

TECHNISCHER BERICHT 05-02

Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten
Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen
mittelaktiven Abfälle

**Darstellung und Beurteilung
der aus sicherheitstechnisch-
geologischer Sicht möglichen
Wirtgesteine und Gebiete**

August 2005

TECHNISCHER BERICHT 05-02

Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten
Brennelemente, der hochaktiven und langlebigen
mittelaktiven Abfälle

**Darstellung und Beurteilung
der aus sicherheitstechnisch-
geologischer Sicht möglichen
Wirtgesteine und Gebiete**

August 2005

ISSN 1015-2636

"Copyright © 2005 by Nagra, Wettingen (Schweiz) / Alle Rechte vorbehalten.

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung der Nagra unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Übersetzungen, Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen und Programmen, für Mikroverfilmungen, Vervielfältigungen usw."

Zusammenfassung

Die Nagra hat für den Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit der sicheren geologischen Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente (BE), der hochaktiven (HAA) und der langlebigen mittelaktiven Abfälle (LMA) Ende Jahr 2002 das Projekt *Entsorgungsnachweis* eingereicht. Diese Machbarkeitsstudie basiert auf der Wirtgesteinsoption Opalinuston und dem Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland. Die Wahl des Opalinustons und des Untersuchungsgebiets resultierte aus einem auf die Sicherheit ausgerichteten Verfahren durch schrittweise Zurückstellen von grundsätzlich möglichen Optionen, die aber in der sicherheitsbezogenen Gesamtbewertung von der Nagra als nachrangig eingestuft wurden. Die Sicherheitsbehörden des Bundes haben alle Phasen des Auswahlverfahrens kritisch beobachtet, die entsprechenden Berichte der Nagra kommentiert und den wichtigen Entscheiden zugestimmt.

Der vorliegende Bericht wurde von der Nagra auf Veranlassung des UVEK als eine der Entscheidungsgrundlagen für das weitere Vorgehen nach dem Entsorgungsnachweis erstellt. Der Bericht zeigt auf, welche Möglichkeiten für die Lagerung der BE, HAA und LMA in der Schweiz vorhanden sind. Dazu fasst er den breit abgestützten aktuellen Stand der akademischen und der angewandten erdwissenschaftlichen Forschung sowie die projektspezifisch von der Nagra in den letzten 30 Jahren erarbeiteten Kenntnisse zusammen.

Die zusammenfassende Beschreibung und Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete erfolgt anhand von Merkmalen, welche die in- und ausländischen Erfahrungen berücksichtigen und die der internationalen Praxis entsprechen. Die Beurteilung gibt der Langzeitsicherheit höchste Priorität und beschränkt sich auf die entsprechenden geologischen Merkmale; nicht-geologische Fragen werden ausgeklammert. Sie führt zu folgenden Resultaten:

1. Aus Gründen der erforderlichen Langzeitstabilität und der einfacheren strukturellen Verhältnisse wird der geologisch-tektonische Grossraum der Mittelländischen Molasse und des nord-östlichen Tafeljuras bevorzugt.
2. Innerhalb dieses Grossraums sind verschiedene Wirtgesteine und Gebiete vorhanden, welche – mit auf die geologischen Bedingungen abgestimmten technischen Barrieren – die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA/LMA prinzipiell gewährleisten können.
3. Die Beurteilung der Unterschiede zwischen den grundsätzlich möglichen Wirtgesteinen führt zum Schluss, dass der Opalinuston gegenüber den anderen möglichen Wirtgesteinen (Kristallin, Tongesteine der Unteren Süsswassermolasse) sicherheitstechnisch-geologische Vorteile aufweist.
4. Für das von der Nagra bevorzugte Wirtgestein Opalinuston gibt es neben dem Zürcher Weinland weitere Gebiete, die grundsätzlich für ein Tiefenlager für BE/HAA/LMA in Frage kommen könnten: Nördlich Lägeren, Bözberg und Jurasüdfuss.

Eine vergleichende Bewertung von potenziellen Standortgebieten hinsichtlich der Festlegung eines Standorts für die Vorbereitung eines Rahmenbewilligungsgesuchs hat auch raumplanerischen und sozio-ökonomischen Aspekten Rechnung zu tragen. Dieser nächste Schritt ist dem vom Bund zu erarbeitenden *Sachplan Geologische Tiefenlager* vorbehalten. Der Konzeptteil dieses Sachplans, in dem die Behörden die Kriterien und das Vorgehen verbindlich festlegen, wird zurzeit vom Bundesamt für Energie (BFE) erarbeitet.

Abstract

In order to demonstrate the basic feasibility of the safe disposal of spent fuel (SF), vitrified high-level waste (HLW) and long-lived intermediate-level waste (ILW) in a deep geological repository, Nagra has submitted Project *Entsorgungsnachweis* (the term translates into English as “demonstration of disposal feasibility”) at the end of the year 2002. This feasibility study is based on the Opalinus Clay host rock option in the Zürcher Weinland area in northern Switzerland. The choice of both Opalinus Clay and the Zürcher Weinland is the result of a procedure focussed on safety, in which other possible options were also evaluated but set aside by Nagra in a stepwise manner. The Swiss safety authorities have critically observed all phases of the evaluation procedure, provided comments to Nagra’s corresponding reports and have given their approval to important decisions.

The present report was put together by Nagra in response to a request by the Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications as a part of the decision basis for the further steps after Project *Entsorgungsnachweis*. The report shows which possibilities for the disposal of SF, HLW and ILW exist in Switzerland and summarises the current state of general academic and applied geoscientific research as well as the project-specific knowledge base that has been developed by Nagra over the past 30 years.

The descriptions and assessments of the potential host rocks and areas are based on attributes that take into account experience gained both in Switzerland and abroad and are in agreement with international practice. The assessments put the highest priority on long-term safety and are restricted to the corresponding geological features. These assessments lead to the following results:

1. Due to the required long-term stability and the relative simplicity of structure the preferred geologic-tectonic region is the Molasse Basin and the north-eastern Tabular Jura.
2. Within this region different host rocks and areas can in principle ensure the safety of a deep geological repository for SF/HLW/ILW if the engineered barriers are adapted to the geological conditions.
3. An assessment of the differences between potential host rocks leads to the conclusion that the Opalinus Clay has advantages from the geological point of view over other host rocks (crystalline basement, claystones of the Lower Freshwater Molasse).
4. Opalinus Clay (the host rock preferred by Nagra) can be found in other areas besides the Zürcher Weinland which might, in principle, be appropriate for siting a SF/HLW/ILW repository. These are the areas of *Nördlich Lägeren*, *Bözberg* and *Jurasüdfuss*.

An assessment of potential siting areas in view of the preparation of a General Licence application will also have to consider land use planning and socio-economic aspects. This will be carried out in the next step according to the Sectoral Plan for Geological Disposal (*Sachplan Geologische Tiefenlager*) under the guidance of the relevant Swiss authorities. The Sectoral Strategy (*Konzept*) of the Plan, which defines both the relevant criteria and the procedure, is currently being developed by the Federal Office of Energy.

