben und diskutiert wird.

Ob solche Rinnen fossil erhalten sind oder nicht, spielt dabei eine entscheidende Rolle. Für die Standortregion Jura Ost fehlen geologische und geomorphologische Hinweise. Die Nagra geht davon aus, dass in diesem Gebiet die Bildung einer Durchbruchsrinne bei einer nächsten Vergletscherungen (also für den Betrachtungszeitraum eines SMA-Lagers) sehr unwahrscheinlich ist, dass aber für längere Zeiträume (Betrachtungszeitraum eines HAA-Lagers) eine solches Erosionsszenarium nicht ausgeschlossen werden kann. Diese Ansätze sind schwierig zu beweisen, erscheinen der EGT aber vernünftig zu sein.

Eine Durchbruchsrinne kann sehr schnell gebildet werden. Allerdings erfolgt ein solcher Einschnitt bis zur Höhenlage der lokalen Erosionsbasis. Die Bestimmung der Tiefenlage der Oberkante Wirtgestein sowie der Lagerperimeter sind hinsichtlich des sicherheitstechnischen Indikators 'Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen' optimiert. Diesen Ansatz erachtet die EGT als vernünftig und konservativ.

3.2.6 Zusammenfassende Beurteilung der EGT

Die Resultate hinsichtlich der Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf Erosions-Kriterien sind in NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12 zusammengestellt. Grundsätzlich ist die Herleitung dieser Abbildung nachvollziehbar. Zudem basiert die Rekonstruktion der Exhumationsszenarien pro Standortgebiet auf dem heutigen Stand der publizierten Daten, die bei der Verabschiedung und Veröffentlichung von NTB 14-02-III und NAB 14-38 zugänglich waren. Unklar in dieser Darstellung sind (i) die Variabilität der Lage der heutigen Erosionsbasis pro Standortgebiet im Hinblick auf das regionale Einfallen dieser Basis sowie der Unsicherheiten, die sich bei der Rekonstruktion dieser Fläche ergeben, (ii) Neuerkenntnisse, aber auch Unsicherheiten in der

Erfassung der Alter insbesondere für die Höheren Deckenschotter und Tieferen Deckenschotter, welche als Grundlage zur Bestimmung der Basisfälle und insbesondere für die pessimistischen Fälle für die Erosionsszenarien dienen, und (iii) Erklärungen sowie Interpretationen hinsichtlich regionaler Unterschiede für die pessimistischsten Erosionsszenarien. Die Punkte (i) und (iii) sollten im Rahmen von Etappe 3 geklärt werden.

In NTB 14-02-III, Abb. 4.4-12 werden die rezente Höhenlage der Terrainoberfläche sowie die Höhenlage der Oberkante Wirtgesteine bezüglich der heutigen und zukünftigen Erosionsbasis dargestellt. Die rezente Höhenlage der Oberkante Wirtgestein wird zudem im Hinblick auf pessimistische Erosionsszenarien optimiert. Aus den Argumenten dieses Berichtes resultieren für die HAA-Standortgebiete Nördlich Lägern die günstigsten Voraussetzungen hinsichtlich Erosionskriterien. Weiter zeigt sich, dass im pessimistischsten Fall das HAA-Standortgebiet Jura Ost sehr nahe an die Oberfläche kommt, und dass im Falle einer glazialen Übertiefung grössere Teile des Lagers exhumiert werden könnten. Für das HAA-Standortgebiet Zürich Nordost resultieren zwei Szenarien. Gemäss NTB 14-02-III bietet dieses Gebiet hinreichend Schutz vor Erosion auch im Falle einer zusätzlichen glazialen Übertiefung am Ende des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahre, weil das Wirtgestein in grosser Tiefe liegt. Falls allerdings das pessimistische Erosionsszenarium in Figur 3-3 bestätigt werden sollte, dann müsste damit gerechnet werden, dass Teile des Lagers bereits nach 700'000-800'000 Jahren in den Einflussbereich der Bio- und Hydrosphäre gelangen könnte, falls das Lager nicht in grössere Tiefen verlegt wird. Dieses pessimistische Szenarium würde aber nur bei einer zusätzlichen glazialen Übertiefung zutreffen. Damit könnte das Standortgebiet Zürich Nordost die ungünstigsten Rahmenbedingungen hinsichtlich Schutz vor Erosion aufweisen. Die EGT erachtet es als stufengerecht, wenn diese Fragen im Rahmen von Etappe 3 geklärt werden.

Für die SMA-Standortgebiete zeigt sich, dass ein Lager im Gebiet Südranden und Jura Ost nach dem Betrachtungszeitraum von 100'000 Jahren sehr nahe an die Oberfläche gelangen kann. Allerdings bestehen genügend Reserven, um ein SMA-Lager im Standortgebiet Jura Ost in tiefere Bereiche zu verlegen. Für das SMA-Standortgebiet Südranden besteht allerdings wegen der untiefen rezenten Höhenlage der Oberkante Wirtgestein kein allzu grosser Spielraum, um ein Lager in grössere Tiefen zu verlegen, wenn aus weitergehenden Untersuchungen im Rahmen von Etappe 3 pessimistischere Szenarien hinsichtlich zukünftiger Landschaftsentwicklung resultieren sollten. Für die übrigen SMA-Standortgebiete der Nordostschweiz ist die Situation hinsichtlich Erosionsszenarien unbedenklich.

Die Rekonstruktion der Erosionsszenarien und damit verbundene Prognose über die Landschaftsentwicklung des Standortgebietes Wellenberg ist mit grossen Unsicherheiten verbunden.

3.3 Prozessierung und Belastbarkeit der 2D-Seismik im Tafeljura

3.3.1 Angaben der Nagra

Die Reflexionsseismik, bestehend aus den reprozessierten seismischen Profilen vor 2010 sowie der 2011/2012 neu gewonnenen Linien, wird für die folgenden Ziele benutzt: (1) Festlegung der regionalen Störungen; (2) Identifizierung tektonisch zu meidender Zonen; (3) Bestimmung der Tiefenlage und Mächtigkeit der Wirtgesteine; (4) Identifikation lokaler Störungen. Punkte (1) bis (3) ergeben die geometrischen Grundlagen für die Abgrenzung der optimierten SMA- und HAA-Lagerperimeter und für die Bewertung, ob ein ausreichendes Platzangebot im jeweiligen Wirtgestein vorhanden ist. (4) soll bei der Bestimmung von anordnungs- und einlagerungsbestimmenden Elementen helfen, die wesentlich für die Festlegung des Platzbedarfs (NAB 14-99) sind.

Das Reprozessing erfolgte im Zeitraum 2009 bis 2011 für 68 Linien (ca. 1'369 km), die zwischen 1979 und 1996 aufgenommen wurden (Nagra 2012b). Diese Profile sind sehr unterschiedlich akquiriert worden: Unterschiedliche Techniken (Schuss, Vibro, Kombination); Überdeckungen von 12 bis 96, CMP-Abstände von 5 bis 25 m; obere Frequenzen (bei Vibro) von 48 bis 120 Hz. Hauptziel des Reprozessings waren: Berechnung und Anwendung neuer statischer Korrekturen (kompatibel mit der 2011/2012 Seismik); Rauschunterdrückung (kompatibel mit der 2011/2012 Seismik); Anwendung der CRS Technik und Zeitmigration. Prozessing und Reprozessing wurden bei der gleichen Firma (Petrologic Geophysical Services GmbH, Hannover) mit ProMAX 2D durchgeführt.

Die Datenakquisition in 2011/2012 (Nagra 2012a) umfasst 20 Linien mit ca. 307 km Länge.

Zur stratigraphischen Charakterisierung werden 5 mesozoische Horizonte verwandt, die in allen 5 Nordschweizer Standortgebieten gut zu sehen sind: Basis Tertiär/Top Malm (BTe), Basis Malm/Top Dogger (BMa), Top Lias/Basis Opalinuston (TLi), Top Muschelkalk (TMk), Basis Mesozoikum (BMz) (NAB 13-10). Damit werden die regionalen Störungen kartiert. Bei der Interpretation dieser Störungen gibt es Spielraum und Unsicherheiten, weil steiler stehende Strukturen schwieriger abzubilden sind und sensitiver auf Änderungen der Prozessing-Parameter reagieren. Das bezieht sich aber nicht auf die Strukturelemente in den Standortgebieten.

Die Interpretation der 2011/2012 Seismik berücksichtigt einen neuen Reflektor, der als nTOp bezeichnet wird, da er in vielen Profilen sichtbar ist und näherungsweise den TOP Opalinuston markiert. Allerdings kann er an den Bohrungen stratigraphisch nicht klar mit dem TOP Opalinuston korreliert werden. Dies ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, weil die Mächtigkeiten des Opalinustons und der anderen Wirtgesteine nicht aus der Seismik entnommen werden sondern aus den Bohrungen.

Anhand der Bohrungen Benken, Böttstein, Leuggern, Lindau-1, Pfaffnau-1, Riniken, Schafisheim, Siblingen und Weiach setzt die Nagra Reflexionen mit der stratigraphischen Abfolge in Beziehung (NAB 13-10). In den Standortgebieten liegen Bohrungen nur in den HAA-Standortgebieten Zürich Nordost (Benken), Nördlich Lägern (Weiach), Jura Ost (Riniken). Alle 5 Markerhorizonte können an den Bohrungen Benken, Lindau-1, Pfaffnau-1, Riniken, Schafisheim und Weiach mit der Seismik korreliert werden, wobei in Riniken die BTe fehlt. An den Bohrungen Böttstein und Siblingen kann nur BMz und TMk korreliert, an der Bohrung Leuggern nur BMz.

3.3.2 Beurteilung der EGT

Die Frage der Belastbarkeit der Seismik hat zwei Aspekte: Erstens stellen sich die Fragen nach der erreichten Qualität der seismischen Linien und deren Interpretation sowie der Vergleichbarkeit derselben an Standorten, unabhängig von den damit verfolgten Zielen. Zweitens muss überprüft werden, ob auch bei bester Qualität und weitgehender Vergleichbarkeit die Ziele erreicht werden, die für die 2D-Seismik im Einengungsvorschlag für Etappe 3 notwendig sind.

Qualität der seismischen Linien und Vergleichbarkeit

Die Datenakquisition in 2011/2012 erfolgte sehr sorgfältig mit der notwendigen Qualitätskontrolle, insbesondere sind Feldstapelungen (NAB 13-09) zu nennen. Es wurde eine sehr hohe Überdeckung (165- bis 330-fach) erreicht mit CMP-Abständen von 3 und 6 m und Frequenzen typisch bis 100 Hz. Das Prozessing der neuen und das Reprozessing der alten seismischen Linien wurde mit grosser Sorgfalt durchgeführt die Industriestandards deutlich übertreffen und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Die Arbeiten wurden in enger Abstim-

mung zwischen der beauftragten Firma und dem Auftraggeber durchgeführt. Die Qualitätskontrollen im Feld und beim Processing inklusive der intensiven Interaktion von Nagra und Kontraktoren waren vorbildlich. Gleiches lässt sich bezüglich der Interpretation sagen.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, insbesondere die Informationen über den Horizont TLi (Top Lias, der Basis der Wirtgesteins Opalinuston) in den Nordschweizer Standortgebieten, ist im Wesentlichen gegeben, obgleich Einschränkungen zu nennen sind:

Wegen der teilweise lange zurück liegenden Datenakquisition der «alten» Linien und der damit verbundenen geringeren Überdeckung muss davon ausgegangen werden, dass trotz der erzielten erheblichen Verbesserungen durch das Reprozessieren die «alten» Linien tendenziell geringere Qualität aufweisen als die «neuen». Die Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit ist nicht untersucht worden. Die Standortgebiete weisen sehr unterschiedliche Anteile «alte» gegen «neue» Seismik auf. Zum Beispiel weist Jura Ost ein doppelt so hohes Verhältnis neuer Profil- zu alten Profil-km auf als Nördlich Lägern.

Die Qualität von Reflektoren wurde für den TLi in NAB 14-34, Beilage 6-5 mit Hilfe der Unsicherheiten hinsichtlich der statischen Korrekturen und der Qualität der Interpretation des Horizonts (NAB 13-10, Tab. 4) dargestellt, aber nicht weiter diskutiert, ob bei den unterschiedlichen Qualitäten die Vergleichbarkeit der Standorte gewahrt bleibt. Während die Standorte SR (Südranden), JO (Jura Ost) und JS (Jura-Südfuss) eine sehr gute Qualität des Reflektors zeigen ist das für NL (Nördlich Lägern) und ZNO (Zürich Nordost) nur noch eingeschränkt der Fall.

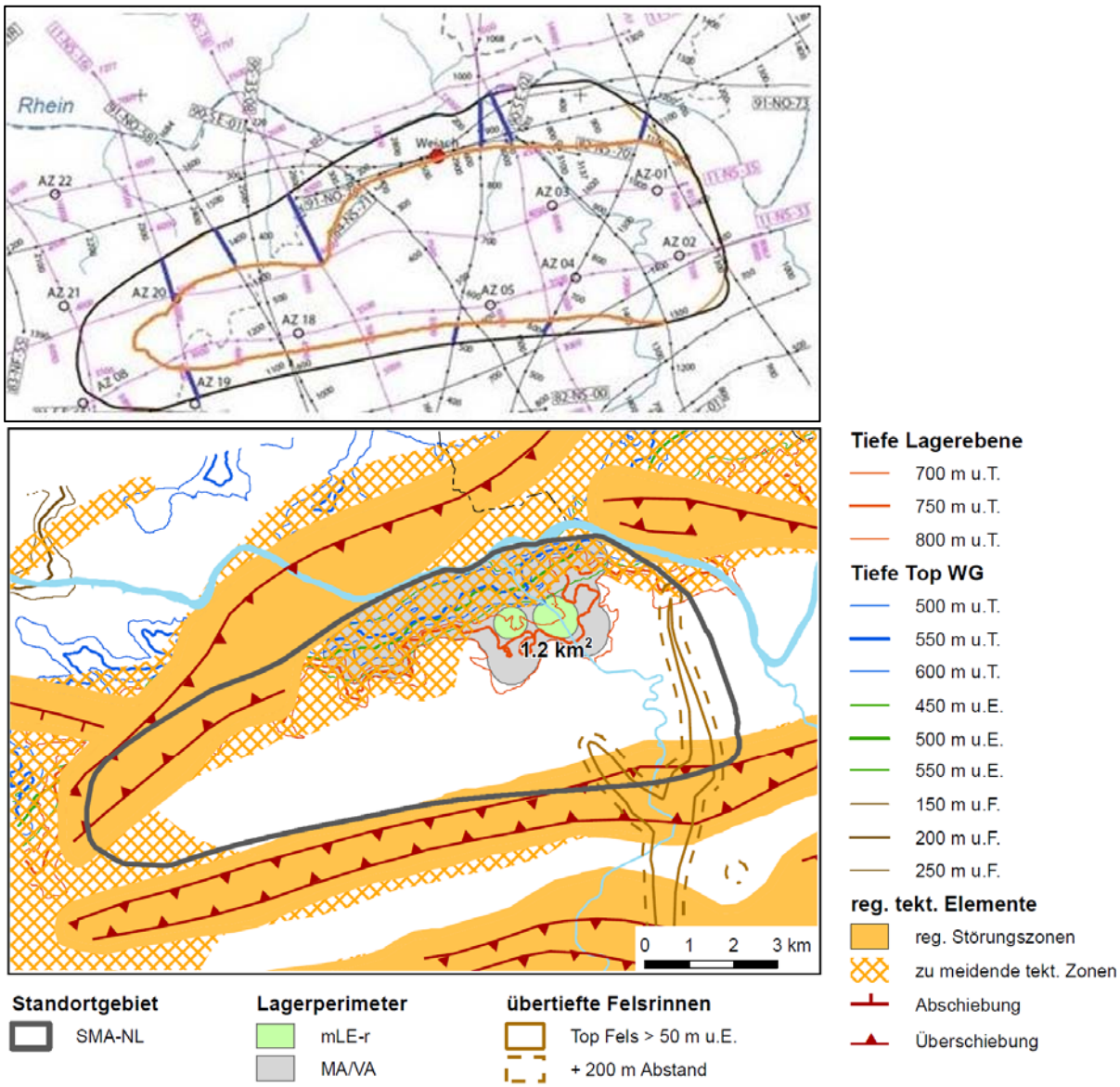
Verschiedene «technische» Massnahmen bei der Datenakquisition, die möglicherweise sehr hilfreich bei den späteren Bewertungen gewesen wären, erfolgten nicht. Dazu gehört die Beobachtung einer «neuen» Linie längs einer «alten» für den direkten Qualitätsvergleich, aber auch check-shots aus Bohrungen in die 2011/2012 Messungen, die für das Geschwindigkeitsmodell wichtig gewesen wären. Die Einrichtung des «Fachgremium Erdwissenschaftliche Untersuchungen» für Etappe 3, in dem technische Fragen vor und während der Erkundungsarbeiten der Nagra diskutiert werden können, ist daher zu begrüssen.

Qualitätsziele für Etappe 2

Mit der verdichteten Seismik (der reprozessierten und der neuen 2011/2012 Seismik) liegt ein Profilnetz mit typischen Abständen im Bereich von 1 km bis 2 km vor, das es erlaubt, das **Ziel 1**, die Festlegung der regionalen Störungen, zuverlässig zu adressieren. Das Netz spannt sich recht gleichförmig über alle Nordschweizer Standorte, sodass man von einer weitgehenden Vergleichbarkeit der Ergebnisse innerhalb dieser Standorte ausgehen kann. Der Linienabstand ist, gemessen an der Dimension der Tiefenlagers (SMA und HAA), die im Bereich von 2 km x 2 km liegen nicht sehr dicht. Zum Beispiel führt das in Nördlich Lägern dazu, dass ein Bereich grösser als 2 km x 2 km von keinem Profil überstrichen wird (verschärft durch die Nichtverfügbarkeit der Linie 90-SE-01), genau in dem Bereich, der von der Tiefe des TLi her für ein Lager in Frage käme.

Ziel 2: Die Festlegung der zu meidenden tektonisch gestörten Zonen spielt eine erhebliche Rolle bei der Festlegung der optimierten Lagerperimeter. Diese Zonen sind durch post-paläozoisch reaktivierte Grundgebirgsstörungen mit Bezug zu Permokarbon-Trögen und Antiklinal-Strukturen im Nahfeld des Überschiebungsgürtels des Faltenjura charakterisiert (NTB 14-02-II, S. 72 ff). Diese Zonen werden als Orte betrachtet, in denen post-paläozoische Störungen eventuell reaktiviert werden können mit den entsprechend negativen Auswirkungen auf die dort befindlichen Teile der Lager. Ihre Festlegung enthält Interpretationsspielraum, der nicht erläutert wird. Während für die Tiefenlage des TLi eine sehr konservative Betrachtung der Unsicherheiten vorgenommen wird, erfolgt diese für die zu meidenden tektonisch gestörten

Zonen überhaupt nicht. Das Ziel (2), die Identifizierung tektonisch zu meidender Zonen, wird, abgesehen von der mangelnden Präzision der Definition, wie diese festgelegt werden, wegen der relativ grossen Profilabstände zumindest nicht in der Genauigkeit erreicht, wie sie in den Abbildungen des Anhangs B von NTB 14-01 als gegeben erscheinen. Dieses Ziel wird also nur eingeschränkt erreicht.



Figur 3-4: Oben: Ausgrenzung durch regionale Störungen und zu meidende tektonsiche Zonen (F. Wenzel). Gezeigt sind die Ausgrenzungen aus den Profilen (blau) und eine mögliche Interpolation. Zum Vergleich unten: Lagerperimeter Nördlich Lägern, Fall SMA-NL-mLE-r (massgebender Lagerperimeter für die Einenegung, mLE, aus NTB 14-01, Anhang Fig. B.3-3)

Das **Ziel 3** besteht in der zuverlässigen Festlegung der Tiefe des Wirtgesteins an den Nordschweizer Standorten. Hinsichtlich des Opalinustons wird dessen Basis (TLi) mit der 2D-Seismik kartiert, während die Mächtigkeit aus Bohrungen bestimmt wird. Das von der Nagra benutzte Verfahren zur Gewinnung der Tiefenlage des TLi aus dem Geschwindigkeitsmodell ist aber fragwürdig und führt zu sehr grossen Fehlern in der Bestimmung der Tiefenlage. In NL erreichen diese zum Beispiel, im relevanten Tiefenbereich, 100 m (NTB14-02 II, Beilage A2-11).

Die von der Nagra benutzte Methodik der Entwicklung eines Geschwindigkeitsmodells zielt vorrangig auf die Interpretation ab. Insbesondere werden mit dem sogenannten «Depthing-

Modell» (NAB 13-80). Sprünge der seismischen Horizonte an Kreuzungspunkten vermieden. Die Unsicherheiten in der Tiefenlage der interpretierten Horizonte stammen von Unsicherheiten der interpretieren Laufzeitlage und Unsicherheiten bzgl. des Geschwindigkeitsmodels für die Tiefenkonversion. Letztere werden durch ad-hoc Annahmen modelliert, die aber als konservativ erscheinen, sodass zu vermuten ist, dass die tatsächlichen Unsicherheiten eher geringer ausfallen.

