



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Beurteilung der Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine sowie der Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten im Sachplan geologische Tiefenlager

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Etappe 1, Sachplan geologische Tiefenlager

swisstopo

Februar 2010



**Expertenbericht von swisstopo, Landesgeologie zu Handen
des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorates ENSI**

1. Februar 2010

Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) Etappe 1

Beurteilung der stratigraphischen Sammelprofile und der hergeleiteten Wirtgesteine

Beurteilung der verwendeten geologischen Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

**Bundesamt für Landestopografie swisstopo
Office fédéral de topographie swisstopo
Ufficio federale di topografia swisstopo
Uffizi federal da topografia swisstopo**

www.swisstopo.ch

SQS-Zertifikat ISO 9001:2000



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Verteidigung,
Bevölkerungsschutz und Sport VBS
armasuisse

Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Landesgeologie

Redaktion:

C. Beer, Projektoberleitung

A. Möri, Projektleitung

P. Bossart

R. Burkhalter

S. Dall'Agnolo

Y. Gouffon

A. Isler

O. Kempf

© 2009 **swisstopo**
Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia
Federal Office of Topography
www.swisstopo.ch

Landesgeologie
Seftigenstrasse 264
CH-3084 Wabern
Tel: +41 31 963 25 68
Fax: +41 31 963 25 45
E-mail: christoph.beer@swisstopo.ch



Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung	1
1.1	Der Sachplan Geologische Tiefenlager	1
1.2	Rolle der Landesgeologie im Sachplanverfahren	1
1.3	Von der Nagra eingereichte und begutachtete Dokumente	2
1.4	Auftrag der Landesgeologie	2
1.5	Ziel und Gliederung des Gutachtens	3
2	Beurteilung der Sammelprofile	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Kriterien zur Beurteilung „potenziell tonreicher Formationen“	4
2.3	Generelles Vorgehen	6
2.4	Sammelprofile Jura (Profile 01, 02, 03, 06)	7
2.4.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	7
2.4.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	7
2.5	Sammelprofile Molasse (Profile 04, 05, 06, 07, 08)	8
2.5.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	8
2.5.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	8
2.6	Sammelprofile Helvetikum West (Profile 09, 10, 11)	10
2.6.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	10
2.6.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	11
2.7	Sammelprofile Helvetikum Ost (Profile 10, 12, 13)	12
2.7.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	12
2.7.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	12
2.8	Sammelprofile Ultrahelvetikum und ultrahelvetischer Flysch (Profile 14, 15)	12
2.8.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	12
2.8.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	12
2.9	Sammelprofile Préalpes (Profile 16, 19, 20, 22)	13
2.9.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	13
2.9.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	13
2.10	Sammelprofile Bündnerschiefer/Flysch (Profile 17, 18)	14
2.10.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	14
2.10.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	14
2.11	Sammelprofile Ostalpin (Profile 21, 23, 24, 25)	15
2.11.1	Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen	15
2.11.2	Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine	15
2.12	Sammelprofile der Südalpen (Profile 26, 27)	16
3	Beurteilung ausgewählter potenzieller Wirtgesteine	17
3.1	Potenzielle Wirtgesteine für schwach- und mittelaktive Abfälle	21
3.1.1	Opalinus-Ton und „Lias indifférent“	21
3.1.2	„Brauner Dogger“	23
3.1.3	Effingen-Member (SMA)	24
3.1.4	Tonschieferabfolgen der Bündnerschiefer	26

3.1.5	Mergelformationen des Helvetikums	28
3.1.6	Aalénien-Schiefer	30
3.1.7	Palfris-Formation und Marnes à Globigérines (W-CH)	30
3.1.8	Staldengraben-Formation	31
3.1.9	Flysch (ultrahelvetisch bzw. Gurnigel-Schlieren-Frutigen-Flysch)	31
3.1.10	Gesteine der Molasse	32
3.1.11	Ostalpin und Südalpen	33
3.2	Potenzielle Wirtgesteine für hochaktive Abfälle	33
4	Beurteilung der verwendeten Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten und Vergleich der Standortgebiete mit den stratigraphischen Referenzprofilen	34
4.1	Allgemeine Kommentare und Vollständigkeit der Datengrundlage	34
4.2	Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägeren	34
4.2.1	Überblick	34
4.2.2	Referenzprofil und Literaturangaben	34
4.3	Geologisches Standortgebiet Bözberg	34
4.3.1	Überblick	34
4.3.2	Referenzprofil und Literaturangaben	35
4.4	Geologisches Standortgebiet Jura-Südfuss	35
4.4.1	Überblick	35
4.4.2	Referenzprofil und Literaturangaben	35
4.5	Geologisches Standortgebiet Südranden	35
4.5.1	Überblick	35
4.5.2	Referenzprofil und Literaturangaben	36
4.6	Geologisches Standortgebiet Zürcher Weinland	36
4.6.1	Überblick	36
4.6.2	Referenzprofil und Literaturangaben	37
4.7	Geologisches Standortgebiet Wellenberg	37
4.7.1	Überblick	37
4.7.2	Referenzprofil und Literaturangaben	37
5	Zusammenfassung	38
6	Empfehlungen swisstopo für die weiteren Schritte in der Lagerrealisierung	39
6.1	Potenzielle Wirtgesteine für schwach- und mittelaktive Abfälle	39
6.2	Potenzielle Wirtgesteine für hochaktive Abfälle	41
	Literaturverzeichnis	42

Figurenverzeichnis

- Figur 2.1: Vergleich von Mineralassoziationen, potenziellen Kohlenwasserstoffzonen und Vitrinitreflexion (Frey 1987).
- Figur 2.2: Verbreitung der geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz (aus NAB 07-35) und Einteilung der in NAB 07-35 untersuchten 27 Sammelprofile in neun tektonische Räume zur detaillierten Überprüfung.
- Figur 2.3: Lithostratigraphisches Profil des Ultrahelvetikums am Lukmanierpass (Fig. 1, Profil 1 aus Etter 1987).
- Figur 2.4: Karte der Vitrinitisograde im Gebiet des Prättigaus (nach Mählmann & Petschick 1996; <http://www.geologie.uni-frankfurt.de/Ton/Ton09.pdf>, August 2009).
- Figur 3.1: Geologische Übersichtskarte der Prättigau-Schiefer zwischen Rhätikon und Plessur und Lage der Profilsuren in Figur 3.2 (Nänny 1948).
- Figur 3.2: Geologische Profile durch die Prättigau-Schiefer zwischen Rhätikon und Plessur (nach Nänny 1948).
- Figur 3.3: Ansichtsskizze der östlichen Alviergruppe (Briegel 1972).
- Figur 3.4: Schematisches geologisches Profil im Gebiet von Wartau (aus Haldimann 1998).

Tabellenverzeichnis

- Tabelle 3.1: SMA-Abfälle. Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche.
- Tabelle 3.2: HAA-Abfälle. Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereiche.
- Tabelle 3.3: SMA-Abfälle. Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine aufgrund der verschärften Anforderungen.
- Tabelle 3.4: HAA-Abfälle. Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine aufgrund der verschärften Anforderungen.

1 Einleitung

1.1 Der Sachplan Geologische Tiefenlager

Seit Ende 2008 liegen die Vorschläge geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager vor, die im Auftrag der Entsorgungspflichtigen von der Nagra nach den im Sachplan Geologische Tiefenlager SGT festgelegten sicherheitstechnischen Kriterien ausgearbeitet wurden. Der Bund hat die Bevölkerung in diesen Regionen über das weitere Vorgehen informiert.

Die Standortsuche erfolgt in drei Etappen und wird rund zehn Jahre dauern. Jede Etappe wird mit einem breiten Anhörungsverfahren begleitet. Am Ende entscheidet der Bundesrat über den Standort.

In Etappe 1 hat das ENSI die Auswahl der geologischen Standortgebiete aus sicherheitstechnischer Sicht zu beurteilen und dazu ein Gutachten zu erstellen. In geologischen Fragen wird das ENSI dabei durch swisstopo, die KNE und eine Reihe von privaten Ingenieur- und Geologiebüros unterstützt.

1.2 Rolle der Landesgeologie im Sachplanverfahren

swisstopo, Landesgeologie, ist die Fachstelle des Bundes für Geologie. Sie stellt (gem. GeolG und LGeolV) dem Bund, den kantonalen Fachstellen sowie Dritten geologische Informationen zur Verfügung im Hinblick auf die nachhaltige Nutzung des geologischen Untergrunds, die Berücksichtigung der geologischen Begebenheiten in Planungs-, Konzessionierungs- und Bewilligungsverfahren sowie die Prävention vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen geologischer Prozesse auf Personen und Sachen. Zu den geologischen Daten von nationalem Interesse gehören insbesondere Vorkommen und Beschaffenheit von geeigneten Gesteinsformationen zur Lagerung von Stoffen und Abfällen (LGeolV Art. 5).

Die Landesgeologie hat unter anderem den Auftrag, die Bundesverwaltung sowie Dritte, denen Aufgaben des Bundes übertragen sind, in geologischen Fragen zu beraten und geologische Untersuchungen bei Projekten der Bundesverwaltung zu begleiten (LGeolV Art. 6). In diesem Kontext ist swisstopo in Organisation, Konzept und Umsetzung des Sachplans Geologische Tiefenlager involviert worden. Gemäss dem mit Bundesratsentscheid vom 2. April 2008 verabschiedeten Sachplan hat swisstopo folgende Aufgaben:

- swisstopo berät und unterstützt das ENSI im Sachplan- und Rahmenbewilligungsverfahren in geologischen Fragen.
- swisstopo ist Mitglied des Technischen Forums Sicherheit. Dieses Forum setzt sich aus Expertinnen und Experten des Bundes, der Standortkantone und Standortgebiete, der Bundesrepublik Deutschland sowie der Entsorgungspflichtigen zusammen. Das Forum diskutiert und beantwortet technische und wissenschaftliche Fragen zu Sicherheit und Geologie.
- Nach der behördlichen Überprüfung und vor der Vororientierung und Aufnahme der geologischen Standortgebiete in den Sachplan findet eine Anhörung und Mitwirkung, unter anderem durch Konsultation der betroffenen Bundesstellen, statt. In diesem Rahmen (RVOG Art. 62, LGeol Art. 17) wird swisstopo einbezogen, jeweils über den gesamten Inhalt der jeweiligen Sachplanetappe Stellung zu nehmen.

1.3 Von der Nagra eingereichte und begutachtete Dokumente

Folgende Dokumente wurden durch swisstopo begutachtet (Auftrag siehe Kap. 1.4):

- NAB 07-35: Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz.
- NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse.
- NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HAA-Lager. Geologische Grundlagen.

Zusätzlich wurden uns sämtliche in den oben genannten Berichten zitierten Grundlagenberichte, sofern diese nicht öffentlich zugänglich waren, von der Nagra zur Verfügung gestellt. Für die Beurteilung der Wirtgesteine wurden folgende Berichte der Nagra hinzugezogen:

- NAB 08-03: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums.
- NAB 08-43: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Ton- und Mergel-Formationen im Faltenjura und angrenzenden Gebieten.
- NAB 04-07: Hydrogeologie des unteren Malm (Oxfordian): Renggeri-Ton, Terrain à Chailles und Effinger Schichten.
- NAB 09-29: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra.

1.4 Auftrag der Landesgeologie

Mandatsgrundlage des vorliegenden Expertenberichtes ist der Vertrag zwischen der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK (in Rechtsnachfolge ab 01.01.2009 das Eidgenössische Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI) und swisstopo vom November 2008.

Gemäss diesem Vertrag wurde swisstopo, Landesgeologie für die Beurteilung der Etappe 1 des Sachplans Geologische Tiefenlager der folgende Auftrag übertragen:

- I. swisstopo beurteilt die von der Nagra in NAB 07-35 (Jordan 2007) schweizweit kompilierten stratigraphischen Profile und prüft,
 - ob die für die einzelnen Profile verwendeten Referenzen vollständig und aktuell sind,
 - ob die aus den Profilen abgeleiteten potenziellen Wirtgesteine gemäss der angegebenen Quellen sinnvoll sind und
 - ob die daraus resultierende Zusammenstellung der potenziellen Wirtgesteine in NTB 08-03 vollständig ist.

- II. Betreffend Vorschlag geologischer Standortgebiete der Nagra für SMA und HAA prüft swisstopo
- ob die für die Herleitung der bezeichneten Standortgebiete (NTB 08-04) herangezogene geologische Literatur vollständig ist oder ob für diese Gebiete allenfalls weitere Literatur zu berücksichtigen wäre und
 - inwiefern in den von der Nagra ausgewählten Standortgebieten Abweichungen zum stratigraphischen Referenzprofil vorliegen, die für die Auswahl und Charakterisierung des Wirtgesteins wichtig wären.

1.5 Ziel und Gliederung des Gutachtens

Wie anlässlich der Koordinationssitzungen mit dem ENSI vereinbart, äussert sich die Landesgeologie nicht zu allen Profilen im Detail, sondern beschränkt sich auf generelle Aussagen zu den Profilen in den geologischen Grossräumen. Es werden aber diejenigen Formationen im Detail betrachtet, zu welchen die Landesgeologie Fragen und/oder Ergänzungen hat.

Im ersten Teil des Berichtes (Kap. 2 und 3) werden die Sammelprofile der Sedimentgesteine – zusammengefasst in neun tektonische Räume – überprüft und besprochen, und es wird eine Beurteilung der daraus abgeleiteten Wirtgesteine vorgenommen. Im zweiten Teil (Kap. 4) wird die für die Herleitung der geologischen Standortgebiete herangezogene Literatur auf ihre Vollständigkeit und allfällige Abweichungen zu den stratigraphischen Sammelprofilen geprüft. Kap. 5 fasst die Schlussfolgerungen zu Etappe 1 zusammen. In einem letzten Kap. 6 äussert sich die Landesgeologie zu Fragen der Verbesserung der Datengrundlagen in den zukünftigen Phasen der Lagerrealisierung.

2 Beurteilung der Sammelprofile

2.1 Allgemeines

Die geologischen Grundlagen im Sachplanverfahren sind im Geologiebericht NTB 08-04 dargelegt. Die Auswahl potenzieller Wirtgesteine basiert vorwiegend auf 27 Sammelprofilen über die Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten, die im Bericht Jordan (2007) zusammengestellt sind und diskutiert werden. Die Profile umfassen jeweils ein grösseres Gebiet, als die später ausgeschiedenen Standortgebiete. In NTB 08-04 wurden später verfeinerte standortspezifische Profile erstellt (Kap. 5.5 in NTB 08-04), die auf den am nächsten gelegenen Tiefbohrungen beruhen.

Beim Bericht Jordan (2007) handelt es sich um einen Nagra-Arbeitsbericht (NAB 07-35). Diese Berichte sind auf Nachfrage zugänglich und werden seitens der Nagra auch weniger konsequent begutachtet als etwa die Technischen Berichte (NTB). Etliche „Unschärfen“ in der Ausdrucksweise bzw. in der Nomenklatur dürften mit diesem Umstand zu erklären sein.

Geht man davon aus, dass es sich bei Jordan (2007) um einen Grundlagenbericht handelt, sollte dieser eigentlich vor dem Geologie- bzw. dem Einengungsbericht der Nagra (NTB 08-04 bzw. NTB 08-03) erstellt worden sein. Mit dem Erscheinen der definitiven Version des Jordan-Berichtes im März 2009 war dies jedoch nicht gegeben.

Der Bericht führt ein Schlagwortregister mit den verwendeten Formationsnamen. Diese sind nicht immer definiert, was ein Nachvollziehen des Berichtes zum Teil erschwert.

2.2 Kriterien zur Beurteilung „potenziell tonreicher Formationen“

Ein wichtiges Kriterium zur Auswahl potenziell geeigneter Gesteinsformationen in Jordan (2007) ist der Tongehalt. Als geeignet werden dabei Formationen mit einem Tongehalt >25% ausgewählt.

Weitere, im Bericht Jordan (2007) berücksichtigte Kriterien sind

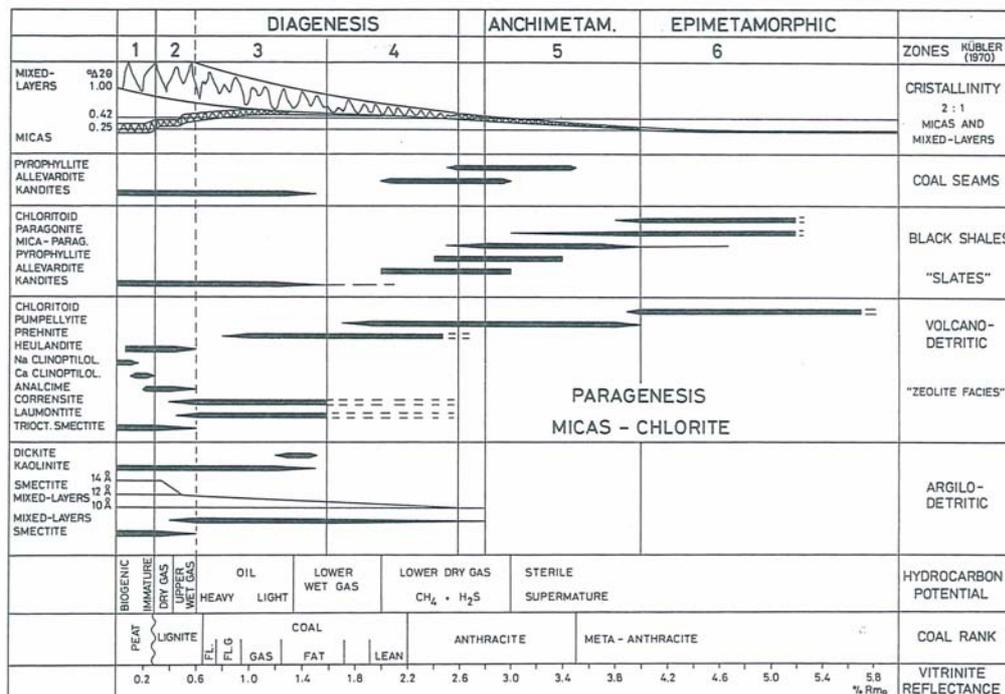
- eine minimale Mächtigkeit von 100 m sowie eine minimale laterale Ausdehnung von 2 km²,
- eine Tiefenlage kleiner als 800 m,
- die Berücksichtigung des Metamorphosegrades (Quellfähigkeit der Tone) sowie
- die Anfälligkeit des Gesteins auf Klüftung.

Bezüglich der Rolle des Tons beim Rückhalt der Radionuklide vermissen wir in den beiden Berichten NTB 08-03 und NTB 08-04 einen Bezug zu den umfangreichen technischen Berichten der Nagra zu diesem Thema. Der Ansatz über den Tongehalt ist in NTB 08-04 stark vereinfachend dargelegt und wird u.E. den unterschiedlichen Rollen des Tons bei den verschiedenen potentiellen Wirtgesteinen zu wenig gerecht.

So kann die feinkörnige Tonfraktion potenzielle Fließspfade verstopfen („clay smears“) oder quellfähige Tonminerale dichten Fließspfade durch Quellung ab. Zudem liefern Tonminerale auch Sorptionsoberflächen für Radionuklide, ein Prozess, welcher von der Nagra intensiv untersucht wurde und wird. Ein wichtiges Beurteilungskriterium bezüglich der Abdichtung von Fließwegen durch Tonminerale ist somit insbesondere der Anteil an quellfähigen Tonmineralen. Detaillierte Angaben zur Zusammensetzung der Tonfraktion existieren jedoch in den meisten Fällen nicht in ausreichendem Mass, wie es überhaupt auch schwierig ist, in der Literatur gesicherte Angaben zum Gehalt an Tonmineralen zu erhalten. Auch fehlen Kriterien bezüglich der Verteilung des Tongehaltes innerhalb einer Formation (dispers, diskrete Bänke, Mächtigkeit usw.), was entscheidenden Einfluss auf die Verteilung diskreter Fließwege haben kann.

Gemäss Nagra wird die Grenze zwischen quellfähigen, selbstabdichtenden Gesteinen und solchen, die ihr Selbstabdichtungsvermögen weitgehend verloren haben, an der Untergrenze der Grünschiefer-/Blauschiefer-Fazies gezogen (Jordan 2007 sowie NTB 08-04: S. 93f.). Gemäss untenstehendem Diagramm (Fig. 2.1) von Frey (1987) sollten u. E. jedoch nur Gesteine in der Diagenesezone berücksichtigt werden, da bereits in der Anchizone praktisch keine quellfähigen Tonminerale mehr vorhanden sind, die eine ausreichende Selbstabdichtung sicherstellen. Wird jedoch der Tonfraktion eine andere Funktion zugeschrieben (z.B. Abdichten von Fließspfadern sowie Reduzierung der hydraulischen Durchlässigkeit durch felsmechanische Deformation von nicht oder nur schwach quellbaren Tonmineralen), so müssten auch weitere tonhaltige Gesteine mit einer höher metamorphen Überprägung in die Evaluation miteinbezogen werden. Je nach Korngrösse, Festigkeit, Steifigkeit des Gefüges und des Porenwassergehaltes kann zum Beispiel kataklastisches Fließen (und somit Selbstabdichtung und Reduktion der hydraulischen Durchlässigkeit) auch bei nicht quellbaren Tonmineralen stattfinden.