Résumé

Fin 2002, la Nagra a soumis au Conseil fédéral les résultats du projet *Entsorgungsnachweis*, qui démontre la faisabilité d'un stockage sûr des assemblages combustibles usés (AC), des déchets de haute activité (DHA) et des déchets de moyenne activité à vie longue (DMAVL) en formation géologique profonde. Cette étude de faisabilité est basée sur les recherches effectuées dans la région du *Weinland* zurichois et sur les Argiles à Opalinus en tant que roche d'accueil. Le choix des Argiles à Opalinus et de la région étudiée constitue l'aboutissement d'un processus de sélection progressif, au cours duquel une série d'options, toutes envisageables, ont fait l'objet d'un classement sur la base de critères de sûreté. Les autorités de surveillance fédérales en charge de la sûreté ont exercé un suivi rigoureux sur chacune des phases de sélection, commenté les rapports rédigés par la Nagra et donné leur approbation aux principales décisions.

Le présent rapport a été préparé par la Nagra à la demande du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC), qui souhaitait disposer d'un document permettant d'orienter les travaux à l'issue de l'étude de faisabilité *Entsorgungsnachweis*. Ce rapport fait le point sur les possibilités existant pour le stockage des AC, DHA et DMAVL en Suisse. Il résume en outre l'état actuel des recherches dans le domaine des sciences de la terre, ainsi que les connaissances réunies par la Nagra au cours de trente années de projets.

La description et l'appréciation critique des roches et régions d'accueil potentielles reposent sur une série de critères qui tiennent compte de l'expérience cumulée en Suisse comme à l'étranger et correspondent à la pratique internationale. Pour l'appréciation critique, le critère de sûreté à long terme a été déclaré prioritaire et seules les caractéristiques géologiques pertinentes ont été prises en compte. Les résultats suivants ont été obtenus:

1. Du fait de l'exigence de stabilité à long terme et en raison de sa relative simplicité structurale, l'espace géologique et tectonique qui comprend la molasse du Plateau suisse et le nord-est du Jura tabulaire a été retenu.
2. Au sein de cet espace, il existe plusieurs roches et secteurs d'accueil qui – alliés à des barrières ouvragées adaptées aux conditions géologiques locales – sont en mesure de garantir la sûreté d'un site de stockage géologique pour AC/DHA/DMAVL.
3. L'étude des différences existant entre les roches d'accueil potentielles indique que, du point de vue géologique, les Argiles à Opalinus présentent des avantages par rapport aux roches cristallines et aux argiles de la molasse d'eau douce inférieure.
4. Les Argiles à Opalinus, sélectionnées par la Nagra comme roche d'accueil, sont présentes dans le *Weinland* zurichois, mais aussi dans d'autres régions qui pourraient également accueillir un site de stockage géologique pour AC/DHA/DMAVL, en l'occurrence les secteurs délimités sous les noms de *Nördlich Lägeren*, *Bözberg* et *Jurasüdfuss*.

L'évaluation comparative des régions d'accueil potentielles en vue du dépôt d'une demande d'autorisation générale doit également prendre en compte l'aménagement du territoire et les aspects socio-économiques. Ces critères seront définis dans le Plan Sectoriel «Dépôts géologiques en profondeur» élaboré par la Confédération. L'Office fédéral de l'énergie (OFEN) rédige actuellement la partie «Conception» de ce Plan Sectoriel, qui fixe de manière contraignante les critères et la procédure à suivre.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract	II
Résumé	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Anlass, Zweck und Stellenwert des Berichtes	1
1.1.1 Anlass	1
1.1.2 Zweck und Stellenwert des Berichtes.....	1
1.2 Aufbau des Berichts.....	2
2 Beurteilung der Standortmöglichkeiten: Rückblick, Ausgangslage und Vorgehen	3
2.1 Rückblick und Ausgangslage	3
2.2 Vorgehen bei der Beurteilung.....	5
2.2.1 Generelle behördliche Vorgaben und internationale Empfehlungen.....	5
2.2.2 Übergeordnete Anforderungen an ein geologisches Tiefenlager für HAA	6
2.2.3 Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete.....	7
3 Abgrenzung und Beschreibung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume	13
3.1 Die Geologie der Schweiz	13
3.1.1 Kenntnisstand und Dokumentation.....	13
3.1.2 Grossräumige geologisch-tektonische Verhältnisse	14
3.2 Bevorzugte geologisch-tektonische Grossräume: Abgrenzung und Beschreibung	15
4 Identifikation, Beschreibung und Beurteilung möglicher Wirtgesteine	19
4.1 Identifikation möglicher Wirtgesteine.....	19
4.2 Kristallines Grundgebirge.....	22
4.2.1 Datengrundlage.....	22
4.2.2 Barriereneigenschaften	22
4.2.3 Bautechnische Machbarkeit.....	25
4.2.4 Belastbarkeit der Aussagen.....	26
4.3 Opalinuston und Rahmengesteine	29
4.3.1 Datengrundlage.....	29
4.3.2 Barriereneigenschaften	29
4.3.3 Bautechnische Machbarkeit.....	37
4.3.4 Belastbarkeit der Aussagen.....	38
4.4 Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse (USM).....	40
4.4.1 Datengrundlage.....	40
4.4.2 Barriereneigenschaften	40

4.4.3	Bautechnische Machbarkeit.....	47
4.4.4	Belastbarkeit der Aussagen.....	48
4.5	Verbreitung der möglichen Wirtgesteine.....	51
5	Abgrenzung und Beschreibung möglicher Gebiete	55
5.1	Vorgehen	55
5.2	Kristallines Grundgebirge.....	55
5.2.1	Datengrundlage.....	55
5.2.2	Gliederung des Verbreitungsraums	55
5.2.3	Beschreibung des Gebiets 'West'	56
5.3	Opalinuston und Rahmengesteine	58
5.3.1	Datengrundlage.....	58
5.3.2	Gliederung des Verbreitungsraums	58
5.3.3	Stratigraphische Gliederung (Opalinuston und Rahmengesteine).....	61
5.3.4	Abgrenzung und Beschreibung möglicher Gebiete	63
5.3.4.1	Zürcher Weinland	66
5.3.4.2	Nördlich Lägeren	66
5.3.4.3	Bözberg.....	67
5.3.4.4	Jurasüdfuss.....	68
5.4	Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse	69
5.4.1	Datengrundlage.....	69
5.4.2	Gliederung des Verbreitungsraums	69
5.4.3	Stratigraphische Verhältnisse	70
5.4.4	Tektonische Verhältnisse.....	72
5.4.5	Mögliche Gebiete	74
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	75
6.1	Die Optionen: mögliche Wirtgesteine und Gebiete	75
6.2	Begründung, Beschreibung und Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete.....	76
6.2.1	Begründung und Bezeichnung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete	76
6.2.2	Beschreibung und Beurteilung der möglichen Wirtgesteine	77
6.2.3	Beschreibung der möglichen Opalinuston-Gebiete	78
6.3	Kenntnisstand	80
6.4	Ausblick.....	81
	Referenzen	83