Andere Methoden diese Unsicherheiten zu quantifizieren oder wenigstens zu klassifizieren werden nicht benutzt. Solche wären z. B. die Analyse der Sprünge in der Tiefe von Markerhorizonten an Kreuzungslinien sowie eher geologisch/stratigraphische Annahmen statt der ad-hoc Hypothese von 5% möglicher Geschwindigkeitsvariation. Die Nagra vergleicht die Tiefenlage TLi aus Etappe 1, die von einem Geschwindigkeitsmodell stammt, das ausschliesslich auf Bohrlochbeobachtungen beruht, mit dem «Depthing-Modell» (NTB 14-02-II, Fig. 5.3-3). Das ergibt aber nicht die tatsächlichen Unsicherheiten, sondern nur den Unterschied zwischen einem schlichten und einem guten Modell.

Die Nagra argumentiert, dass eine weniger konservative Schätzung der Fehler in der Tiefenlage TLi zu keinen anderen Ergebnissen führt, was das mangelnde Platzangebot für ein HAA-Lager (in Nördlich Lägern) und das mangelnde Platzangebot für ein SMA-Lager im Jura-Südfuss, Nördlich Lägern und Südranden betrifft. Dies ist aber unzutreffend. Die Szenarien für Lagerperimeter für NL zeigen, dass das Platzangebot von 4.2 km^2 bei Annahme der Referenztiefe des TLi (HAA-NL-mLE-r) auf 9.8 km^2 bei Einschluss der unteren Fehlergrenze (HAA-NL-mLE-u) steigt.

Die Unsicherheiten in der Tiefenlage des TLi werden in NAB 14-34 auf zwei Ursachen zurückgeführt. Erstens: Unsicherheiten in der interpretierten Laufzeitlage $\Delta t = \Delta t_{stat} + \Delta t_{\text{int}\,erpr}$ mit $\Delta t_{stat} = \pm 8\,ms$ und $\Delta t_{\text{int}\,erpr}$ abhängig von der Zuverlässigkeit des Horizontpicks zwischen $\Delta t_{\text{int}\,erpr} = \pm(1-3)ms$ für robuste picks und $\Delta t_{\text{int}\,erpr} = \pm(4-10)ms$ für ungewisse picks. Diese Fehler in der Laufzeit können als mit einer Normalverteilung zufallsverteilt angenommen werden. In die Tiefe müssen sie mit den RMS-Geschwindigkeiten zum TLi umgerechnet werden: $\Delta z_T = \frac{1}{2} \cdot V_I \cdot \Delta t$. Das ist dann die Standardabweichung des Tiefenfehlers. Mit den Werten für die TLi Reflexionen in Südranden $\Delta t = 10ms$ und einer angenommenen Intervallgeschwindigkeit $V_I = 3.000 m/s$ ergibt sich $\Delta z_T = 15m$ als Standardabweichung.

Der zweite Fehleranteil resultiert aus den Unsicherheiten der Geschwindigkeiten. Diese haben selbst wiederum zwei Komponenten: Eine Zufallskomponente, die im Wert der Abweichung des sogenannten «Depthing-Modells» vom Startmodell besteht (NAB 14-34, Abschnitt 6.1.2) und einer deterministischen Komponente, die linear mit der Entfernung von den Kalibrierungsbohrungen zunimmt. In den Karten der Nagra (NTB 14-02-II) sind alle Anteile zusammen dargestellt. Will man die Bedeutung der Unsicherheit z.B. in Südranden bewerten muss man die deterministische von den zufälligen Komponenten trennen. Mit den verfügbaren Informationen kann man nur die zufälligen Laufzeitfehler von den Geschwindigkeitsfehlern trennen. Dann ergibt sich für Südranden folgendes Bild: Aus NTB 14-02-II, A1-14 ergibt sich ein totaler Tiefenfehler von $\Delta z = \Delta z_T + \Delta z_V = 15\,m + \Delta z_V$, sodass also der deterministische Anteil $\Delta z_V = 35\,m$ ist.

Die Unterscheidung von zufallsverteilten und verfahrensbedingten (deterministischen) Fehlern in den Tiefenangaben – die die Nagra nicht macht - führt dazu, dass der jeweilige Referenzfall als wahrscheinlicher betrachtet werden muss als die Fälle in denen der TLi jeweils untiefer oder tiefer angenommen wird. Betrachtet man die mittleren (Referenz-), tiefen und untiefen

Tiefenwerte als gleichwertig ergäbe sich in den Szenarien zur Ermittlung des Platzangebots in NTB 14-01 und in NAB 16-41 folgendes Bild: Südranden bietet mit der tieferen Lage des TLi ein hinreichendes Platzangebot für SMA, im Unterschied zum Referenzszenario. Für HAA Zürich Nordost führt die untiefe Option zu einem zu geringen Platzangebot, das erst wieder ausreicht wenn die maximale Tiefe des Top Opalinustons etwas unterhalb den geforderten 450 m akzeptiert wird. Mit der Berücksichtigung des Zufallscharakters des Tiefenfehlers erscheinen diese Fälle aber als unwahrscheinlich.

Ziel 4: Lokale Störungen sind definiert als Versätze in Reflektoren, welche grösser als etwa 25 m sind (NAB 13-10), nur auf einer Linie zu sehen sind und nicht auf benachbarten Linien korrelierbar sind. Daher weiss man auch nicht, wie diese Brüche streichen und welche laterale Ausdehnung sie haben. Insbesondere weiss man nicht, wie häufig sie innerhalb der Fläche eines Lagers vorkommen und wie häufig ihnen beim Bau des Lagers auszuweichen ist. Bei der Festlegung des Platzbedarfs (NAB 14-99) spielen diese unbekannten lokalen Störungen eine entscheidende Rolle. Dieser Problematik wird in Kapitel 3.7 nachgegangen.

Zusammenfassung

Die Interpretation der seismischen Linien ist vollständig, nutzt alle verfügbaren Daten inklusive Bohrbefunde und Ergebnisse der Gravimetrie und erfolgt nach dem Stand der Wissenschaft und Technik. Die Ergebniskarten zeigen aber teilweise eine räumliche Auflösung, die eher von Interpolationsprogrammen als von der Akquisitionsdichte der 2D-Seismik herrührt. Im Fall Nördlich Lägern führt das dazu, dass zwar eine nachvollziehbare, aber nicht unbedingt belastbare Interpretation vorliegt.

Insgesamt entsprechen Akquisition, Verarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik – mit den oben diskutierten Einschränkungen –dem Stand von Wissenschaft und Technik. Im Wesentlichen kann man die 2D-Seismik und ihre Ergebnisse auch als stufengerecht bezeichnen.

3.4 Neotektonik und Geodynamische Entwicklung der Nordschweiz

3.4.1 Angaben der Nagra

Neotektonik ist ein Überbegriff für die jüngsten, noch aktiven geologisch-tektonischen Prozesse, die vermutlich in die (geologisch gesehen) nahe Zukunft hinein projiziert werden können. Es gibt zwei Gruppen von Phänomenen, die unter diesen Begriff fallen und die sich in Bezug auf die Untersuchungsmethodik klar unterscheiden:

- Feldbeobachtungen, die möglicherweise auf geologisch sehr junge tektonische Bewegungen hinweisen, die bis in die Gegenwart aktiv gewesen sein könnten, aber ohne direkt messbare dynamische Begleiterscheinungen (Hebung/Senkung, Seismizität, usw.)
- Beobachtungen, die direkte Hinweise auf Krustenbewegungen in der Gegenwart bzw. der jüngsten Vergangenheit geben, welche mittels der Analysen von dynamischen Daten (aus der Seismologie, Geodäsie, usw.) bestimmt wurden (oft «Geodynamik» genannt, aber auch «rezente Tektonik» oder «aktive Tektonik»)

In der Nordschweiz werden Bewegungen der Erdkruste, die während den letzten ca. 4 Millionen Jahren (Pliozän-Pleistozän-Holozän, nach dem Ende der Jurafaltung) stattgefunden haben, als «Neotektonik» bezeichnet (vgl. NTB 14-02-III, S. 13). Vor ca. 4 Millionen Jahren fand am nördlichen Alpenvorland nach regionalen Untersuchungen ein Übergang statt, von der Ab-

scherungstektonik der Jurafaltung ohne Beteiligung des Grundgebirges («thin-skinned tectonics»), zu einem mehr diffusen tektonischen Regime, gekennzeichnet durch die schwache Reaktivierung von früher entstandenen steilstehenden Brüchen und Störungszonen, sowohl im Grundgebirge wie im Deckgebirge («thick-skinned tectonics»).

Die Nagra hat Untersuchungen von den oben genannten zwei Typen neotektonischer Phänomene in der Nordschweiz seit Jahrzehnten finanziell und materiell unterstützt, und kontinuierlich mit den involvierten Forschungsgruppen zusammengearbeitet. Schon in SGT Etappe 1 waren die Resultate eines breiten Spektrums von detaillierten Untersuchungen vorhanden, die in SGT Etappe 2 durch zum Teil methodisch neue Forschung komplementiert wurden (z. B. hochauflösendes Geländemodell DTM-AV, neue Kompilation von geodätischen und seismologischen Daten, Neuauswertung der Präzisionsnivellementdaten, Charakterisierung des rezenten Spannungsfelds, u. a.). In Etappe 2 wurden auch neue Langzeitprogramme gestartet, die in SGT Etappe 3 weitergeführt werden (z. B. permanentes GNSS-Netzwerk, seismologisches Breitband-Netzwerk). Im Allgemeinen ist es klar, dass die Nagra die neotektonischen Untersuchungen nicht als am Ende von Etappe 2 abgeschlossen betrachtet, sondern als eine kontinuierliche Aufgabe, die sich in Etappe 3 und darüber hinaus fortsetzen soll. In NTB 14-02-III, Kapitel 3, werden neotektonische Phänomene in Zusammenhang mit den Indikatoren 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung' und 'Seismizität' behandelt und in Kapitel 4 für die Ableitung von Erosionsszenarien und den damit verbundenen Indikatoren verwendet. In der vorliegenden Stellungnahme der EGT wird die Arbeit der Nagra in Bezug auf Erosion (Abgrenzung der Lagerperimeter) in einem separaten Kapitel beurteilt (Kapitel 3.2). Der Indikator 'Seismizität' wird im Detail im nachfolgenden Kapitel 3.5 ebenfalls separat behandelt. Das vorliegende Kapitel ist deshalb auf das Kriterium 'Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung' fokussiert sowie auf allgemeine Betrachtungen zur geodynamischen Entwicklung der Nordschweiz.

Felduntersuchungen in der Nordwestschweiz und im angrenzenden Ostfrankreich weisen darauf hin, dass die regionalen Paläospannungen der letzten 4 Millionen Jahren der heutigen Situation ähnlich waren, was auf eine Kongruenz der neotektonischen mit der geodynamischen Situation in der Nordschweiz hinweist und eine Extrapolation bis in die nahe geologische Zukunft als plausibel erscheinen lässt (NTB 14-02-II, Kap. 4.3, Madritsch 2015). Innerhalb dieses Zeitraums sind die abgelagerten Sedimente noch nicht verfestigt und werden oft undifferenziert als «Lockergestein» oder für die Zeit ab dem Pleistozän als «Quartär» bezeichnet. Ältere Ablagerungen, die meist schon verfestigt sind (Jura-Kalk, Molasse-Sandsteine, usw.), werden manchmal mit den Sammelbegriffen «Fels» oder «Felsuntergrund» bezeichnet. Nach dieser groben Unterteilung sind neotektonische Effekte hauptsächlich im Lockergestein eindeutig als «neotektonisch» zu identifizieren. Dies ist aber nur sehr selten und nur punktuell festzustellen - die Lockergesteine sind fast überall mit Boden, Vegetation, Wasser, usw., bedeckt, und die Erosion lässt nur klägliche Reste als Zeugnisse der vergangenen Neotektonik übrig.

Im «Felsuntergrund» sind solche Effekte kaum oder gar nicht von älteren tektonischen Erscheinungen zu unterscheiden - die Bewegungen finden meistens durch eine schwache Reaktivierung von früher angelegten tektonischen Strukturen (Brüche, Störungszonen, Falten) statt. Deshalb bringt auch die neue 2D-Seismik wenig gesicherte neotektonische Information. Beschreibungen von neotektonischen Phänomenen sind deshalb auch in der wissenschaftlichen Literatur nicht oft anzutreffen (wobei die Region Basel und die Alpen sehr gut repräsentiert sind). Geologische Phänomene, die möglicherweise auf einen Zusammenhang mit Krustenbewegungen in den letzten 4 Millionen Jahren (Neotektonik) hinweisen, sind zum Beispiel:

- regionale Hebung/Senkung (z. B. Änderungen der Wasserscheiden der Hauptflüsse, Argon-Argon Geothermometrie und Geochronologie - siehe Kapitel 3.2)

- lokale Hebung/Senkung (z. B. «Paläo-Mäander», Durchbruchsrinnen, siehe Kapitel 3.2)
- systematische strukturelle Daten aus zerklüftetem Fels (z. B. fault-slip analysis, Madritsch 2015), zusammen mit datierbaren Kluftmineralen
- Beobachtungen zur Faltung und/oder Bruchbildung im Lockergestein
- Geomorphologische Beobachtungen unter Anwendung von hoch auflösenden LiDAR-Terrainmodellen (z. B. Höhenunterschiede der Erosionsbasis der Höheren Deckenschotter)

Zusammen mit den Daten aus den geodynamischen Untersuchungen (siehe unten) geben diese vereinzelt auftretenden Phänomene einen Einblick in die Krustenbewegungen, die im hier interessierenden Zeitraum (die letzten 4 Millionen Jahre bis 1 Million Jahre in Zukunft) stattgefunden haben und stattfinden können. In der Regel jedoch ist die Interpretation nicht eindeutig und wird mit einem Zusatz wie «ein schwacher neotektonischer Einfluss kann nicht ausgeschlossen werden» qualifiziert. Insbesondere ist es nicht gelungen, mögliche neotektonische Erscheinungen mit spezifischen Störungszonen im Felsuntergrund zu korrelieren.

Im Gegensatz zu neotektonischen Feldbeobachtungen ist die Datengrundlage zur Geodynamik der Nordschweiz sehr umfangreich und flächendeckend. Die wichtigsten Untersuchungsmethoden können wie folgt zusammengefasst werden:

- Geodätische Vermessungen von vertikalen Oberflächenbewegungen
- Periodische GPS-Messung von horizontalen Oberflächenbewegungen an vermarkten Fixpunkten
- Seismizität (Verteilungen, Stärke, Herdtiefen von Erdbeben - siehe Kapitel 3.5)
- Rezentes Spannungsfeld (Herdflächenlösungen, «in situ»-Spannungsmessungen - auch in NTB 14-02-IV, Kapitel 2, im Detail diskutiert)

Zusammen mit den Daten aus den Felduntersuchungen (siehe oben) geben diese regionalen geodynamischen Untersuchungen einen Einblick in die Krustenbewegungen, die möglicherweise für die letzten 4 Millionen Jahre typisch waren und für die nächste Zukunft sein werden. Die zwei Datensätze sind aber so verschiedenartig, dass zurzeit eine vernünftige tektonische Synthese kaum zu bewerkstelligen ist.

3.4.2 Beurteilung der EGT

Die Schlussfolgerungen der Nagra bezüglich der geologischen Langzeitentwicklung sind entsprechend allgemein gehalten und schliessen keine Möglichkeit aus. Die EGT ist einverstanden mit dem Grundtenor der von der Nagra aus tektonischer Sicht entwickelten Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung, besonders den folgenden Elementen:

- Die Nordschweiz weist generell seit ca. 4 Millionen Jahren bis heute eine nur sehr geringe neotektonische Aktivität aus. Es ist plausibel, dass sich diese im gleichen Stil über die nächsten 1 Million Jahre fortsetzen wird.
- Diese sehr schwache Neotektonik führte hauptsächlich zu punktueller Reaktivierung schon vorhandener Brüche und Störungszonen, im Deckgebirge wie auch im Grundgebirge, in Zusammenhang mit langsamen regionalen Hebungen und Senkungen (und Erosion/Sedimentation) und Krustenbewegungen in Verbindung mit glazialen Vorstössen und Rückzügen.
- Ob diese Reaktivierung in Zusammenhang mit einem schwachen Fortsetzen/Ausklingen der alpinen Kollisionstektonik, mit einem neuen (post-alpinen) Spannungsregime, oder mit beidem steht, kann auf Grundlage der heutigen geodynamischen Daten nicht entschieden werden - alle Möglichkeiten müssen für zukünftige geodynamischen Szenarien in Betracht gezogen werden.

Der Nagra-Einstufung der Standortgebiete Zürich Nordost und Südranden als «leicht vorteilhafter» (NTB 14-02-III, S. 40) auf Grund ihrer Modellvorstellungen steht die EGT aber eher skeptisch gegenüber. Die Nähe dieser beiden Standorte zur Randzone des Hegau-Bodensee-Grabens (Neuhausen- und Randen-Störungen, mit Anzeichen neotektonischer Aktivität und einem in Bohrungen nachgewiesenen erhöhten Grad an Zerklüftung) ist wahrscheinlich genauso bedeutungsvoll wie eine Lokalisierung innerhalb der Vorfalten- oder Subjurassischen Zone (Standortgebiete Nördlich Lägern, Jura Ost und Jura-Südfuss), was Neotektonik und tektonische Beanspruchung angeht. Die geologischen Standortgebiete zeigen ähnliche neotektonische Verhältnisse, die zurzeit nicht unterschiedlich gewichtet werden können. Kleine Reaktivierungen von schon vorhandenen Bruchflächen in verschiedenen Richtungen, auf verschiedenen Massstäben und in verschiedenen Tiefen werden in jedem Standort in der nächsten 1 Million Jahre stattfinden. Ein Vergleich auf dieser Basis ist nicht belastbar.

Basierend auf den von der Nagra zu Etappe 2 vorgelegten Unterlagen ist nicht zu erwarten, dass die bisherigen Resultate und die für die Zukunft geplanten Untersuchungen auf dem Gebiet Neotektonik - Geodynamik einen wesentlichen Einfluss auf das Auswahlverfahren in der Nordschweiz haben werden. Die Arbeiten zur Neotektonik und Geodynamik können im Vergleich zu anderen Standortuntersuchungen (3D Seismik, Oberflächendynamik, Felsmechanik) zukünftig deutlich reduziert werden. Für den später zu erbringenden Sicherheitsnachweis sind aber langfristige Datensätze zur Mikroseismizität der Nordschweiz wesentlich.

3.5 Seismizität der geologischen Standortgebiete

3.5.1 Angaben der Nagra

In Etappe 2 des SGT bewertet die Nagra den (nach der Optimierung der Lagerperimeter) entscheidrelevanten Indikator 'Seismizität' (NTB 14-01) für alle HAA-Standorte als 'günstig' (numerischer Indikatorwert: 3.5), für die Nordschweizer SMA-Standorte als 'günstig' (numerischer Indikatorwert: 3.7) und für den SMA-Standort Wellenberg als 'bedingt günstig' (numerischer Indikatorwert: 2.7).

Diese Bewertung und die zugehörige Argumentation ist im Wesentlichen identisch zur Etappe 1: NTB 08-03 bewertet den Indikator 'Seismizität' für alle HAA-Standorte als 'günstig' (numerischer Indikatorwert: 3.0), für die Nordschweizer SMA-Standorte als 'günstig' (numerischer Indikatorwert: 3.4) und für den SMA-Standort Wellenberg als 'bedingt 'günstig' (numerischer Indikatorwert: 2.5).

Mit dem Indikator 'Seismizität' werden die Unterschiede in der erwarteten Häufigkeit von Erdbeben beurteilt, wobei untiefe Erdbeben kritischer beurteilt werden, da sie eher zu einem Versatz im Lagerbereich führen können (NTB 14-02-III, S. 15).

Die Nagra erachtet die Erdbebengefährdung der Tiefenlager als einfach kontrollierbar: Differenzielle Bewegungen des Gesteinsverbands (Zerscherung, Reaktivierung von Brüchen und Störungszonen) werden vermieden, indem ein ausreichender Abstand zu potenziell aktiven oder reaktivierbaren (regionalen) Störungen eingehalten wird (NTB 14-01, Anhang).

3.5.2 Beurteilung der EGT

Die relative Gewichtung des Indikators 'Seismizität' innerhalb der Bewertung der SMA-Standorte ist sinnvoll, weil sich der Wellenberg sowohl durch eine höhere Seismizität als auch eine geringere Tiefenlage der instrumentell beobachteten Beben auszeichnet. Es ist auch prinzipiell richtig die Bewertung für HAA konservativer zu machen als für SMA. Daher ist es auch richtig,

dass die Seismizität keine Feststellung gravierender Nachteile für die 5 Nordschweizer Standorte erlaubt und daher für eine Bevorzugung eines oder mehrerer dieser Standorte im Sinne der Etappe 2 des SGT nicht herangezogen werden kann.

Allerdings ist die Klassifizierung als 'günstig' in diesen Standorten nicht ohne weiteres nachvollziehbar.

In der seismischen Gefährdungsberechnung von Standorten wird die Seismizität benutzt, um seismotektonische Zonen voneinander abzugrenzen, die Häufigkeit grösserer, meist nicht beobachteter Beben, zu schätzen und teilweise auch um maximale Magnituden in der entsprechenden seismotektonische Zone abzuschätzen.