Damit die von der Nagra vorgeschlagenen Wirtgesteine mit der Beurteilung der Landesgeologie verglichen werden können, wurde im Rahmen dieses Expertenberichtes an der von der Nagra vorgegebenen Metamorphosegrenze festgehalten.



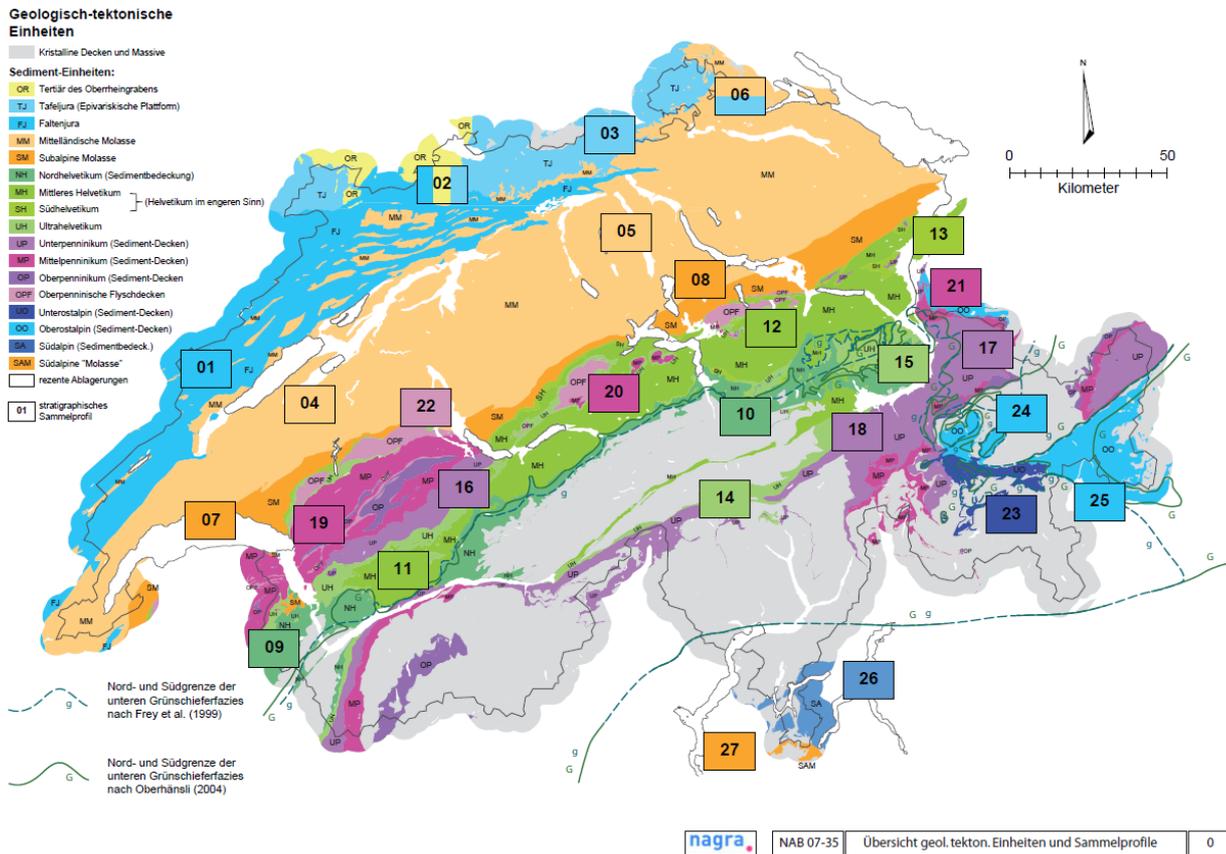
Figur 2.1: Vergleich von Mineralassoziationen, potenziellen Kohlenwasserstoffzonen und Vitrinitreflexion (Frey 1987).

Fazit

Der Bericht Jordan (2007) berücksichtigt die zur Beschreibung der Profile benötigte, relevante neuere Literatur. Bezüglich des Kriteriums Tongehalt steht generell nur eine heterogene Datenbasis zur Verfügung. Die Rolle des Tongehaltes bei der Abdichtung von wasserführenden Strukturen bzw. beim Rückhalt von Radionukliden in der Geosphäre ist in den beurteilten Berichten der Nagra nicht ausreichend dargelegt. Es fehlen häufig gesteinspezifische quantitative Daten.

2.3 Generelles Vorgehen

Zur Überprüfung der 27 Sammelprofile wurden die Profile in neun tektonische Räume zusammengefasst (Fig. 2.2; siehe Kap. 2.4 bis 2.12). Primär wurden die Profile auf ihre Vollständigkeit, die Aktualität der berücksichtigten Referenzen und auf ihre Richtigkeit hin beurteilt. Eine kritische Beurteilung der Auswahl potenziell geeigneter Wirtgesteine folgt in Kap. 3.



- Sammelprofile des Juras (Profile 01, 02, 03, 06)
- Sammelprofile der Molasse (Profile 04, 05, 06, 07, 08)
- Sammelprofile Helvetikum West (Profile 09, 10, 11)
- Sammelprofile Helvetikum Ost (Profile 10, 12, 13)
- Sammelprofile Ultrahelvetikum und ultrahelvetischer Flysch (Profile 14, 15)
- Sammelprofile Préalpes (Profile 16, 19, 20, 22)
- Sammelprofile Bündnerschiefer/Flysch (Profile 17, 18)
- Sammelprofile Ostalpin (Profile 21, 23, 24, 25)
- Sammelprofile der Südalpen (Profile 26, 27)

Figur 2.2: Verbreitung der geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz (aus NAB 07-35) und Einteilung der in NAB 07-35 untersuchten 27 Sammelprofile in neun tektonische Räume zur detaillierten Überprüfung.

2.4 Sammelprofile Jura (Profile 01, 02, 03, 06)

2.4.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Die in Jordan (2007) zitierte Literatur entspricht nicht dem aktuellen Stand der Publikationen über den Jura, es fehlen einige neuere stratigraphische Arbeiten, welche jedoch in NTB 08-04 vorhanden sind (z.B. Gygi 2003, Burkhalter 1996). Auf die Qualität der Sammelprofile 01, 02, 03 und 06 hat dieser Umstand jedoch keinen Einfluss, denn offenbar wurden die wesentlichen Erkenntnisse aus den nicht zitierten Arbeiten soweit ersichtlich in die Beurteilung miteinbezogen, und es wurden weder neueste Erkenntnisse noch relevante Formationen ausser Acht gelassen. Zurzeit werden auch an den Schweizer Universitäten keine stratigraphischen Untersuchungen im betreffenden Gebiet bzw. in den betreffenden Schichten und ihren Äquivalenten durchgeführt. Die Profile in Jordan (2007) sowie die davon abgeleiteten Interpretationen der Nagra widerspiegeln somit das derzeit vorhandene geologische Fachwissen.

2.4.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Die Erkenntnisse aus der für die Sammelprofile konsultierten Literatur sind mit Ausnahme von Profil 02 (Nordwestschweiz) korrekt und vollständig wiedergegeben. Im Profil 02 ist der Faziesübergang Plattform–Becken im Malm falsch dargestellt. Das Birmenstorf-Member ist gemäss den gut fundierten Arbeiten von Reinhart Gygi (z.B. Gygi 2003) das laterale (und zeitliche) Äquivalent der gesamten St-Ursanne-Formation, und das Effingen-Member geht seitlich in die Vellerat-Formation über. Auf die Auswahl von Wirtgesteinen hat dies jedoch keinen Einfluss. Die Selektion potenziell möglicher Wirtgesteine ist u.E. sinnvoll und vollständig und wird im Folgenden kurz diskutiert.

„Lias indifférent“

Der mächtige, vorwiegend tonige „Lias indifférent“ ist vor allem im südwestlichen Schweizer Mittelland anzutreffen (u.a. in der Subjurassischen Zone) und wird von Jordan (2007) „aus mineralogisch-petrographischer Sicht“ als durchaus mögliches Wirtgestein beurteilt. Gemäss Jordan (2007) liegt er jedoch in der Subjurassischen Zone in Tiefen von über 1000 m und wird deshalb als Wirtgestein nicht weiter verfolgt, auch wenn Jordan (2007) einräumt, dass „die Datenlage und somit Kenntnisse zur räumlichen Ausdehnung der günstigen Lithologien äusserst rudimentär“ seien (siehe auch Kap. 3.1.1).

Opalinus-Ton

Der Opalinus-Ton als Formation ist aufgrund der ausgedehnten Untersuchungen im Felslabor Mont Terri und in den Nagra-Tiefbohrungen gut untersucht. Die vorhandenen Erkenntnisse wurden korrekt in die Beurteilung dieser Formation aufgenommen.

„Brauner Dogger“

Die Bezeichnung „Brauner Dogger“ wird in Jordan (2007) nicht verwendet und die entsprechenden Einheiten (zwischen Opalinus-Ton und Birmenstorf-Member) werden nicht als „wirtgesteinswürdig“ betrachtet bzw. näher beschrieben (siehe z.B. Profil 6). In NTB 08-04 wird der Begriff Tongesteinsabfolge ‚Brauner Dogger‘ verwendet. Dieser ist jedoch unseres Erachtens in sprachlicher und speziell in nomenklatorischer Hinsicht unglücklich gewählt und sollte deshalb nur in doppelten Anführungszeichen verwendet werden.

Der „Braune Dogger“ wird als tonreiche Abfolge beschrieben. Diese Beschreibung gibt den tatsächlichen Aufbau dieser sehr heterogenen Abfolge nur bedingt wieder. Wo der „Braune Dogger“ (oder Teile davon) gut aufgeschlossen ist (westlich des Unterlaufes der Aare, Bohrungen

im Thurgauer Seerücken), zeigen sich verschiedene Fazies- und Mächtigkeitswechsel über Distanzen, die weit geringer sind als die seitlichen Abstände zwischen den wenigen, weit (15–20 km) auseinander liegenden Bohrungen im Gebiet Lägeren–Schaffhausen. Unter diesem Aspekt muss auch die Aussagekraft hydraulischer Tests und mineralogischer Untersuchungen in diesen Bohrungen bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit und Faziesvariabilität relativiert werden.

Effingen-Member

Die Eignung des Effingen-Members als Wirtgestein wird in NTB 08-04 im SW der NNE–SSW gerichteten Störungen (Rheintalgrabensystem) deutlich negativer beurteilt als nordöstlich derselben. Insbesondere wird das Risiko höherer kluft- oder karstbedingter Durchlässigkeiten nur im Westen als bedeutend eingeschätzt (Eichenberger et al. 2007). Die Nagra beurteilt den Indikator „Potential zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)“ im Osten aufgrund fehlender Wasserfließwege als bedingt günstig (Selbstabdichtung der Brüche infolge hoher Gehalte an quellfähigen Tonen). Dafür fehlen aufgrund der geringen Datendichte eindeutige Evidenzen, aber auch für die Einschätzung, dass diese Selbstheilung von Brüchen im SW nicht ebenso eintritt.

In Kap. 3 ist die Eignung der oben genannten Einheiten „Lias indifférent“, Opalinus-Ton, „Brauner Dogger“ und Effingen-Member als Wirtgestein diskutiert.

2.5 Sammelprofile Molasse (Profile 04, 05, 06, 07, 08)

2.5.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Insgesamt sind die meisten relevanten und neueren Arbeiten zu den Molasseformationen zitiert und korrekt in die Profile eingegangen. Folgende neuere Arbeiten fehlen in Jordan (2007): Morend (2000): Dissertation über hoch auflösende Seismik in der USM der Westschweiz (und weitere Detailpublikationen: Morend et al. 1998, 2002); Berger et al. (2005): Aktuellste Publikation zur Stratigraphie und Paläogeographie des Tertiärs in Molasse und Oberrheingraben (ergänzt Berger 1996); Keller et al. (1990): Detailstudie zu Fazies und Architektur der USM in der Ostschweiz.

Gestützt auf Bohrbefunde (Keller et al. 1990) und Seismik (Morend 2000) vertiefen diese Arbeiten in erster Linie die Kenntnisse des internen Aufbaus und der 3D-Architektur der Unteren Süsswassermolasse (USM). Die Ergebnisse zeigen, dass die Gesteinsheterogenitäten grösser sind als bislang (Jordan 2007) angenommen. Sinngemäss können diese Ergebnisse auch auf die OSM angewandt werden. Insbesondere zeigen diese, dass auch in vertikaler Richtung im grösseren Massstab erhöhte Durchlässigkeiten nicht auszuschliessen sind (z.B. durch das Vorhandensein amalgamierter Rinnensysteme).

2.5.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Die berücksichtigte Literatur ist in den Sammelprofilen im Wesentlichen korrekt wiedergegeben. Die aus den Profilen abgeleiteten potenziellen Wirtgesteine sind unseres Erachtens richtig ausgewählt.

Graue Mergelgruppe (Meletta-Schichten)

Innerhalb der Grauen Mergelgruppe interessieren nach Jordan (2007) die Meletta-Schichten zusammen mit den Bunten Mergeln. Letztere ergänzen die Graue Mergelgruppe an deren Basis um weitere ca. 80 m, wodurch die gesamte Abfolge eine Mächtigkeit von ca. 350 m erreicht. Neben der möglicherweise problematischen Randfazies, die einerseits schlecht prognostizierbar und andererseits in ihrer räumlichen Ausdehnung nicht gut bekannt ist, ist auch die tektonische Situation ungünstig (Randbereich Oberrheingraben, zahlreiche kleinräumige Störungen, erhöhte seismische Aktivität). Eine vertiefte Betrachtung dieser Einheit im weiteren Verfahren erscheint uns daher wenig sinnvoll (siehe auch Beurteilung hinsichtlich Eignung als Wirtgestein in Kap. 3).

Marnes bariolées s.str.

Die Marnes bariolées in der Molasse der Westschweiz (Profil 04) sind aus einzelnen Bohrungen (z.B. Ruppoldsried-1, Tschugg-1, Fendringen-1, Courtion-1 und Chapelle-1) sowie Aufschlüssen (Strunck 2001) bekannt. Sie zeigen vereinzelt auftretende Sandsteinbänke (Rinnensandsteine und Durchbruchfächer) in einer insgesamt sehr feinkörnigen Abfolge von Tonsteinen und Mergeln. Die Marnes bariolées stellen wohl die Einheit mit dem höchsten Anteil an feinkörnigen Sedimenten innerhalb der Molasse dar.

Die Angabe zur Mächtigkeit der Marnes bariolées s.l. ist bei Jordan (2007) mit 180–360 m potenziell unterschätzt, wurden doch in der Bohrung Courtion-1 ca. 480 m Marnes bariolées s.str. erbohrt (Morend 2000). Über die laterale Ausdehnung der Sandsteine ist nichts bekannt, allerdings ist aus dem Faziesmodell für die Marnes bariolées (fluviatile Schwemmebene, Strunck 2001) zu erwarten, dass die Sandrinnen lateral mächtiger werden und amalgamieren können. Eine vertiefte Betrachtung dieser Einheit erscheint uns daher aufgrund der zu erwartenden schwer prognostizierbaren Gesteinsheterogenität wenig sinnvoll (siehe auch Beurteilung hinsichtlich Eignung als Wirtgestein in Kap. 3).

„Oberaquitane Mergelzone“ der USM

Die „Oberaquitane Mergelzone“ (OAMZ) der USM wird im Profil 05 (Molasse zentrales Mittelland) mit einer Mächtigkeit von 0–150 m als potenziell geeignet beschrieben. Rinnensandsteine treten in der OAMZ selten auf. Im Profil 06 wird die Mächtigkeit mit 0–120 m und im entsprechenden Text mit maximal 75 m angegeben, wodurch diese Gesteine aus geometrischen Überlegungen als Wirtgestein nicht mehr in Betracht gezogen wurden. Zusätzlich wird die gesamte Formation von gut durchlässigen Sandsteinen der OMM überlagert.

Im NTB 08-04 wird die OAMZ mit der unterliegenden Oberen Bunten Molasse zusammengefasst. In Profil 06 erscheint diese Einheit jedoch nicht mehr als potenzielles Wirtgestein, und die USM wird als Einheit nicht mehr behandelt. Gemäss der Antwort der Nagra auf unsere Frage (NAB 09-29) wurde die OAMZ von der Nagra wegen der meist geringen Mächtigkeit nur als gegen oben abschirmender „Deckel“, nicht aber als potenzielles Wirtgestein im engeren Sinn betrachtet (Nagra NTB 94-10). Die Einstufung der OAMZ als potenzielles Wirtgestein in Jordan (2007) wurde „versehentlich nicht korrigiert“ und ist deshalb dort fälschlicherweise als potenzielles Wirtgestein aufgeführt. Der Ansicht, dass die OAMZ nicht als potenzielles Wirtgestein in Frage kommt, schliessen wir (swisstopo) uns an.

Käpfnach-Formation (basale OSM / Basismergelzone) und Bodensee-Schüttung

Die basale OSM inklusive der Käpfnach-Formation in den Profilen 05 (Molasse zentrales Mittelland) und 06 (Weinland bis Bodensee) besteht aus einer mächtigen, tonreichen Abfolge, die zwischen den beiden grossen Schuttfächern des Napf und Hörnli abgelagert wurde (betrifft v.a. die Region Lindenbergr-Albis). Die Tektonik spielt hier, im Gegensatz zum westschweizeri-

schen Molassebecken, jedoch eine deutlich geringere Rolle. Erschwerend kommt hinzu, dass im Gebiet Zürich–Winterthur die Mächtigkeit der Überdeckung meist unter 400 m beträgt (Naef & Merz 1999). Für die Eignung als Wirtgestein gilt u.E. dieselbe Einschränkung wie für die Marnes bariolées, nämlich dass uns aufgrund der Gesteinsheterogenität durch gelegentliche Rinnensandsteine (bei sogar noch höheren Anteilen an Rinnensandsteinen) eine vertiefte Betrachtung der Käpfnach-Formation bzw. Bodensee-Schüttung wenig sinnvoll erscheint (siehe auch Beurteilung hinsichtlich Eignung als Wirtgestein in Kap. 3).

Subalpine Molasse

Die Angaben zur Subalpinen Molasse in den Profilen 07 (Westschweiz) und 08 (Ostschweiz) sind inhaltlich insofern richtig, als alle relevanten stratigraphischen Einheiten berücksichtigt wurden und in ihrer Mächtigkeit korrekt erfasst sind, mit Ausnahme der Unteren Bunten Molasse, die in Profil 08 nur reduziert auf die basale Einheit dargestellt ist.

Die Darstellung mit Flysch im stratigraphischen Verband mit der Molasse (UMM) ist in der Westschweiz in dieser Form nirgends bekannt. Man geht vielmehr davon aus, dass die Gesteine in unterschiedlichen tektonischen Schuppen einander überlagern (Subalpine Molasse unter Wildflysch/Flysch, siehe auch Darstellung auf Profil 08).

Die Darstellung von USM bis basale OSM im Sammelprofil 08 (Subalpine Molasse der Zentral- und Ostschweiz) ist fragwürdig und schwer nachvollziehbar, da hier individuelle Schüttungssysteme (z.B. Rigi, Speer) in einem einzigen Profil erfasst sind. Zwar ist die Fazies der Sedimente vergleichbar, die Faziesentwicklung in den einzelnen Schuttfächersystemen verläuft hingegen individuell. Zwei Profile (zentrale bzw. östliche Molasse) würden die Geologie der USM- bis OSM-Schüttungen nachvollziehbarer und realitätsnäher abbilden.

Im Profil 08 wird die Eignung der Brendenbach-Mergel als potenzielles Wirtgestein diskutiert und aufgrund lithologischer und v.a. topographisch-struktureller Überlegungen als ungeeignet bewertet. Aus unserer Sicht ebenso diskussionswürdig wären ähnliche Vorkommen in den tieferen Abschnitten der USM der Subalpinen Molasse, die feinkörnigen Serien der Molasse Rouge bzw. der Unteren Bunten Molasse, die *zwischen* den Schuttfächern abgelagert wurden. Diese stellen zwar lokale Bildungen dar, können jedoch mehrere 100 m Mächtigkeit erreichen (Habicht 1987). So bildet die Untere Bunte Molasse der Speer-Schuppe zwischen Speer und Stockberg entlang der Thur eine bis ca. 700 m mächtige, tonreiche Abfolge zwischen zwei Schuttfächern (Kempf et al. 1999 bzw. Figur 12 in Jordan 2007). Die topographisch-strukturellen Gegebenheiten wären hier deutlich günstiger als bei den Brendenbach-Mergeln: Die Mächtigkeit der Abfolge, ihre laterale Ausdehnung und die Überlagerung könnten trotz Schrägstellung (ca. 30–35°) als geeignet betrachtet werden.