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Verteilungskarte der Tiefbohrungen (> 300 m), seismischen Linien und Tunnelbauten.	5
Fig. 3-1:	Geologisch-tektonische Karte der Schweiz und angrenzender Gebiete (vereinfacht nach Bundesamt für Wasser und Geologie 2002a, b).	15
Fig. 3-2:	Geologisches Profil vom Oberrheingraben (ORG) bis in die Südalpen; nach Pfiffner et al. (1997), vereinfacht und modifiziert (Permokarbontröge).	15
Fig. 3-3:	Bevorzugter geologisch-tektonischer Grossraum.....	17
Fig. 4-1:	Schematische Übersicht ('Sammelprofil') der Gesteinsschichten im Mittelland und in der Nordschweiz mit einer hydrogeologischen Kurzcharakterisierung.....	20
Fig. 4-2:	Schematische Darstellung verschiedener geologisch-tektonischer Entwicklungsphasen der Nordschweiz mit Bildung und Reaktivierung von Störungszonen im Grundgebirge.	23
Fig. 4-3:	Freilegung der Oberfläche des kristallinen Grundgebirges durch streifenweise Entfernung der Bodenschichten (<i>Trenching</i>), Olkiluoto, Finnland (Foto: Posiva).	26
Fig. 4-4:	Geologisches Profil (Mettauertal – Bohrung Riniken) basierend auf der Interpretation von zwei zusammengesetzten Seismiklinien (83-NF-31 nach Diebold et al. 1991 und 96-NK-02 nach Weber & Albert 1997).....	27
Fig. 4-5:	Paläogeographische Verhältnisse zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons (nach Allia 1996).	30
Fig. 4-6:	Illustration des Opalinustons in verschiedenen Massstäben (Nagra 2002b).	31
Fig. 4-7:	Diffusionsprofil Bohrung Benken (nach Nagra 2002b, Gimmi & Waber 2004).	35
Fig. 4-8:	Störungszonen (Aufschiebungen, vgl. Pfeile) im Opalinuston der Bohrung Schafisheim.....	36
Fig. 4-9:	Ablagerungsverhältnisse zur Zeit der USM (Chattian und Aquitanian), nach Berger (1996) und Kuhlemann & Kempf (2001).	41
Fig. 4-10:	Faziesmodell der distalen (alpenfernen) USM (nach Keller et al. 1990).	42
Fig. 4-11:	Architektur-Elemente der distalen (alpenfernen) USM in der Tongrube Roggwil BE (aus Keller et al. 1990).....	42
Fig. 4-12:	Schematischer N-S Schnitt durch die USM (nach Keller 1992).....	43
Fig. 4-13:	Poröse und zementierte Sandsteine der USM (aus Keller et al. 1990).	44
Fig. 4-14:	Seismisches Modell USM West (aus Hölker & Graf 2004).	50
Fig. 4-15:	Schematischer Profilschnitt durch die Nordschweiz zur Darstellung der Verbreitungsbereiche der möglichen Wirtgesteine.....	52
Fig. 4-16:	Die Verbreitung der möglichen Wirtgesteine im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum unter Berücksichtigung der bevorzugten Tiefenlage unter Terrain.	53

Fig. 5-1:	Geologisch-tektonische Verhältnisse im Grundgebirge unter der Basis des Mesozoikums. Kristallingebiete 'West' (W) und 'Ost' (E).	56
Fig. 5-2:	Die Strukturkarte der Basis Mesozoikum zeigt die geologisch-tektonischen Verhältnisse im Gebiet 'West'.	57
Fig. 5-3:	NW-SE-Profil durch die Bereiche unterschiedlicher Deformation im Deckgebirge.	59
Fig. 5-4:	Gliederung des Opalinuston-Verbreitungsraums in verschiedene geologisch-tektonische Bereiche.	59
Fig. 5-5:	Stark vereinfachte, schematische Darstellung der regional von Ost nach West ändernden sedimentären Fazies im mesozoischen Deckgebirge über und unter dem Opalinuston, insbesondere der unterschiedlich ausgebildeten Rahmengesteine.	62
Fig. 5-6:	Detailliertere tektonische Gliederung der im bevorzugten Tiefenbereich liegenden Opalinuston-Vorkommen in der Nordschweiz.	64
Fig. 5-7:	Geologische Profile im Verbreitungsraum mit Opalinuston.	65
Fig. 5-8:	Seismostratigraphisch definierte Ablagerungssequenzen und Lithologs von Tiefbohrungen in der USM des westlichen Molassebeckens.	71
Fig. 5-9:	Verbreitung des Chattian im westlichen Molassebecken in bevorzugter Tiefenlage sowie tektonische Strukturen (Störungen und Faltenachsen an der Basis des Tertiärs, ergänzt durch Oberflächendaten).	73
Fig. 5-10:	Verbreitung der mittleren und oberen USM im zentralen und östlichen Mittelland in bevorzugter Tiefenlage sowie tektonische Strukturen.	74
Fig. 6-1:	Überblick über die räumliche Verbreitung der möglichen Wirtgesteine (in den bevorzugten Tiefenbereichen) und Abgrenzung möglicher Gebiete.	75

1 Einleitung

1.1 Anlass, Zweck und Stellenwert des Berichtes

1.1.1 Anlass

In der Schweiz führt die Nagra im Auftrag der Verursacher der radioaktiven Abfälle (die Kernkraftwerksbetreiber und der Bund als Verantwortlicher für die Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung) seit Ende der 70er Jahre umfangreiche Studien und Untersuchungen zur sicheren Entsorgung aller Abfallkategorien durch (abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (HAA), langlebige mittelaktive Abfälle (LMA), schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA)). Im Dezember 2002 hat die Nagra beim Bundesrat eine umfangreiche Synthese zur geologischen Tiefenlagerung der BE/HAA/LMA für das potenzielle Wirtgestein Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet Zürcher Weinland eingereicht (Nagra 2002a, b, c). Damit will die Nagra den gesetzlich geforderten Nachweis erbringen, dass die sichere Entsorgung der BE/HAA/LMA in der Schweiz möglich ist¹. Der so genannte Entsorgungsnachweis ist ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur sicheren Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Die Arbeiten der Nagra werden von den Sicherheitsbehörden des Bundes eng begleitet, und die verschiedenen Berichte und Vorschläge der Nagra werden durch die Sicherheitsbehörden und ihre Experten beurteilt. Dies gilt auch für den Entsorgungsnachweis, welcher durch die Behörden und ihre Experten geprüft wird.

Die eingereichte Dokumentation zum Entsorgungsnachweis sowie der gleichzeitig von der Nagra gestellte Antrag auf Fokussierung der zukünftigen Arbeiten für die Entsorgung der BE/HAA/LMA (im folgenden kurz mit „HAA“ bezeichnet) auf den Opalinuston als Wirtgestein und das Zürcher Weinland als potenzielles Standortgebiet ist in der Öffentlichkeit und in den Medien auf grosses Interesse gestossen. In Hinblick auf den Entscheid des Bundesrats zum Entsorgungsnachweis und zum weiteren Vorgehen im HAA-Programm hat das Bundesamt für Energie (BFE) die nukleare Sicherheitsbehörde (HSK) beauftragt, einen Kurzbericht zum Ablauf des Auswahlverfahrens des Opalinustons im Zürcher Weinland und zu den Begründungen für die getroffenen Entscheide zu erstellen. Weiter wurde die Nagra vom Vorsteher des UVEK aufgefordert, eine Auslegeordnung über die in der Schweiz vorhandenen Möglichkeiten für die Tiefenlagerung der HAA vorzunehmen als eine der Entscheidungsgrundlagen für das weitere Vorgehen, insbesondere bezüglich der weiter zu verfolgenden Wirtgesteine (UVEK 2004a, UVEK 2005). Mit dem vorliegenden Bericht kommt die Nagra dieser Aufforderung nach.