Die Nagra sieht in der Seismizität ausschliesslich ein Anzeichen für ein höheres oder geringeres Potenzial für differentielle Bewegungen im Untergrund, denen aber immer ausgewichen werden kann indem ein angemessener Abstand (200 m) zu potenziellen Bruchzonen gehalten wird.

Die Bewertung der Seismizität in den Nordschweizer SMA-Standorten als 'günstig' ist nur mit dem Paradigma nachvollziehbar, dass man potenzielle Bruchzonen verlässlich und vollständig identifizieren und ihnen ausweichen kann. Diese Annahme ist aber nicht wissenschaftlich nachgewiesen, sondern wird einfach gemacht. Tatsächlich sind selbst in gut geologisch und geophysikalisch untersuchten Regionen (z. B. Los Angeles Basin, USA) sogenannte «blind faults» zu vermuten. Das 1994 Northridge (Mw 6.7) Erdbeben im San Fernando Valley fand auf einer solchen «blind fault» statt und hatte im Nachgang noch zwei Beben mit Mw 6 zur Folge. In Regionen, in denen seismisch aktive Verwerfungszonen identifiziert werden, wird gleichzeitig auch immer eine Hintergrundseismizität angenommen, die räumlich zufällig verteilt ist, also überall auftreten kann. Die Annahme, alle Verwerfungsflächen für zukünftige grosse Beben zu kennen, entspricht nicht dem allgemeinen Stand der Wissenschaft hinsichtlich seismischer Gefährdung der Lager-Standorte.

Die Ermittlung der seismischen Gefährdung für Schweizer Standorte von Kernkraftwerken (PEGASOS) beruht auf der stochastischen Verteilung von Erdbebenherden in den seismotektonischen Zonen. Bemerkenswerterweise werden dabei die gleichen Zeiträume betrachtet, die für die Tiefenlager von Bedeutung sind, nämlich 100'000 und 1'000'000 Jahre. In die PEGAOS-Studien gehen viele verschiedene Modelle ein, aber keines bei dem angenommen wird, dass grössere Erdbeben ausschliesslich auf den grösseren mesozoischen Störungen auftreten können.

Die Differenzierung der Bewertung für die Nordschweizer Standorte zwischen Lagern für SMA und HAA innerhalb der Bewertung 'günstig' mit dem Indikatorwert 3.7 (SMA) und 3.5 (HAA) ist ebenfalls nur mit der rigiden Annahme möglich, dass man potenzielle Bruchzonen verlässlich und vollständig identifizieren und ihnen ausweichen kann. Mit der Annahme einer Hintergrundseismizität, auch wenn sie durch eine sehr kleine Rate gekennzeichnet ist, erhält man für den 10-fach längeren Zeitraum für den die Sicherheit des Lagers für HAA im Vergleich zum Lager für SMA nachzuweisen ist auch eine ca. 10-fach höhere Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines solchen Bebens im Lagerbereich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die Etappe 2 des SGT, in der die Identifikation eindeutiger Nachteile von Standorten der Tiefenlager im Fokus steht, die Seismizität - in relativer Hinsicht - zutreffend bewertet wird. Die Bewertung der Seismizität für die Sicherheit der Tiefenlager in Etappe 3 sollte Erdbebenherdmodelle beinhalten, die über die schlichten Annahmen, wie sie in Etappe 2 gemacht werden, hinausgehen, aber auch weitere Aspekte berücksichtigen wie Verschiebungen entlang von Störungen im Nahfeld des Endlagers, und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Wirksamkeit der technischen Barrieren.

3.6 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf der tektonischen Überprägung

3.6.1 Angaben der Nagra

Die Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf der tektonischen Überprägung erfolgt hauptsächlich mittels der Ergebnisse der verschiedenen in der Nordschweiz durchgeführten reflexionsseismischen Untersuchungen, die aus älteren Messkampagnen (1979 - 1996) und einer neuen Messkampagne (2011-2012) bestehen. Die älteren seismischen Profile wurden mit den gleichen Methoden wie die neueren Profile reprozessiert, um vergleichbare seismische Abbildungen über die ganze Region zu gewinnen. Die Datenbearbeitung wurde für beide Teile des Profilnetzes durch eine qualifizierte Firma mit einer modernen Software durchgeführt und wird von verschiedenen unabhängigen Experten als «state-of-the-art» beurteilt und akzeptiert (eine detaillierte Beschreibung der reflexionsseismischen Untersuchungen und eine Expertenbeurteilung der Qualität und Vergleichbarkeit der Resultate befindet sich in Kapitel 3.3).

Die Beurteilung der tektonischen Überprägung der geologischen Standortgebiete und ihrer Umgebungen basiert auf folgenden Hauptdokumenten:

- NAB 13-10: Wichtig aufgrund der Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren.
- NAB 14-34: Endresultat der geophysikalisch-technischen Prozessierung und Interpretation: Die interpretierte Profile sind als «best guess» dargestellt und die geologisch-tektonische Interpretation baut auf dieser Grundlage auf (zusammen mit NAB 13-10)
- NTB 14-02-II: Beschreibung der «zu meidenden tektonischen Zonen», sowie standortspezifische Unterlagen zu jedem potenziellen Standort (Anhang A)
- NTB 14-01: Methodik und Bestimmung der Lagerperimeter der Standortgebiete für SMA und HAA: «massgebender Fall für die Einengung»

Dazu kommen mehrere Spezialberichte, die konsultiert, aber nicht im Detail bearbeitet wurden. Ebenso wurde die Nachdokumentation der Nagra (insbesondere NAB 16-41) herangezogen, soweit sie neue Daten zum Thema Tektonisierung der Standortgebiete beinhaltet (für eine Beurteilung dieser Dokumentation hinsichtlich «Platzbedarf» und «Platzangebot», siehe Kap. 3.7 und 3.11).

3.6.2 Beurteilung der EGT

Eine detaillierte Beschreibung der Prozessierung und Belastbarkeit der Nagra 2D-Seismik befindet sich in Kapitel 3.3. Hier werden einige wichtige Aspekte hervorgehoben, die für eine Bewertung der von der Nagra angewendeten Methodik bei der Optimierung der Lagerperimeter aus tektonischer Sicht von besonderer Wichtigkeit sind.

Stellenwert der 2D-Seismik

2D-Seismik in einem groben regionalen Netzwerk wie in der Nordschweiz (ca. 2 km Abstand parallel laufender Linien) ist ein Erkundungswerkzeug und kann nur grobe Hinweise liefern, wo man am ehesten Sondierbohrungen ansetzen resp. eine 3D-Seismik-Kampagne durchführen könnte. Die Linienabstände sind zu weit und die Ungewissheiten in der Prozessierung (siehe Kap. 3.3) zu gross, um statistische Methoden, z. B. zur Konstruktion von Isohypsen oder zur Abschätzung von subseismischen Bruchmustern, anwenden zu können. Um die Datengrundlage klar von der Interpretation zu trennen, sollte man konsequent «ribbon maps» oder «strip maps» («Streifenkarten», die die Interpretation nur entlang der seismischen Profillinien darstellen) benutzen und auf allen interpretierten Karten sollten die seismischen Profillinien eingezeichnet sein. Die Nagra scheint nur teilweise diese Grundsätze verfolgt zu haben.

In den Nagra-Unterlagen sind die Zusammenhänge und Ungenauigkeiten oft schwierig zu durchschauen, z. B. wenn die «Streifenkarte» von Top Lias (TLi in NAB 14-34, mit den Tiefenbestimmungen längs der Linien) in Strukturkarten des TLi mit 20 m Höhenlinien (NTB 14-02-II, Beilagen A1-11, A2-7, A3-7, A4-9) umgewandelt und dann weiter für die Konstruktion der Lagerperimeter-Karten (NTB 14-01, Abb. 4.2-1 bis -23, alle ohne eingezeichnete seismische Profillinien) benutzt wird, ohne diese Transformation und Interpolation genau zu beschreiben. Hinsichtlich einer klaren Trennung von Datengrundlagen und Interpretation ist die Dokumentation der Nagra mangelhaft. Die Ausgangsprofile in NAB 13-10 und NAB 14-34 sind als beste Schätzung zu betrachten und sollten nur im Wissen um die grobe regionale Natur der Erkundungsresultate verwendet werden. Für die Festlegung der regionalen Störungszonen sind die Erkundungsresultate allgemein als belastbar anzusehen. Für kleinere tektonische Strukturen, die zur Definition von zu meidenden tektonischen Zonen (siehe unten) und anordnungsbestimmenden Strukturen herangezogen werden, muss die sehr provisorische Natur der aus der 2D-Seismik gezogenen Schlussfolgerungen im Auge behalten werden.

Ungewissheiten bei der Interpretation

Zusätzlich zur groben regionalen Natur von 2D-Seismik Untersuchungen (lange Profillinien, weiter Abstand der Linien und Shotpoints, usw.) sind auch bei optimaler Prozessierung/Reprozessierung grosse Ungewissheiten vorhanden, die systembedingt sind (d. h. nicht mit weiterer oder andersartiger Datenverarbeitung reduziert werden können), z. B.:

- Ungewissheiten bei der Korrelation Bohrloch-Seismik, die in diesem Fall 20 bis 40 m beträgt
- Ungewissheiten im Geschwindigkeitsmodell, die in diesem Fall zu Unsicherheiten in der interpretierten Tiefenlage von bis zu maximal ± 150 m führen
- Ungewissheiten über den Grad der Tektonisierung (Bruchbildung), da nur Versätze grösser als 20 bis 25 m sicher identifiziert werden können

Solche Ungewissheiten begrenzen die Anwendbarkeit der Daten für mehr als grobe, ganz generelle Einschätzungen. Zusätzlich existieren in diesem Zusammenhang auch die Ungewissheiten, die durch die fehlende Klassifizierung der Reflektoren in den tiefenkonvertierten Profilen der Nagra entstehen. Die Qualitätsbezeichnungen der Reflektoren («gut definiert», «ausreichend definiert», «schlecht definiert/konzeptuell», wie in NAB 13-10) wird in den entscheidenden Abbildungen des NTB 14-01 und NTB 14-02-II nicht angegeben (d. h. überall mit kontinuierlichen Linien, die gleiche Qualitätsbezeichnung wie «gut definiert» in NAB 13-10), was einen signifikanten Informationsverlust bedeutet.

Definition der «zu meidenden tektonischen Zonen»

In NTB 14-01 basiert ein wesentlicher Teil der Festlegung der optimierten Lagerperimeter auf der Ausgrenzung der «zu meidenden tektonischen Zonen». Diese Zonen sind in den Nagra-Unterlagen nur qualitativ-generisch definiert (Einflussbereiche «von post-paläozisch reaktivierten Grundgebirgsstörungen» und «Antiklinalstrukturen im Nahbereich des Faltenjuras», NTB 14-02-II, S. 72-81), und sie sind ausserdem nicht in den seismischen Profilen oder standortspezifischen Kartendokumentation eingezeichnet (ausser in sehr wenigen Figuren, z. B. NTB 14-02-II, Fig. 4.4-4 bis -7). Die in NTB 14-01 dargestellten zu meidenden tektonischen Zonen sind im Grunde als «expert judgement» der Nagra zu betrachten. Sie basieren nicht auf gut definierten strukturellen Kriterien. Die in vielen Kärtchen eingezeichneten Abgrenzungslinien, die auch als Grenze der optimierten Lagerperimeter dienen sollen, sind also nicht im Detail nachvollziehbar.

Da die Definition dieser Zonen qualitativ ist, stellt sich die Frage, ob die Abgrenzungen als konservativ zu betrachten sind. Nach Meinung der EGT ist diese Frage mit «ja» zu beantworten in Falle des Standortgebietes Zürich Nordost, nicht aber für Jura Ost und Nördlich Lägern. Die Siggenthal-Störungszone läuft in das Standortgebiet Jura Ost hinein und «stirbt» (NTB 14-02-II, Fig. 4.4-6). In der Fortsetzung dieser Störungszone ist aber höchst wahrscheinlich ein tektonisch gestörtes Gebiet zu erwarten («tip region» - wie bei der Eppenberg-Antiklinale im Standortgebiet Jura-Südfuss, NTB 14-02-II, Fig. 4.4-7), das im nächsten Kreuzprofil (11-NS-08) angedeutet wird, aber aufgrund der niedrigen Auflösung der 2D-Seismik nicht klar hervorkommt. Dass keine zu meidende tektonische Zone in dieser Gegend eingezeichnet ist, ist sicher keine konservative Interpretation. Nach Meinung der EGT liegt auch die Begrenzung der tektonisch zu meidenden Zone im Standortgebiet Nördlich Lägern weiter südlich als von der Nagra ausgewiesen (ENSI 33/464, Kap. 4).

In NTB 14-01 werden diese konzeptionell definierten «zu meidenden tektonischen Zonen» als ein wichtiger ersten Schritt zur «Abgrenzung optimierter Lagerperimeter» angewendet. Danach erfolgen verschiedene Optimierungsschritte und die Ausarbeitung verschiedener alternativer Lagerperimeter mit entsprechenden Flächen (angegeben auf 0.1 km^2 genau) und Tiefentabellen (Beilage B, Tiefen angegeben auf 1 m genau). Die Darstellung erfolgt in sehr kleinen Karten mit verschiedenen, sich überlagernden Isolinien. Die Kärtchen sind schwer lesbar und die angegebenen Genauigkeiten sind nicht realistisch (Flächen zu 0.1 km^2, Tiefen zu 1 m), wenn man in Betracht zieht, dass sie auf den Ergebnissen der 2D-Seismik beruhen, deren grosse Unsicherheiten oben und in Kapitel 3.3 diskutiert wurden.

Fazit

Obwohl die Akquisition und Prozessierung der neuen 2D-Seismik und die Reprozessierung der älteren seismischen Profile in der Nordschweiz sehr sorgfältig durchgeführt und dokumentiert wurden, ist ihre Anwendung für die Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf der tektonischen Überprägung nicht überzeugend. Die systembedingten Ungenauigkeiten erlauben keine Quantifizierung in dem in NTB 14-01 gezeigten Ausmass. Die Flächenangaben zum «massgebenden Fall für die Einengung» als Argument für die Standortwahl sind mit grossen Fehlerspannen behaftet, die nicht erwähnt sind. Die in NTB 14-01 und NAB 14-88 beschriebene nicht angemessene Nutzung der 2D-Seismik für Zwecke, die nur mit 3D-Seismik erreicht werden können, führt zu nicht belastbaren Ergebnissen.

Trotz dieser negativen Bewertung ist darauf hinzuweisen, dass die allgemeine Beurteilung der Nordschweizer Standorte aus tektonischer Sicht in NTB 14-02-II (Kapitel 4.5) für die Einengung die gleiche Reihenfolge ergibt wie in NTB 14-01:

- Zürich Nordost (ZNO) - «sehr günstige Bedingungen»;
- Jura Ost (JO) - «sehr günstige Bedingungen» aber mit Einschränkungen
- Nördlich Lägern (NL) - «möglicherweise weniger günstig»;
- Jura-Südfuss (JS) - «vergleichsweise nur bedingt günstig».

Ein genauer Vergleich der geologischen Standortsgebiete aus tektonischer Sicht unter Anwendung einer anderen Interpretationsmethodik (siehe ENSI 33/464, Kap. 4) hat gezeigt, dass die Beurteilung der tektonischen Überprägung der HAA-Standortgebiete ZNO, NL und JO auch die gleiche Reihenfolge wie in NTB 14-02-II (Kapitel 4.5) ergibt. Die EGT erachtet die Unterschiede in der tektonischen Überprägung der SMA- und HAA-Standortgebiete nicht als so gross, dass daraus eindeutige Nachteile abgeleitet werden könnten.

3.7 Platzbedarf der Tiefenlager in den verschiedenen Standortgebieten

3.7.1 Angaben der Nagra

Der Platzbedarf (in km^2) für die geologischen Tiefenlager in der Formation des Opalinustons wird in NAB 14-99 für jeweiligen mögliche Standorte ermittelt. Er hängt vom Typ des Lagers (HAA, SMA), von der Bauart der Kavernen, aber auch von zu erwartenden Störungen, die zuvor nicht detektiert wurden und denen ausgewichen werden muss, ab.

Die Bestimmung des Platzbedarfs erfolgt mit einer Reihe von Parametern, die teils bauliche und teils geologische Aspekte beinhalten. Die baulichen Aspekte ergeben sich aus der Menge des einzulagernden Materials für SMA- und HAA-Lager und den verschiedenen Konzepten bzgl. Kavernengrösse, Stollenlänge und -abstände, die dabei zur Anwendung kommen. Die geologischen Parameter beziehen sich auf mögliche anordnungsbestimmende Störungen, denen auszuweichen ist und auf die Möglichkeit ungünstiger geotechnischer Verhältnisse mit Niederbrüchen und/oder vergrösserten Auflockerungszonen, die zum Verlust von Kavernen führen können. Die Nagra verfährt in NAB 14-99 so, dass zunächst ein Rechteck in den massgebenden Lagerperimeter eingepasst wird. Ausnahme ist Nördlich Lägern, wo ein alternativer Lagerperimeter betrachtet wird. In die daraus resultierende Fläche, die typischerweise kleiner ist als die Perimeterfläche, wird dann unter Variation der genannten Parameter das Lager «eingepasst», wobei die sich ergebende erforderliche Fläche die Ausgangsfläche (= Theoretische Ausgangsfläche) überschreiten kann.

Es ergeben sich dann als Platzbedarf (in km^2) für das SMA-Lager: Südranden: 3 - 4, Zürich Nordost: ca. 3, Nördlich Lägern: 4 - 5, Jura Ost: 3 - 4, Jura-Südfuss: 6 - 8; Wellenberg: ca. 3. Für das HAA-Lager quantifiziert die Nagra den Platzbedarf mit: Zürich Nordost: ca. 6, Nördlich Lägern: 8 - 12, Jura Ost: 6 - 9 (NTB 14-01, Tab. 4.2-1).

In der Diskussion der Nachforderungen des ENSI (NAB 16-41) benutzt die Nagra andere Zahlen für den Platzbedarf als in NTB 14-01. Diese variieren zudem für jedes Szenario. Prinzipiell wird weiterhin das in NAB 14-99 benutzte Verfahren eingesetzt aber mit anderen, nicht näher dargestellten Variationen der Annahmen über Zahl und Lage der anordnungsbestimmenden Störungszonen. Zum Beispiel ändert sich der Wertebereich für NL aus NTB 14-01 von 8 bis 12 km^2 zu 5.8 bis 9.6 km^2 in NAB 16-41 für den massgebenden Fall der Einengung.

Die Ermittlung des Platzangebots für die Tiefenlager wird in NTB 14-01, S. 165 ff. beschrieben und in diesem Bericht im Kap. 3.11 erläutert und diskutiert.

3.7.2 Beurteilung der EGT

Bei der Festlegung des Platzbedarfs ist ein entscheidender Parameter die Zahl der zu erwartenden Störungen, denen ausgewichen werden muss. Es geht aber nicht nur die Zahl von Störungen in den Platzbedarf ein sondern auch die Frequenz der Störungszonen in Fallrichtung, die Frequenz der Störungszonen in Streichrichtung und die Ausdehnung der Störungszonen. Die Störungszone bezieht sich dabei immer auf den TLi.

Diese Parameter werden für die verschiedenen Standorte in NAB 14-88 abgeleitet. Es werden zwei Typen von lokalen Störungen unterschieden: Solche, die nur auf einer seismischen Linie zu sehen sind und solche, die auf zwei Linien zu sehen sind, aber nicht zu den regionalen Störungen gehören. Als Region, in denen die lokalen Störungen gezählt werden, wird die Standortregion oder ein Polygon, das den Standort einschliesst, benutzt. Das führt dann zu dem «Mean LDF Spacing» von Tab. 7-8 in NAB 14-88, wo Nördlich Lägern und Jura-Südfuss

ein - im Vergleich zu den anderen Standorten - erheblich kleineres «Spacing» zeigen. LDF bedeutet dabei Layout-Determining Faults = anordnungsbestimmende Störungen.

Die Streichrichtung der Störungen, die nur auf einer Linie zu sehen sind, wird aus der Beobachtung des Streichens von Rissen in geologischen Aufschlüssen in der Nordschweiz aus vorwiegend jurassischen Gesteinen (NAB 12-41) genommen. Über die Länge der Brüche glaubt man aus der 3D-Seismik Hinweise zu haben (140 bis 600 m).

Das angewandte Verfahren ist sehr fragwürdig. Zunächst ist es nicht möglich, mit der verfügbaren 2D-Seismik die Zahl der gesuchten lokalen Störungen, auch in einem statistischen Sinn, zu bestimmen. Hier ist die 2D-Seismik eindeutig überfordert. Die Feststellung eines Unterschieds zwischen Zürich Nordost, wo eine 3D-Seismik vorliegt, und z. B. Nördlich Lägern kann nur erfolgen, wenn an beiden Standorten 3D-Seismik vorliegt. Ein Vergleich der Zahl von abgezählten lokalen Störungen aus 2D-Seismik mit 3D-Seismik ist nicht aussagekräftig. Um eine statistisch relevante Anzahl an Störungen zu erhalten, wurden von der Nagra zudem auch die zu meidenden tektonischen Zonen und Tiefenlagen verwendet, und nicht nur die bevorzugten Regionen.