Ungünstig für die Eignung als Wirtgestein sind sowohl die Heterogenität im Profil (einzelne Sandstein- und Konglomeratrinnen innerhalb der tonreichen Abfolge) als auch die Tektonik (unmittelbar an der alpinen Hauptüberschiebung gelegen). Aus diesen Gründen kommen die Gesteine der Subalpinen Molasse als potenzielle Wirtgesteine u.E. nicht in Frage.

2.6 Sammelprofile Helvetikum West (Profile 09, 10, 11)

2.6.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Ingesamt sind im Westteil des Helvetikums alle relevanten und neueren Arbeiten zitiert. Eine Ausnahme bilden die Publikationen von Tröhler (1965), Dollfus (1965) und Menkveld (1995), die bei der Diskussion der Glockhaus-Formation und des Mols-Members der Bommerstein-Formation erwähnt werden sollten. Die Angaben aus der Literatur wurden, mit Ausnahme der Palfris-Formation, grösstenteils korrekt in die Sammelprofile übernommen (siehe unten).

2.6.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Marnes à Globigérines

Diese Mergel werden in NTB 08-04 innerhalb der Mergelformationen des Helvetikums behandelt und treten als eigene Einheit nicht mehr auf. Aufgrund ihrer Lithologie (Tongehalt) eignen sich diese Gesteine als Wirtgestein. Insbesondere in der Westschweiz ist jedoch gemäss Haldimann (2008) deren dreidimensionale Ausdehnung nicht näher bekannt und die Prognostizierbarkeit schwierig.

Drusberg-Formation

Im Sammelprofil 11 ist die 100–120 m mächtige Drusberg-Formation verzeichnet, die aber von Jordan nicht als potenziell mögliches Wirtgestein betrachtet wird. Es handelt sich im Wesentlichen um eine Abfolge von dünnen Kieselkalkbänken und sandig-tonigen schiefrigen Mergeln, die anchimetamorph sind (Lauber 1975). Gemäss Moser (1985, Fig. 5) beträgt ihre (z.T. akkumulierte) Mächtigkeit gar 100–280 m. Wegen der bestehenden lithologischen Analogie zum Effingen-Member sollten diese Schichten ebenfalls als mögliche Wirtgesteine diskutiert werden, umso mehr, als Kieselkalk kaum je verkarstet ist.

Palfris-Formation

In Jordan (2007) wird die Kreide in der Westschweiz als fast ausschliesslich kalkig bezeichnet, obschon die Palfris-Formation im Profil 09 tonig gezeichnet ist. Im Sammelprofil 9 werden ca. 100–200 m Palfris-Formation ausgeschieden. Es wird in den Berichten nicht näher darauf eingegangen, wo sich diese Abfolgen in der Westschweiz befinden. Nach Goy-Eggenberger (1998) liegt ein Teil der Palfris-Formation im Westen noch im Diagenesebereich.

Aalénien-Tonschiefer

Aalénien-Tonschiefer treten in der Westschweiz sowohl im Faltenkern der Morcles-Decke als auch in der tektonisch höher gelegenen Wildhorn-Decke auf. Bezüglich des Metamorphosegrades in der Morcles-Decke beurteilen wir die Figur von Goy-Eggenberger (1998) dahingehend, dass im Faltenkern ein Teil der Aalénien-Tonschiefer noch der Anchizone zuzuordnen ist (nördlicher Teil, Gebiet Ovronnaz, siehe auch Fig. 4.2-2 in NTB 08-04).

Die Mächtigkeit der im Profil 11 von Jordan (2007) gezeichneten Tonschiefer des Doggers des Wildhorn-Komplexes (Bommerstein-Formation) wird mit 200–500 m angegeben. Die darin eingeschlossene Glockhaus-Serie besteht allerdings zum grössten Teil aus quarzitischen und kalkigen Sandsteinen (Tröhler 1965, Dollfus 1965). Die ursprüngliche Mächtigkeit der unterlagernden Basalen Tonschiefer (Aalénien) ist geringer und kann gemäss Moser (1985) in der Westschweiz auf ca. 170–200 m geschätzt werden (Lias schisteux inkl. Aalénien-Schiefer). Durch isoklinale Verfaltung geschaffene Akkumulationen sind möglich.

Eine Beurteilung, ob die oben genannten Einheiten Marnes à Globigérines, Drusberg-Formation, Palfris-Formation und Aalénien-Tonschiefer die Kriterien an ein Wirtgestein erfüllen, erfolgt in Kap. 3.

2.7 Sammelprofile Helvetikum Ost (Profile 10, 12, 13)

2.7.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Die Referenzen für die Sammelprofile sind aktuell und ausreichend. Der Verweis auf diverse unpublizierte Exkursions- und Vorlesungsbeilagen (Profile 12, 13) ist allerdings wenig hilfreich. Die Aussagen betreffend der Stad-Mergel/Globigerinenmergel könnten mit Hinweisen auf entsprechende Lokalarbeiten ergänzt werden (z.B. Rüefli 1959).

2.7.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Die Sammelprofile sind korrekt dargestellt und die geeigneten Wirtgesteine vollständig erfasst. Im Profil 10 werden die Stad-Mergel/Globigerinenmergel als mögliches Wirtgestein diskutiert. Es wird eine Mächtigkeit von 200 m angegeben. Dies würde für ein SMA-Lager ausreichen. Der Bericht Jordan (2007) gibt aber weder Hinweise auf die Lokalitäten, wo diese Mächtigkeit vorhanden ist, noch wird begründet, warum diese Option nicht weiterverfolgt wird.

In Kap. 3 ist die Eignung der oben genannten Einheiten „Palfris-Formation und Stad-Mergel/Globigerinenmergel als Wirtgestein diskutiert.

2.8 Sammelprofile Ultrahelvetikum und ultrahelvetischer Flysch (Profile 14, 15)

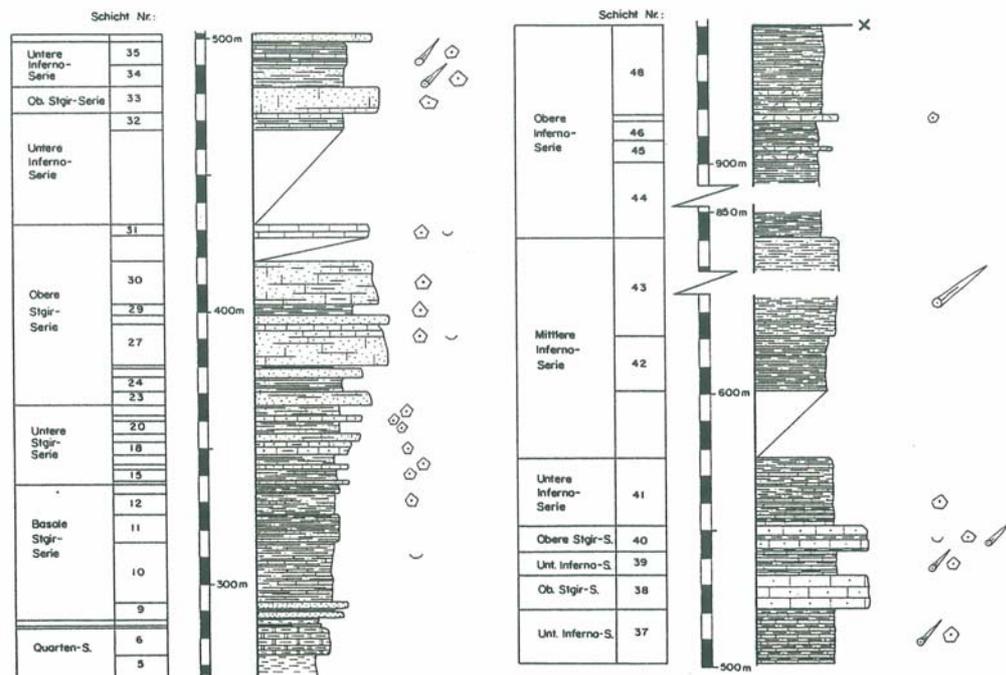
2.8.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Auf dem Sammelprofil 14 sollten neben Etter (1986) auch Jung (1963), Baumer (1964, dieser ist nur im Text aufgeführt) und Frey (1967) erwähnt werden. Das Sammelprofil 15 ist korrekt abgehandelt, sollte aber mehr als nur die Sardona-Decke umfassen (siehe unten).

2.8.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Die graphische Darstellung des Sammelprofils 14 gibt die Lithologie und die Mächtigkeiten, besonders für die Inferno-Serie, nicht korrekt wieder. In letzterer gibt es beispielsweise keine massigen Kalke (vgl. Profil Lukmanierpass, Fig. 2.3), und die bis 500 m betragende Mächtigkeit der Coroi-Tonschiefer wird massstäblich nicht korrekt wiedergegeben. Dies ändert aber nichts am Ausschluss dieser Serie aufgrund des zu hohen Metamorphosegrades.

Was hingegen fehlt, ist eine Diskussion der südhelvetischen Flysche der Zentral- und Ostschweiz (Südelbach-Serie, Wildflysch, Blattengrat-Decke, Ragazer Flysch; vgl. Bayer 1982, S. 58ff.). Insbesondere die Vorkommen im Weisstannental (Lihou 1996: Profil B und C; Rüefli 1959) und Krauchtal (Bisig 1957) erfordern einen zusätzlichen Kommentar. Zudem sollte nicht nur die einzelne Flyscheinheit, sondern die Einschlusswirksamkeit der gesamten Abfolge (Sardona/Blattengrat/Sandstein-Dachschiefer-Komplex/Stad-Mergel) dargelegt werden (siehe auch Beurteilung hinsichtlich Eignung als Wirtgestein in Kap. 3).



Figur 2.3: Lithostratigraphisches Profil des Ultrahelvetikums am Lukmanierpass (Fig. 1, Profil 1 aus Etter 1987).

2.9 Sammelprofile Préalpes (Profile 16, 19, 20, 22)

2.9.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Insgesamt sind in den Préalpes die relevanten und neueren Arbeiten berücksichtigt und in die Profile integriert worden. Folgende zwei wichtige Referenzen fehlen: Basabe-Rodríguez (1992) und Baud & Septfontaine (1980). Zusätzlich sei bemerkt, dass im Profil 19 in NAB 07-35 stellenweise die Préalpes médianes plastiques externes mit den Préalpes médianes plastiques internes verwechselt wurden. Beides hat jedoch auf die Beurteilung der Wirtgesteine keinen Einfluss, bzw. die Informationen stehen in Einklang mit der Beurteilung.

2.9.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

In den Profilen 16, 19 und 22 stimmen die Angaben in den Profilen mit der Beschreibung im Text und den Referenzen nicht überein. Profil 16: Ackermann (1986) sagt nicht, dass der Tonanteil über 25% liegt, sondern spricht lediglich von pelitischen Schichten; Profil 19: In der Literatur ist die Einheit A die tonreiche, nicht D (vgl. unten); Profil 22: Der Schlieren-Flysch weist im Profil generell zu wenig Ton auf (vgl. unten). Bei Figur 19 fehlt die Legende.

Staldengraben-Formation

Gemäss Jordan (2007) sind die obersten 100–170 m der Einheit D der Staldengraben-Formation tonreicher und sandärmer als der Rest der Formation. In gängigen Beschreibungen (Weidmann 1993, Plancherel 1979, Pasquier 2005) und besonders in der Definition dieser Formation (Spicher 1966, Septfontaine 1983) wird jedoch die Einheit A als unité schisteuse beschrieben. Dies wäre auch im Erosionsprofil des Sammelprofils gut ersichtlich, die Signatur stimmt jedoch an dieser Stelle im Sammelprofil nicht.

Frutigen-Flysch

Gemäss Ackermann (1986) ist die sprödetektonische Deformation in der Niesen-Decke beträchtlich. Die Sandstein- und Konglomeratlagen im Frutigen-Flysch stellen gemäss Basabe-Rodríguez (1992) lokal Kluftaquifere dar, mit einer lokal erhöhten Durchlässigkeit (Mikrokarst) und dem Potential zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten. Bezüglich des Metamorphosegrades wird vermutet, dass mindestens lokal grünschieferfazielle Bedingungen herrschten (transportierte Metamorphose; Mosar 1988).

Gurnigel-Schlieren-Flysch

Das Sammelprofil in Jordan (2007) ergibt bezüglich des Tongehalts im Gurnigel-Schlieren-Flyschkomplex ein verzerrtes Bild. Vor allem die Schichten der Hellstätt-Serie sind viel toniger ausgebildet als im Sammelprofil dargestellt (siehe dazu das Sammelprofil von Winkler 1983, S. 87). Dennoch dürfte der Tongehalt innerhalb dieser sehr heterogenen Einheit gesamthaft gesehen geringer als 25% sein. Allerdings stellt sich hier die Frage, ob die mineralogischen Anforderungen an ein Wirtgestein in Anbetracht des hohen Anteils an noch quellfähigen Tonmineralen (vgl. Winkler 1983, Stuijvenberg 1979) wirklich nicht erfüllt sind. Das Vorhandensein einzelner Quellhorizonte deutet darauf hin, dass auch in dieser Einheit lokal hydraulisch aktive Gesteinsschichten sowie ein verbundenes Kluftnetzwerk vorhanden sind. Neben der geringen Metamorphose (mittlere Diagenese) gilt es, die grosse Mächtigkeit dieser Einheit und die zumindest lokal relativ einfache Tektonik speziell zu erwähnen.

In Kap. 3 ist die Eignung der oben genannten Einheiten Staldengraben-Formation, Frutigen-Flysch und Gurnigel-Schlieren-Flysch als Wirtgestein diskutiert.

2.10 Sammelprofile Bündnerschiefer/Flysch (Profile 17, 18)

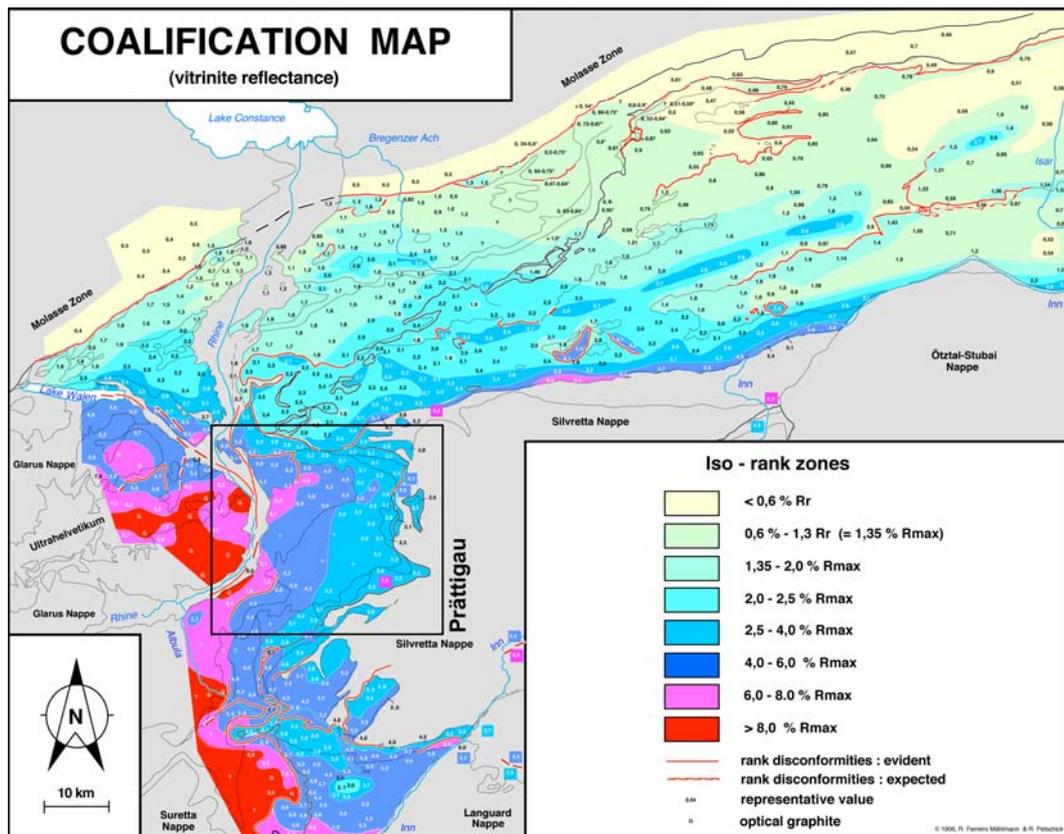
2.10.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Das Sammelprofil 18 ist inhaltlich korrekt, aber bei den Referenzen wurden Unstimmigkeiten festgestellt. Etter (1986) hat in den gotthardmassivischen Bündnerschiefern und der Trias gearbeitet und nicht in der Tomül-Decke, und Baumer (1964) liefert lediglich eine summarische Beschreibung der Lugnezer bzw. Sosto-Schiefer sowie der Terri-Schiefer, die nicht zur Tomül-Decke gehören. Korrekterweise müssten hier Steinmann (1994) und Streiff et al. (1976) sowie neu auch Wyss & Isler (2007) zitiert werden.

2.10.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Im Sammelprofil 17 wird die Valzeina-Formation als mögliches Wirtgestein diskutiert. Gemäss der Beschreibung von Jordan (2007: S. 58f.) weist die Valzeina-Formation eine grünschiefer- bis blauschieferfazielle Metamorphose auf. Dies steht im Widerspruch zu den Angaben von Ferreiro Mählmann (in Weh 1998) und Thum & Nabholz (1972: S. 32f.), die zeigen, dass die Valzeina-Formation mindestens im nördlichen Teil des Prättigau-Halbfensters (am Tschinasbach und an der Salgina-Brücke) noch im Bereich der Anchizone liegt (Fig. 2.4).

Das Sammelprofil 18 deckt nicht nur die Tomül-Decke, sondern auch die Grava-Decke ab, die ursprünglich die nördliche Fortsetzung der Tomül-Decke gebildet hat. Dies geht aus der Beschreibung allerdings nicht hervor. Zudem endet die Grava-Decke wenig südlich des Hinterrheins (Steinmann 1994: Fig. 3.4) und lässt sich nicht bis in die Misoixer Zone zurückverfolgen (siehe auch Beurteilung hinsichtlich Eignung als Wirtgestein in Kap. 3).



Figur 2.4: Karte der Vitrinitisograde im Gebiet des Prättigaus (nach Mählmann & Petschick 1996; <http://www.geologie.uni-frankfurt.de/Ton/Ton09.pdf>, August 2009).

2.11 Sammelprofile Ostalpin (Profil 21, 23, 24, 25)

2.11.1 Vollständigkeit und Aktualität der Referenzen

Das Sammelprofil 21 ist korrekt dargestellt. Die Quellenangaben sind jedoch lückenhaft: Gruner (1981) bearbeitete nur den Jura, und in den Erläuterungen zur hydrogeologischen Karte Toggenburg findet sich wenig Konkretes zur Lithostratigraphie. Hier müsste Weh (1998) zitiert werden.

Die auf Sammelprofil 23 angeführte Arbeit von Furrer (1985) fehlt im Literaturverzeichnis. Die Quellenangaben zu den Sammelprofilen 24 und 25 sind ausreichend und aktuell.

2.11.2 Beurteilung Sammelprofile und Selektion der Wirtgesteine

Entgegen der Aussage von Jordan (2007) existieren durchaus detaillierte Angaben zum „Neocom-Flysch“ (siehe Sammelprofil 21), nämlich bei Trümpy (1916), Allemann (1957) und Weh (1998). Die Mächtigkeit des „Neocom-Flyschs“ wird von Weh (Abb. 2.3.1) im Falknisgebiet mit 200–500 m angegeben (Jordan, 2007: bis 200 m). Die Lithologie erachten wir eher als ungeeignet für ein Tiefenlager.

Der das Sammelprofil 23 abschliessende God-Drosa-Flysch sollte ebenfalls als mögliches Wirtgestein diskutiert werden, und zwar zusammen mit der Emmat- und der Chanèls-Formation. Entgegen der Darstellung im Profil handelt es sich bei diesem Flysch um Tonschiefer und Mergel mit untergeordneten Kalkareniten und Feinbrekzien. Es ist zu vermuten, dass keine ausreichend grossen Vorkommen in geeigneter Tiefenlage existieren (vgl. z.B. Rösli 1944).

Die Begründung zum Ausschluss der Kössen- und Allgäu-Formation ist nicht überzeugend. Offensichtlich liegen keine konkreten Daten punkto Tonmineralogie/Hydrologie vor. Da es sich um eine Kalk-Mergel-Abfolge mit schlecht prognostizierbaren Übergängen in Brekzien handelt, kann dem Ausschluss trotzdem zugestimmt werden.