1.1.2 Zweck und Stellenwert des Berichts

In vorliegendem Bericht wird zusammenfassend dokumentiert, welche Wirtgesteine und Gebiete in der Schweiz aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht die grundsätzlichen Voraussetzungen für die Errichtung eines sicheren geologischen Tiefenlagers für HAA erfüllen. Dazu werden die möglichen Wirtgesteine und Gebiete beschrieben und ihre mögliche Eignung beurteilt. Im Bericht wird auch geprüft, ob und gegebenenfalls inwieweit die bisherigen Aussagen der Nagra (Nagra 1988, 1994b, 2003a, 2003b) zu den verschiedenen geologischen Möglichkeiten aus heutiger Sicht angepasst werden müssen.

Neben dem vorliegenden Bericht und dem erwähnten Bericht der HSK (HSK 2005) wird die Frage der Möglichkeiten für die geologische Tiefenlagerung der HAA auch in anderen

¹ Für SMA wurde der entsprechende Nachweis 1985 im Rahmen des Projekts Gewähr erbracht.

Berichten und Verfahren zu behandeln sein: Der Bundesrat hat in der Kernenergieverordnung (Art. 5) festgelegt, dass der Bund die notwendigen Ziele und Vorgaben sowie Kriterien für die Standortwahl in einem Sachplan „Geologische Tiefenlager“ festlegt. Das Sachplanverfahren wird eine Bewertung der möglichen Optionen umfassen und zur Wahl eines Standorts für die Vorbereitung eines Rahmenbewilligungsgesuchs führen. Die abschliessende Standortwahl erfolgt danach durch die Rahmenbewilligung, verbunden mit der Festsetzung des Standortes gemäss Sachplan. Das Konzept des Sachplans (Verfahren und Kriterien) soll bis 2006 vorliegen (BFE 2005a). Gemäss Kernenergieverordnung (KEV, Art. 62) werden im Rahmenbewilligungsgesuch (RBG) die verschiedenen Optionen in einem Bericht hinsichtlich ihrer Sicherheit zu vergleichen und die für die Wahl des Standorts ausschlaggebenden Eigenschaften zu bewerten sein. Zudem wird für das RBG auch ein Bericht über die Abstimmung mit der Raumplanung verlangt, der neben geologisch-sicherheitstechnischen Fragen auch andere Aspekte (raumplanerische, sozio-ökonomische, etc.) behandeln muss.

Der vorliegende Bericht, welcher auf Veranlassung des UVEK erstellt wurde, beschränkt sich auf eine Beurteilung der Möglichkeiten für die geologische Tiefenlagerung der HAA in der Schweiz aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht. **Eine vollständige und verbindliche Beurteilung und vergleichende Bewertung der verschiedenen möglichen Gebiete in Hinblick auf die Realisierung eines Tiefenlagers auch unter Berücksichtigung von nicht-sicherheitsbezogenen Kriterien wird im Rahmen des Sachplans „Geologische Tiefenlager“ durchgeführt und kann erst erfolgen, wenn die Vorgaben und Kriterien des Sachplans vorliegen.**

1.2 Aufbau des Berichts

Der Bericht wendet sich sowohl an die Öffentlichkeit (vor allem Kap. 1, 2 und 6) als auch an die Fachwelt (fachlicher Inhalt vor allem in Kap. 3, 4 und 5). Er stellt insbesondere bezüglich der Geologie – als fachlich zentrales Thema bei der Identifikation und Beurteilung der geologischen Möglichkeiten – den breiteren Zusammenhang dar und stützt sich auf eine grössere Zahl von Berichten und wissenschaftlichen Publikationen ab, welche detailliertere Unterlagen enthalten.

Der Aufbau des Berichts orientiert sich an dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Vorgehen bei der Beurteilung der geologischen Möglichkeiten. Nach der Einleitung (Kap. 1), der Darstellung der Ausgangslage (Kap. 2.1) und der Beschreibung des Vorgehens bei der Beurteilung (Kap. 2.2) wird in Kapitel 3 der bevorzugte geologisch-tektonische Grossraum identifiziert und diskutiert. In Kapitel 4 folgt die Darstellung der möglichen Wirtgesteine und in Kapitel 5 die Beschreibung möglicher Gebiete. Kapitel 6 fasst die Beurteilungen und die entsprechenden Schlussfolgerungen zusammen. Die Reihenfolge der Diskussion der verschiedenen Wirtgesteine und Gebiete in den einzelnen Kapiteln folgt dem geologischen Alter: zuerst werden die ältesten und am Schluss die jüngsten Gesteine diskutiert; die Reihenfolge nimmt keine vergleichende Bewertung vorweg.

2 Beurteilung der Standortmöglichkeiten: Rückblick, Ausgangslage und Vorgehen

2.1 Rückblick und Ausgangslage

Die Entsorgung radioaktiver Abfälle beruht auf dem Konzept der geologischen Endlagerung, d.h. ihrem dauerhaft wirksamen Einschluss in geeigneten tiefliegenden Gesteinsformationen. Diesbezüglich besteht ein international breit abgestützter fachlicher Konsens (z.B. NEA 1995, IAEA 1995). Auch die im Auftrag des Bundesrates eingesetzte Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA) kam in ihrem Bericht zum Schluss: „*Nach heutigem Wissensstand ist die geologische Endlagerung die einzige Methode zur Beseitigung der radioaktiven Abfälle, welche den Anforderungen an die Langzeitsicherheit (bis zu mehr als hunderttausend Jahren) entspricht.*“ (EKRA 2000). Das von der EKRA vorgeschlagene und im Kernenergiegesetz unter dem Begriff *geologische Tiefenlagerung* festgeschriebene Konzept verlangt auch die Überwachung des Lagers nach Einlagerung der Abfälle für einen längeren Zeitraum und schreibt vor, dass während der Beobachtungsphase die Abfälle ohne grossen Aufwand rückholbar sein müssen (KEG 2003).