Angesichts dieser systematischen Fehler in der Ableitung der Parameter muss man davon ausgehen, dass deren Quantifizierung nicht gelungen ist und keine belastbare Grundlage für die Abschätzung des Platzbedarfs darstellt. Die neuen Angaben zum Platzbedarf in NAB 16-41 fussen auf der gleichen fragwürdigen Methodik wie die in NTB 14-01. Die Veränderungen gegenüber den alten Angaben werden nicht nachvollziehbar begründet.

3.8 Annahmen zur Auslegung, Vortriebsmethode, Stützung und Versiegelung der SMA- und HAA-Lager

3.8.1 Auslegung der Lagerstollen

Angaben der Nagra

Die Auslegung der SMA- und HAA-Lager ist im Prinzip sehr ähnlich. Parallele Lagerstollen bzw. Kavernen mit entsprechendem Abstand werden über Betriebstunnel an die Zugänge angebunden. Ein separater Lüftungstunnel ist parallel zum Betriebstunnel angeordnet. Das Lagerkonzept der Nagra sieht als Zugang sowohl Vertikalschächte als auch Stollen vor. Versiegelungen sind jeweils am Ende der Lagerkammern, im Betriebs- und Lüftungstunnel, sowie bei den Zugangstunneln und Schächten vorgesehen.

Der Zugang zu den HAA Lagerstollen soll durch Aufweitungen der Betriebstunnel ermöglicht werden. Die HAA Lagerstollen sollen als «Blindstollen» ausgeführt werden. Betriebs- und Lüftungsstollen sollen als Fluchtwege dienen, wobei der Zugang zu Obertage über die Zugangstunnel und Schächte erfolgen soll.

Beurteilung der EGT

Die Auslegung der Lager erscheint im Wesentlichen zweckmässig und sinnvoll. Bedenken hat die EGT allerdings bezüglich des Fluchtweges. Es ist im Untertagebau üblich, zumindest einen unabhängigen Fluchtweg zur Tagoberfläche einzurichten, um bei einem gravierenden Ereignis, wie z. B. einem Schlammeinbruch in Bereich der Zugangstunnel/Schächte eine selbständige Rettung der untertage Beschäftigten zu ermöglichen.

Die Abzweiger von den Betriebstunneln in die Lagerstollen führen zu ständig veränderlichen Querschnitten, welche nicht nur aufwendig in der Herstellung sind, sondern auch wegen ihrer Grösse (Spannweite geschätzt bis zu 12m) Stabilitätsprobleme verursachen könnten.

Die Ausführung der HAA-Lagerstollen als Blindstollen führt zu Erschwernissen, da ja im Falle einer Verwendung von Tunnelbohrmaschinen diese im Stollen abgebaut werden müssen.

3.8.2 Vortriebsmethode

Angaben der Nagra

Die Nagra bewertet verschiedene Vortriebsverfahren, wobei das Hauptaugenmerk auf die HAA-Lagerstollen gelegt wird, da grössere Querschnitte mit grosser Wahrscheinlichkeit mit konventionellen Verfahren hergestellt werden müssen. Neben offener Tunnelbohrmaschinen (TBM) werden auch Schildmaschinen mit Tübbingausbau und Spreiztübbingausbau, sowie Teilschnittmaschinen beurteilt. Die Nagra kommt zum Schluss, dass bevorzugt eine sogenannte Microgrippermaschine (NAB 16-46, Fig. A-1) zum Einsatz kommen soll. Bei dieser Maschine sind der Bohrkopf und die Grippereinheit durch einen Schild geschützt. Der Einbau der Stützmittel (Spritzbeton, Stahlbögen und Anker) ist hinter dem Schild in einem Abstand von rund 10m hinter der Ortsbrust möglich. Bei sogenannten Mainbeam TBMs wäre ein beschränkter Einbau von Stützmitteln (Kopfschutz, Versiegelung) in einem geringeren Abstand zur Ortsbrust möglich, allerdings könnte der Ringschluss erst rund 8 Durchmesser hinter der Ortsbrust hergestellt werden (Bereich L2). Andere Methoden, wie Schildmaschinen mit Tübbingausbau werden von der Nagra weniger günstig bewertet, da der Einbau der Stützung erst 2 bis 3 Durchmesser hinter der Ortsbrust möglich ist, und damit schwer detektierbare Auflockerung des Gebirges befürchtet wird. Konventioneller Vortrieb mit Teilschnittmaschine wird als ungünstig bewertet, da aus baulogistischen Gründen Ausweichnischen hergestellt werden müssten, welche später wieder verfüllt werden müssten.

Die Ausführung der Lagerstollen als Blindstollen erfordert einen Rückzug der Maschine durch den gesicherten Stollen.

Für die übrigen Untertagebauwerke ist ein konventioneller Vortrieb mit Sprengen oder bevorzugt mit Teilschnittmaschinen vorgesehen. Für SMA-Lagerkavernen ist ein sequenzieller Vortrieb (Kalotte-Strosse-Sohle) vorgesehen, der Ausbruch soll bevorzugt mit Teilschnittmaschinen erfolgen.

Beurteilung der EGT

Grundsätzlich ist die Argumentation der Nagra bezüglich der präferierten Vortriebsmethode der HAA Lagerstollen mit offener Grippermaschine nachvollziehbar.

Die bevorzugte Microgripper TBM weist allerdings einen relativ langen Schild auf (rund 9 bis 10m). In diesem Bereich ist das Gebirge ungestützt, was eine Auflockerung des Gebirges begünstigt. Der Schutz der Gripper und Vorschubeinrichtung durch den Schild hat allerdings den Vorteil, dass die Verschmutzung durch das Aufbringen des Spritzbetons reduziert ist. Die Ankerung ist aus geometrischen Gründen nur in geotechnisch eher wenig wirksamer Orientierung einzubringen.

Bei der offenen Mainbeam TBM könnte im Bereich hinter dem Bohrkopf (Bereich L1, ca. 2 D hinter Ortsbrust) eine erste Sicherung eingebaut werden, welche die Auflockerung des Gebirges beschränken würde. Allerdings ist ein statisch wirksamer Ausbau in diesem Bereich mit starken Behinderungen des Vortriebes und Verschmutzung der Maschine, insbesondere der Grippereinheit und der Vorschubhydraulik verbunden, weshalb dieser bevorzugt erst in grösserem Abstand von der Ortsbrust eingebaut wird (Bereich L2, > 8D hinter Ortsbrust). Dadurch kann sich das Gebirge praktisch unbehindert deformieren, was zu zusätzlicher Schädigung des Gebirges führen kann. Die Bedingungen für den Ankereinbau sind auch bei diesem Maschinentyp nicht besser als bei der Microgripper TBM.

Dem Vorteil des relativ raschen Ringschlusses bei der Microgripper TBM steht das grössere Potenzial zu Auflockerung durch die wegen der Schildlänge grössere ungestützte Länge gegenüber.

Zu bedenken ist auch, dass die kurzfristige Spannungsumlagerung, und damit die vortriebsinduzierte Deformation des Gebirges in einem Bereich von 2 bis 3 Durchmessern hinter der Ortsbrust stattfindet. Ein Ausbau, welcher erst in einem grösseren Abstand von der Ortsbrust eingebaut wird, entfaltet mangels Gebirgsdeformation zumindest kurzfristig keinen Widerstand, trägt also nicht bis kaum zu einer Reduktion der rein vortriebsbedingten Gebirgsdeformation und Schädigung bei. Ein Widerstand der Auskleidung wird also nur langfristig durch Kriechen des Gebirges aktiviert.

Das Problem der vollständigen Verfüllung des Ringspaltes bei Schildmaschinen mit Tübbingausbau ist bekannt und auch, dass unentdeckte Gebirgsauflockerung im Schildbereich entstehen kann. Andererseits ist der Einbau der Stützung ebenso wie bei der offenen Grippermaschine rund 3 Durchmesser hinter dem Schneidkopf möglich. Die ordnungsgemässe Verfüllung des Ringspaltes kann z.B. mit Mörtel erreicht werden. Allerdings würden Injektionen erforderlich sein, um nicht erkannte aufgelockerte Gebirgsbereiche zu verfüllen. Dies ist sicherlich zeitaufwendig und kostenintensiv.

Bei allen diskutierten Maschinenvortrieben ist eine wirksame Stützung erst mehrere Durchmesser hinter dem Bohrkopf möglich. Unabhängig vom verwendeten maschinellen Vortriebsverfahren ist daher jedenfalls anzustreben, Bereiche mit bereits gestörtem Gebirge für die Lagerstollen zu vermeiden, um eine Schädigung des Gebirges möglichst gering zu halten.

Einen weiteren kritischen Punkt sieht die EGT im Rückzug der Maschine durch den gesicherten Stollen. Dazu ist jedenfalls eine Teildemontage der Maschine erforderlich. Die Herstellung einer in solchen Fällen üblichen Demontagekaverne ist wegen der Ausführung als Blindstollen kaum möglich. Wie die Demontage der Maschine ohne Demontagekaverne bewerkstelligt werden soll, geht aus den Unterlagen der Nagra nicht hervor.

3.8.3 Stützung

Angaben der Nagra

Der Regelausbau von HAA-Lagerstollen soll aus Spritzbeton mit einer Stärke von 15 cm bis 20 cm nach Erfordernis Stahlbögen und Felsbolzen bestehen. Die durchgeführten Berechnungen ergaben, dass bei einem Einbau der Sicherung im Abstand zur Ortsbrust von grösser 3 Durchmessern ein duktiler Ausbau nicht erforderlich ist.

In den Versiegelungsstrecken soll ein ringförmiger Stahlbogenausbau im Abstand von 0.7 m bis 1.0 m mit Bewehrungsnetzen, in der Regel jedoch ohne Spritzbeton Verwendung finden, damit ein satter Anschluss der Versiegelung (Bentonit) an das Gebirge möglich wird. Bei geotechnischen Schwierigkeiten ist eine Versiegelung vorgesehen, welche später geraubt werden soll. Sollte die Errichtung der Zwischensigel geotechnisch nicht möglich sein, kann laut Nagra auch darauf verzichtet werden (NAB 16-41).

Für die Zugangsbauwerke werden Gesamtspritzbetonstärken von 15 cm bis 35 cm vorgesehen, wobei hier bei Bedarf Duktilelemente eingesetzt werden sollen. Gitterträger, bzw. TH Profile sollen bei ungünstigeren Gebirgsverhältnissen Verwendung finden.

Für die SMA-Lagerkammern sind Spritzbetonstärken von 20 cm bis 65 cm vorgesehen, wobei bei Bedarf Duktilelemente Verwendung finden sollen, sowie Gitterbögen und Felsbolzen. In schlechten Gebirgsverhältnissen soll zudem ein Kalottensohlgewölbe eingebaut werden.

Die Beurteilung der Beanspruchung der Auskleidung, bzw. deren Wirkung auf die Deformationen und Auflockerungszone wird einerseits durch numerische 2D und 3D Simulationen, andererseits durch das Kennlinienverfahren bewerkstelligt. Dabei wird für die numerische Simulation ein elastisch-plastisches Verhalten des Spritzbetons angenommen. Die Spritzbetonsteifigkeit wurde beim Kennlinienverfahren mit 7GPa angenommen, um den rheologischen Eigenschaften des Spritzbetons Rechnung zu tragen.

Beurteilung der EGT

Die durchgeführten Abschätzungen von Gebirgs- und Systemverhalten erscheinen nachvollziehbar und stufengerecht. Die Baugrundeigenschaften wurden sehr konservativ eingeschätzt (siehe Kap. 3.9). Der Ansatz von Abminderungsfaktoren für anisotrope Verformungen in Kombination mit Teilsicherheitsbeiwerten für die Stützung führt zu einem (vielleicht zu) grossen Sicherheitspolster.

3.8.4 Versiegelung

Angaben der Nagra

Die Versiegelung von Stollen, Kavernen und Zugängen soll durch ein Sand-Bentonitgemisch erfolgen. Für die Zwischensiegel in den HAA-Lagerstollen ist ein reiner Bentonit/Sandstoppel vorgesehen, während bei den Verschlüssen der Stollen und Zugänge beidseitig eine Übergangszone, welche aus Sand, Schotter und gebrochenem Fels besteht, angeordnet ist.

Als geeignete Randbedingungen für den Einbau der Versiegelungen werden von der Nagra wegen der potenziellen chemischen Reaktionen und Gasentwicklung eine Beschränkung des Einsatzes von zementgebundenen Materialien, Stahl und Organika angegeben. Weiter wäre der Ausbau so zu gestalten, dass möglichst kein loses Material oder Hohlräume das satte Anliegen der Bentonitverfüllung beeinträchtigt.

Im Bereich der Versiegelung schlägt die Nagra weiter vor, den Ausbau in Form von linienförmigen Stützelementen, wie mit Geotextilschläuchen gegen das Gebirge abgestützte Stahlbögen, zu verwenden. Zur Sicherstellung der Arbeitssicherheit sollen Netze zwischen den Bögen dienen. In besonderen Fällen könnte auch eine Spritzbetonversiegelung zur Vermeidung von Auflockerung eingebracht werden, welche allerdings vor Verfüllung mit Bentonit wieder geraubt werden müsste.

Der mit diesem Ausbau verbundene geringe Widerstand und das Potenzial der Auflockerung zwischen der Stützung führen zur Beurteilung, dass die normierten Konvergenzen vor dem Einbau der Sicherung 1% nicht überschreiten sollte.

Beurteilung der EGT

Die EGT sieht mehrere Punkte in Bezug zur vorgeschlagenen Ausführung der Versiegelungsstrecken aus bautechnischer Sicht kritisch. Die linienförmige Stützung durch Stahlbögen stellt sehr beschränkten Ausbauwiderstand zur Verfügung, was in weiterer Folge zu grösseren Konvergenzen und erhöhter Gebirgsschädigung führen kann. Es ist durch die nicht flächige Stützung auch nicht auszuschliessen, dass das Gebirge über die Stahlbögen hinaus nachbricht, die Stützung daher gänzlich unwirksam werden kann. Dies ist nicht nur aus geotechnischer und bautechnischer Sicht, sondern auch aus Sicht der Arbeitssicherheit bedenklich. Jedoch auch im Fall, dass die Bögen den Kontakt mit dem Gebirge nicht verlieren, ist mit einer vermehrten Auflockerung des Gebirges zwischen den Bögen zu rechnen, womit das nachgebro-

chene Material vom Gitter gehalten würde. Dies würde den angestrebten satten Kontakt zwischen Versiegelungsmaterial und Gebirge entscheidend reduzieren, bzw. umfangreiche Nacharbeiten vor der Verfüllung erforderlich machen.

Ein weiterer Punkt, welcher auch von der Nagra kritisch gesehen wird, ist die angestrebte vollständige Verfüllung der Versiegelungsstrecken. Ist eine vollständige Verfüllung mit pumpfähigem Material (zementbasierte Verfüllmittel) schon schwer zu erreichen, ist dies mit losem Material (Bentonitgranulat) in Anbetracht der zwangsläufig entstehenden Auflockerung und des damit verbundenen unregelmässigen Profils noch viel schwieriger. Ein satter Kontakt der Versiegelung mit dem Gebirge wird ohne grösseren Aufwand, wie Entfernen des losen Materials kaum zu erreichen sein.

Die Nagra hat allerdings mittlerweile erkannt, dass die Zwischensiegel nicht jene Bedeutung haben, welche ihnen ursprünglich zugeordnet wurde, und könnte sich vorstellen, auf diese auch gänzlich zu verzichten, sollte die Herstellung problematisch sein.

3.9 Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf bautechnischen Kriterien, insbesondere maximale Tiefenlage

3.9.1 Angaben der Nagra

Die maximale Tiefe der HAA- und SMA-Lager aus bautechnischer und sicherheitstechnischer Sicht stellt ein wichtiges Kriterium für die Optimierung der Lagerperimeter und die Auswahl der Standortgebiete in Etappe 2 dar. Die Nagra revidiert in NAB 16-41 und NAB 16-45 (Nachdokumentation) ihre übergeordneten Nutzungsanforderungen gegenüber dem ursprünglichen Referenzdokument (NAB 14-81). Neu werden in NAB 16-45 unterschieden:

- Unabdingbare Anforderungen «m» (z.B. gesetzliche und behördliche Anforderungen zur Langzeitsicherheit, Vorgaben zu Dosisgrenzwerten)
- Wünschbare Anforderungen «s» (z.B. Anforderungen im Sinne der von den Behörden geforderten Optimierung der Langzeitsicherheit, der Bautechnik und der Verhältnismässigkeit). Diese helfen, das Projekt bezüglich seiner Nachteile zu bewerten.

Die Nagra (NAB 16-45) formuliert 13 Nutzungsanforderungen, welche sich auf die bauliche Sicherheit, Machbarkeit und Gebrauchstauglichkeit (NA-1 – NA-5), die Langzeitsicherheit (NA-6 – NA-11) und die Randbedingungen der Konzeptentwicklung (NA-12 – NA-13) beziehen. Die Erfüllung der NA-1 bis NA-11 wird durch den Projektanten für jedes Projektkonzept und alle relevanten Tiefenlagen untersucht und bewertet. Wesentliche unabdingbare Nutzungsanforderungen, welche durch die Tiefenlage stark beeinflusst werden, sind die Beschränkung der vertikalen Zone um die Lagerkammern mit durch den Ausbruch verursachter Schädigung des Wirtgesteins (NA-7), sowie die Beschränkung der für die Ausbruchssicherung verwendeten Materialmengen an Zement und Stahl (NA-10).

Die Beurteilung der verschiedenen Projektkonzepte basiert auf einer systematischen Analyse der Bauverfahren, Sicherungskonzepte, Baugrundmodelle mit geomechanischen Parametersätzen, Gefährdungsbildern, Nutzungszuständen, Tragwerkskonzepten, Tragwerksanforderungen und Massnahmen (NAB 16-45). Der Einfluss der unterschiedlichen Tiefenlagen wird anhand von Gebirgs- und Ausbaukennlinien für verschiedene Bauverfahren, Baugrundmodelltypen und Ausbausicherungen beurteilt. Für BE/HAA-Stollen kommt Nagra zu folgenden Schlüssen (NAB 16-41):

- Bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse[2], bei denen sich keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei einer allfälligen Rückholung oder beim Verschluss stellen, ergeben sich für die bevorzugten Bauverfahren nur bis in Tiefen von ca. 700 m und bei günstigen Baugrundverhältnissen (Baugrundmodelltypen BGM-1 oder BGM-2).
- Bei ungünstigen Verhältnissen (BGM-3 oder BGM-2 in 900 m) sind gemäss Nagra druckhafte Verhältnisse (Kurzzeitdeformationen bis 5%) bzw. stark druckhafte Verhältnisse (> 5%) anzunehmen, welche die zuverlässige Machbarkeit eines maschinellen Vortriebs mit TBM gefährden könnten. Eine diesbezügliche Aussage von grosser Zuverlässigkeit ist nach Nagra heute nicht möglich, Gewissheit werden erst Teststollen auf Lagerebene geben können. Im Sinn der Vorsicht macht die Nagra einen Vorbehalt, ob in 900 m u.T. ein maschineller Vortrieb sowohl mit TBM-Gripper als auch Schild-TBM vernünftig ausführbar ist.

Die Nagra kommt darum wie in NAB 14-81 zum Schluss, dass für die Optimierung der Lagerperimeter geringere Tiefenlagen verwendet werden sollten als die Mindestanforderungen und Verschärften Anforderungen in SGT Etappe 1 und zwar für das HAA-Lager ≤ 700 m u.T. und das SMA-Lager ≤ 600 m u.T. Als 'günstig' gilt nach Nagra neu 600 bis 700 m für das HAA-Lager und 500 bis 600 m für das SMA-Lager. Weniger tiefe Bereiche gelten als 'sehr günstig'. In der Nachlieferung (NAB 16-45) werden diese Vorgaben an die Bewertung des Indikators «Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit» für den Vergleich der 3 HAA-Standortgebiete wie folgt konkretisiert:

Für die zuverlässige Verwendung einer offenen TBM mit Gripper[3] und für den zuverlässigen und qualitativ befriedigenden Einbau der Zwischensiegel werden die Bedingungen im Standortgebiet Nördlich Lägern (NL) im Vergleich zu den Bedingungen in den Standortgebieten Zürich Nordost (ZNO) und Jura Ost (JO) aus folgenden Gründen als weniger günstig beurteilt:

- Die Untersuchungen zeigen, dass trotz tiefenabhängiger Verbesserung der Gebirgseigenschaften das Gebirgsverhalten mit der Tiefe deutlich ungünstiger wird.
- Die grosse Tiefe führt voraussichtlich zu Auflockerungen und verdeckten Hohlräumen, welche für die technischen Barrieren und das Wirtgestein nachteilig sind.
- Die grössere Tiefenlage in NL in Kombination mit dem Baugrundmodelltyp BGM-2 und insbesondere mit dem Baugrundmodelltyp BGM-3 ist mit dem bevorzugten Bauverfahren (TBM mit Gripper) nur mit Vorbehalten zuverlässig machbar.
- Falls als Folge davon ein TBM-Schildvortrieb mit Tübbingausbau gewählt werden müsste, sind die Nachteile aus Sicht Langzeitsicherheit bezüglich verbleibender Hohlräume hinter dem Tübbingausbau sowie höherer Zementmengen in Kauf zu nehmen.
- Die Alternative eines auf die Tiefe und den Baugrundmodelltyp BGM-2 und insbesondere auf den Baugrundmodelltyp BGM-3 abgestimmten Bauverfahrens im konventionellen Vortrieb ist bezüglich Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz anspruchsvoll und führt zu einem Realisierungsplan, welcher mit der Planung nicht kompatibel ist.