In den Sammelprofilen 24 und 25 sind alle potenziellen tonigen Wirtgesteine erfasst und korrekt beschrieben. Leider werden die Sulfatgesteine generell nicht kommentiert und es bleibt z.B. unklar, wie der Stugl-Gips (Stulser Gips) beurteilt wird. Gemäss Profil 24 weist dieser eine Mächtigkeit von bis zu 80 m auf. In der Profilkolonne ist aber nicht Gips, sondern ein Dolomit- und Brekzienintervall eingetragen. Auch wenn wir uns der Beurteilung der Nagra anschliessen und der Stugl-Gips die Anforderungen an ein Wirtgestein nicht erfüllt, sollten diese Punkte der Vollständigkeit halber noch geklärt werden (siehe Antwort der Nagra in NAB 09-29).

2.12 Sammelprofile der Südalpen (Profile 26, 27)

Die beiden Sammelprofile in den Südalpen sind umfassend und geben die sedimentären Bedingungen korrekt wieder. Die Beurteilung in Jordan (2007), wonach weder im Sottoceneri noch im Mendrisiotto potenzielle Wirtgesteinsformationen vorhanden sind, ist nachvollziehbar.

3 Beurteilung ausgewählter potenzieller Wirtgesteine

Die Beurteilung der Nagra der Wirtgesteine basiert auf dem Bericht Jordan (2007) und ist in den beiden Berichten NTB 08-03 (Einengungsbericht – Kap. 4) und NTB 08-04 (Geologiebericht – Kap. 5) dokumentiert. swisstopo hat diese Beurteilung, basierend auf den vorgegebenen Kriterien, überprüft. Die folgenden Tabellen 3.1 bis 3.4 sind den oben zitierten Berichten entnommen und grün hinterlegte Gesteinseinheiten werden in den folgenden Kapiteln diskutiert. Die Indikatoren Gesteinsfestigkeiten und Tiefenlage u.T. im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit wurden von swisstopo nicht beurteilt (blau hinterlegt).

Tabelle 3.1: SMA-Abfälle. Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine bzw. einflusswirksamer Gebirgsbereiche.

Prüfung der Mindestanforderungen zur Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine SMA											
Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren								Bemerkungen Nagra	
		Hydraulische Durchlässigkeit	Transmissivität präferenzzieller Freisetzungspfade	Potenzial zur Bildung neuer Wasserserwegsamkeiten (Verkarstung)	Mächtigkeit	Tiefenlage u.T. im Hinblick auf flächenhafte Erosion	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	Tiefenlage u.T. im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit		Laterale Ausdehnung
Karbonatgesteinsformationen verschiedenen Alters	Ganze Schweiz			zT							Wegen allg. hoher hydr. Durchlässigkeit nicht näher untersucht
Sandsteinformationen verschiedenen Alters	Ganze Schweiz										Wegen allg. hoher hydr. Durchlässigkeit nicht näher untersucht
Verrucano-Schiefer, Schiefer des Karbons	Helvetikum		gk							gk	Schiefer des Karbons haben ungenügende Ausdehnung
Playa-Serie	Westlicher Tafeljura										
Evaporitabfolgen der Trias	Tafeljura / SJZ				gk		gk		zT	zT	
Evaporitabfolgen der Trias	Alpen						zT				
Kössen- und Allgäu-Formation (tonige Fazies)	Ostalpin					zT					
Lias („Lias indifférent“)	Faltenjura / westliche SJZ									zT !	
Opalinus-Ton	westl. Tafeljura / Faltenjura / westl. SJZ									!	
Opalinus-Ton	östl. Tafeljura / östliche SJZ										
Aalénien-Tonschiefer	Helvetikum	gk !								gk !	Einziges Vorkommen liegt ungünstig hinsichtlich Seismizität.
Stalpengraben-Fm. (tonige Fazies)	Préalpes				zT !						
Tongesteinsabfolge ‚Brauner Dogger‘	Östlicher Tafeljura										
Effingen-Member	Faltenjura / westliche SJZ	zT	zT	zT							

Effingen-Member	östl. Tafeljura / östliche SJZ																			
Renggeri-Ton und Terrain à Chailles	Faltenjura / westl. Tafeljura				zT	zT														
Tonschiefer-Abfolgen der Bündnerschiefer	Penninikum		!																	
Scaglia	Südalpin																			
Mergel-Formationen des Helvetikums	Helvetikum	!					!	!											!	
Flysch-Formationen	Helvetikum/ Penninikum																			zT
USM (Marnes Bariolées s. str.)	westliches Molassebecken																			
Meletta-Schichten (Graue Mergelgr.)	Oberreingraben/ westl. Tafeljura																			
Formazione di Chiasso	Südalpine Molasse																			
Brendenbach-Mergel-Formation	Subalpine Molasse																			
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken																			
Quartäre Seeablag.	Molassebecken																			
Kristallingesteine	Nordschweiz																			
Kristallingesteine	Alpen																			

Legende:

-  Nagra: Mindestanforderung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt
-  swisstopo: Kommentare bzw. abweichende Beurteilung
-  swisstopo: Mindestanforderung eventuell nicht erfüllt
-  swisstopo: Erfüllen Mindestanforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit; (vertiefte Abklärungen in weiteren Schritten der Lagerrealisierung)
-  swisstopo: Indikatoren, welche durch swisstopo nicht beurteilt wurden

- gk Nagra: gekoppelte Eigenschaften
- zT Nagra: Mindestanforderung im betrachteten Verbreitungsraum z.T. nicht erfüllt
- ! swisstopo: Ergänzungen der Nagra in NAB 09-29 nachgeliefert

Tabelle 3.2: HAA-Abfälle. Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine bzw. einschliesswirksamer Gebirgsbereiche.

Prüfung der Mindestanforderungen zur Identifikation potenziell möglicher Wirtgesteine HAA											
Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren									Bemerkungen Nagra
		Hydraulische Durchlässigkeit	Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	Mächtigkeit	Tiefenlage u. T. im Hinblick auf flächenhafte Erosion	Rohstoffvorkommen innerhalb des Wirtgesteins	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften	Tiefenlage u. T. im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	Laterale Ausdehnung	
Kalksteinformationen verschiedenen Alters	östl. Tafeljura/ östliche SJZ			zT							Wegen allg. hoher hydr. Durchlässigkeit nicht näher untersucht
Sandsteinformationen verschiedenen Alters	östl. Tafeljura/ östliche SJZ										Wegen allg. hoher hydr. Durchlässigkeit nicht näher untersucht
Evaporitabfolgen der Trias	östl. Tafeljura/ östliche SJZ				gk		gk		zT	zT	
Opalinus-Ton	östl. Tafeljura / östliche SJZ										
Tongesteinsabfolge ‚Brauner Dogger‘	östlicher Tafeljura										
Effingen-Member	östl. Tafeljura / östliche SJZ										
USM (Marnes Bariolées s. str.)	westliches Molassebecken										
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken										
Quartäre Seeablagerungen	Molassebecken									zT	
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz										

Legende:

-  Nagra: Mindestanforderung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt
-  swisstopo: Kommentare bzw. abweichende Beurteilung
-  swisstopo: Mindestanforderung eventuell nicht erfüllt
-  swisstopo: Erfüllen Mindestanforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit; (vertiefte Abklärungen in weiteren Schritten der Lagerrealisierung)
-  swisstopo: Indikatoren, welche durch swisstopo nicht beurteilt wurden

- gk Nagra: gekoppelte Eigenschaften
- zT Nagra: Mindestanforderung im betrachteten Verbreitungsraum z.T. nicht erfüllt

Tabelle 3.3: SMA-Abfälle. Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine aufgrund der verschärften Anforderungen.

Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren	
		Hydraulische Durchlässigkeit	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit
Opalinus-Ton	östlicher Tafeljura / östliche SJZ		
Tongesteinsabfolge ‚Brauner Dogger‘	östlicher Tafeljura	X	X
Effingen-Member	östlicher Tafeljura / östliche SJZ	X	X
Mergel-Formationen	Helvetikum	!	
USM (Marnes bariolées s. str.)	Westliches Molassebecken	●	●
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	Östliches Molassebecken	●	●
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz		●
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Alpen		●

Legende: siehe Tabelle 3.4

Tabelle 3.4: HAA-Abfälle. Auswahl der bevorzugten Wirtgesteine aufgrund der verschärften Anforderungen.

Gesteinseinheit bzw. Gesteinsabfolge (Reihenfolge der Sedimentgesteine stratigraphisch)	Verbreitung	Indikatoren		
		Hydraulische Durchlässigkeit	Homogenität des Gesteinsaufbaus	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit
Opalinus-Ton	östlicher Tafeljura / östliche SJZ			
Tongesteinsabfolge ‚Brauner Dogger‘	östlicher Tafeljura	X	●	●
Effingen-Member	östlicher Tafeljura / östliche SJZ	X	●	●
USM (Marnes bariolées s. str.)	westliches Molassebecken	●	●	●
OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)	östliches Molassebecken	●	●	●
Kristallingesteine (wenig deformierte Blöcke)	Nordschweiz			●

Legende:

- Nagra: bevorzugtes Wirtgestein (HAA)
- Nagra: potenziell mögliches Wirtgestein (HAA)
- Nagra: verschärfte Anforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt
- swisstopo: verschärfte Anforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht erfüllt
- X swisstopo: Erfüllen verschärfte Anforderungen mit grosser Wahrscheinlichkeit; (für SMA vertiefte Abklärungen in weiteren Schritten der Lagerrealisierung)
- ! swisstopo: Ergänzungen der Nagra in NAB 09-29 nachgeliefert

3.1 Potenzielle Wirtgesteine für schwach- und mittelaktive Abfälle

3.1.1 Opalinus-Ton und „Lias indifférent“

Mindestanforderungen

Bezüglich der SMA-Tauglichkeit des Opalinus-Tons wird von der Nagra in der westlichen SJZ vor allem die begrenzte laterale Ausdehnung bemängelt. Aus den uns vorliegenden Unterlagen der Nagra (Fig. 5.2 aus NAB 08-43; vgl. Fig. 5.2-6 in NTB 08-04) geht nicht klar hervor, ob die Mächtigkeit des Opalinus-Tons in der westlichen SJZ tatsächlich ungenügend ist. In den Unterlagen ist die Datendichte im Westen gering und der daraus abgeleitete Verlauf der Isopachen (Figur 5.2) mittels linearer Interpolation nicht nachvollziehbar. Es ist aufgrund der vorhandenen Unterlagen nicht auszuschliessen, dass es in der westlichen SJZ Bereiche gibt, in denen der Opalinus-Ton in genügend grosser Mächtigkeit vorliegt. Zudem könnte der „Lias indifférent“ noch als Rahmengestein zum Wirtgesteinskörper hinzu gerechnet werden.

Es erstaunt zudem, dass in der Westschweiz der Opalinus-Ton die Anforderungen bezüglich Tiefenlage erfüllt (Tabelle 3.1), der unmittelbar darunterliegende „Lias indifférent“ hingegen nicht. Profile und Isohypsenkarten in Eichenberger et al. (in Vorb.) zeigen z.T. Tiefenlagen der Untergrenze Opalinus-Ton um bzw. leicht unter 1000 m (bei einem Fehler von mind. ± 100 m). In eine Beurteilung mit einzubeziehen ist u.E. auch die Frage, inwiefern tektonische Bruchsysteme das Gebiet der westlichen SJZ stören sowie auf welchen Grundlagen die geologischen Modelle basieren, welche für die Interpretation des Aufstiegs der Schichten am Jurasüdfuss herangezogen werden.

Jordan (2007) schreibt: „Vor allem beim mittleren Lias erscheint die Eignung als Wirtgestein aus mineralogisch-petrographischer Sicht durchaus möglich. Allerdings ist die Datenlage und somit Kenntnisse zur räumlichen Ausdehnung der günstigen Lithologien äusserst rudimentär.“ Dieser Beurteilung schliessen wir uns an, und wir haben deshalb bei der Nagra zusätzliche Angaben eingefordert (siehe NAB 09-29).

Hierfür hat die Nagra eine ergänzende Auswertung seismischer Linien und Interpretationen unter Berücksichtigung weiterer Daten der UNI Lausanne (Eichenberger et al. in Vorb.) vorgenommen und präsentiert. Dazu gehört insbesondere eine konturierte Karte des Top Lias im westlichen Molassebecken und der angrenzenden westlichen Subjurassischen Zone (siehe NAB 09-29). Diese Karte zeigt, dass westlich einer N-S-Linie bei Egerkingen die mesozoischen Schichten über einer Schwelle im Kristallin deutlich tiefer liegen, wodurch sich für den Opalinus-Ton und den unmittelbar darunter liegenden „Lias indifférent“ in der westlichen SJZ keine Gebiete mehr ergeben, welche die Anforderungen an einen Lagerstandort erfüllen. Zudem wurde gezeigt, dass nebst den bekannten rheinisch verlaufenden Störungen westlich des Neuenburgersees zusehends E-W-gerichtete Störungslinien auftreten (z.B. La-Lance-Störung), die konjugiert zu den Erstgenannten auftreten und die Tektonik in diesem Gebiet komplexieren.

Aufgrund dieser Informationen schliessen wir uns der Beurteilung der Nagra an und erachten für den Opalinus-Ton und den „Lias indifférent“ in der westlichen SJZ die Mindestanforderungen als nicht erfüllt.

Fazit

Jordan (2007) liefert eine gute Zusammenstellung der bestehenden Unterlagen und des aktuell vorhandenen Wissens zur Stratigraphie und Verteilung von Opalinus-Ton und „Lias indifférent“. Die ursprünglich von der Nagra eingereichten Dokumente beinhalten jedoch nur wenig Information zu Verbreitung und Mineralogie dieser Gesteinseinheiten in der westlichen SJZ. Basierend auf den von der Nagra nachgereichten Unterlagen (NAB 09-29) schliesst sich die Landesgeologie der Beurteilung der Nagra an, dass weder der Opalinus-Ton noch der „Lias indifférent“ in der westlichen SJZ als Wirtgestein in Frage kommen, dies insbesondere wegen der zu tiefen

Lage (>1000 m) sowie wegen der nach Westen hin komplexer werdenden Tektonik in der SJZ. Mit der Beurteilung des Opalinus-Tons im östlichen Tafeljura bzw. der östlichen SJZ ist swisstopo einverstanden.

Gasfrage

swisstopo macht an dieser Stelle auch darauf aufmerksam, dass die Gasfrage in Gesteinen mit den für Tiefenlager geforderten geringen Durchlässigkeiten (z.B. Opalinus-Ton) aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes nicht abschliessend gelöst ist. Gasbildungsrate und Gasakkumulationen sowie deren zeitliche Entwicklung hängen vom Abfallinventar, vom Einlagerungskonzept der SMA- und HAA-Abfälle, von den technischen Barrieren und von den Eigenschaften des Wirtgesteins ab. Dabei wird vor allem Wasserstoff gebildet, bedingt durch die Korrosion der Stahlmaterialien, aber auch Methan, welches aus dem Abbau der organischen Abfälle stammt. Ein Teil der Gase kann durch die „engineered barriers“ und wahrscheinlich durch die noch nicht abgedichtete Auflockerungszone entweichen (in die hangenden Aquifere oder direkt in die Biosphäre). Gase dringen aber auch ins Gestein ein, wobei mehrere Transportmechanismen denkbar sind: Lösung der Gase im Porenwasser und diffusiver Transport, klassischer Zweiphasentransport einer Gas- und einer Porenwasserphase mit Verdrängung des Porenwassers ins Gestein, Dilatation von Anisotropieflächen im Wirtgestein und Gas-Fracturing. Hinzu kommt noch, dass die Gaskennwerte im selben Wirtgestein stark variieren können.

Kritisch beurteilen wir insbesondere die Gaseintrittsdrücke und die Gasdurchlässigkeit für ein SMA-Lager im Opalinus-Ton im gesamten Untersuchungsraum. Versuche im Felslabor Mont Terri haben gezeigt, dass die Gas-Eintrittsdrücke sehr stark variieren und die Gas-Permeabilitäten sehr klein sind. Letzteres könnte vor allem bei hohen Gas-Akkumulationsraten in einem SMA-Lager problematisch sein (Gas kann nicht abgeführt werden und es besteht die Möglichkeit von Gas-Fracturing). Weiterführende Erkenntnisse dazu sind u.a. nach Auswertung und Interpretation der laufenden Gasexperimente im Felslabor Mont Terri zu erwarten (z.B. SB- und HG-A-Experimente, Bossart & Thury 2009).

Alternativ könnten neue Materialien anstelle der Stahlkanister verwendet werden, um die Wasserstoffbildungsrate bei HAA zu reduzieren. Bei den SMA-Abfällen (Stahl und organische Abfälle) ist aber eine Reduktion nur sehr bedingt möglich. Gasexperimente mit verschiedenen Gasen (u.a. auch Wasserstoff) sind im Feld (z.B. Mont Terri Felslabor) zu vertiefen, vor allem auch in anderen Faziestypen (z.B. sandige Fazies) und mit anderen Versuchsanordnungen (z.B. Richtungsabhängigkeit). Experimente mit alternativen Behältermaterialien, die keine oder nur wenige Korrosionsgase entstehen lassen, erachten wir ebenfalls als zielführend.

Bei den Experimenten im Mont Terri Felslabor ist die Nagra aktiv beteiligt (als Versuchleiter oder auch als Experimentdelegierte) und erste Resultate sind bezüglich Systemverhalten bereits in die Bewertung eines möglichen SMA-Lagers eingeflossen (NTB 08-07). Die Gasfrage wird die Nagra auch noch in den nächsten Jahren beschäftigen, da die Lagerrealisierung schrittweise erfolgt und entsprechend neue wissenschaftliche und technische Experimente (u.a. Gas Transportprozesse und Gasfliesswege, Materialforschung) geplant, durchgeführt und ausgewertet werden (RD & D Plan der Nagra, NTB 09-06).

Fazit

Gasexperimente mit verschiedenen Gasen (u.a. auch Wasserstoff) und alternativen Behältermaterialien sind im Feld (z.B. Mont Terri Felslabor) zu vertiefen, vor allem auch in anderen Faziestypen (z.B. sandige Fazies) und mit anderen Versuchsanordnungen (z.B. Richtungsabhängigkeit). Mit ersten belastbaren Aussagen aus den Experimenten kann frühestens in einigen Jahren gerechnet werden.

3.1.2 „Brauner Dogger“

Mindestanforderungen

Die Formationen des unteren (exklusive Opalinus-Ton), mittleren und oberen Doggers sind sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung bezüglich Fazies und Mächtigkeit sehr heterogen aufgebaut. Die Korrelationslängen könnten durchaus im Bereich von einem bis wenigen Kilometern liegen, wodurch die laterale Ausdehnung eines homogenen Blockes sehr eingeschränkt ist. In den kompetenteren Abschnitten des „Braunen Doggers“ sind Bruchsysteme und damit präferentielle Fliesswege zu erwarten. Die geochemischen Verhältnisse können zudem lokal ungünstig sein. Beispielsweise ist die Redoxpufferkapazität stark von der Mineralogie (Pyrit, organisches Material) und der Durchlässigkeit lokaler Aquifere abhängig. Ob wirklich überall reduzierende Verhältnisse herrschen, bezweifeln wir, da goethitische Eisenooxide und Partikel (z.B. Bohrung Weiach) mindestens ein starkes Indiz für ein lokal oxidierendes Milieu sind (Burkhalter 1995).

Hinsichtlich Rohstoffvorkommen ist das Eisenerzvorkommen von Herznach-Wölflinswil zu berücksichtigen, welches im stratigraphischen Bereich des „Braunen Doggers“ liegt. Von den ca. 5 m Mächtigkeit im Abbaugelände keilt es über eine Distanz von <10 km aus, was deutlich unterhalb der Distanz zwischen den Bohrungen Weiach und Benken ist. Der Dogger-beta-Sandstein ist im Süddeutschen Raum zudem als Aquifer sowie Kohlenwasserstoffspeichergestein bekannt. Es ist nicht auszuschliessen, dass er in dieser Eigenschaft auch im Untersuchungsgebiet auftritt.

Verschärfte Anforderungen

Im „Braunen Dogger“ gibt es mehrere Aquifere, die lokal erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen können (z.B. Wedelsandstein). Auch wenn in der Bohrung Benken tiefe Durchlässigkeiten gemessen wurden, ist regional mit erhöhten Durchlässigkeiten zu rechnen. Detaillierte Informationen über weitere hydraulische Tests und deren Kennwerte in den Aquifere liegen uns aber nicht vor. Hier kann ein hydraulisches Testprogramm Klarheit schaffen. Die Variabilität der Gesteinseigenschaften sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung sowie die zu erwartenden geringen Impedanzkontraste sind schlechte Voraussetzungen für eine verlässliche Charakterisierbarkeit der Untereinheiten des „Braunen Doggers“.