Die Beurteilung und Auswahl möglicher Wirtgesteine und Gebiete für ein geologisches Tiefenlager stützt sich auf erdwissenschaftliche Informationen ab, welche die für die Langzeitsicherheit und die bautechnische Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers relevanten Aspekte abdecken. Ausgehend von einem breiten Kenntnisstand zur Geologie der Schweiz (geologische Forschung, Untersuchungen der öffentlichen Hand und der Industrie) wurde Ende der 70er Jahre eine breite Evaluation der in Frage kommenden Wirtgesteine (Kristallin, Steinsalz, Anhydrit, Mergel, Tonsteine) durchgeführt (VSE et al. 1978). Basierend darauf wurde zunächst das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz prioritär untersucht. Diese Untersuchungen umfassten auch die Charakterisierung der sich potenziell eignenden Sedimentschichten (z.B. des Opalinustons) im Deckgebirge, welches den kristallinen Sockel in der Nordschweiz überlagert. Die Resultate aus diesen Erkundungen, zusammen mit ersten Erkenntnissen aus dem von der Nagra 1984 gebauten und seither betriebenen Felslabor Grimsel sowie Informationen aus ausländischen Entsorgungsprogrammen, bildeten die Grundlage des Projekts Gewähr, in welchem vom kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz als Wirtgestein ausgegangen wurde (Nagra 1985). Basierend auf den Gutachten und Empfehlungen der Behörden kam der Bundesrat 1988 in seiner Beurteilung dieser umfassenden Studie zum Schluss, dass für die geologische Endlagerung der hochaktiven Abfälle sowohl der Machbarkeits- als auch der Sicherheitsnachweis erbracht, der Nachweis eines genügend grossen Gesteinsvorkommens mit geeigneten Eigenschaften (Standortnachweis) indes noch nicht abschliessend geführt worden sei. Er machte deshalb die Auflage, die Untersuchungen zum Nachweis eines genügend ausgedehnten Gesteinsvorkommens mit geeigneten Eigenschaften fortzuführen und neben der bis anhin prioritär untersuchten Wirtgesteinsoption Kristallin auch Sedimentgesteine in die Abklärungen einzubeziehen. Nach Abschluss der letzten Sondierbohrung im Kristallin (Sondierbohrung Siblingen 1989) hat die Nagra eine gesamtheitliche Auswertung der Möglichkeiten der Lagerung der hochaktiven Abfälle im Kristallin durchgeführt (Thury et al. 1994, Nagra 1994a), welche aus Sicht der Nagra die grundsätzliche Machbarkeit der sicheren Lagerung bestätigte. Der Sicherheitsbericht (Nagra 1994a) wurde von der HSK begutachtet (HSK 2004); auch die HSK sieht prinzipiell die Möglichkeit eines sicheren Lagers im Kristallin, hat aber bezüglich der Chancen einer erfolgreichen Realisierung grössere Vorbehalte.

Der Auflage zum Einbezug der Sedimentgesteine in das HAA-Programm nachkommend, veröffentlichte die Nagra eine breit angelegte Studie über die mögliche Eignung von in der Schweiz vorkommenden Sedimentgesteinen sowie über mögliche Standortregionen für die Aufnahme eines HAA-Tiefenlagers (Nagra 1988). Im Vergleich zum kristallinen Grundgebirge

lagen bereits Mitte der 80er Jahre umfangreiche, in der Literatur dokumentierte Kenntnisse zu den Sedimentgesteinen des Deckgebirges im Falten- und Tafeljura sowie zum Molassebecken vor. Weiter konnte sich die Nagra für die Sedimentstudie auf den im Rahmen der Kristallin-Untersuchungen gezielt erworbenen Datensatz zu den Sedimentgesteinen stützen. Zusätzlich wurden alle verfügbaren Daten und Erkenntnisse aus Untersuchungen Dritter (insbesondere für die Kohlenwasserstoff-Exploration) in die Beurteilung einbezogen.

Auf der Basis der 1988 vorgenommenen Auslegeordnung (Nagra 1988) und der nachfolgenden Beurteilung durch die Behörden (HSK 1990, KNE 1990, KSA 1990) erfolgte eine regionale Untersuchungsphase (1990 bis 1993). Diese hatte das Ziel, die geologischen Grundlagen zur nachvollziehbaren Begründung der Auswahl möglicher Sediment-Wirtgesteinsoptionen und potenzieller Standortgebiete zu verbessern. 1994 wurde eine Lagebeurteilung vorgenommen und im Konsens mit den Bundesbehörden und ihren Experten entschieden, in erster Priorität den Opalinuston als Wirtgestein und das Zürcher Weinland als potenzielles Standortgebiet vertieft zu untersuchen. Die Ergebnisse, welche zu dieser Entscheidung geführt haben, wurden in verschiedenen Technischen Berichten der Nagra veröffentlicht (Nagra 1988, 1991, 1994b) und auch in Informationsschriften einem breiteren Publikum zugänglich gemacht. In diesen Arbeiten sind die identifizierten Möglichkeiten für die Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle aufgezeigt und diskutiert; sie sind auch für den vorliegenden Bericht eine wichtige Grundlage. Auf Wunsch der grenznahen deutschen Gemeinden hat im Jahr 2002 die Deutsch-Schweizerische Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK) eine unabhängige deutsche Expertengruppe (AkEnd) damit beauftragt, die 1994 getroffene Wahl des Opalinustons und des Zürcher Weinlandes für die weiteren Untersuchungen zu prüfen. In ihrer Stellungnahme kam die Expertengruppe (AkEnd 2002a) zu folgendem Schluss: *„Die unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit getroffene Auswahl des Zürcher Weinlandes als bevorzugte Option für ein HAA/LMA-Tiefenlager in der Schweiz ist als gerechtfertigt anzusehen.“* Und: *„Insgesamt gesehen erfüllt das Schweizer Auswahlverfahren die Anforderungen, die international an ein solches Verfahren gestellt werden.“* Auch die EKRA hat sich zum Opalinuston geäußert (EKRA 2000, S. 73); sie kommt in ihrem Bericht zum Schluss: *„Gemäss dem heutigen Kenntnisstand ist das gegenwärtig erkundete Wirtsgestein Opalinuston grundsätzlich ... geeignet“.*

Für das Projekt Opalinuston wurden Feldarbeiten und Studien zur Ergänzung der regionalen Kenntnisse zur Geologie und detaillierte Untersuchungen im Zürcher Weinland (3D-Seismik, Bohrung Benken) durchgeführt. Diese wurden ergänzt durch umfangreiche Studien, Untersuchungen und Experimente zu sicherheitsrelevanten und bautechnischen Eigenschaften des Opalinustons im Felslabor Mont Terri, in anderen Tiefbohrungen, in Tunnels und in Oberflächenaufschlüssen. Die Experimente und Untersuchungen im Felslabor Mont Terri wurden im Rahmen einer internationalen Forschungsgemeinschaft mit zahlreichen Partnern aus der Schweiz und aus dem Ausland durchgeführt. Dies hat zu einer umfangreichen Dokumentation zum Projekt Opalinuston im Zürcher Weinland geführt, die für den Entsorgungsnachweis in drei Berichten zusammengefasst wurde (Nagra 2002a, b, c).

Der geologische Kenntnisstand zur Beurteilung der geologischen Möglichkeiten für die Lagerung der HAA in der Schweiz stützt sich also auf die Ergebnisse einer langjährigen geologischen Forschung, umfangreiche Felduntersuchungen (Fig. 1-1) und Labordaten ab und ist gut fundiert.