[2] Einfach beherrschbare Verhältnisse für den Bau der BE/HAA-Lagerstollen sind dann gegeben, wenn ein maschineller Vortrieb mit einer TBM-Grippermaschine in einem Industrie-ähnlichen Ablauf ohne grosse Behinderung durch Ablösungen im L1 und beschränkter Sicherung möglich ist. Nur mit diesem Verfahren sind einerseits die aus Sicht der Langzeitsicherheit angestrebten Einbaubedingungen für die technischen Barrieren (Meidung von losem Material und verbleibenden Hohlräumen, Einbau von Zwischensiegeln) vernünftig umsetzbar und andererseits die gemäss übergeordnetem Realisierungsprogramm vorgesehenen Bauzeiten mit verhältnismässigem Aufwand und zuverlässiger Arbeitssicherheit zu realisieren.

[3] Das nach Nagra bevorzugte Bauverfahren.

- Zwischensiegel mit Stahlbögen erfordern in der grossen Tiefe tunnelstatisch eventuell einen kleinen Bogenabstand; dann wäre die anforderungsgemässe Funktion der Zwischensiegel in Frage gestellt.
- Die voraussichtlich beschränkten Möglichkeiten der Anpassung der Orientierung der Lagerkammern im Spannungsfeld aufgrund des beschränkten Platzangebotes, wo auch die zu erwartenden anordnungsbestimmenden Störungszonen zu berücksichtigen sind.
- Der im Standortgebiet NL fehlende Handlungsspielraum und die – mit oder ohne Nutzung der zu meidenden tektonischen Zone – fehlende Möglichkeit bei Bedarf die maximale Tiefenlage reduzieren zu können, wird als wenig günstig eingestuft.
- In der Nachlieferung NAB 16-42 werden alternative Lager- und Barrierenkonzepte diskutiert, welche von der Nagra bis auf alternative Verfüllkonzepte verworfen werden. Eine solche Zement-basierte Verfüllung des Hohlraums zwischen Lagerbehälter und Stützmittel anstelle einer Bentonitgranulat-Verfüllung weist nach Nagra (NAB 16-42) folgende Vor- und Nachteile auf:

Bentonit

- Gut untersucht (>20 Jahre)
- Hoher Quelldruck und Selbstabdichtung OPA
- Langfristig chemisch stabil
- Hitzeempfindlich 100°C
- Sulfat-reduzierende Barrieren
- Tiefer pH-Wert (starke Korrosion der Lagerbehälter)
- Sorptionseigenschaften am Kontakt zu Zement reduziert

Zement-basiertes Verfüllmaterial

- Langfristig chemisch instabil
- Hoher pH-Wert (geringe Korrosion der Lagerbehälter)
- Keine Einschränkung zementbasierter Stützmittel
- Weniger gut untersucht
- Kein aktiver Quelldruck und geringere Selbstabdichtung OPA
- Hitzeempfindlich ab 100°C
- Hydrogensulfid (HS^-) zerstört den Endlagerbehälter und entsteht durch mikrobiologische Reduktion von Sulfat, welches im Porenwasser vom OPA vorhanden ist und durch Oxidation von Sulfid-Mineralien während Bau und Betrieb entsteht. Sulfat-reduzierende Bakterien sind nach Nagra aktiv, wenn genügend grosse Poren und Wasseraktivität vorhanden sind. In einer Zementumgebung sind Sulfide aber stabil.

3.9.2 Beurteilung der EGT

Die EGT unterstützt die Einschätzung der Nagra, dass die wesentlichen Indikatoren zur Bewertung der maximalen Tiefenlage die Ausdehnung der Auflockerungszone (respektive die ungestörte vertikale Migrationsdistanz) im Wirtgestein, sowie die aus Gebirgskennlinien abgeleitete gemittelte Tunnelkonvergenz sind. Grundsätzlich wichtig bei diesen Analysen sind zutreffende Annahmen zu den Gebirgskennwerten (inklusive tektonischer Trennflächen) und Spannungszuständen in den verschiedenen Standortgebieten und Tiefenlagen. Zusätzlich von Bedeutung bei den tonreichen Wirtgesteinen sind die hydromechanische Koppelung sowie die Sättigungszustände des Gebirges, welche beide die Ausbildung der Auflockerungszone massgeblich beeinflussen. Die Bewertung der maximalen Tiefenlage aus bautechnischer Sicht wird in separaten Berichten der ETH Zürich (ENSI 33/460; ENSI 33/531) im Detail begründet.

Gesteins- und Gebirgskennwerte

Die in der Nachlieferung revidierten Gesteins- und Gebirgskennwerte des Opalinustons (NAB 16-43) werden in ENSI 33/531 im Detail analysiert und bewertet. Die verwendete felsmechanische Datenbasis wird im Sinne der Prüfexperten auf wenige belastbare Versuche reduziert und ein gegenüber NTB 14-02-IV neuer Parametersatz entwickelt. Die Kennwerte des Gebirges auf Projektskala werden konzeptuell in drei verschiedene Gebirgsklassen (oder nach Nagra «Gebirgsmodelle») GMmin, GMref und GMmax) sowie in Baugrundmodelle (BGM-1 bis BGM-3) eingeteilt. Die grossen Unsicherheiten in der felsmechanischen Datenbasis werden durch 3 neue Gebirgsmodelle beschrieben und die Tiefenabhängigkeit der Gebirgskennwerte wird explizit im kritischen Tiefenintervall (600-900 m) berücksichtigt.

Die Nagra leitet die Gebirgsmodelle auf Grundlage eines Critical State Modells (CSM) ab, was eine Abschätzung intrinsischer und tiefenabhängiger Materialeigenschaften über die Porosität und das volumetrische Verhalten (Resultate aus Ödometerversuchen) ermöglicht. Nach Ansicht der Experten bildet das gewählte Modell wichtige Aspekte des Verhaltens des Opalinustons ab (vergleiche ENSI 33/461). Für die generelle Gültigkeit und Anwendbarkeit des Stoffansatzes für Opalinuston fehlen jedoch geomechanische Belege. Es ist zudem fragwürdig, ob das für Lockergesteine entwickelte Critical State Modell auf intakten, diagenetisch zementierten Opalinuston (Favero et al. 2016) anwendbar ist.

Das Verfahren der Nagra zur Herleitung der geomechanischen Eigenschaften gemäss CSM beruht zu einem erheblichen Teil auf Ergebnissen von Ödometerversuchen sowie auf empirischen Abschätzungen. Die massgebenden Ergebnisse dieser Abschätzung (undrainierter und drainierter E-Modul, effektive Kohäsion c‘ und undrainierte Scherfestigkeit cu) sind weitgehend insensitiv auf Parameter aus den Ödometerversuchen, jedoch sehr sensitiv gegenüber Resultaten, welche mittels triaxialen Druckversuchen erhoben werden könnten. Die Nagra bestätigt die Bewertung der Experten des ENSI weitgehend, indem bei ihrer Nachlieferung nur noch die gemäss NAB 13-45 mit Qualität B gekennzeichneten Triaxialversuche von NAB 13-18 berücksichtigt wurden. Die vorhandenen 4 Ödometerversuche an Proben der Bohrung Schlattingen (NAB 12-50) wurden im Rahmen der Nachlieferung der Nagra durch weitere 3 Ödometerversuche ebenfalls an Proben der Bohrung Schlattingen ergänzt, die zusätzliche Aussagen zu den Steifigkeitsparametern (E-Modul), nicht jedoch zu den Festigkeitsparametern (Kohäsion, Reibungswinkel) erlauben. Insgesamt verbleibt eine stark eingeschränkte geomechanische Grundlage.

Die spärliche Datengrundlage zu den standortspezifischen geomechanischen und geologischen Verhältnissen sowie die Superposition von vorwiegend konservativen Annahmen (abdeckende effektive Festigkeit und Steifigkeit gemäss GMmin, vereinfachende Berechnungsannahmen) erlauben keine abschliessende und belastbare quantitative Beurteilung der maximalen Tiefenlage im Hinblick auf den Nachweis eindeutiger Nachteile aus bautechnischer Sicht (ENSI 33/531). Die für die Argumentation von der Nagra verwendeten geomechanischen Kennwerte und vereinfachten Berechnungsannahmen (effektive Festigkeiten der Bettung, E-Modul normal zur Schichtung) werden von den Experten als nicht belastbar bzw. zu konservativ beurteilt. Dies betrifft insbesondere die Annahme, dass GMmin für gesamte Standortgebiete massgebend ist, den nicht stichhaltigen Ausschluss von GMmax für die Beurteilung der Tiefenlage, die verbleibenden grossen Unsicherheiten bei den tiefenabhängigen effektiven Festigkeiten und Steifigkeiten, sowie die ungünstigen Annahmen zu den geomechanischen Kennwerten in numerischen Berechnungen der Tunnelkonvergenz (ENSI 33/531).

Gefährdungsbilder

Die von der Nagra prioritär erwarteten (d.h. relevanten) Gefährdungsbilder (NAB 16-44) umfassen gravitative Auflockerungen und Ablösungen, welche durch bestehende Trennflächen

und/oder neue Bruchprozesse kontrolliert werden, sowie druckhaftes Gebirge. Letzteres betrachtet die EGT als unwahrscheinlich, da druckhaftes Gebirge sogar im Grenchenbergtunnel bei 800 m Überlagerung im Faltenjura nicht beobachtet wurde. Gemäss Konzept der Nagra ergeben sich aber in dieser Tiefe für die entsprechenden Kennwerte und Kennlinien stark druckhafte Verhältnisse.

Spannungsbedingungen

Die regionale Verteilung der Spannungsorientierungen in der Nordschweiz wurde durch die Nagra systematisch aufgrund von Bohrlochrandausbrüchen und Hydrofrac-Versuchen kompiliert und mit Paläospannungs-Analysen und Modellrechnungen verglichen. Die regionalen Analysen der Spannungsmagnituden sind sorgfältig dokumentiert. Die lokalen Spannungsverhältnisse in den Standortgebieten und kleinräumige Spannungsheterogenitäten werden nicht systematisch beschrieben; dafür decken die verwendeten Spannungs-Szenarien die zu erwartenden Bandbreiten konservativ ab.

Auswirkungen alternativer Barrierenkonzepte auf die maximale Tiefenlage

Während die bautechnische Machbarkeit eines Tunnels in tonreichen Gesteinen wie dem Opalinuston selbst bei stark druckhaften Verhältnissen in tektonisch gestörten Zonen bis in grosse Tiefenlagen (> 1'000 m u.T.) gegeben ist, unterliegt die Bewertung der bautechnischen Eignung eines HAA-Tiefenlagers Einschränkungen der zur Verfügung stehenden Stützmittel. Ein gutes Beispiel für den Bau grosser Tunnels in 1'000 m Tiefe in einem Gebirge mit sehr geringer Festigkeit ist der Gotthard Basistunnel im nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv.

Im Fall der HAA-Lagerstollen sollen im Rahmen von Optimierungsanforderungen für die Langzeitsicherheit (z. B. Gasbildung, Lösungshohlräume, geochemische Alterationen von Bentonit und Wirtgestein) wichtige klassische Sicherungsmittel (Zement, Stahl, Organika) mengenmässig eingeschränkt werden. Diese Optimierung umfasst nach Nagra (NAB 14-81) eine Begrenzung der Spritzbetonstärke auf 30 cm, sowie eine nicht quantifizierte Beschränkung der Menge an Stahl und Organika in den Stützmitteln (wie zum Beispiel GFK Anker). Zudem wirken sich unerwünschte Ereignisse wie Niederbrüche oder eine weit ausgedehnte Auflockerungszone, die im klassischen Tunnelbau beherrscht werden oder von geringer Relevanz sind, auf die Langzeitsicherheit negativ aus.

Die EGT geht heute davon aus, dass die von der Nagra in NAB 16-42 vorgeschlagenen Zement-basierten Verfüllungen keine nennenswerten Auswirkungen auf die resultierende bautechnische Gebirgsschädigung und die Standorteinengung in Etappe 2 SGT haben, da sich die grossen Gebirgsdeformationen schon im Ausbruchsbereich ergeben. Langfristige Verformungen und sicherheitstechnische Auswirkungen alternativer Verfüllungen sollten in Etappe 3 vertieft untersucht werden.

Fazit

Die EGT erachtet die Nachdokumentation zur Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit als wertvolle Zusatzinformation zur Bewertung der maximalen Tiefenlage. Diese Zusatzdokumentation beinhaltet eine umfassende Beschreibung und stufengerechte Analyse von geotechnischen Kennwerten, geologischen Baugrundmodellen, Gefährdungsbildern, Nutzungsanforderungen, bautechnischen Massnahmen, sowie dem Gebirgs- und Systemverhalten. Die EGT kommt aber zum Schluss, dass die Berechnungen zum Gebirgs- und Systemverhalten in unterschiedlicher Tiefenlage und Standortgebieten auf einem überkonservativen geotechnischen Kennwertesatz sowie ungünstigen Annahmen zu den geomechanischen Kennwerten in numerischen Berechnungen beruhen.

3.10 Auswirkungen der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit des SMA- und HAA-Lagers

3.10.1 Angaben der Nagra

Vorgehenskonzept

Die Langzeitentwicklung der Auflockerungszone (AUZ) wird durch die Nagra primär im Rahmen von numerischen Simulationen der Selbstabdichtung, d. h. der langfristigen Reduktion der Porosität und hydraulischen Leitfähigkeit in der Auflockerungszone diskutiert (NAB 13-78; NAB 14-87; NTB 14-02-IV). Für den Zustand nach dem Vortrieb bis zu einer vollständigen Lageraufsättigung werden Porositäten und Durchlässigkeiten einer homogenisierten radialsymmetrischen AUZ entlang der HAA-Lagerstollen (nicht der Zwischensiegel) und Schächte simuliert. Diese radialsymmetrische Konzeptualisierung der AUZ entspricht jener der Lagerdurchfluss- und Radionuklidtransportberechnungen in NTB 14-10. Die hydraulischen Annahmen in diesen Berechnungen zur Langzeitsicherheit gehen von einer hydraulischen Durchlässigkeit der AUZ im Basisfall von $1 \cdot 10^{-12}$ m/s aus. Parametervariationen decken den Bereich bis zu einer hydraulischen Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ m/s ab. Aus diesen Parametervariationen ergibt sich, dass bei sehr hohen Durchlässigkeiten der Durchfluss durch die AUZ durch den vertikalen Zufluss aus der intakten geologischen Barriere beschränkt wird, und dass die AUZ um die verfüllten Untertagebauwerke einen unbedeutenden Freisetzungspfad darstellt, solange das hydraulische Leitvermögen kleiner als rund $1 \cdot 10^{-7}$ m^3/s ist (NAB 14-81; NTB 14-10).

Die sichertechnische Bewertung der Auflockerungszone für die Ermittlung der *maximalen Tiefenlage* erfolgt durch die bautechnischen Entwurfsindikatoren 1 und 2 (Kapitel 3.9). Für HAA-Stollen und Zwischensiegel wird die aus NTB 14-10 abgeleitete hydraulische Leitvermögen von kleiner als rund $1 \cdot 10^{-7}$ m^3/s gefordert, entsprechend einer Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-8}$ m/s und einer Durchflussfläche von 7 m^2. Nach NAB 14-81 (S. 6) wird diese geforderte hydraulische Durchlässigkeit bei mittleren Tunnelkonvergenzen mit/ohne Ausbau von kleiner als 4% eingehalten.

Die Bewertung der Auswirkungen der AUZ auf die *Langzeitsicherheit* erfolgt mit dem Indikator 29 ('Auflockerungszone im Nahbereich der Untertagebauten'). Die Bewertung dieses Indikators beruht auf der Grösse und Transporteigenschaften der Auflockerungszone, des Selbstabdichtungsvermögens und der Relevanz für den Radionuklidtransport (NTB 08-05, A1-103). Aufgrund des ausgeprägten Selbstabdichtungsvermögens des Opalinustons bewertet die Nagra diesen Indikator in allen HAA-Standortgebieten (vor und nach der Lageroptimierung) als 'sehr günstig'. Die Bewertung dieses Indikators für alle SMA-Standortgebiete (NTB 14-01, Tabelle 3.3-1) erfolgt mit 'günstig', und variiert zwischen 3.5 (Opalinuston Nordschweiz, nach der Lageroptimierung) und 3.1 (Wellenberg).

Modellrechnungen zur Selbstabdichtung

Die Modellrechnungen zur Selbstabdichtung der AUZ basieren auf einem geomechanischen Rissnetzwerksimulator (Y-Geo, FEMDEM), dessen Parameter aufgrund von einaxialen Druck- und Zugversuchen geschätzt wurden (NAB 13-78). Effekte des 3-dimensionalen Tunnelvortriebs werden durch die klassische Stützkernmethode, Quelldrucke im Bentonit durch einen vorgegebenen Stützdruck (zwischen 0.2 MPa und 10 MPa, entsprechend der horizontalen Minimalspannung) approximiert. Eine maximale zulässige radiale Tunnelverformung von 3-4% wird als Randbedingung für den Zeitpunkt des Einbaus der Stützmittel (Spritzbeton) verwendet.

Die Gebirgskennwerte für Lagerstollen- und Schachtmodelle werden gegenüber den aus Laborversuchen kalibrierten Kennwerten angepasst, da die mit den Laborwerten simulierten Risslängen und Rissdichten weit über den im Felslabor Mont Terri beobachteten Werten liegen. Da keine Kalibration mit Felddaten erfolgt, wird die Erhöhung der Kohäsion, Zugfestigkeit und Rissenergie um einen Faktor 2 bis 5 im Rahmen einer Sensitivitätsstudie untersucht. Eine hydro-mechanische Koppelung und Quellprozesse im Opalinuston werden in diesen geomechanischen Simulationen nicht berücksichtigt. Simulationen der Rissmuster und Konvergenzen (Kennlinien) werden für eine grosse Anzahl von felsmechanischen Kennwerten und Spannungszuständen durchgeführt. Die simulierten Rissdichten liegen um einen Faktor 5 bis 10 höher als die beobachteten Rissdichten in der AUZ.

Aus diesen geomechanischen Modellen werden die Rissaperturen extrahiert und in eine zellbasierte Risstransmissivität (mittels Cubic Law) und Rissporosität überführt, welche für die Simulation der Auswirkungen der Wiederaufsättigung der AUZ mit einem Finite Element Model verwendet werden (NAB 13-94). In diesen Modellrechnungen werden die hydraulischen Matrixparameter (mittlere Durchlässigkeit $1 \cdot 10^{-13}$ m/s) als bekannt vorausgesetzt. Die Rissaperturen α(t) werden in Funktion der simulierten Porenwasserdrucke p(t) während der Aufsättigung verändert:

$$a(t) = a_0 - \frac{\Delta p(t)}{a_0 K_{n0} \Delta p(t)^{\alpha} + \Delta p(t)}$$

Diese Gleichung soll den Quellprozess in den Rissen wiedergeben, basiert aber auf der Gleichung der hydro-mechanisch gekoppelte Rissschliessung als Funktion der effektiven Normalspannungen (nicht Kluftdrücken), der initialen Riss-Öffnungsweite α_0 und Kluft-Normalsteifigkeiten K_{n0} von Bandis et al. (1983). Für die Simulationen wurden die geometrischen und mechanischen Kluftparameter so festgelegt, dass nach der vollständigen Wiederaufsättigung (Δp=7.8 MPa) eine Gebirgsdurchlässigkeit entsteht, welche der intakten Matrix entspricht. Daraus ergibt sich schliesslich auch der Wert des Parameters α, welcher die Zeitkonstanten der Wiederaufsättigung kontrolliert.

Labor- und in-situ Experimente zur Selbstabdichtung

An neuen Opalinuston-Proben der Bohrung Schlattingen-1 wurden wichtige ödometrische Kompressionsversuche zum Konsolidations- und Quellverhalten durchgeführt (NTB 14-02-IV; NAB 12-50). Diese Versuche führen zur Bestimmung von Indices, welche Kenngrössen der primären und sekundären Konsolidation darstellen und auch Hinweise auf die intrinsische Durchlässigkeit, die Quelleigenschaften und Versenkungsgeschichte (Überkonsolidation) der Proben erlauben (Tabelle 3-1). Das Überkonsolidationsverhältnis für potenzielle Lagertiefen in der Nordschweiz liegt nach diesen Versuchen zwischen 2.0 und 3.5. Die Quelldrücke und Quellhebungen des Opalinustons wurden zusätzlich in Quell-Versuchen ermittelt. Diese zeigen ein stark anisotropes Verhalten.