Fazit

Der „Braune Dogger“ wird von der Nagra aufgrund einiger weniger Aufschlüsse bzw. Bohrungen trotz der grossen internen Heterogenität flächendeckend günstig beurteilt. Insbesondere ist das Wissen bezüglich der lateralen Persistenz von höher durchlässigen Sedimentkörpern und deren Vernetzung nur rudimentär. Gestützt auf die Kenntnisse aus Gebieten mit höherer Aufschlussdichte muss von einer Variabilität von Fazies und Mächtigkeit einzelner Sedimentkörper im „Braunen Dogger“ im km-Bereich ausgegangen werden, wohingegen die Distanz zwischen den Datenpunkten im Gebiet zwischen Lägeren und Thurgauer Seerücken um einen Faktor zehn höher ist.

Ausserdem wurde das postulierte wichtige Phänomen der „clay smears“ im „Braunen Dogger“ bis anhin nicht beobachtet.

Basierend auf dem aktuellen Kenntnisstand teilt die Landesgeologie die Ansicht der Nagra, dass die Gesteine des „Braunen Doggers“ sowohl die Mindestanforderungen als auch die verschärften Anforderungen für ein SMA-Lager erfüllen. Es muss jedoch festgehalten werden, dass die Datenbasis äusserst schmal ist und die faziell bedingte laterale Variabilität mit den wenigen Informationsquellen, die zur Verfügung stehen, nicht erfasst werden kann. In den weiteren Schritten der Lagerrealisierung muss dieser Umstand berücksichtigt werden, damit zu den oben genannten Punkten belastbare Aussagen gemacht werden können.

3.1.3 Effingen-Member (SMA)

Mindestanforderungen

Dem Effingen-Member fehlen insbesondere im Hangenden geeignete Rahmengesteine mit Barrierenwirkung. Die hydraulisch wichtigen Kalkbankabfolgen innerhalb des Effingen-Members dürften aufgrund fazieller Überlegungen eine bedeutende laterale Persistenz aufweisen (mündl. Mitt. H.R. Bläsi, R. Gygi, s.a. NTB 08-04, S. 156 u. Fig. 4.3-15) und möglicherweise zusätzlich durch steil stehende Störungen intern vernetzt sein. Die Korrelation dieser Lagen hat sich namentlich in Bohrungen als schwierig erwiesen. Die hydrogeologischen und geochemischen Untersuchungen in den Bohrungen Oftringen und Küttingen-1 und -2 wurden näher geprüft (NAB 07-28, NAB 08-12, NAB 08-18 und NAB 08-47).

- Die Transmissivität der Gerstenhübel-Schichten in der Bohrung Küttingen-2 beträgt in einer Tiefe von 180 m unter Terrain $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (Testintervalllänge 40 m, siehe NAB 08-12, Fig. 4.3). Die erhöhten Durchlässigkeiten konnten transmissiven Brüchen zugeordnet werden. Ansonsten sind die Transmissivitäten deutlich tiefer (bis zu 2 Zehnerpotenzen). Es gibt scheinbar nur wenige tektonische Brüche in den Kalkbänken und Tonmergelabfolgen des unteren und oberen Effingen-Members. Dies könnte aber auch damit zusammenhängen, dass mit vertikalen Bohrungen nur sehr wenige steil stehende Brüche getroffen werden können. Hier müsste unbedingt eine Terzaghi-Korrektur (z.B. Ermittlung der Häufigkeit von Bruchflächen längs horizontaler Linien) vorgenommen werden.
- Die Chlorid- und He-4-Profile weisen in der Bohrung Oftringen vor allem auf diffusiven Stofftransport sowie auf lange Verweilzeiten des Porenwassers hin. Die Salinität des Porenwassers konnte aber nur indirekt ermittelt werden. Die geochemische Chlorid-Porosität ist deshalb nur sehr ungenau bestimmbar.
- Der aus den Chlorid- und He-4 Profilen abgeleitete diffusive Stofftransport steht nicht im Einklang mit den hohen Jodgehalten im Effingen-Member. Auch weist das Porenwasser aus den tieferen Bereichen der Bohrung Küttingen-2 eine recht gute Übereinstimmung mit der Jodquelle von Möriken-Wildegg auf, was eindeutig auf advektiven-dispersiven Stofftransport hinweist. Daraus kann geschlossen werden, dass die Effinger Schichten ein komplexes, teils diffusionsdominiertes (Kalkmergel), teils advektionsdominiertes System (geklüftete Kalkbankabfolgen, ev. auch Störungen in den Kalkmergeln) darstellen, zumindest in der Dekompaktionszone (Tiefe < 300 m), eventuell aber auch unterhalb dieser Zone (Tiefe > 300 m).

Aus dem oben Genannten geht hervor, dass transmissive Fliesswege im Effingen-Member vorhanden sind (vor allem in den Gerstenhübel-Schichten), auch wenn deren Frequenz nicht sehr hoch zu sein scheint. Diffusion ist zwar der dominante Transportprozess, Anteile von advektiv-dispersivem Stofftransport sind aber nicht ausschliessbar. Auch die geochemischen Resultate weisen auf eine gewisse Mobilität des Porenwassers hin.

Kalkbankabfolgen können zudem mit Reflexionsseismik nicht erfasst werden. Eine mikrofazielle Studie der Kalkbänke (autochthones Material vs. allochthones Plattformmaterial) könnte mehr Klarheit bezüglich der lateralen Persistenz von Kalkbankabfolgen schaffen. Nicht unmittelbar nachvollziehbar ist zudem, dass die Bewertung der hydraulischen Durchlässigkeit in der östlichen SJZ günstiger ausfällt als in der westlichen.

Es erstaunt, dass der wichtige Prozess der Mischungskorrosion in NTB 08-03 und 08-04 nirgends erwähnt ist. Unter Mischungskorrosion versteht man in der Speläologie die Korrosion von Kalzit, bedingt durch die Mischung zweier Wässer, die zwar kalzitgesättigt sind, aber verschiedene Konzentrationen von CaCO_3 und CO_2 aufweisen (Bögli 1963). Das Mischwasser löst zusätzlich Kalzit. Dieser Prozess ist nicht tiefenabhängig (Bögli 1963) und daher auch in tiefer liegenden Schichten des Effingen-Member zu erwarten, wenngleich in den Bohrungen keine

entsprechenden Lösungsstrukturen beobachtet worden sind. Der Prozess der Mischungskorrosion wird zusätzlich durch die vorhandenen transmissiven Elemente begünstigt. In transmissiven Brüchen bewegen sich die Porenwässer advektiv fort und mischen sich. Basierend auf Beobachtungen von Quellaustritten in Steinbrüchen geht die Nagra von lokal stark erhöhten Durchlässigkeiten (vermutlich $>10^{-7} \text{ m s}^{-1}$) aus (NTB 88-25, S. 195).

Somit ist Lösungsporosität in der Subjurassischen Zone zumindest stellenweise wahrscheinlich, und es muss damit gerechnet werden, dass räumlich schwierig prognostizierbare Wasserflusswege vorhanden sind.

Verschärfte Anforderungen

Die transmissiven Elemente in den Gerstenhübel-Schichten sowie der zu erwartende Prozess der Mischungskorrosion in Bereichen, in denen das Effingen-Member tiefer liegt, sind bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit kritische Elemente bei der Auswahl des Effingen-Members als potenzielles Wirtgestein. Das Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung) im Effingen-Member ist auch in grösseren Tiefen gegeben. Die Impedanzkontraste der Kalkbankabfolgen sind für eine seismische Charakterisierung zu gering.

Fazit

Bedingt durch einen hohen Kalkgehalt des Effingen-Members (durchschnittliche Werte von >50%) deformiert das Gestein spröde, und es entstehen vor allem in den Kalkbankabfolgen Klüfte und Brüche. Aufgrund von Mischungskorrosion ist zu erwarten, dass diese Diskontinuitäten zur Verkarstung neigen.

Aufgrund der vorhandenen Daten sind die Mindestanforderungen wie auch die verschärften Anforderungen erfüllt. Untersuchungen in den zukünftigen Phasen der Lagerrealisierung müssen jedoch belastbare Ergebnisse zu den oben genannten Vorbehalten liefern.

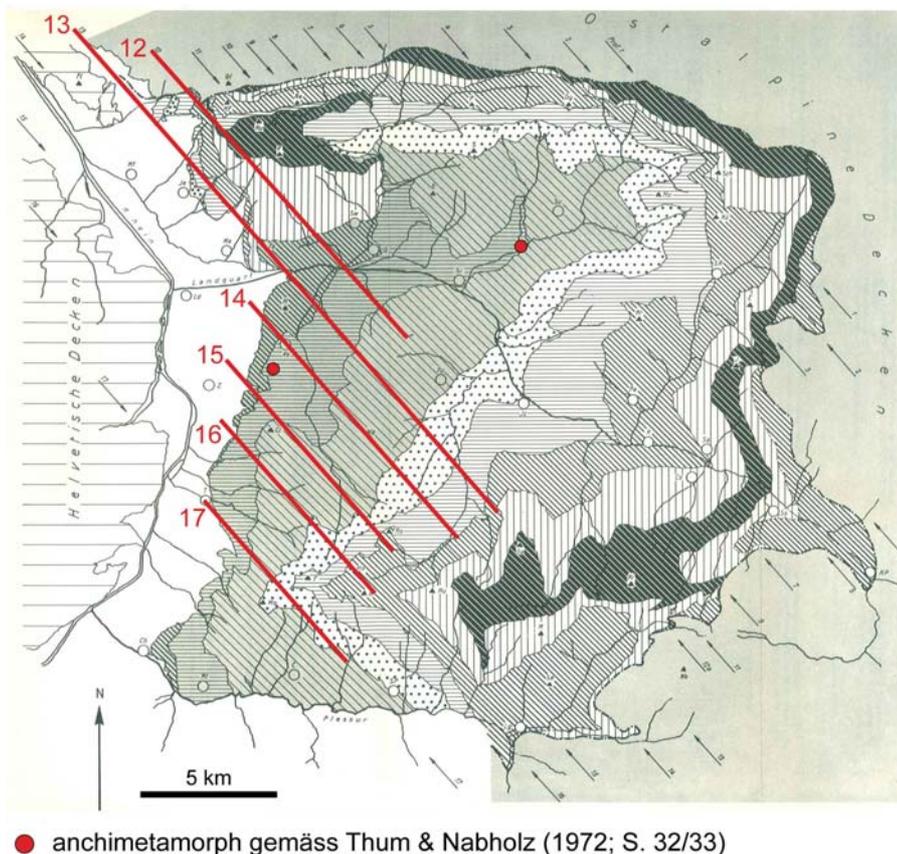
3.1.4 Tonschieferabfolgen der Bündnerschiefer

Mindestanforderungen

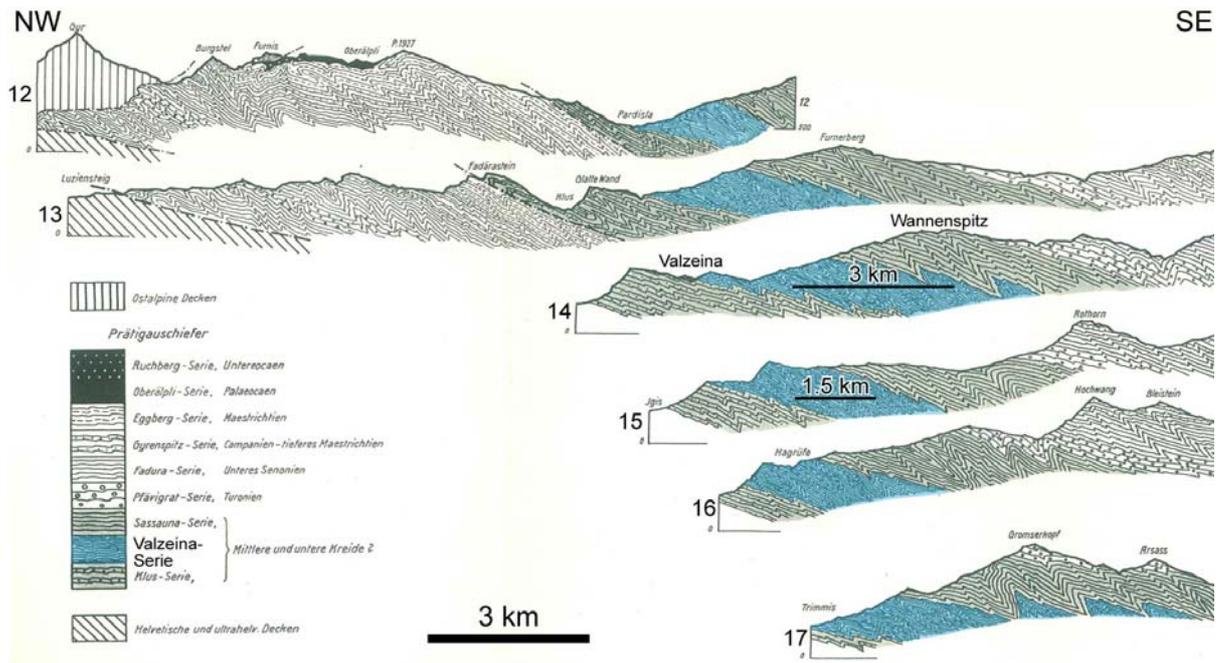
Bei der Beurteilung der Bündnerschiefer ist der Metamorphosegrad ein wichtiges Kriterium (siehe auch Kap. 2.10). Es gibt erhebliche Unsicherheiten bei der gesamtheitlichen Interpretation der Metamorphose, insbesondere bezüglich der Lage der Grenze Anchi-zone/Grünschieferfazies. Da die tonige Valzeina-Formation mindestens teilweise nachgewiesenermassen (vgl. Thum & Nabholz 1972) nur anchimetamorph ist, dürften die Mindestanforderungen punkto präferenzierter Freisetzungspfade lokal erfüllt sein.

Die Herleitung einer signifikanten, grossräumigen Durchlässigkeit der Bündnerschiefer aufgrund des Aufstiegs von CO₂ (NTB 08-04: S. 110) stellt kein belastbares Argument dar. Die angeführten Mineralquellen (im Engadin und bei Chur/Bonaduz) liegen alle auf oder nahe bedeutender Störungszonen (= prädestinierter Aufstiegs Pfad für H₂O, CO₂, He; vgl. auch Hartmann 1998) und sind zudem mehr als 10 km vom potenziellen Lagergebiet entfernt. Zudem müsste nachgewiesen sein, dass das CO₂ tatsächlich aus grosser Tiefe und nicht aus Niederschlagswasser stammt.

Die minimalen Anforderungen an die laterale Ausdehnung sind gemäss Auskunft der Nagra (NAB 09-29) trotz der grossen ursprünglichen Mächtigkeit von 550 m (Nänny 1948) und tektonischen Akkumulationen höchstens nördlich Schiers und in der Gegend von Valzeina erreicht (Figur 3.1 und 3.2). Dabei werden die Verhältnisse bei Schiers als hypothetisch bezeichnet, da die liegende Klus-Formation nicht aufgeschlossen ist, und bei Valzeina können tektonische Komplikationen nicht ausgeschlossen werden. Weitere Unsicherheiten bestehen auch bezüglich der lateralen Ausdehnung und Vernetzung von sandigen Rinnenfüllungen und Sandsteinlagen.



Figur 3.1: Geologische Übersichtskarte der Prättigau-Schiefer zwischen Rhätikon und Plessur und Lage der Profilsuren in Figur 3.2 (Nänny 1948).



Figur 3.2: Geologische Profile durch die Prättigau-Schiefer zwischen Rhätikon und Plessur (nach Nänny 1948).

Fazit

Betreffend des Metamorphosegrads der Bündnerschiefer gibt es erhebliche Unsicherheiten bei der gesamtheitlichen Interpretation der Metamorphose (Lage der Grenze Anchizone/Grünschieferzone). Mit den der Landesgeologie vorliegenden Daten kann die Existenz eines ausreichend grossen potenziellen Lagerbereichs (grosse, wenig deformierte Blöcke von mind. 3 km²) im Verbreitungsgebiet der Valzeina-Formation nicht bestätigt werden, wodurch die Mindestanforderungen als nicht erfüllt gelten.

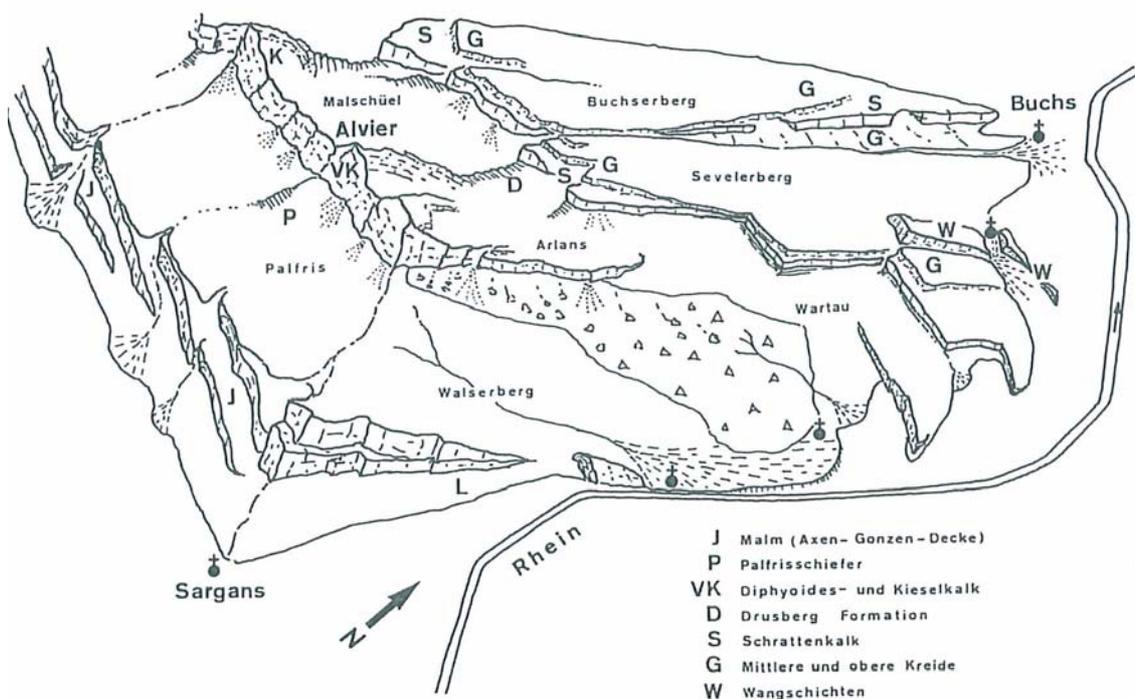
Da die tonigen Bündnerschiefer-Serien (Nolla-Tonschiefer, Valzeina-Formation) jedoch auf den ersten Blick für eine Einlagerung von SMA-Abfällen durchaus geeignet erscheinen (insbesondere auch im Vergleich zum Wellenberg), muss der Ausschluss der Bündnerschiefer-Vorkommen, insbesondere auch der Valzeina-Formation, sehr sorgfältig begründet sein (siehe Empfehlungen).