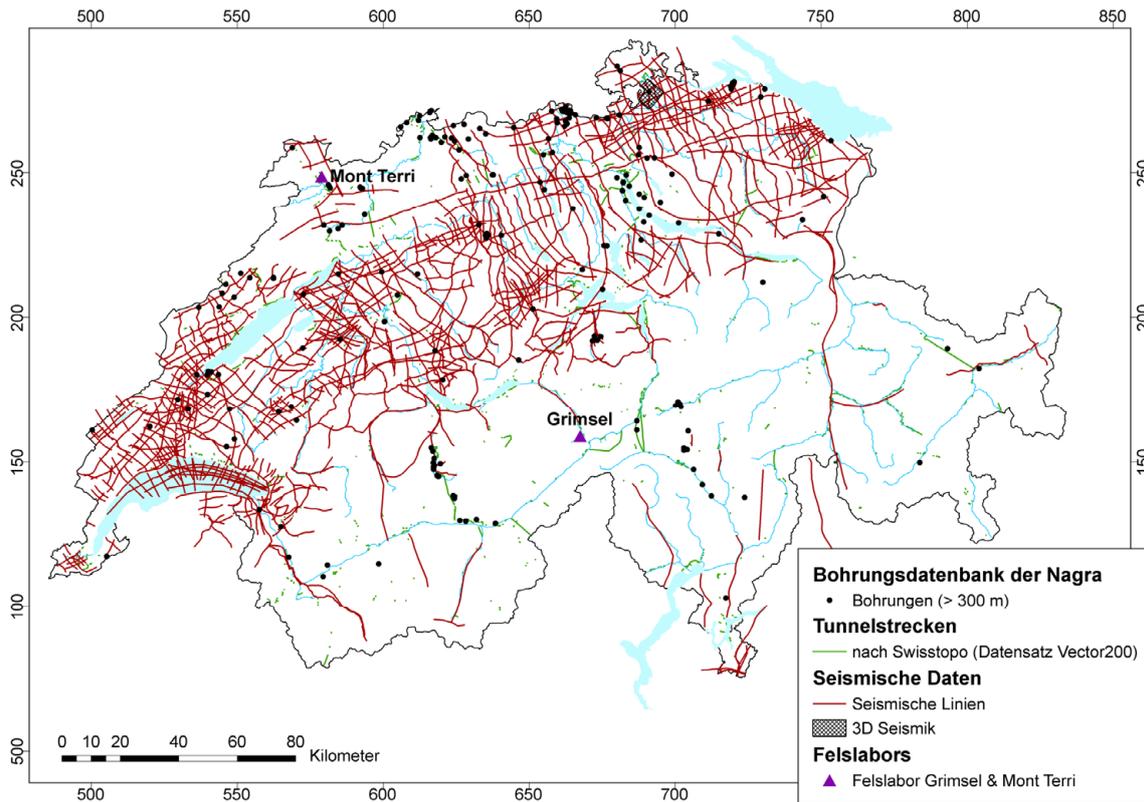


Fig. 1-1: Verteilungskarte der Tiefbohrungen (> 300 m), seismischen Linien und Tunnelbauten.

Die Alpen und der Faltenjura sind wegen der guten Aufschlüsse sowie durch Kenntnisse aus Tunnelbauten und umfangreichen geologischen Forschungsarbeiten gut bekannt. Im Mittelland ermöglichen Kenntnisse der Oberflächengeologie aber nur sehr beschränkten Einblick in den tieferen Untergrund; hier beruht der Kenntnisstand im Wesentlichen auf der umfangreichen seismischen Exploration und den zahlreichen Tiefbohrungen, welche in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts durch Dritte und durch die Nagra durchgeführt wurden.

2.2 Vorgehen bei der Beurteilung

2.2.1 Generelle behördliche Vorgaben und internationale Empfehlungen

Zum Vorgehen bei der Standortwahl und zur Beurteilung von Standorten für die geologische Tiefenlagerung der radioaktiven Abfälle gibt es – neben den generellen Angaben im Kernenergiegesetz (KEG 2003), in der Kernenergieverordnung (KEV 2004) und in der behördlichen Richtlinie HSK/R-21 (HSK 1993) – zur Zeit in der Schweiz keine detaillierten behördlichen Vorgaben zu Vorgehen und Kriterien. Solche sind gegenwärtig in Vorbereitung (Erarbeitung des Konzeptteils des Sachplans, vgl. Abschnitt 1.1). In Übereinstimmung mit der bisherigen Ausrichtung ihrer Arbeiten und gemäss den Anforderungen der behördlichen Richtlinie HSK/R-21 und den generellen Vorgaben in der neuen Kernenergiegesetzgebung gibt die Nagra bei der Beurteilung der Möglichkeiten der Sicherheit gegenüber anderen Aspekten (Raumplanung, sozio-ökonomische Aspekte, etc.) oberste Priorität. Dies ist in Übereinstimmung mit den Vorstellungen des Bundesrats, wie sie z.B. Bundesrat Leuenberger formulierte (UVEK 2004b), wonach bei der Standortwahl die Sicherheit oberste Priorität hat.

Die Beurteilung von möglichen Wirtgesteinen und Gebieten hat transparent und nachvollziehbar zu erfolgen. Die Nagra hat sich dazu auf die generellen Vorgaben im KEG, in der KEV und in der HSK/R-21 sowie auf Empfehlungen internationaler Organisationen (z.B. CCE 1992, IAEA 1994) und nationaler Organisationen/Behörden (z.B. AkEnd 2002b, NRC 1996, NUMO 2004, SKI 2002, STUK 2001) abgestützt. Auch die Resultate und Erkenntnisse aus Sicherheitsanalysen in der Schweiz und im Ausland sowie die entsprechenden behördlichen Überprüfungen und die resultierenden Schlussfolgerungen (z.B. Nagra 1985, HSK 1986, Nagra 1994a, Schneider et al. 1997, HSK 2004, Nagra 2002c, SKB 1999a, SKI 2001, SKB 2004, Posiva 1999, Posiva 2003a, STUK 2000, ONDRAF 2001a, Andra 2001a) werden berücksichtigt. Die Hinweise in diesen Unterlagen erlauben es, die für die Sicherheit massgebenden übergeordneten Anforderungen an das gesamte Lagersystem zu formulieren. Sie werden ergänzt durch Anforderungen zur technischen Machbarkeit der Lagersysteme. Ausgehend von diesen übergeordneten Anforderungen hat die Nagra für diesen Bericht für die Beurteilung der Wirtgesteine und Gebiete konkrete Vorgaben und Beurteilungsmerkmale abgeleitet.

2.2.2 Übergeordnete Anforderungen an ein geologisches Tiefenlager für HAA

Übergeordnete Anforderungen an das gesamte Lagersystem

Zur Gewährleistung eines sicheren geologischen Tiefenlagers für HAA sind aus Sicht der Nagra folgende übergeordnete Anforderungen für das gesamte Lagersystem (bestehend aus den technischen Barrieren und dem umgebenden Wirtgestein in einer geeigneten geologischen Situation; nachfolgend kurz als Gesamtsystem bezeichnet) zu erfüllen:

- **Langzeitstabilität:** Für die BE/HAA ist eine genügende Wirksamkeit des Gesamtsystems für einen Zeitraum von etwa einer Million Jahre notwendig. Dies verlangt eine genügende Stabilität des Gesamtsystems über diesen Zeitraum. Innerhalb einer Million Jahre nimmt die Radiotoxizität der hochaktiven Abfälle durch den radioaktiven Zerfall um mehrere Zehnerpotenzen ab und liegt dann im Bereich natürlicher Uranerze².
- **Langfristig wirksamer Einschluss:** Es ist ein langfristig wirksamer Einschluss der radioaktiven Stoffe im Lagersystem – bestehend aus den geologischen Barrieren und den auf das geologische Umfeld abgestimmten technischen Barrieren (Abfallmatrizen, Behälter, Verfüllmaterial) – anzustreben. Für die BE/HAA ist für eine bestimmte Zeit der vollständige Einschluss in Behältern vorgesehen, anschliessend werden die Radionuklide praktisch vollständig im Nahfeld (technische Barrieren sowie direkt umgebendes Wirtgestein) und in der Geosphäre zurückgehalten, sodass es nur zu marginalen Freisetzungen in die Biosphäre kommen kann. Grundsätzlich besteht auch die Möglichkeit, den Einschluss über sehr langlebige Behälter sicherzustellen, wie das die geplanten Lager für abgebrannte Brennelemente in Finnland und Schweden vorsehen; dort sollen Kupferbehälter den Einschluss gewährleisten, und die Hauptaufgabe der geologischen Umgebung besteht darin, günstige und stabile Bedingungen für die Integrität der Behälter über die erforderlichen Zeiten zu gewährleisten.
- **Technische Machbarkeit:** Die technische Machbarkeit des vorgesehenen Lagersystems (Untertagebauten, technische Barrieren, Einbringtechnologie für die Abfälle und die technischen Barrieren, inklusive Rückholbarkeit) muss mit einer Technologie gewährleistet sein, die schon heute in den Grundsätzen weitgehend entwickelt ist.