Tabelle 3-1: Konsolidations- und Quellindices nach NAB 14-01 * Wert nach Nagra mit Vorsicht zu behandeln

Index	Untergrenze	Obergrenze	Referenz
Kompressionsindex C_c	0.02	0.09	Chiffoleau und Robinet 1999; NAB 12-50
Quellindex C_s	0.007	0.017	Chiffoleau und Robinet 1999; Nagra 2002
Kriechindex C_a		0.001*	Nagra – Favero, persönliche Auskunft
Quellhebung S_ε (%) P-Orientierung	1.4	9	Nagra 1999; Vögtli und Bossart 1998
Quelldruck p_s (MPa) P-Orientierung	0.1	0.2	NAB 12-50; Vögtli und Bossart 1998
Quellhebung S_ε (%) S-Orientierung	0.7	11	NAB 12-50; Nagra 1999
Quelldruck p_s (MPa) S-Orientierung	0.4	1.4	NAB 12-50; Vögtli und Bossart 1998

Die Nagra hat in den vergangenen Jahren auch eine Vielzahl von untertägigen in-situ Versuchen zur hydraulischen Durchlässigkeit und zur Selbstabdichtung der AUZ im Opalinuston ausgeführt oder kompiliert (Zusammenfassung in NAB 13-94). Die Versuche EH, SE, GS und HG-A im Felslabor Mont Terri zeigen nach Nagra (Marschall et al. 2013; NAB 13-94; NTB 14-02-IV) folgende Befunde:

- Die initiale Durchlässigkeit in der konturnahen AUZ (20-40 cm) um Stollen im Felslabor Mont Terri ist gegenüber dem intakten Opalinuston um 6 bis 7 Grössenordnungen erhöht. In diesem Kapitel beträgt die makroskopische Rissfrequenz etwa 10 m^{-1}.
- Für einen mit Spritzbeton gesicherten Stollenbereich reduzieren sich die Transmissivitäten der (gesamten) AUZ während einer Beobachtungsdauer von 800 Tagen von $5 \cdot 10^{-7}$ m^2/s auf $2 \cdot 10^{-9}$ m^2/s.
- In derselben Tunnelstrecke reduzieren sich die Transmissivitäten unter einem Stützdruck von 1 bis 5 MPa (Plattendruckversuch) weiter bis zu $2 \cdot 10^{-11}$ m^2/s.
- Unter einem Packerdruck von 2.5 bis 3 MPa reduzieren sich während etwa 6 Jahren die auf 1 m^2 normierten Durchlässigkeiten der AUZ um ein Grossbohrloch von 1 m Durchmesser von $1 \cdot 10^{-7}$ auf $2 \cdot 10^{-11}$ m/s.
- Sobald bei einem Fluidinjektionsdruck von etwa 1.5 MPa die Packerdrucke auf diese AUZ unter einen Wert von etwa 2.5 MPa fallen, erhöhen sich die Durchlässigkeiten der AUZ gegenüber dem konsolidierten Wert wieder relativ rasch.

3.10.2 Beurteilung der EGT

Die Selbstabdichtung stellt eine phänomenologische Beobachtung der Reduktion der Porosität und hydraulischen Leitfähigkeit in natürlichen (tektonischen Störungen) und künstlichen Schwächezonen (Auflockerungszonen) dar. Die dieser Beobachtung zugrunde liegenden Prozesse (Primär- oder Sekundärkonsolidation, Quellprozesse, Desintegration) sind bis heute nicht genau verstanden. Die Selbstabdichtung wird von der Nagra als fundamental wichtige Eigenschaft des Wirtgesteins betrachtet, mit dem Tonmineralgehalt korreliert, und in den Bewertungen zur Standorteinengung in Etappe 2 sehr stark gewichtet. Ebenso erhält der Radionuklidtransport in der Auflockerungszone bei der Nagra durch die geplanten Zwischensiegel und ihre Entwurfsindikatoren eine sehr grosse Bedeutung.

Die neuen Konsolidations- und Quellversuche an Proben der Bohrung Schlattingen-1 sind wertvolle Ergänzungen der früheren Datensätze über das Quell- und Konsolidationsverhalten des Opalinustons sowie die Belastungsvorgeschichte in der Nordschweiz. Die Quelldrücke

entsprechen den Wertebereichen anderer Langzeitversuche (Langzeitversuche von 900 Tagen des Instituts für Geotechnik/ETH für Proben des Belchentunnels) und in-situ-Messungen. Die in NAB 14-01 ausgewiesenen Quellhebungen des Opalinustons sind im Vergleich zu diesen Langzeitversuchen der ETH sehr tief. Auch nach 900 Tagen sind Quelldrücke und Quellhebungen noch nicht abgeschlossen.

Die in-situ Versuche zur Selbstabdichtung bestätigen grundsätzlich, dass Konsolidations- und Quellprozesse zu einer signifikanten Reduktion der initial sehr hohen Durchlässigkeit der AUZ führen. Die in-situ Versuche erlauben es heute aber nicht, die dieser «Selbstabdichtung» zugrunde liegenden Prozesse (Primär- oder Sekundärkonsolidation, Quellprozesse, Desintegration) im Detail zu belegen und zu quantifizieren.

Die Modellrechnungen zur Selbstabdichtung der AUZ (NAB 13-78 und NAB 14-81) tragen keine neuen wichtigen Erkenntnisse zu dieser Thematik bei und sollten nicht als Grundlage von Sicherheitsanalysen verwendet werden. Die Modellrechnungen basieren auf fragwürdigen konstitutiven Beziehungen (u. a. Skalen-, 3D- und Netzeffekte, fehlende hydro-mechanische Koppelung im Risssimulator; Kluftschliessgesetz im Fliessmodell). Modellparametrisierungen und Annahmen über Randbedingungen wurden nicht aufgrund von Versuchsresultaten festgelegt, sondern derart, dass Vorgaben zur maximalen Tunnelkonvergenz oder Selbstabdichtung der AUZ bei vollständiger Aufsättigung erreicht werden. Ebenso sollte die zeitliche Entwicklung der Selbstabdichtung sowie die Geometrie und Ausdehnung der AUZ nicht aus diesen Simulationen abgeleitet werden.

Die neuen Modellrechnungen zum Radionuklidtransport in der Auflockerungszone (NTB 14-10) bestätigen grundsätzlich frühere Modellresultate der Nagra und ihrer Prüfbehörden. Die Beiträge der Untertagehohlräume zum Radionuklidtransport nehmen mit zunehmender Durchlässigkeit der AUZ zu (bei einer doppelt-logarithmischen Betrachtung). Die Berechnungen in NTB 14-10 zeigen, dass die AUZ um die verfüllten Untertagebauwerke gegenüber dem vertikalen Transport durch den Opalinuston einen weniger wichtigen Freisetzungspfad darstellt, solange die hydraulische Durchlässigkeit der AUZ kleiner als $1 \cdot 10^{-8}$ m/s ist. Ab einer Durchlässigkeit von $1 \cdot 10^{-6}$ m/s und grösser bleiben die berechnen Dosen stabil, da dann der Zufluss durch den Opalinuston die Abflüsse der Radionuklide kontrolliert. Die langfristig geforderte hydraulische Leitfähigkeit von maximal $1 \cdot 10^{-8}$ m/s sollte bei entsprechenden technischen Massnahmen im Tunnelvortrieb an allen Standortgebieten eingehalten werden können. Das Einhalten von dieser Anforderung hängt primär davon ab, ob und mit welchen technischen Mitteln grössere Ausbrüche im Stollenvortrieb (insbesondere den Zwischensiegeln) verhindert und allenfalls wirksam verfüllt werden können.

Wie die wenigen in-situ Versuche zur Selbstabdichtung zeigen, ist der Betrag und die räumliche Verteilung der Stützdrücke wesentlich für eine signifikante Reduktion der hydraulischen Leitfähigkeit der Auflockerungszone. Die für eine signifikante Reduktion der Durchlässigkeit notwendigen Stützdrücke können vermutlich durch herkömmliche, für das HAA-Lager vorgesehene Sicherungsmittel und insbesondere auch in den Versiegelungsstrecken nicht durch Stahlbögen erreicht werden, sondern nur durch den quellenden Bentonit. Demzufolge ist mit einer signifikanten Selbstabdichtung erst bei beginnendem Quellen des Bentonits zu rechnen. Während Bau und Betrieb ist demzufolge die Beherrschung von grösseren Ausbrüchen und Schädigungen von zentraler Bedeutung.

3.11 Abgrenzung der Lagerperimeter

3.11.1 Angaben der Nagra

Das Platzangebot an einem Standort wird für die optimierten Lagerperimeter angegeben, die durch hinreichenden Abstand von regionalen Störungen, Meidung von tektonisch stärker überprägten Zonen, Mindestanforderungen an die Mächtigkeit des Wirtgesteins und die minimale und maximale Tiefenlagen kontrolliert werden. Die Kriterien der Optimierung werden nicht als harte Ausschlusskriterien, sondern als weiche Optimierungsanforderungen verstanden.

Die Kriterien für die angestrebte maximale Tiefenlage (Kapitel 3.9), welche im Wesentlichen aus Anforderungen an die Stabilität und Sprödverformung des Gebirges stammen, sind für das SMA-Lager 600 m u.T. (herabgesetzt von 800 m in Etappe 1) und für das HAA-Lager 700 m u.T. (herabgesetzt von 900 m in Etappe 1). Die Tiefenangaben beziehen sich auf den Abstand zwischen Lagerebene und Terrainoberkante. Allerdings werden diese «neuen» Werte nicht durchgängig eingehalten. Zum Beispiel wird der massgebende Lagerperimeter für das HAA-Lager Nördlich Lägern durch eine maximale Tiefenlage von 800 m bestimmt.

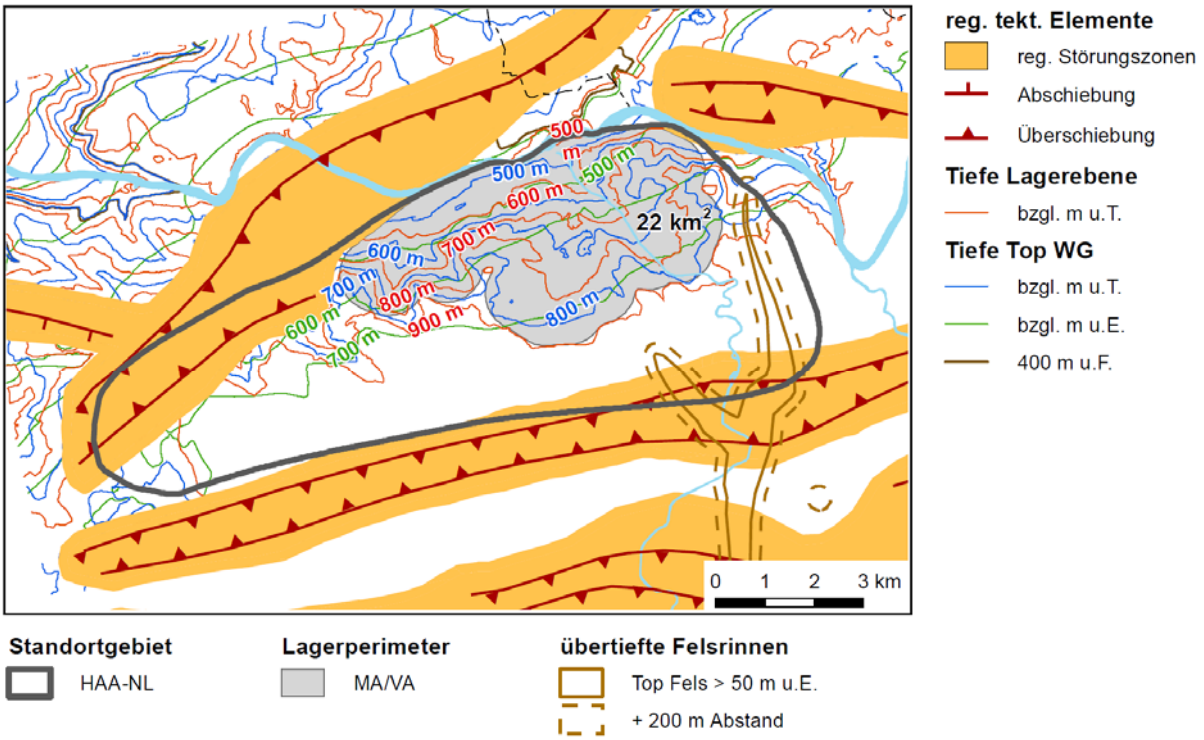
Für die angestrebte minimale Tiefenlage werden drei Effekte berücksichtigt (Kapitel 3.2): (1) Vermeidung von signifikanter Gesteins-Dekompaktion. Dies resultiert nach Nagra in einem minimalen Abstand zwischen Top Opalinuston und Terrainoberkante 350 m für das SMA-Lager und 450 m für das HAA-Lager (NTB 14-01 S. 167 ff). Bzgl. Erosion wird mit dem Einschneiden des Hauptflussnetzes wegen einer möglichen (2) flächenhaften Abtragung der Topographie und (3) mit der Bildung von Durchbruchsrinnen als Folge von Vergletscherungen gerechnet (NTB 14-01, S. 169 ff). Der erste Punkt ist abgedeckt, wenn die Anforderungen an die Dekompaktion erfüllt sind. Der zweite Punkt erfordert folgende Tiefenlagen des Top Opalinuston unter dem heutigen Erosionsniveau (u.E.): SMA (SR, J-SF): mindestens 100 m u.E., SMA (NL, Z-NO): mindestens 150 m u.E., SMA (JO): keine Anforderung, HAA (NL, Z-NO): mindestens 350 m, HAA (JO): mindestens 200 m. Weiterhin wird für den dritten Punkt die Vertiefung bestehender glazialer Rinnen berücksichtigt, bei der die Tiefe des Top Opalinuston unter Fels (u.F.) erheblich ist. Die Mächtigkeit des Opalinustons wird aus Bohrungen abgeschätzt (NTB 14-01, S.77 ff und NTB 14-02-VI, S. 134 ff). Die Referenzwerte sind: Südranden 105 m, Zürich Nordost 110 m, Nördlich Lägern 110 m, Jura Ost 110 m, Jura-Südfuss 90 m.

Die Abgrenzung der Lagerperimeter erfolgt in zwei Schritten, deren erster Schritt die Anwendung der Mindest- und verschärften Anforderungen der Etappe 1 (auf die neuen Daten) darstellt, auf den der zweite Schritt der Optimierung folgt. Beispielhaft sei dies am HAA-Lagerperimeter Nördlich Lägern illustriert.

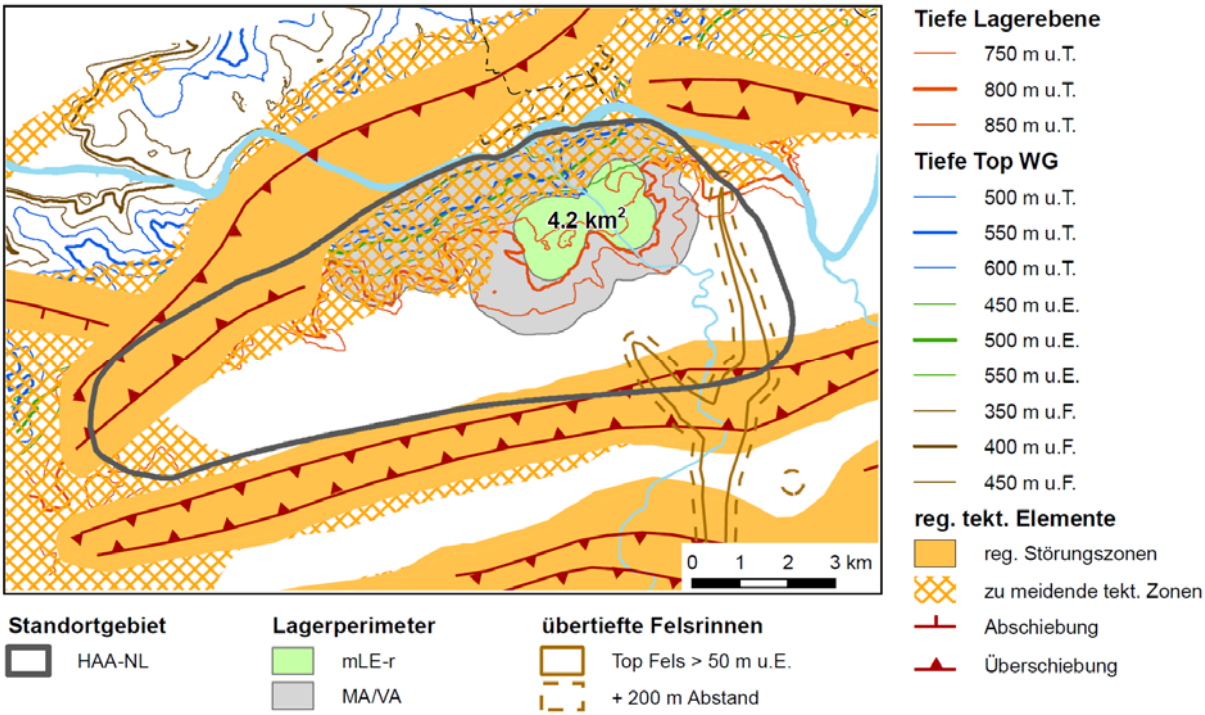
Figur 3-5 zeigt die Isolinien der verschiedenen Kriterien für die Tiefenlage. Die maximale Tiefe war in Etappe 1 durch 900 m Tiefe der Lagerebene unter Terrainoberkante bestimmt. Die entsprechende braune Isolinie begrenzt den Lagerperimeter nach Süden; die nördliche Begrenzung ist durch die in den Objektblättern zu Etappe 1 festgehaltenen Grenzen des geologischen Standortgebiets gegeben. Die anderen Anforderungen an die minimalen Tiefen sind damit ohnehin gegeben. In Teilschritt 2 ändert sich zum einen die maximale Tiefenlage von 900 m auf 800 m (anstatt auf die angestrebten 700 m), womit sich die südliche Begrenzung des Lagerperimeters nach Norden verschiebt (Figur 3-6). Eine weitere Reduzierung der Perimeterfläche ergibt sich durch die Berücksichtigung der zu meidenden tektonischen Zone im Norden. Die Anforderungen an die minimale Tiefe werden wiederum ohnehin eingehalten.

Der Lagerperimeter der Figur 3-6 wird als massgebender Lagerperimeter für die mittlere Tiefe des Top Lias/Basis Opalinuston (TLi) bezeichnet. Zusätzlich werden alternative Lagerperimeter untersucht, die in diesem Fall so zustande kommen, dass die maximale Tiefenlage der Lagerebene unter Terrainoberkante auf 850 m und 900 m (dem Wert der Etappe 1) gesenkt

wird. Weitere Alternativen bestehen darin, die verschiedenen Tiefenlagen des TLi in seinen Fehlergrenzen aus der Reflexionsseismik zu nehmen und bei einer maximalen Tiefe von 800 m zu bleiben. Die sich ergebenden Lagerperimeter und deren Flächen sind in NTB 14-01, Anhang B67 bis B73 dargestellt. Die Akzeptanz von 900 m maximaler Tiefenlage bei Anwendung der mittleren Tiefen des TLi aus der Seismik würde ca. 10 km^2 Fläche ergeben; etwa der gleiche Wert ergäbe sich, wenn man die maximale Tiefe bei 800 m fixiert und das «flachere» Modell aus der Seismik nimmt. Dieses und eine grössere Maximaltiefe würde Flächen von deutlich über 10 km^2 ergeben.



Figur 3-5: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern, Lagerperimeter vor der Optimierung (Resultat von Teilschritt 1, aus NTB 14-01. Fig. 4.2-7)



Figur 3-6: Lagerperimeter für das HAA-Lager im geologischen Standortgebiet Nördlich Lägern: Lagerperimeter nach der Optimierung; massgebender Lagerperimeter für die Einengung (Teilschritt 2, aus NTB 14-01, Fig. 4.2-1).

In der Nachdokumentation der Nagra (NAB 16-41) werden zusätzliche Szenarien für das Platzangebot für ZNO-HAA, NL-HAA und JO-HAA gezeigt. Für ZNO-HAA werden als maximale Tiefen 650 m, 800 m, und 900 m bei gleichzeitiger Erhöhung der minimalen Tiefenlage gezeigt und gefolgert, dass ZNO «eine grosse Flexibilität für unterschiedliche Optimierungen bietet».

Für JO wird untersucht wie sich die Vernachlässigung der Optimierungsanforderung «zu meidende tektonische Zone» auswirkt. Wie zu erwarten vergrössert sich das Platzangebot. Es scheint, dass bei 50 m vergrösserter minimaler Tiefe auch kein ausreichendes Platzangebot entsteht, wenn man die «zu meidende tektonische Zone» ignoriert. Daraus schliesst die Nagra, dass nur begrenzter Spielraum bezüglich grösseren Erosionsschutzes besteht. Für NL werden die bereits in NTB 14-01 gezeigten Szenarien für maximale Tiefen von 800 m, 850 m, und 900 m ergänzt durch die entsprechenden unter Vernachlässigung der Optimierungsanforderung «zu meidende tektonische Zone». Es wird gefolgert, dass auch bei Vernachlässigung der «zu meidenden tektonischen Zone» kein genügendes Platzangebot besteht.

3.11.2 Beurteilung der EGT

Die EGT kommt zum Schluss, dass die Berechnungen und Festlegungen der maximalen Tiefenlage und ihrer Bewertungsskala nicht nachvollziehbar sind. Zudem ist die Abgrenzung der Lagerperimeter basierend auf der tektonischen Überprägung teilweise nicht überzeugend. Demzufolge ist auch der Schritt der optimierten Abgrenzung der Lagerperimeter in NTB 14-01 und NAB 16-41 bezüglich dieser Kriterien sowie die ausgewiesenen Platzangebote nicht nachvollziehbar. Diese Kritik hat auf die Bewertung des HAA-Platzangebots im Standort Nördlich Lägern die stärksten Auswirkungen, da hier für die verwendeten Optimierungs-Anforderungen der von der Nagra ausgewiesene Platzbedarf kaum erfüllt wird.