3.1.5 Mergelformationen des Helvetikums

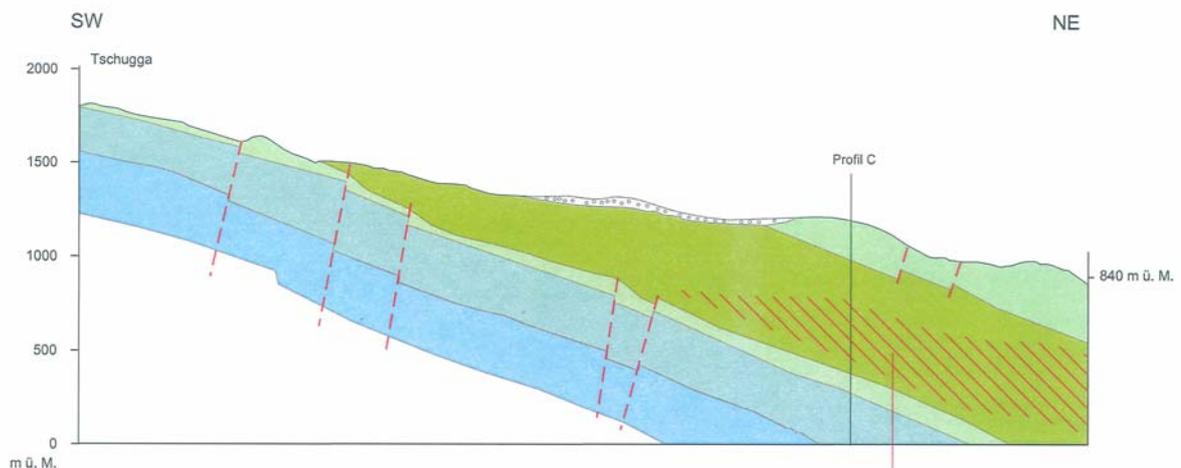
Palfris-Formation (E-CH)

In NTB 08-03 und 08-04 wird die Palfris-Formation als „Vorkommen von tektonischen Akkumulationen von Mergeln im Helvetikum“ abgehandelt. Gemäss Fig. 5.2-19 in NTB 08-03 erfüllen von 18 geprüften grösseren Akkumulationen nur gerade drei die von der Nagra aus dem Sachplanverfahren abgeleiteten Mindestanforderungen an ein SMA-Lager. Neben dem Wellenberg sind dies die Standorte Muotathal und Wartau. Für den Standort Muotathal ist eine Zurückstellung verständlich. Aufgrund der eingereichten Dokumente nicht nachvollziehbar ist hingegen die Nichtberücksichtigung des Standortes Wartau. Haldimann (2008, S. 28) schreibt zu diesem Standort: „Ein Vorteil dieses Standortes ist die voraussichtlich grosse Mächtigkeit und damit die grosse Ausdehnung der Palfris-Formation. Dies gewährt für die Anlage eines SMA-Tiefenlagers grossen Spielraum. Die Explorierbarkeit ist im Vergleich mit andern Standorten relativ gut.“ Dem gegenüber steht in NTB 08-03 (S. 220): „Die Verhältnisse im Gebiet Wartau lassen erwarten, dass das Mergel-Vorkommen für die Anordnung eines SMA-Lagers evtl. knapp genügen könnte. Die ungünstigen Aufschlussverhältnisse lassen jedoch keine zuverlässigen Aussagen zu, und es besteht ein grosses Realisierungsrisiko“. Die infolge der flachen Lagerung der Mergel im Vergleich zum Wellenberg eher einfache geologische Situation im Bereich eines potentiellen Lagergebietes (Fig. 3.3) widerspricht dieser Aussage. Das im Streichen verlaufende Profil in NTB 08-04 (Fig. 5.3-4) gibt die effektiven Platzverhältnisse nur schlecht wieder. Hier sollte auf das durch Aufschlüsse abgesicherte Profil B in Haldimann (2008) zurückgegriffen werden (Fig. 3.4).

Im Weiteren kann im Gebiet Wartau eine im Vergleich zum Wellenberg weit geringere Tektonisierung erwartet werden. Der Verlauf der Felsslinie im Rheintal zeigt zudem im Raum Balzers–Sargans eine Felsschwelle, die darauf hindeutet, dass hier eine im Vergleich zum übrigen Rheintal reduzierte glaziale Tiefenerosion stattgefunden hat (vgl. Keller 1990, Figur 3).



Figur 3.3: Ansichtsskizze der östlichen Alviergruppe (Briegel 1972).



Figur 3.4: Schematisches geologisches Profil im Gebiet von Wartau (aus Haldimann 1998).

Gemäss einer ersten Antwort der Nagra (NAB 09-29) sind die Mindestanforderungen an die räumliche Ausdehnung (SGT Schritt 5: 3 km², Mindestbreite 1 km, evtl. auf verschiedenen Niveaus) erfüllt, die verschärften Anforderungen (Gesteinsüberdeckung > 400 m wegen Dekompaktionseffekten) jedoch nicht. Die wegen der Dekompensationseffekte geforderten 400 m Gesteinsüberdeckung dürften im Liegenden des Kieselkalkes aber nicht erforderlich sein, da hier keine Entspannung und folglich auch keine Auflockerung des Mergels eingetreten ist.

Eine zusätzlich durch die Nagra in Auftrag gegebene 3D-Studie zu den räumlichen und tektonischen Verhältnissen am geologischen Standortgebiet Wartau hat schlussendlich nachvollziehbar aufgezeigt, dass die dortigen Platzverhältnisse auf einer Ebene im besten Fall knapp erfüllt wären (siehe hierzu auch die nachgereichten Berichte NAB 09-31, NAB 09-32 und NAB 09-33). Die Unsicherheiten bei der Konstruktion des geologischen Modells der Palfris-Schiefer im Gebiet der Wartau sowie nicht bekannte potenzielle geologische Komplikationen (Fremdgesteinseinschlüsse und Störungszonen) können das Platzangebot unter die erforderlichen Masse reduzieren. Zudem käme die Lagerebene weit über dem Vorfluter des Rheintales zu liegen.

Stad-Mergel/Globigerinenmergel (E-CH)

Die zu den Stad-Mergeln/Globigerinenmergeln im Helvetikum der Ostschweiz gelieferten Angaben erachten wir als zu wenig detailliert bezüglich räumlicher Ausdehnung und Metamorphosegrad bzw. Anteil an quellfähigen Tonmineralen. Die Wahrscheinlichkeit, dass grössere Akkumulationen von Stad-Mergeln/Globigerinenmergeln in der Ostschweiz in geeigneter Lage vorkommen könnten, erachten wir jedoch als sehr gering, wodurch diese, basierend auf dem heutigen Wissensstand, als Wirtgesteine u.E. nicht in Frage kommen.

Fazit

Die grossen Unsicherheiten bei der Einschätzung der knappen räumlichen Verhältnisse in der Wartau sowie die Lage eines möglichen Lagerbereiches deutlich über dem Vorfluter führen dazu, dass das Gebiet der Wartau als Lagerstandort als nicht geeignet angesehen werden muss.

Die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins grösserer Akkumulationen von Stad-Mergeln/Globigerinenmergeln im Helvetikum der Ostschweiz wird von der Nagra wie auch von der Landesgeologie als gering erachtet. Die Anforderungen an ein Wirtgestein sind somit nicht erfüllt.

3.1.6 Aalénien-Schiefer

Bezüglich der hydraulischen Durchlässigkeit ist bei den Aalénien-Schiefen nebst der tektonischen Überprägung der Metamorphosegrad von entscheidender Bedeutung. Dieser gibt vor, ob die vorhandenen Tonminerale quellfähig sind bzw. in der Lage sind, vermutete Störungszonen abzudichten.

Die entsprechende Figur von Goy-Eggenberger (1998) bzw. Figur 4.2-2 in NTB 08-04 mit Angabe der Metamorphose-Isograden beurteilen wir etwas differenzierter als die Nagra. Im nördlichsten Teil des Faltenkerns der Morcles-Decke befinden sich die Aalénien-Schiefer innerhalb der Anchizone (Gebiet Ovronnaz), wodurch sie, gemäss Nagra, noch immer über quellfähige Tonminerale verfügen sollten. Im Weiteren ist der Metamorphosegrad der Aalénien-Schiefer in der Wildhorn-Decke generell tiefer als in der darunter liegenden Morcles-Decke. Auf die Wildhorn-Decke wird aber weder in Jordan (2007) noch in Haldimann (2008) näher eingegangen, sondern es wird vor allem die Zone des Cols beschrieben. Die Aalénien-Tonschiefer dieser Zone genügen gemäss Haldimann (2008) aufgrund der zu geringen Ausdehnung und Mächtigkeit den Minimalanforderungen nicht mehr (in Haldimann 1979a noch als Wirtgestein ins Auge gefasst). In der Literatur bewegt sich die Mächtigkeit der Aalénien-Tonschiefer des Wildhorn-Komplexes zwischen 200–500 m. Im NAB 07-35 wird die Mächtigkeit auf 170–200 m geschätzt, was jedoch im Text nicht erwähnt wird.

Aufgrund der oben genannten Gründe sowie der Einschätzungen von Jordan (2007) und Haldimann (2008) beurteilen wir die hydraulische Durchlässigkeit sowie die laterale Ausdehnung der Aalénien-Schiefer in der Westschweiz, insbesondere in der Wildhorn-Decke, positiver als die Nagra. Die in Tabelle 3.1 durch die Nagra erwähnte Einschränkung bezüglich der Seismizität ist u.E. bei der Beurteilung nicht relevant. Eine Ausweitung der Beurteilung der Aalénien-Schiefer auf die Wildhorn-Decke wurde bei der Nagra angefordert (NAB 09-29). Darin räumt die Nagra ein, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass ausreichend grosse tektonische Akkumulationen von Schiefen mit quellfähigen Tonmineralien existieren, diese aber kaum prognostizierbar sind (NAB 09-29).

Fazit

Bezüglich Metamorphosegrad und Quellfähigkeit der Tonminerale in den Aalénien-Schiefen der Westschweiz muss zwischen Morcles- und Wildhorn-Decke unterschieden werden. Die beurteilten Unterlagen der Nagra tragen diesem Umstand zu wenig Rechnung. Aufgrund der nachgereichten Auswertung der vorhandenen Kenntnisse bezüglich Metamorphosegrad, Ausdehnung, Mächtigkeit und Tiefenlage der Aalénien-Schiefer in der Westschweiz ist die Landesgeologie mit der Beurteilung der Nagra, dass aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes die Aalénien-Schiefer die Mindestanforderungen nicht erfüllen, einverstanden.

3.1.7 Palfris-Formation und Marnes à Globigérines (W-CH)

Im Westen erfüllen diese Gesteine sowohl aufgrund ihres Metamorphosegrades als auch bezüglich der räumlichen Verbreitung (3D/Prognostizierbarkeit) die Mindestanforderungen gemäss Nagra nicht. Auch wenn eine Diskussion der Unterschiede im Metamorphosegrad innerhalb der Morcles-Decke und in der darüber liegenden Wildhorn-Decke ausbleibt, verfügen wir über keine Daten, welche ein ausreichendes Volumen dieser Gesteine in der Westschweiz belegen würden.

Fazit

Aufgrund des aktuellen Kenntnisstands zu den Mergelformationen des Helvetikums in der Westschweiz sind die Mindestanforderungen für die Marnes à Globigérines und Palfris-Formation nicht erfüllt.

Drusberg-Formation (W-CH)

Eine Diskussion der Drusberg-Formation, die eine Wechsellagerung von Tonmergeln mit Kieselkalkbänken darstellt und im Rawil-Gebiet eine Mächtigkeit von 100–280 m (Moser 1985, Lauber 1975) aufweist, fehlt in den vorliegenden Berichten. Obschon die Drusberg-Formation u.E. petrographisch als Wirtgestein geeignet wäre, ist davon auszugehen, dass die räumlichen Verhältnisse für ein Tiefenlager nicht ausreichend sind (siehe auch Antwort der Nagra auf unsere Frage in NAB 09-29).

Fazit

Die lithologisch mit dem Effingen-Member durchaus vergleichbare Drusberg-Formation wird von der Nagra nicht als potenzielles Wirtgestein erachtet und ist nirgends kommentiert. Selbst wenn davon ausgegangen werden muss, dass keine grösseren, für einen Lagerstandort geeigneten Akkumulationen existieren, müssten diese Sachverhalte und die örtlichen Verhältnisse u.E. detailliert beschrieben sein (siehe Kap. 6.1).

3.1.8 Stalpengraben-Formation

Die Mindestanforderungen sind in NTB 08-03 nur bezüglich der Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung nicht erfüllt. Betrachtet man jedoch das Member A anstelle des Members D, so verfügt ersteres über eine doppelt so grosse Mächtigkeit (ca. 200 m), wodurch der Indikator Mächtigkeit erfüllt wäre. Die Abklärungen der Nagra, inwieweit dieses Member auch die Anforderungen an die laterale Ausdehnung erfüllt, sind in NAB 09-29 dokumentiert. Daraus geht hervor, dass aufgrund der verfügbaren Daten kein ausreichend grosses Vorkommen dieses Members identifiziert werden kann.

Fazit

Die Mindestanforderungen sind u.E. für die gesamte Stalpengraben-Formation nicht erfüllt.

3.1.9 Flysch (ultrahelvetisch bzw. Gurnigel-Schlieren-Frutigen-Flysch)

Die in NTB 08-03 und NTB 08-04 enthaltenen Angaben zu den Flyschen der Zentral- und Ostschweiz erachten wir als ungenügend. Insbesondere sollte erwähnt sein, welche konkreten Daten (Bohrungen, hydraulische Tests, Stollenaufnahmen) aus diesen Gesteinen vorliegen.

Der Gurnigel-Schlieren-Flysch und der Frutigen-Flysch erfüllen u.E. bezüglich Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade sowie bezüglich des Tongehaltes die Mindestanforderung an ein Wirtgestein nicht. Die Einheiten sind durch zahlreiche Sandsteinbänke geprägt, die als spröde Zwischenlagen, analog zur Molasse, eine gewisse Wasserwegsamkeit mit sich bringen könnten. Zum weiteren Verständnis wäre eine Beurteilung des Ablagerungsmilieus bezüglich linearer Rinnenbildungen und Verfüllungen und der Vernetzung der Rinnen wünschenswert. Auch die erwähnten Quellaustritte müssten u.E. detaillierter dargestellt werden, da es sich möglicherweise nur um oberflächennahe Zirkulationssysteme handelt.

Fazit

Die Frage nach der Eignung der mächtigen Flysch-Serien als Wirtgestein wird häufig gestellt. Auch wenn der Sichtweise der Nagra gefolgt und damit einer Zurückstellung der Flysche zugestimmt werden kann, sollten die vorhandenen Daten unbedingt vollständig und zielgerecht aufgearbeitet und zu einem überzeugenden Argumentarium zusammengestellt werden (metamorphe Überprägung der Flysche im Alpenraum, Zusammensetzung und tektonische Überprägung nicht-metamorpher Flysche wie z.B. der Gurnigel-Schlieren-Flysch).

3.1.10 Gesteine der Molasse

Bei der Beurteilung von Molasseabfolgen muss primär die Gesteinsheterogenität bewertet werden, da diese die vertikalen und horizontalen Fliessspfade wesentlich beeinflusst. In der Molasse existieren Bereiche mit sehr unterschiedlichen Sandsteinanteilen. Werden Sandsteinrinnen beim Bau eines Tiefenlagers angeschnitten, führt dies zu potenziellen Freisetzungsfäden.

Auch wenn die Begründung zur Nichteignung der Molasse als Wirtgestein für ein Tiefenlager schwer nachvollziehbar ist, sind wir der Ansicht, dass die Schlussfolgerung der Nagra, die Gesteine der Molasse zurückzustellen, richtig ist und die Molasse für ein potenzielles SMA-/HAA-Tiefenlager nicht geeignet ist.

USM (Marnes bariolées s.str.)

Mehrere Tiefbohrungen durchörtern die Marnes bariolées in der Westschweiz. Zu erwähnen sind die Bohrungen Ruppoldsried-1, Tschugg-1, Fendingen-1, Courtion-1 und Chapelle-1. Die Erdölindustrie hat in diesen Bohrungen umfangreiche Hydrotests durchgeführt und diese auch ausgewertet. Die maximalen hydraulischen Durchlässigkeiten, die lokal in einigen Testintervallen ermittelt wurden, liegen im Bereich von 10^{-5} m s^{-1} . Diese sehr hohen Durchlässigkeiten lassen sich gut mit denjenigen der USM-Rinnengürtel und Durchbruchsfächer korrelieren (z.B. Keller 1992). Vor allem die Rinnengürtel in den Marnes bariolées können deshalb als bevorzugte Fliesswege betrachtet werden.

Das ENSI hat in Zusammenarbeit mit der ETH die verschiedenen Architekturelemente der USM mittels eines stochastischen Faziesmodelles simuliert (mit dem Code PETREL). Die Modellannahmen basieren auf den lithologischen Bohrkernaufnahmen und geophysikalischen Bohrlochlogs. Diesem stochastischen Faziesmodell wurden dann die aus den Hydrotests ermittelten Durchlässigkeiten zugeordnet und daraus die Strömung simuliert (hydrodynamische Modellierung). Es konnte gezeigt werden, dass die vertikalen Fliessraten durch ein hypothetisches USM-Tiefenlager bis zu 100'000 mal höher sind als im Opalinus-Ton.

Die Marnes bariolées erfüllen deshalb die Mindestanforderungen sowohl für ein SMA- als auch für ein HAA-Tiefenlager nicht, vor allem dann nicht, wenn ein zukünftiges Tiefenlager einen Rinnengürtel anschneiden würde. Diese Rinnengürtel sind mit der State-of-the-Art-Explorations- und -Geophysiktechnologie von der Oberfläche her nicht prognostizierbar.

Meletta-Schichten

Präferenzielle Freisetzungspfade in den Meletta-Schichten sind aufgrund der Unsicherheit in der Ausdehnung und Geometrie der Randfazies schwer prognostizierbar. Dadurch beurteilen wir den Indikator Transmissivität präferenzieller Freisetzungspfade kritischer als in NTB 08-03 (S. 131, Tab. 4.2-1). Die Prognostizierbarkeit von Inhomogenitäten innerhalb dieser Einheit ist u.E. schwierig, womit sich die negativen Einflüsse derselben noch verstärken.

OSM (Basiszone und Bodensee-Schüttung)

Obschon die Basiszone mehrheitlich von feinkörnigen Abfolgen dominiert ist, muss auch hier mit dem Auftreten von grobkörnigen Rinnen- und Durchbruchssandsteinen, z.T. auch Konglomeraten gerechnet werden (Gubler 2008 bzw. NAB 07-21), wodurch die Gesteinsheterogenität zunimmt und der Indikator „Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade“ u.E. negativ zu bewerten ist („Mindestanforderungen eventuell nicht erfüllt“). Der Aufbau sowie die Geometrie der Bodensee-Schüttung sind, wie in Jordan (2007) richtig dargestellt, nur punktuell bekannt. Es ist anzunehmen, dass - trotz höherer Tongehalte (Gubler 2008 bzw. NAB 07-21) - vergleichbare Gesteinsheterogenitäten sowie das Vorhandensein von grobkörnigen Rinnenfüllungen zu erwarten sind.

Zudem ist nach unserem Kenntnisstand die Überdeckung zumindest in den Talungen ungenügend. Ausserhalb davon, z.B. im Gebiet Knonaueramt-Albis-Sihltal (Gubler 2008 bzw. NAB 07-21; Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Bl. 1111 Albis, Gubler 2009), kann lokal mit ausreichender Überdeckung gerechnet werden. In wie weit in diesen Gebieten die räumlichen Erfordernisse für ein Tiefenlager erfüllt wären, müsste noch genauer abgeklärt werden.

Diese Beurteilung gilt in gleichem Masse für SMA- wie auch für HAA-Tiefenlager. Dass diese Einheiten die verschärften Anforderungen nicht erfüllen, ist aufgrund unserer Beurteilung der Mindestanforderungen a priori gegeben (vgl. Tabelle 3.3 und 3.4).

Fazit

In der Molasse treten an verschiedenen Stellen mächtige tonreiche Abfolgen auf. Diese sind jedoch aufgrund der schlecht explorierbaren und prognostizierbaren Gesteinsheterogenität (z.B. grobkörnige Rinnenfüllungen) als Wirtgestein ungeeignet. Für die weiteren Schritte in der Lagerrealisierung können u.E. die vorhandenen Mittel auf andere Einheiten verwendet werden, da wir analog zur Nagra grosse Zweifel haben, ob aufgrund der oben genannten Faktoren ein geeignetes Wirtgesteinsvolumen innerhalb der Molasse gefunden werden kann.

3.1.11 Ostalpin und Südalpen

Der Einschätzung der Nagra, dass im ostalpinen Raum keine für ein Lager geeigneten Vorkommen von Tongesteinen vorhanden sind, kann zugestimmt werden.

Auch die Sedimente der Südalpen eignen sich offensichtlich wenig für die Aufnahme von Tiefenlagern. Bezüglich des Kristallins werden nur den ganzen Alpenraum betreffende Aussagen gemacht. Südlich der Insubrischen Linie ist das Kristallin bezüglich Metamorphosegrad und Tektonik vergleichbar mit jenem der Nordschweiz. Damit bleibt aber auch im Kristallin der Südschweiz das Problem der Prognostizierbarkeit bestehen, weshalb swisstopo der Einschätzung der Nagra folgen kann.

3.2 Potenzielle Wirtgesteine für hochaktive Abfälle

Bezüglich der HAA-Abfälle teilen wir die Ansicht der Nagra, dass in Schritt vier nur der Opalinus-Ton die verschärften Anforderungen erfüllt. Aufgrund nachgereicherter Untersuchungen der Nagra zur SJZ (NAB 09-29) muss davon ausgegangen werden, dass in der SJZ kein ausreichendes Wirtgesteinsvolumen in geeigneter Tiefe (<800 m unter Terrain) existiert, das die verschärften Anforderungen erfüllen kann.

4 Beurteilung der verwendeten Grundlagen für die Herleitung von Standortgebieten und Vergleich der Standortgebiete mit den stratigraphischen Referenzprofilen

4.1 Allgemeine Kommentare und Vollständigkeit der Datengrundlage

Die Landesgeologie überprüfte die Vollständigkeit der Datengrundlage, die von der Nagra zur Festlegung der Standortgebiete verwendet wurde.