² Die Radiotoxizität der BE und HAA ist nach einer Million Jahr tiefer als die Radiotoxizität von Uranerz (z.B. Cigar Lake, 8 % U) unter Annahme eines Volumens, das den Lagerstollen der BE/HAA entspricht (vgl. Nagra 2002c, S. 30)

- **Genügende Belastbarkeit der Aussagen:** Die Aussagen zur Sicherheit und Machbarkeit müssen für die jeweilige Projektstufe und die zu treffenden Entscheide genügend belastbar sein.

Diese übergeordneten Anforderungen an das Gesamtsystem bedingen, dass die nachfolgend beschriebenen – den oben aufgelisteten Anforderungen sehr ähnlichen – übergeordneten geologisch-sicherheitstechnischen Anforderungen an mögliche Standorte erfüllt werden.

Übergeordnete geologisch-sicherheitstechnische Anforderungen an mögliche Standorte

- **Langzeitstabilität der Barrieren:** Die geologische Umgebung hat die Langzeitstabilität der geologischen Barrieren zu gewährleisten und soll günstige Bedingungen für das Langzeitverhalten der technischen Barrieren bieten. Durch Vermeiden von Standorten mit einem signifikanten Potenzial an nutzbaren Rohstoffvorkommen wird zudem die Wahrscheinlichkeit für unbeabsichtigtes Anbohren des Tiefenlagers minimiert.
- **Günstige Barriereneigenschaften des Wirtgesteins:** Gute Barriereneigenschaften des Wirtgesteins (gute Radionuklidrückhaltung) und/oder günstige Rahmenbedingungen für die langfristige Wirksamkeit der technischen Barrieren gewährleisten zusammen mit den technischen Barrieren einen praktisch vollständigen Einschluss der Radionuklide bis ihre Radiotoxizität durch Zerfall um mehrere Zehnerpotenzen abgenommen hat. Zusammen mit den technischen Barrieren soll das Wirtgestein dafür sorgen, dass es nur zu marginalen Radionuklid-Freisetzungen in die Biosphäre kommen kann.
- **Bautechnische Machbarkeit:** Die grundsätzliche bautechnische Machbarkeit der Anlagen untertage muss ohne Verwendung von Materialien, welche die Sicherheit unzulässig beeinträchtigen, gewährleistet sein. Zu den Anforderungen der Machbarkeit gehört auch die genügende Ausdehnung des Wirtgesteins zur Anordnung der Lagerstollen.
- **Gute Charakterisier- und Explorierbarkeit:** In Hinblick auf eine gute Belastbarkeit der Aussagen sind eine gute Charakterisier- und Explorierbarkeit der Wirtgesteineigenschaften und der geometrischen Verhältnisse sowie eine angemessene zeitliche Prognostizierbarkeit der geologischen Langzeitentwicklung vorteilhaft. Es werden einfache strukturgeologische Situationen bevorzugt.

Aus diesen übergeordneten geologisch-sicherheitstechnischen Anforderungen hat die Nagra die für die Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete massgebenden Vorgaben und Beurteilungsmerkmale abgeleitet. Diese werden im Folgenden beschrieben.

2.2.3 Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete

Vorgehen

Bei der Beurteilung der geologischen Möglichkeiten für eine sichere geologische Tiefenlagerung der HAA geht die Nagra in diesem Bericht von einer Gesamtbetrachtung der geologischen Gegebenheiten in der Schweiz aus, d.h. es wird a priori nichts ausgeschlossen.

In der Schweiz bestehen bezüglich der langzeitigen geologischen Entwicklung (Geodynamik) grössere Unterschiede, und die Schweiz lässt sich diesbezüglich in verschiedene geologisch-tektonische Grossräume unterteilen. Diese Grossräume unterscheiden sich in den Rahmenbedingungen für die geforderte *Langzeitstabilität*. Deshalb ist es angebracht, zuerst eine Beurteilung der geologisch-tektonischen Grossräume vorzunehmen: Die bevorzugten geologisch-tektonischen Grossräume müssen für die Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität

grundsätzlich vorteilhafte Rahmenbedingungen bieten; für die abschliessende Beurteilung der Langzeitstabilität eines Gebiets sind jedoch zusätzlich auch die lokalen Bedingungen zu betrachten. Weiter werden Grossräume von grosser struktureller Komplexität möglichst vermieden. Innerhalb der bevorzugten Grossräume ist anschliessend zu prüfen, welche der dort vorhandenen Gesteine die Anforderungen bezüglich *Barriereigenschaften* und *bautechnischer Machbarkeit* erfüllen und als Wirtgestein in Betracht gezogen werden können. Anschliessend ist zu beurteilen, ob und wo in den bevorzugten Grossräumen die grundsätzlich möglichen *Wirtgesteine in geeigneter Konfiguration* (Tiefenlage, Ausdehnung) vorkommen. Dies führt zu einer Abgrenzung möglicher Gebiete. Schliesslich werden die resultierenden möglichen Gebiete beurteilt. Dieses Vorgehen bei der Beurteilung entspricht weitgehend dem früheren Vorgehen der Nagra bei der Beurteilung der geologischen Möglichkeiten (Nagra 1988, Nagra 2003b).

In diesem Bericht wird bei der Beurteilung geprüft, in wie weit die nachfolgend aufgelisteten von der Nagra für diesen Zweck gewählten konkreten Vorgaben erfüllt werden; wird eine Vorgabe nicht erfüllt, beurteilt die Nagra das entsprechende Wirtgestein bzw. Gebiet als ungünstig. Bei der Diskussion der möglichen Wirtgesteine und Gebiete werden noch zusätzliche Merkmale betrachtet; auch diese sind nachfolgend aufgeführt.

Abgrenzung und Beschreibung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume

Für die Abgrenzung der geologisch-tektonischen Grossräume werden für den vorliegenden Bericht folgende Vorgaben verwendet:

- Zur Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität ist eine *genügende Überdeckung des Lagers* notwendig. Grossräume, in welchen gemäss den geodynamischen Modellvorstellungen grössere Hebungen erwartet werden (Betrachtungszeitraum ca. eine Million Jahre), werden als ungünstig beurteilt. In Bezug auf die rezenten Hebungsraten werden Grossräume mit Hebungen von mehr als 0.4 mm/Jahr bezüglich der grossräumigen Erosionsbasis zurückgestellt³. Grössere Hebungen sind ungünstig, weil langfristig von einem Gleichgewicht zwischen Hebung und Erosion auszugehen ist. Eine grosse Hebung würde zur Erosion eines signifikanten Teils der über dem Lager liegenden Gesteinschichten und im Extremfall sogar zu einer Freilegung des Lagers führen.
- Zur Gewährleistung der Langzeitstabilität wird Regionen ausgewichen, in denen *differenzielle tektonische Bewegungen* möglich sind mit dem *Potenzial zur Störung des Gesteinsverbandes*.
- In komplex aufgebauten Grossräumen ist die Charakterisier- und Explorierbarkeit der räumlichen und strukturellen Verhältnisse eingeschränkt. Um die Belastbarkeit der Aussagen zu erhöhen, werden strukturell einfach aufgebaute Grossräume bevorzugt. Deshalb werden Grossräume von übermässiger *Komplexität* (engständige Störungen / starke Zergliederung sowie starke Verfaltung) zurückgestellt, auch wenn in diesen Grossräumen ein grundsätzlich sicheres Lager nicht ausgeschlossen werden kann.