Die Verwendung verschiedener «Szenarien» bei der Ermittlung der optimierten Lagerperimeter ist sicherlich vernünftig, um Sensitivitäten aufzuzeigen. Es zeigt sich aber auch, dass z. B. im Fall des HAA-Lagers NL die Bandbreite der Möglichkeiten sehr gross ist und bei den gezeigten Fällen von 4.2 km^2 bis 10.6 km^2 reicht, wobei nicht alle Parameter-Kombinationen eingeschlossen sind. Insbesondere sind Unsicherheiten in der Festlegung der zu meidenden tektonischen Zone und der maximalen Tiefenlage nicht berücksichtigt, die zu einer zusätzlichen Vergrösserung oder Verkleinerung führen können. Die Ungenauigkeiten in der Tiefenlage werden zum Teil, aber nicht systematisch in die Analyse der Nagra einbezogen.

Das Verfahren wird intransparent, wenn man für NL in NAB 16-41 die Szenarien ohne Berücksichtigung der «zu meidenden tektonischen Zone» mit recht verschiedenen minimalen Tiefenanforderungen rechnet (z.B. HAA-NLaL113-r, maximale Tiefe 900 m minimale Tiefe 601 m), diese aber dennoch mit den HAA-NLaL2-r (maximale Tiefe 900 m minimale Tiefe 530 m) vergleicht. Die EGT ist aber der Meinung, dass Zonen, in denen mit der Reaktivierung mesozoischer Verwerfungen gerechnet werden kann, gemieden werden sollten. Eine präzisere Definition, Identifizierung und Abgrenzung solcher Zonen kann mit der 3D-Seismik der Etappe 3 erreicht werden.

Die Behauptung, dass für HAA-NL kein ausreichendes Platzangebot besteht, ist darum nicht nachgewiesen: Die Szenarien für Lagerperimeter für NL zeigen, dass das Platzangebot von 4.2 km^2 bei Annahme der Referenztiefe des TLi (HAA-NL-mLE-r) auf 9.8 km^2 bei Einschluss der unteren Fehlergrenze (HAA-NL-mLE-u) steigt.

NTB 14-01 und NAB 16-41 enthalten zudem recht verschiedene Angaben zum Platzbedarf. Der von der Nagra in NTB 14-01 abgeschätzte Platzbedarf des SMA- und HAA-Lagers für die verschiedenen Standortgebiete ist aufgrund des heutigen Kenntnisstandes nicht für die einzelnen Standortgebiete quantifizierbar und darum nicht nachvollziehbar. Es ist unklar wie die neuen Zahlen des NAB 16-41 zustande kommen.

Zum Platzangebot in den einzelnen Standorten kann festgestellt werden:

Südranden

Das Mesozoikum ist kaum tektonisiert, allerdings erscheint der TLi unterschiedlich gut im Standortgebiet. Zu meidende tektonische Zonen sind nicht erkennbar. Das Platzangebot wird gut, wenn die untere Tieflage, die das Geschwindigkeitsmodell zulässt, angenommen wird (SMA-SR-aL5-t, NTB 14-01, B14), und zwar unter Vermeidung der Neuhauserwald-Rinne. Das Platzangebot ist dann in einem Gebiet verfügbar, in dem die Mächtigkeit des Opalinustons über 100 m liegt (NTB 14-02-II, Beilage A1-12). Jedenfalls sind die Abb. B9 bis B15 in NTB 14-01 nachvollziehbar. Wenn man beide Szenarien als gleichwertig betrachtet, erscheint ein SMA in SR aus der Sicht des Platzangebots möglich, wegen der grösseren Tiefe u.T. sogar mit einem reduzierten Potenzial der Gesteinsdekompaktion. Allerdings wird das Kriterium von mindestens 350 m Tiefe Top Opalinuston u.T. nicht erreicht.

Zürich Nordost

Durch die Verfügbarkeit der 3D-Seismik sind die Aussagen der Abb. B18 bis B22 (SMA) und der Abb. B58 bis B63 (HAA) in NTB 14-01 nachvollziehbar. Im Referenzszenario für SMA werden die Optimierungskriterien erreicht und das Platzangebot ist ausreichend. Bei Berücksichtigung der Unsicherheiten der Tiefenlage des TLi ergibt sich ein hinreichender Platzbedarf nur bei (leichter) Verletzung des Kriteriums von mindestens 350 m Tiefe Top Opalinuston u.T. Für HAA werden im Referenzszenario die Optimierungskriterien erreicht und das Platzangebot ist ausreichend. Bei Berücksichtigung der Unsicherheiten Tiefenlage des TLi ergibt sich ein hinreichender Platzbedarf nur bei (leichter) Verletzung des Kriteriums von mindestens 350 m Tiefe Top Opalinuston u.T. Die neuen in NAB 16-41 gerechneten Szenarien betrachten grössere maximale Tiefen als 700 m und führen zu weiteren Platzangeboten.

Nördlich Lägern

Hier spielen die zu meidenden tektonischen Zonen eine wesentliche Rolle bei der Einengung. Der Grad der räumlichen Detailliertheit ist nicht begründbar; die Lagen der Zonen selbst können auch anders interpretiert werden, allerdings weniger im NW des Standortes. Die Lage der verfügbaren seismischen Linien erlaubt es nicht, den Bereich zu bewerten, in dem das Platzangebot gesucht wird. Damit sind die Aussagen der Abb. B25 bis B28 (SMA) und der Abb. B66 bis B73 (HAA) in NTB 14-01 als mögliche Interpretation zu sehen, sie sind aber nicht belastbar. Erosion und Dekompaktion spielen in NL keine wesentliche Rolle. Der Parameter, welcher das Platzangebot für SMA und HAA-Lager am meisten kontrolliert, ist die maximale Tiefe der Lagerebene unter Terrain. Die von der Nagra definierte maximale Tiefe von 600 m erlaubt kein SMA-Tiefenlager. Daran ändert sich auch nichts, wenn die zu meidende tektonische Zone nicht vom Lagerperimeter ausgeschlossen wird. Wenn grössere Tiefen bautechnisch realisierbar sind (z.B. 800 m wie in Etappe 1 angenommen) sowie die Unsicherheiten der Tiefe des TLi mit berücksichtigt werden, kann ein SMA in NL aufgrund des Platzangebots bei der jetzigen Datenlage nicht ausgeschlossen werden. Die von der Nagra definierte maximale Tiefe von 700 m erlaubt ebenfalls kein HAA-Tiefenlager. Daran ändert sich auch nichts, wenn die zu meidende tektonische Zone nicht vom Lagerperimeter ausgeschlossen wird. Wenn grössere Tiefen bautechnisch realisierbar sind sowie die Unsicherheiten der Tiefe des TLi mit berücksichtigt werden, kann ein HAA in NL aufgrund des Platzangebots bei der jetzigen Datenlage nicht ausgeschlossen werden.

Jura Ost

Hier spielen die zu meidenden tektonischen Zonen keine grosse Rolle, weil nur ein kleines Gebiet im Südosten damit ausgegrenzt wird. Die Tektonisierung scheint im gesamten Gebiet eher schwach ausgeprägt zu sein. Die Mächtigkeit des Opalinustons scheint ausserhalb der

zu meidenden Zonen über 120 m zu liegen. Unabhängig von Unsicherheiten in der Tiefenlage des TLi ist das Platzangebot für SMA ausreichend. Im Referenzszenario für HAA ergibt sich ein ausreichendes Platzangebot. Die Konsequenzen, die sich aus den vorliegenden Szenarienrechnungen unter Einbezug der Unsicherheiten in der Tiefenlage ergeben, sind nicht klar ausgewiesen. Als Gesamtbild ergibt sich, dass JO für HAA ein hinreichendes Platzangebot liefert, wenn das Optimierungskriterium der minimalen Tiefe u.T. von 450 m nicht ganz eingehalten wird.

Jura-Südfuss

Hier spielen die zu meidenden tektonischen Zonen keine grosse Rolle, weil damit im Wesentlichen nur ein kleines Gebiet innerhalb regionaler Störungen im Südosten ausgegrenzt wird. Diese Ausweisung dieser zu meidenden tektonischen Zone ist nachvollziehbar. Insgesamt zeigt sich eine deutlich stärkere Tektonisierung am TLi und den darüber und darunter liegenden Horizonten, sowohl auf den NS- als auch den OW-Linien. JS bietet nicht genügend Platz für ein SMA-Lager, wenn die untere Fehlergrenze für die Tiefe des TLi benutzt wird (–t Szenario) und gleichzeitig das Optimierungskriterium von max. 600 m Tiefe u.T. gelten soll (NTB 14-01 Anhang B41). Diesen Möglichkeit betrachtet die EGT jedoch als unwahrscheinlicher als den Referenzfall (NTB 14-01 Anhang B39), der zu einem hinreichenden Platzangebot führt.

Die EGT ist wie die Nagra der Meinung, dass der Standort NL hinsichtlich maximaler Tiefenlage und Platzangebot für HAA der ungünstigste von den drei möglichen ZNO, NL, JO ist. Es ist nach bisherigen Kenntnisstand jedoch nicht auszuschliessen, dass auch dort für ein SMA- und HAA-Lager ein hinreichendes Platzangebot vorhanden sein könnte.

4. Sicherheitstechnische Bewertung und Vergleich der geologischen Standortgebiete

4.1 Generelle Bemerkungen zum Vorgehen der Nagra

Ausgangspunkt für die Gesamtbewertung (Schritt 5) in diesem Kapitel sind die Schlussfolgerungen der vorangehenden Schritte:

Auf Grund einer Gesamtbewertung aller Kriterien und Indikatoren für den massgebenden Fall der Einengung (NTB 14-01, Kapitel 3.3 bzw. Anhang C) wird die Gesamtbewertung aller potentiellen SMA-Wirtgesteine von Nagra als 'geeignet' bzw. 'sehr geeignet' eingestuft. Eine detaillierte Bewertung auf Stufe Indikatoren zeigt nach Nagra aber erhebliche Unterschiede. Darum kommt die Nagra im Schritt 2 zum Schluss, dass die Helvetischen Mergel, der 'Braune Dogger' und die Effinger Schichten entscheidungsrelevante Nachteile im Vergleich zum Opalinuston aufweisen, welcher als prioritäres Wirtgestein für SMA- und HAA-Lager angesehen wird, wenn das Platzangebot untertags dies erlaubt. Die verwendeten entscheidrelevanten Merkmale, die Methodik und Resultate dieser Priorisierung der SMA-Wirtgesteine werden im vorliegenden Bericht in Kapitel 2 kritisch durchleuchtet und teilweise als unzulänglich gefunden. Trotzdem unterstützt die EGT die Priorisierung des Opalinustons als SMA-Wirtgestein.

In Bezug auf die Optimierung der Lagerperimeter und die Ermittlung des Platzangebots untertage (Schritte 3 und 4) ist die von der Nagra angewendete Methodik sehr kompliziert und teilweise nicht nachvollziehbar, was im Detail im Kapitel 3 des vorliegenden Berichts erläutert wird. Unter Berücksichtigung aller Kriterien, Indikatoren und alternativen Konzeptualisierungen (Optimierungen) kommt die Nagra am Ende von Schritt 4 zur Schlussfolgerung, dass alle SMA- und HAA-Standortgebiete als mindestens 'geeignet' bewertet werden müssen (NTB 14-01, Kapitel 4.4 bzw. Anhang C). Die EGT kommt im Kapitel 3 zum Schluss, dass die Abgrenzung der optimierten Lagerperimeter, insbesondere aus bautechnischer Sicht, nicht nachvollzogen werden kann und dass darum eine Zurückstellung des Standortgebietes Nördlich Lägern fraglich ist.

Die vergleichende Gesamtbewertung aller Standortgebiete in Etappe 2 SGT (Schritt 5) basiert auf einer provisorischen Sicherheitsanalyse und fokussiert sich gemäss den Vorgaben des Sachplanverfahrens (BFE 2008; ENSI 33/075; ENSI 33/154) auf «entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren» und «eindeutige Nachteile» der individuellen Standortgebiete (NTB 14-01, Kapitel 5.2 bzw. Anhang C). Auf Grund einer detaillierten Diskussion der identifizierte Merkmale und Indikatoren kommt die Nagra zum Schluss, dass für SMA- sowie für HAA-Lager die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost am geeignetsten sind und für weitere Untersuchungen in Etappe 3 vorgeschlagen werden sollen, während die anderen Standorte deutliche Nachteile aufweisen. Im vorliegenden Kapitel werden die Argumentation und die Schlussfolgerungen für SMA-Standortgebiete (Unterkapitel 4.2) und HAA-Standortgebiete (Unterkapitel 4.3) in getrennten Kapiteln geprüft.

4.2 Vergleichende Bewertung aller SMA-Standortgebiete

4.2.1 Angaben der Nagra

Die Beurteilung der entscheidrelevanten Merkmale der SMA-Standortgebiete durch die Nagra ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst und wurde in den vorgängigen Kapiteln erläutert.

Tabelle 4-1: Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren für die SMA-Standortgebiete (NTB 14-01, Tab. 5.2-1)

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA-SR	SMA-ZNO	SMA-NL	SMA-JO	SMA-JS	SMA-WLB
a)	**Wirksamkeit der geologischen Barriere**	**4.4**	**4.5**	**4.5**	**4.4**	**4.3**	**3.3 (*)**
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.3	4.5	4.5	4.5	4.5	3.7 (*)
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1 (*)
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.1 (*)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5 (×)
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.7 (×)
5	Mächtigkeit	3.5 (*)	4.5	4.5	3.5 (*)	2.5(×)	4.5
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
16	Kolloide	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5 (×)
b)	**Langzeitstabilität der geologischen Barriere**	**2.5 (*)**	**3.7**	**3.7**	**3.7**	**3.7**	**2.5 (*)**
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	2.9 (×)	4.5	4.3	4.3	3.7 (*)	2.9 (×)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5 (×)
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.3
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	3.5 (*)
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	3.1 (*)	4.5	4.7	4.5	4.5	4.1
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	2.7 (×)	4.5	4.7	4.1	4.1	4.1
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	2.5 (×)	4.5	4.7	4.5	4.3	4.5
24	Seismizität	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	2.7 (*)

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	SMA-SR	SMA-ZNO	SMA-NL	SMA-JO	SMA-JS	SMA-WLB
c)	**Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet**	**4.3**	**4.4**	**4.4**	**4.4**	**4.3**	**2.0 (×)**
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	2.5 (×)
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.1	4.3	4.3	4.3	4.1	1.5 (×)
d)	**Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale**	**3.1**	**3.5**	**1.3 (×)**	**3.5**	**2.9 (*)**	**2.7 (*)**
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	4.7	3.5 (*)	1.5 (×)	3.5 (*)	3.5 (*)	2.7 (×)
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5 (*)	3.5 (*)	3.5 (*)	4.3	2.9 (×)	4.1
8	Platzangebot untertags	3.1 (*)	4.1	1.3 (×)	4.7	3.3 (*)	3.1 (*)

Legende: (x) bzw. (*): Hinweis auf einen eindeutigen bzw. vertieft zu überprüfenden Nachteil; Farbskala abgestuft zur Verdeutlichung der Bewertungen

4.2.2 Beurteilung der EGT

Die Zurückstellung eines Standortgebiets in Etappe 2 des SGT ist nur dann möglich, wenn es im Vergleich zu anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweist. Die EGT versteht unter eindeutigem Nachteil, dass einer oder mehrere der entscheidrelevanten Merkmale (Wirksamkeit der geologischen Barriere, Langzeitstabilität der geologischen Barriere, Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet, Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers) eindeutig schlechter charakterisiert ist und dies durch die Datenlage klar belegt ist. Bei unklarer Datenlage sollte in der Etappe 2 ein Standort nicht zurückgestellt werden. Diese Betrachtung gilt sowohl für SMA- als auch für HAA-Standortgebiete (siehe Kap. 4.3).

Wellenberg

Die KNE als Vorgängerin der EGT hat schon in Etappe 1 SGT ursprünglich vorgeschlagen, das Standortgebiet Wellenberg insbesondere aufgrund der starken tektonischen Überprägung, sowie der Heterogenität, der schwierigen Explorationsverhältnisse, der Erosion und Auflockerung sowie der geodynamischen Situation zurückzustellen. Die EGT schliesst sich dieser Empfehlung an.

Nördlich Lägern

Das Platzangebot untertags im Standortgebiet Nördlich Lägern wird insbesondere durch die maximale Tiefenlage und untergeordnet durch zu meidende tektonische Zonen so stark eingeschränkt, dass der ausgewiesene Platzbedarf kaum mehr erreicht werden kann. Die maximale Tiefenlage ist aber aus Sicht der EGT heute ungewiss und abhängig von der verfügbaren Bautechnik und den lokalen geotechnischen Verhältnissen. Eindeutige Nachteile wären nur vorhanden, wenn das Platzangebot im Standortgebiet Nördlich Lägern eindeutig nicht dem Platzbedarf entsprechen würde. Eindeutige Nachteile bezüglich des Platzangebots und der Langzeitsicherheit sind also aus der gegenwärtigen Daten- und Kenntnislage zwar möglich, aber heute nicht belastbar nachgewiesen. Diese Unsicherheiten können in Etappe 3 reduziert werden. Zudem ist die Explorierbarkeit im Standortgebiet Nördlich Lägern aufgrund der vermuteten grösseren tektonischen Überprägung und der grösseren Tiefe erschwert.

Südranden

Das von der Nagra ermittelte Platzangebot im Standortgebiet Südranden wird durch die Anforderungen bezüglich Schutz vor Erosion (100 m unter Erosionsbasis) eingeschränkt. Das Platzangebot deckt möglicherweise den Platzbedarf ab. Die Lagerkavernen in 300-350 m Tiefe können vermutlich mit minimalen Stützmitteln (Systemankerung und Netzen) und ohne grössere Nachbrüche erstellt werden, was für die Langzeitsicherheit von Vorteil ist. Allerdings wird die Anforderung von mindestens 350 m Tiefe Top Opalinuston u.T. nicht erreicht. Die EGT unterstützt die Zurückstellung des Standortgebietes Südranden auf Grund der von der Nagra ausgewiesenen Erosionsszenarien.

Jura-Südfuss

Das von der Nagra ermittelte Platzangebot im Standortgebiet Jura-Südfuss wird durch die maximale Tiefenlage eingeschränkt, erfüllt aber mit grosser Wahrscheinlichkeit den Platzbedarf. Die Mächtigkeitsanforderungen werden in NTB 08-05 klassifiziert und für den Opalinuston wie folgt festgelegt: 'günstig' werden eine nutzbare Mächtigkeit von ≥ 100 m (Opalinuston inklusive Rahmengesteine); 'sehr günstig' werden nutzbare Mächtigkeiten von ≥ 100 m Opalinuston mit zusätzlichen oberen und unteren Rahmengesteinen von je ≥ 25 m bezeichnet. Die Mächtigkeit

des Opalinustons am Jura-Südfuss beträgt (mit Rahmengesteinen) etwa 90 m und wäre damit knapp nicht mehr günstig ('bedingt günstig'). Aufgrund der fehlenden Rahmengesteine und der geringen Mächtigkeit des Opalinustons unterstützt die EGT die Zurückstellung des Standortgebietes Jura-Südfuss.

Zürich Nordost

Der von der Nagra ermittelte Platzbedarf für das Standortgebiet Zürich Nordost wird durch das Angebot erfüllt. Bei Berücksichtigung der Unsicherheiten der Tiefenlage des TLi ergibt sich ein hinreichender Platzbedarf bei (leichter) Verletzung der Anforderung von mindestens 350 m Tiefe Top Opalinustons u.T. Die vorhandene 3D-Seismik bestätigt zudem eine sehr geringe tektonische Überprägung und gute Explorierbarkeit. Die EGT stimmt der Bewertung dieses Standortgebiets zu.

Jura Ost

Die EGT stellt fest, dass die minimale Tiefenlage stark von den zu erwartenden Erosionsszenarien abhängt. Die EGT betrachtet die Wahrscheinlichkeit der Bildung einer zukünftigen Durchbruchsrinne durch den Bözberg als sehr gering. Der von der Nagra ermittelte Platzbedarf für das Standortgebiet Jura Ost wird durch das Angebot in jedem Fall erfüllt, unabhängig von den Unsicherheiten in der Bewertung der minimalen und maximalen Tiefenlage. Die neue 2D-Seismik lässt eine ähnlich geringe tektonische Überprägung wie im Standortgebiet Zürich Nordost vermuten. Aus diesen Gründen stimmt die EGT der Bewertung dieses Standortgebiets zu.

4.3 Vergleichende Bewertung aller HAA-Standortgebiete

4.3.1 Angaben der Nagra

Die Beurteilung der entscheidrelevanten Merkmale der HAA-Standortgebiete durch die Nagra ist in Tabelle 4-2 zusammengefasst und wurde in den vorgängigen Kapiteln erläutert.