Die Literaturangaben zu den Standortgebieten im Bereich Jura–Nordschweiz inkl. Wellenberg sind grundsätzlich vollständig und aktuell. Ergänzende Literaturangaben befinden sich im Literaturverzeichnis zur Beurteilung der Wirtgesteine (Kap. 2 und 3) sowie in den folgenden Kapiteln.

4.2 Geologisches Standortgebiet Nördlich Lägeren

4.2.1 Überblick

Als potenzielle Wirtgesteine werden in diesem Gebiet der Opalinus-Ton und der „Braune Dogger“ betrachtet. Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus basieren auf der Nagra-Bohrung Weiach sowie einem das gesamte Gebiet abdeckenden Netz von Seismiklinien.

Natürliche Aufschlüsse der potentiellen Wirtgesteine sind innerhalb des Standortgebietes keine vorhanden. Die am nächsten beim Standortgebiet gelegenen Aufschlüsse liegen an der Lägeren sowie auf der deutschen Seite bei Dangstetten und Erzingen. Die Bohrungen Benken und Riniken, in denen die genannten Gesteine gut dokumentiert sind, befinden sich zwar, wie in NTB 08-04, S. 366, angegeben, je rund 12 km vom Rand des Standortgebiets Nördlich Lägeren entfernt, die Distanz zur Bohrung Weiach, dem hinsichtlich wichtiger Gesteinsparameter einzigen verlässlichen Datenpunkt im Standortgebiet, beträgt jedoch ca. 17 bzw. ca. 21 km.

4.2.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Die regionalen stratigraphischen Verhältnisse werden von Jordan (2007) mit dem Sammelprofil Ostjura (03) erfasst. Die darin angegebene Mächtigkeiten von 80–120 m für den Opalinus-Ton und 90–155 m für den „Braunen Dogger“ sind im vorliegenden Gebiet nur durch die Bohrung Weiach verifiziert, in welcher die Mächtigkeit des Opalinus-Tons im o.g. Rahmen liegt, diejenige des „Braunen Doggers“ mit rund 77 m jedoch geringer ansteht als in Jordan (2007) angegeben ist.

Bezüglich der lithofaziellen Verhältnisse im „Braunen Dogger“ und deren Variabilität lässt das Profil 03 aufgrund des hohen Generalisierungsgrads keine Aussage zu.

Die Nagra hat die geologische Literatur der Nordschweiz sehr umfassend und vollständig aufgearbeitet. Die Literaturangaben zu Profil 03 in Jordan (2007) sind zwar unvollständig; neuere Literatur ist jedoch offenbar verwendet worden, wie die Verwendung teils neuer Formationsbezeichnungen nahe legt (NTB 08-04).

4.3 Geologisches Standortgebiet Bözberg

4.3.1 Überblick

Als potenzielles Wirtgestein wird in diesem Gebiet der Opalinus-Ton betrachtet. Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus basieren auf der Bohrung Riniken am Ostrand des Gebiets, vier Seismiklinien, vereinzelt und meist qualitativ mangelhaften Oberflächenaufschlüssen im Bereich der Mandach-Überschiebung und des Faltenjuras. Weitere Daten stammen von der über 20 km vom Ostrand des Gebiets entfernten Bohrung Weiach (NTB 08-04, S. 369).

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist u.E. nach unten durch den überwiegend kalkigen, 3–5 m mächtigen Arietenkalk begrenzt (Diebold et al. 2006, Tongrube Frick). Bei der Abgrenzung nach oben sind die sandig-kalkigen Abschnitte der Passwang-Formation mit zu berücksichtigen (Burkhalter 1996).

4.3.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Die regionalen stratigraphischen Verhältnisse werden von Jordan (2007) mit dem Sammelprofil Ostjura (03) erfasst. Die darin angegebenen Mächtigkeiten von 80–120 m für den Opalinus-Ton stimmen im vorliegenden Gebiet.

Die Nagra hat die geologische Literatur der Nordschweiz sehr umfassend und vollständig aufgearbeitet. Die Literaturangaben zu Profil 03 in Jordan (2007) sind zwar unvollständig; neuere Literatur ist jedoch offenbar verwendet worden (Verwendung teils neuer Formationsbezeichnungen).

4.4 Geologisches Standortgebiet Jura-Südfuss

4.4.1 Überblick

Als potenzielle Wirtgesteine werden in diesem Gebiet der Opalinus-Ton und das Effingen-Member betrachtet. Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus basieren im Wesentlichen auf den Bohrungen Schafisheim (für beide Einheiten), Oftringen und Küttigen-1/-2 (für das Effingen-Member), fünf Seismiklinien sowie weiteren Bohrungen und Oberflächenaufschlüssen im Bereich des Faltenjuras.

Die genannten Bohrungen liegen alle ausserhalb des Standortgebiets. Die in NTB 08-04, S. 371, angegebenen Entfernungen der Bohrungen zum betrachteten Gebiet beziehen sich auf dessen Perimeter. Die tatsächlichen Distanzen zwischen den Bohrungen und den bevorzugten Bereichen (NTB 08-04, Fig. 5.5-5) sind (z.T. wesentlich) grösser. Auch die Oberflächenaufschlüsse liegen einige Kilometer ausserhalb der bevorzugten Bereiche.

4.4.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Die regionalen stratigraphischen Verhältnisse werden von Jordan (2007) mit den Sammelprofilen Nordwestschweiz (02) und Ostjura (03) erfasst. Die darin angegebenen Mächtigkeiten von 80–120 m (bzw. 80–150 m) stimmen für den Opalinus-Ton im vorliegenden Gebiet, für das Effingen-Member trifft die Mächtigkeitsangabe für das Standortgebiet in Profil 03 zu. Die Mächtigkeit des Effingen-Members in Profil 02 bezieht sich aufgrund des Übergangs von „raurachischer“ zu „argovischer“ Fazies auf die Gegend westlich des Standortgebiets.

Die Nagra hat die geologische Literatur der Nordschweiz sehr umfassend und vollständig aufgearbeitet. Die Literaturangaben zu den Profilen 02 und 03 in Jordan (2007) sind zwar unvollständig; neuere Literatur ist jedoch offenbar verwendet worden (Verwendung teils neuer Formationsbezeichnungen).

Die hier zitierte Literatur ist in NTB 08-04 vorhanden, mit Ausnahme von Gygi (2003).

4.5 Geologisches Standortgebiet Südranden

4.5.1 Überblick

Es handelt sich um ein Standortgebiet mit dem Wirtgestein Opalinus-Ton mitsamt den unter- bzw. überlagernden Rahmengesteinen (in NTB 08-03 „Südliches Schaffhausen“). Die Aufschlussituation (Seismik, Bohrungen, Oberflächenaufschlüsse) lässt sich aus Sicht von

swisstopo wie folgt zusammenfassen:

- Die dem zwischen Osterfingen und Beringen verlaufende Längsprofil Profil A (NTB 08-03, S. 335) zugrunde liegende Seismiklinie verläuft ganz im Nordwesten des Gebietes. Im Südosten beschränkt sich die Information auf zwei kurze Querprofile.
- Die unmittelbar nördlich des Gebietes niedergebrachten Bohrungen (Nagra-Bohrung Siblingen; Steinsalzbohrung Siblingen) haben den Opalinus-Ton nicht oder nur teilweise durchteuft. Im Süden bildet die rund 4 km ausserhalb des Gebietes gelegene Nagra-Bohrung Benken den einzigen Bohraufschluss. Im Gebiet selbst existieren keine Bohraufschlüsse.
- Im ausgeschiedenen Standortgebiet und im südlich daran anschliessenden Gebiet Jettetten-Lotstetten-Rafz existieren an der Oberfläche keine Dogger/Lias-Aufschlüsse.
- Nördlich des Standortgebietes sind, nebst den von der Nagra intensiv untersuchten Aufschlüssen in der Tongrube Siblingen (NTB 02-03) nur wenige Aufschlüsse im Opalinus-Ton vorhanden. Die Angaben in den Erläuterungen zur Geologischen Karte von Tengen-Wiechs a.R. (Hofmann et al. 2002) stammen aufgrund der heute schlechten Aufschlussverhältnisse auf den Beschreibungen von Schalch (1916).

Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus werden von der Nagra in Anbetracht der generell einfachen geologisch-tektonischen Situation (Blocktektonik) als sehr gut eingestuft. Die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen wird für den Opalinus-Ton ebenfalls als sehr gut, für den „Braunen Dogger“ aber nur als gut eingeschätzt.

4.5.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Die stratigraphischen Verhältnisse werden von Jordan (2007) mit dem Sammelprofil Weinland bis Bodensee (Profil 06) erfasst. Die in diesem Profil in der Kolonne „Lithologie“ angegebene Mächtigkeit des Opalinus-Tons von 95–120 m dürfte für das Standortgebiet Südranden zu hoch sein. Es sind uns diesbezüglich die folgenden Zahlenwerte bekannt: Bohrung Benken: 94 m, Blatt Neunkirch: 60–70 m (Hofmann 1981), Blatt Wiechs: bis 100 m (Schalch 1916) und Schwäbische Alb: 90–100 m (Geyer & Gwinner 1991). Über allfällige fazielle Besonderheiten (beispielsweise betreffend Mächtigkeit der Zopfplatten, der Kalklagen in den Murchisonae-Schichten usw.) sind keine Angaben möglich.

Bezüglich der Literatur fehlen in Jordan (2007) generell Hinweise auf ältere Arbeiten. Da diese Arbeiten zum Teil auch heute noch die besten Beschreibungen der lithologischen Verhältnisse beinhalten, sollten sie auch zitiert sein. Die Nagra hat diese Grundlagen aber für ihre Standortanalysen mitbenutzt, so dass sie nichts Unberücksichtigtes enthalten.

4.6 Geologisches Standortgebiet Zürcher Weinland

4.6.1 Überblick

Es handelt sich um ein Standortgebiet mit den Wirtgesteinen Opalinus-Ton und „Brauner Dogger“ mitsamt ihren Rahmengesteinen. Das ganze Gebiet ist von quartären Ablagerungen bedeckt, d.h. es fehlen oberflächliche Aufschlüsse zur Feststellung allfälliger Fazieswechsel und der lokalen Mächtigkeiten.

Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus basieren auf einer das ganze Gebiet abdeckenden 3D-Seismik sowie der Nagra-Bohrung Benken. In Anbetracht der generell einfachen Situation (Blocktektonik) betrachtet die Nagra diese Kenntnisse als sehr gut. Die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen wird für den Opalinus-Ton als sehr gut, für den „Braunen Dogger“ als gut eingeschätzt.

4.6.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Auf den „Braunen Dogger“ wird im Text von Jordan nicht explizit eingegangen, obwohl dieser im Weinland eine vom Opalinus-Ton unabhängige Wirtgesteinsoption darstellt. Die Mächtigkeit des „Braunen Doggers“ beträgt in der Bohrung Benken 104 m. In Ermangelung nahegelegener Aufschlüsse ist die Variabilität der Mächtigkeit schwierig abzuschätzen, dürfte aber im angegebenen Bereich von 70–110 m liegen. Wie die Nagra in ihren Berichten anmerkt, muss die Bedeutung der innerhalb des „Braunen Doggers“ allenfalls vorhandenen durchlässigeren Kalk- und Sandsteinlagen noch detaillierter abgeklärt werden, da dieselben die nutzbare Mächtigkeit unter Umständen erheblich reduzieren. So sind z.B. die Murchisonae-Schichten in der Bohrung Benken rund 20 m mächtig und in Opalinuston-Fazies ausgebildet, nördlich des Klettgaus und in der Bohrung Weiach enthalten sie jedoch dünnbankige Kalkeinschaltungen, die andernorts durchaus Wasser führen könnten.

Bezüglich der Literatur fehlen bei Jordan (2007), wie beim Standortgebiet Südranden erwähnt, einige wesentliche Zitate. Dies fällt aber nicht ins Gewicht, da die Nagra in ihren zahlreichen NTB, NAB und NIB die ganze diesbezügliche Literatur sehr umfassend aufgearbeitet hat.

4.7 Geologisches Standortgebiet Wellenberg

4.7.1 Überblick

Es handelt sich um ein Standortgebiet in den Mergelformationen des Helvetikums, die zwischen Axen- und Drusberg-Decke akkumuliert sind. Diese umfassen Palfris-Schiefer, Vitznau-Mergel, Globigerinenmergel und Schimberg-Schichten mit dazwischenliegenden Mélanges (NTB 96-01, S. 47). Die Gesteine haben den anchimetamorphen Metamorphosegrad nicht erreicht und wurden in einer späten Phase der Alpenbildung einer starken Spröddeformation unterworfen. Rund ein Viertel des Standortgebietes ist von der Rutschmasse Altzellen überdeckt.

Die Kenntnisse des räumlichen Aufbaus basieren auf sechs Tiefbohrungen und werden von der Nagra insgesamt als gut bewertet. Die durchgeführte Reflektionsseismik lieferte keine brauchbaren Resultate. Die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen zur Mergelakkumulation am Wellenberg wird ebenfalls als gut eingeschätzt.

4.7.2 Referenzprofil und Literaturangaben

Die stratigraphischen Verhältnisse im Gebiet des Wellenbergs werden von Jordan (2007) mit den Sammelprofilen Mittelhelvetikum bzw. Südhelvetikum der Ostschweiz (Profile 12 und 13) erfasst. Die Angabe der primären Mächtigkeiten und die generellen Aussagen zu Lithologie und Fazies sind korrekt.

Infolge des komplizierten tektonischen Baus und weil seismischen Untersuchungen zu keinen belastbaren Resultaten führen dürften, ist die detaillierte Abklärung der lithologischen Grenzen, Faziesänderungen und Störzonen nur mit Bohrungen und Sondierstollen zu bewerkstelligen. Bei einer Weiterverfolgung dieser Standortregion sind z.B. noch zusätzliche Abklärungen bezüglich wasserführender Störungszonen und Fremdgesteinseinschlüssen notwendig, da dieselben die Auslegung des Lagers beeinflussen könnten. Zusätzlich wird auch erwähnt, dass die Globigerinenmergel örtlich synsedimentäre Brekzien aus Kalk- und Sandsteinen aufweisen. Es ist aber nicht klar, wo und in welchem Umfang diese auftreten können und was für Auswirkungen sie haben.

Die Literaturangaben betreffend dieses Standortes können als komplett erachtet werden, da im begleitenden Text auf den Synthesebericht Wellenberg (NTB 96-01) hingewiesen wird, der ein sehr ausführliches Literaturverzeichnis enthält.

5 Zusammenfassung

Die von swisstopo, Landesgeologie beurteilten Dokumente der Nagra stellen eine äusserst umfangreiche und wertvolle Datenbasis zur Beurteilung potenzieller Wirtgesteine in der Schweiz dar. Mit wenigen Ausnahmen sind die relevanten verfügbaren Grundlagen zur Geologie der Schweiz präsentiert und von der Nagra korrekt in die Beurteilung miteinbezogen worden.

Der Sachplan Geologische Tiefenlager SGT hält im Konzeptteil vom 2. April 2008 fest, dass die schrittweise Einengung beim Standortauswahlverfahren auf den bisherigen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der geologischen Kenntnisse der Schweiz basieren soll. Dies hat zur Folge, dass nicht alle von der Nagra untersuchten und durch die Landesgeologie beurteilten Gesteinseinheiten über dieselbe Datengrundlage verfügen. Die Landesgeologie beurteilt die potentiellen Wirtgesteine ausschliesslich aufgrund der vorhandenen Kenntnisse, macht jedoch Empfehlungen für weitere Schritte der Lagerrealisierung (siehe folgendes Kapitel).

Für die hochaktiven Abfälle erfüllt gemäss Nagra nur der Opalinus-Ton die Mindest- und die verschärften Anforderungen an ein Wirtgestein. Dieser Beurteilung schliesst sich die Landesgeologie an, wenn auch bezüglich der Gasproblematik und den technischen Barrieren noch offene Fragen zu klären sind.

Für die schwach- und mittelaktiven Abfälle erfüllen gemäss Nagra die folgenden Einheiten die Mindest- und die verschärften Anforderungen an ein Wirtgestein: Opalinus-Ton, „Brauner Dogger“, Effingen-Member und die Mergelformationen des Helvetikums. Die Landesgeologie stimmt dieser Auswahl zu.

Die Beurteilung des „Braunen Doggers“ und des Effingen-Members durch die Nagra fällt in Anbetracht der verfügbaren Grundlagen und im Vergleich zu anderen Einheiten zu positiv aus. Faktoren wie horizontale und vertikale Variabilität der hydraulischen Durchlässigkeit, Karstphänomene (z.B. Mischungskorrosion) oder das Konzept der „clay smears“ in tektonischen Brüchen sollten weiter untersucht und in kommende Beurteilungen miteinbezogen werden. Bei den Mergelformationen des Helvetikums erfüllt nur die Palfris-Formation beim Standortgebiet Wellenberg die Anforderungen an ein Wirtgestein. Weitere potenzielle Standortgebiete desselben scheiden aufgrund mangelnder lateraler Ausdehnung bzw. ungenügender Tiefenlage aus.

Die Landesgeologie, kann sich der Beurteilung der Nagra bezüglich der Bündnerschiefer, der Flysche und der Einheiten der Molasse anschliessen, welche die Anforderungen an ein potenzielles Wirtgestein nicht erfüllen. Aus Gründen der Nachvollziehbarkeit und im Wissen, dass diese Gesteinseinheiten schon verschiedentlich als potenzielle Wirtgesteine diskutiert wurden und sicher noch weiter diskutiert werden, erachtet es die Landesgeologie als angebracht, diese Einschätzung durch zusätzliche Dokumente zu belegen (siehe auch unsere Empfehlungen).

Die für die Herleitung von Standortgebieten berücksichtigte Literatur ist vollständig. Es konnten von der Landesgeologie in den Standortgebieten keine relevanten Abweichungen zu den Referenzprofilen in Jordan (2007) festgestellt werden.

Die während dem Prozess der swisstopo-Begutachtung durch die Nagra gelieferten Ergänzungen sowie die Antworten zu den Fragen der Landesgeologie sollen in einem Bericht öffentlich zugänglich gemacht werden (NAB 09-29).

6 Empfehlungen swisstopo für die weiteren Schritte in der Lagerrealisierung

Der Sachplan Geologische Tiefenlager SGT hält im Konzeptteil vom 2. April 2008 fest, dass die schrittweise Einengung beim Standortauswahlverfahren auf den bisherigen Untersuchungen und dem aktuellen Stand der geologischen Kenntnisse der Schweiz basieren muss. Daraus muss geschlossen werden, dass für die Beurteilung potenzieller Wirtgesteine in Etappe 1 keine Zusatzuntersuchungen durchgeführt werden können.

Die Landesgeologie hat bei der Beurteilung potenzieller Wirtgesteine mehrmals auf die heterogene Datenlage hingewiesen, sei es in Bezug auf potenzielle Wirtgesteine, die aus Sicht der Nagra die Mindest- und die verschärften Anforderungen erfüllen, oder bezüglich Gesteinseinheiten, welche die Anforderungen nicht erfüllen.

Im Falle der von der Nagra vorgeschlagenen potenziellen Wirtgesteine zeigen die Empfehlungen auf, wo aus Sicht der Landesgeologie in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung die bestehenden Kenntnisse erweitert werden sollten.

Empfehlungen zu Gesteinseinheiten, welche die Minimalanforderungen bzw. die verschärften Anforderungen nicht erfüllen, dienen in kommenden Diskussionen der einfacheren Nachvollziehbarkeit der Argumente, die zu dieser Beurteilung geführt haben. Hierzu dient bereits eine Publikation der im Rahmen des Verfahrens von der Nagra nachgereichten Antworten auf Fragen von swisstopo (enthalten in NAB 09-29).

6.1 Potenzielle Wirtgesteine für schwach- und mittelaktive Abfälle

Indikator Tongehalt

Aufgrund der heterogenen Datenbasis bezüglich des Anteils und der Art der Tonminerale in den untersuchten Einheiten erachtet es die Landesgeologie als angebracht, für Wirtgesteine, welche die verschärften Anforderungen erfüllen, in den kommenden Etappen ein Laborprogramm zu initialisieren, mit dem Ziel, entsprechend der zgedachten Rolle der Tonminerale im Lagerkonzept der Nagra eine vergleichbare Datenbasis zu erhalten. Die Landesgeologie empfiehlt beim Indikator Tongehalt folgende Eigenschaften zu spezifizieren: Tonmineral-Zusammensetzung, Korngrössenverteilung, Anteil quellfähiger Tonminerale am Gesamttonmineralgehalt sowie die entsprechenden Sorptionskennwerte.