Tabelle 4-2: Bewertung der entscheidrelevanten Merkmale und zugehörigen Indikatoren für die HAA-Standortgebiete (NTB 14-01)

Nr.	**Entscheidrelevante Merkmale (EM)** / Entscheidrelevante Indikatoren (EI)	HAA-ZNO	HAA-NL	HAA-JO
a)	**Wirksamkeit der geologischen Barriere**	**4.5**	**4.5**	**4.4**
9	Hydraulische Durchlässigkeit	4.5	4.5	4.5
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	4.5	4.5	4.5
20	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	4.5	4.5	4.5
5	Mächtigkeit	4.5	4.5	3.5 (*)
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	4.5	4.5	4.5
16	Kolloide	4.5	4.5	4.5
b)	**Langzeitstabilität der geologischen Barriere**	**3.5**	**3.5**	**3.1**
23	Modellvorstellungen zur Langzeitentwicklung (Geodynamik und Neotektonik; weitere Prozesse)	4.3	3.5 (*)	3.1 (*)
22	Selbstabdichtungsvermögen	4.5	4.5	4.5
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	4.5	4.5	4.5
28	Erosion im Betrachtungszeitraum	4.3	4.3	4.3
3	Tiefenlage unter lokaler Erosionsbasis im Hinblick auf die Bildung neuer Rinnen	4.1	4.7	3.1 (*)
2	Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf Gesteins-Dekompaktion	4.5	4.7	3.1 (*)
4	Tiefenlage unter Fels im Hinblick auf glaziale Tiefenerosion	3.5 (*)	4.3	4.1
24	Seismizität	3.5	3.5	3.5
c)	**Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet**	**4.4**	**4.4**	**4.4**
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	4.5	4.5	4.5
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	4.3	4.3	4.3
d)	**Bautechnische Machbarkeit eines Tiefenlagers unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Standortareale**	**3.3**	**1.3 (×)**	**3.9**
1	Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit (u.B. Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften)	3.5 (*)	2.1 (×)	4.1
48	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	3.5 (*)	3.5 (*)	4.3
8	Platzangebot untertags	3.3	1.3 (×)	3.9

Legende: (x) bzw. (*): Hinweis auf einen eindeutigen bzw. vertieft zu überprüfenden Nachteil; Farbskala abgestuft zur Verdeutlichung der Bewertungen

4.3.2 Beurteilung der EGT

Basierend auf den heutigen Kenntnissen zu den Erosionsszenarien weisen die Standortgebiete Zürich Nordost und Jura Ost die ungünstigsten Voraussetzungen bezogen auf den

Schutz vor Erosion auf. So muss im pessimistischen Szenarium damit gerechnet werden, dass Teile der Lager gegen Ende des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren exhumiert werden könnten (siehe Kapitel 3.2). Dies stellt aber nach heutigen Kenntnissen aufgrund der geringen radiologischen Aktivität des Tiefenlagers gegen Ende des Betrachtungszeitraums keinen eindeutigen Nachteil dar. ZNO als auch JO stellen genügend Platz für ein Lager zur Verfügung und die bautechnische Machbarkeit scheint gegeben.

Das Platzangebot untertags für ein HAA-Lager im Standortgebiet Nördlich Lägern ist im kritischen Bereich und wird durch die maximale Tiefenlage und in geringerem Umfang von den zu meidenden tektonischen Zonen kontrolliert. Die Explorierbarkeit von grossen Teilen des Standortgebietes Nördlich Lägern ist weniger günstig als jene an den Standortgebieten Jura Ost und Zürich Nordost. Die maximale Tiefenlage aus bautechnischer Sicht und die Auswirkungen grösserer Tiefen auf die geologische Barriere sind heute ungewiss und auch abhängig vom gewählten Bau- und Lagerkonzept.

Die bautechnischen Gefährdungsbilder und notwendigen Stützmittel unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Tiefenlage und tektonischen Überprägung vermutlich stark in den drei zur Diskussion stehenden HAA-Lagerstandorten. Die negativen bautechnischen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit sind mit dem heutigen Lagerkonzept und den vorgeschlagenen bautechnischen Massnahmen im Standortgebiet Jura Ost signifikant geringer als an den Standorten Zürich Nordost und insbesondere Nördlich Lägern. Ausserdem ist die Erosionsgefahr deutlich geringer insbesondere verglichen mit dem Standortgebiet Zürich Nordost.

Obgleich die bautechnischen Verhältnisse eines HAA-Lagers in NL schwieriger sind als in den beiden anderen Standortgebieten und der verfügbare Platz eher knapp bemessen ist, ist die Datenlage für diese Nachteile heute nicht ausreichend gesichert. Der von der Nagra vorgeschlagenen Zurückstellung des HAA-Standortgebietes Nördlich Lägern wird daher von der EGT widersprochen. Auf der anderen Seite unterstützt die EGT den Vorschlag der Nagra, die Standortgebiete Jura Ost und Zürich Nordost in Etappe 3 SGT weiter zu untersuchen.

5. Verwendete Literatur und Berichte

Akçar N., Ivy-Ochs S., Alfimov V., Claude A., Graf H.R., Dehnert A., Kubik P.W., Rahn M., Kuhlemann J., Schlüchter C. (2014): The first major incision of the Swiss Deckenschotter landscape. Swiss Journal of Geoscience 107, 337-347. DOI: 10.1007/s00015-014-0176-6.

Akçar N., Ivy-Ochs S., Alfimov V., Schlunegger F., Claude A., Reber R., Christl M., Vockenhuber C., Dehnert A., Rahn M., Schlüchter C. (2016, in review): Isochron-burial dating of glaciofluvial deposits: Primary results from the Alps. Earth Surface Processes and Landforms.

Bandis S.C., Lumsden A.C., Barton N.R. (1983): Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. 20, 249-268.

Baran R., Friedrich A.M., Schlunegger F. (2014): The late Miocene to Holocene erosion pattern of the Alpine foreland basin reflects Eurasian slab unloading beneath the western Alps rather than global climate change. Lithosphere 6, 124-131. DOI: 10.1130/L307.1.

BFE (2008): Sachplan geologische Tiefenlager – Konzeptteil, Bundesamt für Energie, Bern.

Bini A., Buoncristiani J.-F., Couterrand S., Ellwanger D., Felber M., Florineth D., Graf H.R., Keller O., Kelly M., Schlüchter C., Schoeneich P. (2009): Die Schweiz während des letzteiszeitlichen Maximums (LGM) 1:500 000, Karte Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern.

Bolliger T., Feijar O., Graf H., Kälin D. (1996): Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugern aus den höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich). Eclogae Geologicae Helvetiae 89, 1043-1048.

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.

Cederbom C.E., Van der Beek P., Schlunegger F., Sinclair H.D., Onken O. (2011): Rapid extensive erosion of the North Alpine foreland basin at 5–4 Ma. Basin Research 23, 528-550. DOI: 10.1111/j.1365-2117.2011.00501.x.

Chiffoleau S., Robinet J.C. (1999): HE experiment: determination of the hydromechanical characteristics of the Opalinus Clay, Technical Note 98-36 Mont Terri Project, St-Ursanne.

Chittenden H., Delunel R., F. S., Akçar N., Kubik P. (2014): The influence of bedrock orientation on the landscape evolution, surface morphology and denudation (10Be) at the Niesen, Switzerland. Earth Surface Processes and Landforms 39, 1153-1166.

Claude A. (2016): Landscape evolution of the northern Alpine Foreland: constructing a temporal framework for early to middle Pleistocene glaciations, Dissertation Universität Bern, Institut für Geologie, Bern.

Claude A., Akçar N., Ivy-Ochs S., Schlunegger F., Kubik P.W., Dehnert A., Kuhlemann J., Rahn M., Schlüchter C. (2017): Timing of early Quaternary gravel accumulation in the Swiss Alpine Foreland. Geomorphology 276, 71-85. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.10.016.

Croisé J., Mayer G., Marschall P., Matray J.M., Tanaka T., Vogel P. (2006): Gas Threshold Pressure Test Performed at the Mont Terri Rock Laboratory (Switzerland): Experimental Data and Data Analysis. Oil & Gas Science and Technology - Revue de l'IFP 61, 631-645. DOI: 10.2516/ogst:2006003.

Cruz Nunes F., Delunel R., Schlunegger F., Akçar N., Kubik P. (2015): Bedrock bedding, landsliding and erosional budgests in the Central European Alps. Terra Nova 27, 370-378.

Dürst Stucki M., Reber R., Schlunegger F. (2010): Subglacial tunnel valleys in the Alpine foreland:an example from Bern, Switzerland. Swiss Journal of Geosciences 103, 363-374. DOI: 10.1007/s00015-010-0042-0.

ENSI-G03: Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Richtlinie, Würenlingen, 2009.

ENSI 33/075: Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich, Sachplan geologische Tiefenlager Etappe 2, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Brugg, 2010.

ENSI 33/154: Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.

ENSI 33/170: Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2013.

ENSI 33/460: Assessment of Geomechanical Properties, Maximum Depth below Ground Surface and EDZ Impact on Long Term Safety, ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.

ENSI 33/461: Expert Report - Assessment of Geomechanical Properties of Intact Opalinus Clay, ETH Zürich, Ingenieurgeologie; Dr. von Moos AG Beratende Geologen und Ingenieure, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2015.

ENSI 33/464: Beurteilung der Datenverarbeitung und Interpretation der 2D-Seismik der Nagra im Hinblick auf Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Brugg, 2016.

ENSI 33/476: Nachforderung zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ in Etappe 2 SGT, Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, Aktennotiz, Brugg, 2015.

ENSI 33/531: Beurteilung der geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage im Rahmen der Nachforderungen des ENSI zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" im SGT Etappe 2, ETH Zürich, Ingenieurgeologie, Expertenbericht zuhanden des ENSI, Zürich, 2016.

Favero V., Ferrari A., Laloui L. (2016): On the hydro-mechanical behaviour of remoulded and natural Opalinus Clay. Engineering Geology 208, 128-135.

Fernandez R., Cuevas J., Sanchez L., de la Villa R.V., Leguey S. (2006): Reactivity of the cement–bentonite interface with alkaline solutions using transport cells. Applied Geochemistry 21, 977–992.

Gaucher E.C., Blanc P., J.-M. M., Michau N. (2004): Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. Applied Geochemistry 19, 1505-1515.

Hinderer M., Kastowski M., Kamelger A., Bartolini C., Schlunegger F. (2013): River loads and modern denudation of the Alps - A review. Earth-Science Reviews 118, 11-44. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.01.001.

Korup O., Montgomery D.R. (2008): Tibetan plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge. Nature 455, 786-790. DOI: 10.1038/nature07322.

Kull H., Jockwer N., Zhang C.-L., Wileveau Y., Pepa S. (2007): Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C 32, 937-946. DOI: 10.1016/j.pce.2006.04.036.

Li Y.-H., Gregory S. (1974): Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments. Geochimica Et Cosmochimica Acta 38, 703-714.

Madritsch H. (2015): Outcrop-scale fracture systems in the Alpine foreland of central northern Switzerland: kinematics and tectonic context. Swiss Journal of Geosciences 108, 155-181. DOI: 10.1007/s00015-015-0203-2.

Marschall P., Lanyon B., Gaus I., J. R. (2013): Gas transport processes at Mont Terri Test Site (EDZ and host rock) - Field results and conceptual understanding of self-sealing processes– FORGE Report D4.16, Technical Report Deliverable D4.16 Euratom 7th Framework project: FORGE.

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.

Metcalfe R., Walker C. (2004): Proceedings of the International Workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05 Nuclear Waste Management Organization of Japan, Tokyo, Japan.

NAB 08-01: Biosphärenmodellierung in den sicherheitstechnischen Betrachtungen für die Vororientierung zum Sachplan geologische Tiefenlager, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.

NAB 08-25: EWS Bohrung Oftringen – Felsmechanische Tests, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.

NAB 08-48: Felsmechanische Eigenschaften möglicher Wirtgesteine für geologische Tiefenlager, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2008.

NAB 11-08: Bohrung Gösgen KB-5a: Felsmechanische Untersuchungen an Kernen der Effinger Schichten, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 12-20: Drainage system and landscape evolution of northern Switzerland since the Late Miocene, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 12-26: Biosphere Modelling for C-14: Description of the Nagra Model, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 12-35: Regionale GIS-Kompilation und -Analyse der Deckenschotter-Vorkommen im nördlichen Alpenvorland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 12-41: Characterisation of Cenozoic brittle deformation of potential geological siting regions for radioactive waste repositories in Northern Switzerland based on structural geological analysis of field outcrops, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 12-47: Laboratory Characterisation of Cores (Geothermal Well Schlattingen SLA-1; Switzerland): Petrophysics and rock mechanics/physics, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 12-50: Geotechnical characterization of core samples from the Schlattingen SLA-1 by LMS/EPFL, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2012.

NAB 13-04: SGT Etappe 2: Biosphärenmodellierung für die provisorischen Sicherheitsanalysen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-09: Seismische Datenverarbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Zeit, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-10: Regionale strukturgeologische Zeitinterpretation der Nagra 2D-Seimik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-18: Geomechanical laboratory tests on Opalinus Clay cores from the bore hole Schlattingen SLA-1, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-45: Diagnostic analyses of the geomechanical database from cores of the SLA-1 borehole, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-49: Nagra Biosphere Modelling: Review of Generic Data, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-71: Ausgewählte Beobachtungen im Hinblick auf die geologische Langzeitentwicklung des Standortgebiets Wellenberg, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-75: Charakterisierung der Lockergesteinsaquifere für die Modellierung der Biosphäre, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-78: Extent and shape of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the Opalinus Clay formation in the proposed siting regions in Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-80: Seismische Datenbearbeitung der Nagra 2D-Seismik 2011/12 in Tiefe, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-83: Gas related property distributions in the proposed host rock formations of the candidate siting regions in Northern Switzerland and in the Helvetic Zone, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2013.

NAB 13-92: Sensitivity analyses of gas release from a L/ILW repository in the Opalinus Clay in the candidate siting regions of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 13-94: Hydraulic conductance of the EDZ around underground structures of a geological repository for radioactive waste – A sensitivity study for the candidate host rocks in the

proposed siting regions in Northern Switzerland., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-01: Geomechanical properties, rock models and in-situ stress conditions for Opalinus Clay in Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-02: Digitales Höhenmodell Basis Quartär der Nordschweiz - Version 2014 und ausgewählte Auswertungen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-10: Sensitivity analyses of gas release from a SF/HLW repository in the Opalinus Clay in the candidate siting regions of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-11: Thermo-hydraulic simulations of the near-field of a SF/HLW repository during early- and late-time post-closure period, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-16: Long-term Evolution of the Engineered Gas Transport System, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-25: Erosion und Landschaftsentwicklung Nordschweiz: Zusammenfassung der Grundlagen im Hinblick auf die Beurteilung der Langzeitstabilität eines geologischen Tiefenlagers (SGT Etappe 2), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-34: Tiefenkonvertierung der regionalen Strukturinterpretation der Nagra 2D-Seismik 2011/12, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-38: Kinematische Gesamtausgleichung der Schweizer Landesnivellementlinien 2013 und Detaildarstellung der rezenten vertikalen Oberflächenbewegungen in der Zentralschweiz, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-58: Reflexionsseismische Analyse des 'Braunen Doggers', Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-81: Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-87: Development and evolution of the Excavation Damaged Zone (EDZ) in the Opalinus Clay – A synopsis of the state of knowledge from Mont Terri, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-88: Simulation of layout determining fault networks based on 2D-seismic interpretations: Implications for subsurface space reserves in geological siting regions in northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-98: Sensitivity study of gas release from a L/ILW repository – Comparison of the host rock formations in the candidate siting regions, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 14-99: Unterlagen zum Platzbedarf in den Lagerperimetern der geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2014.

NAB 16-41: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht), Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-42: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-43: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Geomechanische Unterlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-44: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Standortspezifische geologische Modelle und geologische Gefährdungsbilder, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 16-45: ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2016.

NAB 17-01: ENTWURF: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Arbeitsbericht, Wettingen, 2017.

Nagra (1999): Sondierbohrung Benken: Felsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen (Teil 2), Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2002): Laboratory experiments on gas migration in Opalinus clay samples from the Benken borehole, Switzerland, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2012a): 2D-Seismik Nordschweiz 2011/12, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2012b): Abschlussbericht des Reprozessings der regionalen seismischen Profildaten in der Nordschweiz, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Nagra (2014): MIRAM 14 (Basisszenarium) – System und Kenndaten der Abfallsorten, Nagra unpubl. Interner Bericht, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.

Norton K.P., von Blanckenburg F., DiBiase R., Schlunegger F., Kubik P. (2011): Cosmogenic ^{10}Be-derived denudation rates of the Eastern and Southern Alps. International Journal of Earth Sciences 1000, 1163-1179.

Norton K.P., von Blanckenburg F., Kubik P.W. (2010): Cosmogenic nuclide-derived rates of diffusive and episodic erosion in the glacially sculpted upper Rhone Valley, Swiss Alps. Earth Surface Processes and Landforms 35, 651–662.

Norton K.P., von Blanckenburg F., Schlunegger F., Schwab M., Kubik P. (2008): Cosmogenic nuclide-based investigation of spatial erosion and hilllsope channel coupling in hte transient foreland of the Swiss Alps. Geomorphology 95, 474-486.

NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse – Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente; verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2002.

NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager – Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, 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, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

NTB 08-07: Effects of post-disposal gas generation in a repository for low- and intermediate-level waste sited in the Opalinus Clay of Northern Switzerland, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2008.

NTB 12-03: Effective Diffusion Coefficients and Porosity Values for Argillaceous Rocks and Bentonitethe : Measured and Estimated Values for Provisional Safety Analyses for SGT-E2, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-01: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT-Etappe 2: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-II: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier II: Sedimentologische und Tektonische Verhältnisse, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-III: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier III: Geologische Langzeitentwicklung, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-IV: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier IV: Geomechanische Unterlagen, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-02-VI: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen: Dossier VI: Barriereneigenschaften der Wirt- und

Rahmengesteine, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-03: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-10: Modelling of Radionuclide Transport along the Underground Access Structures of Deep Geological Repositories, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

NTB 14-11: Geochemical Evolution of the L/ILW Near Field, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, Wettingen, 2014.

Oladyshkin S., Class H., Helmig R., Nowak W. (2011): A concept for data-driven uncertainty quantification and its application to carbon dioxide storage in geological formations. Advances in Water Resources 34, 1508–1518. DOI: 10.1016/j.advwatres.2011.08.005.

Taylor R., Krishna R. (1993): Multicomponent mass transfer (Vol. 2). John Wiley & Sons.

Van den Berg F., Schlunegger F., Akçar N., Kubik P. (2012): ^{10}BE-derived assessment of accelerated eroson in a glacially conditioned inner gorge, Entlebuch, Central Alps of Switzerland. Earth Surface Processes and Landforms 37, 1176-1188.

van Dorp F., Brennwald M.S. (2009): Plant uptake of carbon-14 released from underground disposal of radioactive waste. Radioprotection 44, 853-855.

Vögtli B., Bossart P. (1998): DI Experiment: swelling experiments on Opalinus Clay drillcores, Technical Note 97-06 Mont Terri Project, St-Ursanne.

Whipple K.X. (2004): Bedrock rivers and the geomorphology of active orogens. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 32, 151-185. DOI: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120356.

Wild K.M. (2016): Evaluation of the hydro-mechanical properties and behavior of Opalinus Clay, Dissertation Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 23875.

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. DOI: 10.1029/2006JF000729.

Xu W.J., Shao H., Hesser J., Wang W., Schuster K., Kolditz O. (2013): Coupled multiphase flow and elasto-plastic modelling of in-situ gas injection experiments in saturated claystone (Mont Terri Rock Laboratory). Engineering Geology 157, 55-68. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.02.005.

6. Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

1D, 2D, 3D	eindimensional, zweidimensional, dreidimensional
AUZ	Auflockerungszone, oft auch Englisch mit EDZ (excavation damaged zone) abgekürzt.
BD	'Brauner Dogger'
BMa	Seismischer Markerhorizont: Basis Malm
BMz	Seismischer Markerhorizont: Basis Mesozoikum
BTe	Seismischer Markerhorizont: Basis Tertiär (= Top Malm)
EFF	Effinger Schichten
EGT	Expertengruppe Geologische Tiefenlagerung
EGTS	Engineered Gas Transport System: Konzept zur Abführung der im Tiefenlager entstehenden Gase
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
HAA	Hochaktive Abfälle: Es ist vorgesehen, im HAA-Lager auch die abgebrannten Brennelemente und die langlebigen, mittelaktiven Abfälle (LMA) einzulagern.
JO	Standortgebiet Jura Ost
JS	Standortgebiet Jura-Südfuss
mFE	massgebender Fall für die Einengung, siehe Kap. 1.3.2
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
NL	Standortgebiet Nördlich Lägern
nTOp	seismischer Hilfshorizont Near-Top Opalinuston: Reflektor, der in vielen Profilen sichtbar ist und näherungsweise die obere Begrenzung des Opalinustons markiert
OPA	Opalinuston
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager. Teilweise ist der sogenannte Konzeptteil des SGT gemeint, in dem der SGT beschrieben ist.
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
SR	Standortgebiet Südranden
TBM	Tunnelbohrmaschine
TLi	Top Lias: Seismischer Markerhorizont, der der unteren Begrenzung des Opalinustons entspricht
TMk	Seismischer Markerhorizont: Top Muschelkalk
ZNO	Standortgebiet Zürich Nordost