Opalinus-Ton und „Lias indifférent“ (westl. Tafeljura / Faltenjura / westl. SJZ)

Die Empfehlung der Landesgeologie, sämtliche vorhandenen Daten in der westlichen SJZ bezüglich Tiefenlage und Tektonik im Hinblick auf die Eignung von Opalinus-Ton und „Lias indifférent“ zum Wirtgestein auszuwerten, wurde von der Nagra bereits umgesetzt. Die nachgereichten Dokumente, insbesondere die Konturenkarte Top Lias im westlichen Molassebecken, sollen in einem Bericht zugänglich gemacht werden (siehe NAB 09-29).

Aalénien-Schiefer

Zur besseren Nachvollziehbarkeit empfiehlt die Landesgeologie die nachgereichten Begründungen der Nagra betreffend dem Nichterfüllen der Mindestanforderungen der Aalénien-Schiefer in der Westschweiz, insbesondere innerhalb der Wildhorn-Decke, öffentlich zugänglich zu machen (siehe NAB 09-29).

Staldengraben-Formation

Zur besseren Nachvollziehbarkeit empfiehlt die Landesgeologie, die nachgereichten Begründungen der Nagra betreffend der Einheit A der Staldengraben-Formation unter Einbezug der Einheiten B–D als Rahmengesteine öffentlich zugänglich zu machen (siehe NAB 09-29).

„Brauner Dogger“

Die Landesgeologie erachtet es insbesondere beim „Braunen Dogger“ als wichtig, dass sich die Beurteilung der Nagra bezüglich lateraler und vertikaler Variabilität der Fazies wie auch der Mineralogie (v.a. Ton- und Karbonatgehalt) sowie Durchlässigkeit von potenziell durchlässigen Sedimentkörpern auf mehr Informationen abstützt. Die Datengrundlage ist in den kommenden Etappen, allenfalls durch Felduntersuchungen, bezüglich der o.g. Punkte zu ergänzen.

Es ist unseres Erachtens auch wichtig, dass in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung das Konzept der „clay smears“ durch Beobachtungen an Aufschlüssen oder in Bohrungen belegt wird.

Effingen-Member (SMA)

Die Landesgeologie erachtet es auch beim Effingen-Member als wichtig, dass für weitere Schritte in der Lagerrealisierung mehr Informationen bezüglich lateraler und vertikaler Heterogenität von Fazies, Mineralogie und hydraulischer Durchlässigkeit akquiriert werden. Für die Beurteilung der lateralen Persistenz und der Korrelierbarkeit von Kalkbankfolgen schlägt die Landesgeologie eine detaillierte Mikrofaziesstudie vor.

Die Datengrundlage der Nagra bezüglich hydraulischer und geochemischer Kennwerte soll erweitert werden, damit sie für die Auswahl der Standorte genügt. In den weiteren Schritten der Lagerrealisierung ist auch die Frage zu klären, ob die Prozesse der Mischungskorrosion und des daraus folgenden advektiven Stofftransports, wie von der Landesgeologie vermutet, auch in tieferen (>300 m) flachliegenden Bereichen des Effingen-Members nachgewiesen werden können.

Tonschieferabfolgen der Bündnerschiefer

Die Frage nach der Eignung der mächtigen Bündnerschiefer-Serien (Nolla-Tonschiefer, Valzeina-Formation) als Wirtsgestein ist eine häufig gestellte Frage. Da die Valzeina-Formation nicht einfach mit dem Argument des zu hohen Metamorphosegrades zurückgestellt werden kann, müssen allfällige zwingende Ausschlusskriterien sehr sorgfältig und detailliert dargelegt sein. Die Landesgeologie empfiehlt deshalb, in Ergänzung zu Jordan (2007) einen entsprechenden Text mit Figuren (detailliertes Metamorphosekärtchen, Längs- und Querprofile) zur besseren Nachvollziehbarkeit zu erstellen (siehe NAB 09-29). Zusätzliche Daten zur Bestimmung des effektiven Anteils an quellbaren Tonmineralen können ebenfalls wesentlich zur Begründung der Sachlage beitragen.

Mergelformationen des Helvetikums: Palfris-Formation und Stad-Mergel/ Globigerinenmergel in der Ostschweiz

Die Empfehlung der Landesgeologie, die Eignung der Palfris-Schiefer im Gebiet Wartau basierend auf den vorhandenen Grundlagen einer detaillierten Evaluation bezüglich Tiefenlage und lateraler Ausdehnung zu überprüfen, wurde von der Nagra bereits umgesetzt. Die nachgereichte Studie soll in einem Bericht zugänglich gemacht werden (siehe NAB 09-29).

Die Landesgeologie empfiehlt zudem, eine detaillierte (Literatur-)Analyse zu den Stad-Mergeln/Globigerinenmergeln im Helvetikum der Ostschweiz nachzuliefern.

Drusberg-Formation in der Westschweiz

Zur besseren Nachvollziehbarkeit empfiehlt die Landesgeologie eine detaillierte Literaturanalyse zur Drusberg-Formation im Helvetikum der Westschweiz nachzuliefern (siehe NAB 09-29), insbesondere unter Einbezug der Arbeiten von Moser (1985) und Lauber (1975).

Flysch (ultrahelvetisch bzw. Gurnigel-Schlieren-Frutigen-Flysch)

Die Frage nach der Eignung der mächtigen Flysch-Serien als Wirtgestein wird häufig gestellt. Auch wenn der Sichtweise der Nagra gefolgt und damit einer Zurückstellung der Flysche zugestimmt werden kann, sollten die vorhandenen Daten vollständig und fachgerecht aufgearbeitet und zu einem überzeugenden Argumentarium zusammengestellt werden. Bedeutende Mächtigkeiten, z.B. im Frutigen-Flysch, eine generell geringe Wasserführung in Stollenbauten und ihre weiträumige Verbreitung erfordern eine ausführlichere Darlegung der Gründe für einen Abschluss (bzw. eine Zurückstellung).

Zur besseren Nachvollziehbarkeit empfiehlt die Landesgeologie, der Bewertung der Nagra eine entsprechende Detaildarstellung in Ergänzung zur Antwort der Nagra auf unsere Frage (NAB 09-29) nachzuliefern.

6.2 Potenzielle Wirtgesteine für hochaktive Abfälle

Swisstopo, Landesgeologie schliesst sich der Beurteilung der Nagra an, für hochaktive Abfälle in den weiteren Schritten der Lagerrealisierung den Opalinus-Ton weiter zu verfolgen.

1. Februar 2010

**Bundesamt für Landestopographie swisstopo
Landesgeologie**

Literaturverzeichnis

- Ackermann, A. (1986): Le Flysch de la nappe du Niesen. – *Eclogae geol. Helv.* 79/3, 641–684.
- Allemann, F. (1957): Geologie des Fürstentums Liechtenstein (südwestlicher Teil). – Diss. Univ. Bern.
- Basabe-Rodríguez, P.P. (1992): Typologie des eaux souterraines du flysch de la nappe tectonique du Niesen (Préalpes Suisses). – Thèse Univ. Lausanne 1073.
- Baud, A. & Septfontaine, M. (1980): Présentation d'un profil palinspastique de la nappe des Préalpes médianes en suisse occidentale. – *Eclogae geol. Helv.* 73/2, 651–660.
- Baumer, A. (1964): Geologie der gotthardmassivischen-penninischen Grenzregion im oberen Bleinotal. – *Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.* 39.
- Bayer, A. (1982): Untersuchungen im Habkern-Mélange („Wildflysch“) zwischen Aare und Rhein. – Diss. ETH Zürich.
- Berger, J.-P. (1996): Cartes paléogéographiques-palinspastiques du bassin molassique suisse (Oligocène inférieur-Miocène moyen). – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 202, 1-44.
- Berger, J.-P., Reichenbacher, B., Becker, D., Grimm, M.C., Grimm, K.I., Picot, L., Storni, A., Pirkenseer, C., Derer, C. & Schäfer, A. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. – *Int. J. Earth Sci.* 94, 697–710.
- Bisig, W.K. (1957): Blattengratflysch und Sardonaflysch im Sernftal nördlich der Linie Richetlipass – Elm – Ramital – Grosse Scheibe. – Diss. ETH Zürich.
- Bögli, A. (1963): Beitrag zur Entstehung von Karsthöhlen. – *Die Höhle* 14, 63–68.
- Bossart, P. & Thury, M. (2009): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. – *Rep. Swiss geol. Survey*, 3.
- Briegel, U. (1972): Geologie der östlichen Alviergruppe (Helvetischen Decken der Ostschweiz) unter besonderer Berücksichtigung der Drusberg- und Schrattenkalkformation (Unterkreide). – *Eclogae geol. Helv.* 65/2, 425–483.
- Burkhalter, R.M. (1995): Ooidal ironstones and ferruginous microbialites: origin and relation to sequence stratigraphy (Aalenian and Bajocian, Swiss Jura mountains). – *Sedimentology* 42, 57–74.
- Burkhalter, R.M. (1996): Die Passwang-Alloformation (unteres Aalénien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Jura. – *Eclogae geol. Helv.* 89/3, 875–934.
- Diebold, P., Bitterli-Brunner, P. & Naef, H. (2006): Blatt 1069/1049 Frick-Laufenburg. – *Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläut.* 110.
- Dollfus, S. (1965): Über den helvetischen Dogger zwischen Linth und Rhein. – Diss. Univ. Zürich.
- Eichenberger, U., Jeannin, P.-Y. & Laws, S. (2007): Verkarstung von Karbonatgesteinen. In: Laws, S. & Deplazes, G: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten. – *Nagra Arbeitsber. NAB 07-28.*
- Eichenberger, U., Sommaruga, A. & Marillier, F. (in Vorb.): Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. – *Matér. Géol. Suisse, Géophys.*
- Etter, U. (1986): Stratigraphische und strukturgeologische Untersuchungen im gotthardmassivischen Mesozoikum zwischen dem Lukmanierpass und der Gegend von Ilanz. – Diss. Univ. Bern.
- Frey, J.D. (1967): Geologie des Greinagebietes. – *Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.]* 131.
- Frey, M. (1987): Low Temperature Metamorphism. – Blacky, Glasgow, London.

- Furrer, H. (1985): Stratigraphy. In: Furrer, H. (Ed.): Field workshop on Triassic and Jurassic sediments in the Eastern Alps of Switzerland, 25th – 29th August 1985. – Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich [N.F.] 248.
- Geyer, O.F. & Gwinner, M.P. (1991): Geologie von Baden-Württemberg (4. Aufl.). – Gebr. Bornträger, Berlin/Stuttgart.
- Goy-Eggenberger, D. (1998): Faible métamorphisme de la Nappe de Morcles: Minéralogie et géochimie. – Thèse Univ. Neuchâtel.
- Gruner, U. (1981): Die jurassischen Breccien der Falknis-Decke und altersäquivalente Einheiten in Graubünden. – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 154.
- Gubler, T. (2009): Blatt 1111 Albis. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Karte 134.
- Gygi, R.A. (2003): Perisphinctacean ammonites of the Late Jurassic in northern Switzerland: a versatile tool to investigate the sedimentary geology of an epicontinental sea. – Schweiz. paläont. Abh. 123.
- Habicht, K. (1987): Internationales Stratigraphisches Lexikon, Band I: Europa, Fasz. 7: Schweiz, 7b: Schweizerisches Mittelland (Molasse). – Schweiz. geol. Komm.
- Haldimann, P. (1979a): Alpine Ton- und Mergelformationen als mögliche Wirtgesteine für Endlager schwach- und mittelradioaktiver Abfälle in der Schweiz. Nagra interner Bericht.
- Haldimann, P. (2008): Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums. – Nagra Arbeitsber. NAB 08-03.
- Hartmann, P. (1998): Mineralwasservorkommen im nördlichen Bündnerschiefergebiet mit Schwerpunkt Valsertal. – Diss. ETH Zürich.
- Hofmann, F. (1981): Blatt 1031 Neunkirch. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Karte u. Erläut. 74.
- Hofmann, F., Schlatter, R. & Weh, M. (2000): Blatt 1011/1012 Beggingen-Singen. – geol. Atlas Schweiz 1:25000, Karte u. Erläut. 97.
- Hofmann, F., Schlatter, R. & Weh, M. (2002): Geologische Karte von Baden-Württemberg 1:25000, Bl. Tengen-Wiechs a.R., mit Erläuterungen. – Landesamt für Geol., Rohstoffe, Bergbau, Bad.-Württemb.
- Jordan, P. (2007): Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz. – Nagra Arbeitsber. NAB 07-35.
- Jung, W. (1963): Die mesozoischen Sedimente am Südostrand des Gotthard-Massivs (zwischen Plaun la Greina und Versam). – Eclogae geol. Helv. 56/2, 653–754.
- Keller, B. (1992): Hydrologie des schweizerischen Molassebeckens: aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtung. – Eclogae geol. Helv. 85/3, 611–651.
- Keller, B., Bläsi, H.-R., Platt, N.H., Mozley, P.S. & Matter, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. – Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol. 13.
- Keller, O. (1990): Die geologische Entwicklung des Alpenrheintales. – Werdenberger Jb. 1990, Buchs SG.
- Kempf, O., Matter, A., Burbank, D.W. & Mange, M. (1999): Depositional and structural evolution of a foreland basin margin in a magnetostratigraphic framework: the eastern Swiss Molasse basin. – Int. J. Earth Sci. 88, 253–275.
- Lauber, T. (1975): Geologie der Gebirgsregion zwischen Rawilpass und Iffigenalp (Wildhorn-Decke). – Unpubl. Lizentiatsarb. Univ. Bern.

- Lihou, J.C. (1996): Structure and deformation history of the Infrahelvetic flysch units, Glarus alps, eastern Switzerland. – *Eclogae geol. Helv.* 89/1, 439–460.
- Menkveld, J.W. (1995): Der geologische Bau des Helvetikums der Innerschweiz. – Diss. Univ. Bern.
- Morend, D. (2000): High-resolution seismic facies of alluvial depositional systems in the Lower Freshwater Molasse (Oligocene – early Miocene, western Swiss Molasse Basin). – *Terre & Environnement* 23, Diss. Univ. Genève.
- Morend, D., Pugin, A. & Gorin, G.E. (1998): Sedimentological interpretation of high-resolution seismic facies in the Lower Freshwater Molasse (Chattian, western Switzerland). *Terra Nova*, 10, 155–159.
- Morend, D., Pugin, A. & Gorin, G.E. (2002): High-resolution seismic imaging of outcrop-scale channels and an incised valley-system within the fluvial-dominated Lower Freshwater Molasse (Aquitainian, western Swiss Molasse Basin). – *Sediment. Geol.* 149, 245–264.
- Mosar, J. (1988): Métamorphisme transporté dans les Préalpes. – *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 68, 77–94.
- Moser, H.-J. (1985): Strukturgeologische Untersuchungen in der Rawil-Depression (Helvetische Kalkalpen zwischen Berner Oberland und Wallis). – Diss. Univ. Bern.
- Naef, H. & Merz, M. (1999): Geologische Profile durch den Kanton Zürich im Massstab 1:100'000. In: Bolliger, T. (Ed.): *Geologie des Kantons Zürich*. – Ott, Thun. (Profil A2 entlang Reflexionsseismik-Linie 75-SE-1/74-SE-1).
- Nänny, P. (1948): Zur Geologie der Prättigau-Schiefer zwischen Rhätikon und Plessur. – Diss. ETH Zürich.
- Pasquier, J.-B. (2005): Feuille 1225 Gruyères. – Atlas géol. Suisse 1:25000, Notice expl. 115.
- Plancherel, R. (1979): Aspect de la déformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar; implications cinématiques et dynamiques. – *Eclogae geol. Helv.* 72/1, 145–214.
- Rösli, F. (1944): Fazielle und tektonische Zusammenhänge zwischen Oberengadin und Mittelbünden. – *Eclogae geol. Helv.* 37/2, 355–383.
- Rüfli, W.H. (1959): Stratigraphie und Tektonik des eingeschlossenen Glarner Flysches im Weisstannental (St. Galler Oberland). – *Mitt. geol. Inst. ETH u. Univ. Zürich (C)* 75.
- Schalch, F. (1916): Geologische Spezialkarte des Grossherzogtums Baden, Bl. 145: Wiechs-Schaffhausen., mit Erläuterungen. – *Grossherzogl. Bad. geol. Landesanstalt und Schweiz. geol. Comm.*
- Schalch, F. (1921): Geologische Spezialkarte von Baden, Bl. 158: Jestetten-Schaffhausen., mit Erläuterungen. – *Bad. geol. Landesanstalt und Schweiz. geol. Comm.*
- Septfontaine, M. (1983): Le Dogger des Préalpes médianes suisses et françaises; stratigraphie, évolution paléogéographique et paléotectonique. – *Denkschr. schweiz. natf. Ges.* 97.
- Spicher, J.-P. (1966): Géologie des Préalpes médianes dans le massif des Bruns. – Thèse Univ. Fribourg.
- Steinmann, M. (1994): Die Nordpenninischen Bündnerschiefer der Zentralalpen Graubündens: Tektonik, Stratigraphie, Beckenentwicklung. – Diss. ETH Zürich.
- Streiff, V., Jäckli, H. & Neher, J. (1976): Blatt 1235 Andeer. – *Geol. Atlas Schweiz 1:25'000*, Erläut. 56.

- Strunck, P. (2001): The Molasse of Western Switzerland. – Diss. Univ. Bern.
- Stuijvenberg, J. van (1979): Geology of the Gurnigel area (Prealps, Switzerland). – Beitr. geol. Karte Schweiz [N.F.] 151.
- Thum, I. & Nabholz, W. (1972): Zur Sedimentologie und Metamorphose der penninischen Flysch- und Schieferabfolgen im Gebiet Prättigau–Lenzerheide–Oberhalbstein. – Beitr. Geol. Karte Schweiz [N.F.] 144.
- Tröhler, B. (1965): Geologie der Glockhaus-Gruppe. – Diss. Univ. Bern.
- Trümpy, D. (1916): Geologische Untersuchungen im westlichen Rätikon. – Diss. Univ. Bern.
- Weh, M. (1998): Tektonische Entwicklung der penninischen Sediment-Decken in Graubünden (Prättigau bis Oberhalbstein). – Diss. Univ. Basel.
- Weidmann, M. (1993): Feuille 1244 Châtel-St-Denis. – Atlas géol. Suisse 1:25000, Notice expl. 92.
- Winkler, W. (1983): Stratigraphie, Sedimentologie und Sedimentpetrographie des Schlieren-Flysches (Zentralschweiz). – Diss. Univ. Fribourg.
- Wyss, R. & Isler, A. (2007): Blatt 1234 Vals. – Geol. Atlas Schweiz 1:25'000, Erläut. 121.

Berichte der Nagra

- NTB 88-25: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988. Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz.
- NTB 94-10: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993. Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1999 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen.
- NTB 96-01: Geosynthese Wellenberg 1996. Ergebnisse der Untersuchungsphasen I und II (Textband und Bildband).
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.
- NTB 08-03: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HHA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse.
- NTB 08-04: Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und HHA-Lager. Geologische Grundlagen.
- 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.
- NTB 09-06: The Nagra research, development and demonstration (RD&D) plan for the disposal of radioactive waste in Switzerland.

- NAB 04-07: Hydrogeologie des unteren Malm (Oxfordian): Renggeri-Ton, Terrain à Chailles und Effinger Schichten.
- NAB 07-28: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss.
- NAB 07-35: Sammelprofile der Sedimentgesteine der verschiedenen geologisch-tektonischen Einheiten der Schweiz.
- NAB 08-03: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Tonschiefer- und Mergel-Formationen des Helvetikums.
- NAB 08-12: EWS-Bohrungen Küttigen – Synthese der geologischen und hydrogeologischen Untersuchungen.
- NAB 08-18: Borehole Oftringen: Geochemistry, Mineralogy, Porosimetry, Pore Water Chemistry.
- NAB 08-43: Geologische Grundlagen für die Beurteilung von Standortmöglichkeiten für ein SMA-Tiefenlager in Ton- und Mergel-Formationen im Faltenjura und angrenzenden Gebieten.
- NAB 08-47: Bohrung Küttigen 2: Interpretation von Wasserproben aus den Effinger Schichten (Oberjura).
- NAB 09-29: Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörige Antworten der Nagra.
- NAB 09-31: Geologisches 3D-Modell Wellenberg.
- NAB 09-32: Geologisches Modell Wartau / Alp Palfries: Geologische Grundlagen.
- NAB 09-33: Geologisches Modell Wartau / Alp Palfries: 3D-Modell.

ENSI 33/067

Herausgeber: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), CH-5200 Brugg
Telefon +41(0)56 460 84 00, Telefax +41(0)56 460 84 99

Zu beziehen bei: Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), Informationsdienst, Industriestrasse 19, CH-5200 Brugg
oder per E-Mail Infodienst@ensi.ch
Abrufbar unter www.ensi.ch