Weiter werden die Grossräume bezüglich der seismischen Gefährdung beschrieben:

- Die Behandlung der *Gefährdung durch seismische Erschütterungen* beschränkt sich auf eine Beschreibung, weil die seismische Aktivität in der Schweiz für die Beurteilung der

³ Dieser Wert basiert auf der Vorgabe einer Mindestdiefe des Lagers in 400 m Tiefe (vgl. Fussnote 5). Zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit werden Gebiete mit deutlich kleineren rezenten Hebungsraten als 0.4 mm/Jahr bevorzugt. Mit der Vorgabe der relativ hohen Rate von 0.4 mm/Jahr wird gewährleistet, dass keine Gebiete frühzeitig zurückgestellt werden.

Sicherheit eines Tiefenlagers und die Auswahl der Grossräume nicht ausschlaggebend ist. Die Studie von Bäckblom & Munier (2002) – welche die weltweit vorhandene Information zur seismischen Gefährdung von Untertagebauten berücksichtigt – zeigt, dass Untertagebauten im Vergleich zu Oberflächenbauten eine weitaus grössere Erdbebensicherheit aufweisen. Sowohl die Oberflächenanlagen als auch die untertägigen Bauten können für die Betriebsphase gegenüber den in der Schweiz möglichen mechanischen Beanspruchungen während eines Erdbebens genügend robust ausgelegt werden. Für die Langzeitsicherheit ist die Beanspruchung der Barrieren durch Erdbeben nicht relevant, da die verfüllten Stollen durch Erschütterungen nicht beschädigt werden können. Neotektonische Phänomene im Zusammenhang mit Erdbeben, d.h. Versätze des Gesteinsverbands entlang reaktiver Störungen, werden im Rahmen der Langzeitstabilität bei der Beurteilung der einzelnen Gebiete explizit berücksichtigt: Zu Störungen mit einem realen Potenzial für eine Reaktivierung (verbunden mit einem grösseren Versatz) wird mit den untertägigen Lagerstollen ein angemessener Sicherheitsabstand eingehalten.

Beurteilung der Gesteinseinheiten im Hinblick auf ihre Eignung als Wirtgestein

Für die Beurteilung der verschiedenen Gesteine bezüglich ihrer Eignung als Wirtgestein werden im Rahmen des vorliegenden Berichts in Anlehnung an die internationale Praxis folgende Vorgaben verwendet:

- Um eine genügende Wirksamkeit des Wirtgesteins (geologische Barriere) als Teil des Mehrfach-Barrierensystems zu gewährleisten, soll das Wirtgestein eine *geringe hydraulische Durchlässigkeit* haben. Diese sorgt für einen genügend kleinen Wasserfluss durch das Lager (beeinflusst das Langzeitverhalten der technischen Barrieren und die Radionuklidfreisetzung aus dem Lager in das umgebende Wirtgestein) und ist wichtig für die Wirksamkeit des Wirtgesteins als Transportbarriere. Es werden in den bevorzugten Grossräumen nur diejenigen Gesteine weiter betrachtet, welche eine hydraulische Durchlässigkeit von weniger als 10^{-10} m/s haben. Bei der Beurteilung werden auch die direkt an das Wirtgestein anschliessenden Gesteine mit berücksichtigt; sind diese auch gering durchlässig, werden sie als Rahmengesteine bezeichnet und bilden zusammen mit dem Wirtgestein den so genannten *einschlusswirksamen Gebirgsbereich* (Terminologie nach AkEnd 2002b).
- Die Wirksamkeit der Transportbarriere hängt auch von der Länge der Transportpfade und damit von der *Mächtigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* ab. Es werden nur diejenigen Gesteine bzw. Gesteinsstapel weiter betrachtet, für welche im betrachteten Grossraum neben der oben erwähnten geringen hydraulischen Durchlässigkeit auch eine typische Mächtigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von rund 100 m oder mehr erwartet werden kann. Eine detaillierte Überprüfung der effektiv vorhandenen Mächtigkeit erfolgt bei der Beurteilung der einzelnen Gebiete.
- Zur Gewährleistung der bautechnischen Machbarkeit ist eine *minimale Standfestigkeit* des Gebirges erforderlich. Deshalb werden nicht bzw. wenig konsolidierte Sedimente zurückgestellt.
- In Hinblick auf die Belastbarkeit der Aussagen muss die Prognostizierbarkeit der Barrierenwirkung des Wirtgesteins genügend sein. Wasserführende Gesteine mit einem *Potenzial zur Verkarstung* werden nicht weiter betrachtet⁴.

⁴ Über die für die BE/HAA zu betrachtenden Zeiträume können sich die Bedingungen für die Verkarstung auch in Lokationen ändern, wo heute keine Verkarstung beobachtet wird. Deshalb werden in diesem Bericht im Sinne eines vorsichtigen Vorgehens grundsätzlich verkarstungsfähige Gesteine nicht weiter betrachtet.

Die möglichen Wirtgesteine werden zusätzlich bezüglich folgender Merkmale beurteilt:

- Der Beitrag des Wirtgesteins zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems. Neben der oben erwähnten hydraulischen Durchlässigkeit und Mächtigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden zusätzlich betrachtet: Die *geochemischen Bedingungen* zur Rückhaltung der Radionuklide in den technischen Barrieren und im Wirtgestein, die *hydraulische Homogenität des Wirtgesteins* und der Einfluss *präferenzierter Transportpfade* (Kanalisation des Wasserflusses) auf die Radionuklidrückhaltung, sowie das *Selbstabdichtungsvermögen* von Störungen und Klüften.
- Die Robustheit des Wirtgesteins gegenüber *externen Einflüssen* (z.B. Vergletscherung) sowie die Auswirkung *lagerbedingter Einflüsse* auf die Barrierenwirkung des Wirtgesteins.
- Die *bautechnischen Eigenschaften des Wirtgesteins*, welche einen Einfluss auf den Bau und die Auslegung des Lagers haben. In diesem Zusammenhang muss auch die natürliche Gasführung in Hinblick auf den Bau und den Betrieb des Lagers beachtet werden.
- Die Charakterisierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften sowie die internationalen Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen.

Räumliche Verbreitung der möglichen Wirtgesteine in bevorzugter Tiefe

Bei der Abgrenzung der räumlichen Verbreitung der möglichen Wirtgesteine in bevorzugter Tiefe werden folgende Vorgaben verwendet:

- Zur Gewährleistung einer bezüglich Langzeitstabilität genügenden Überdeckung des Lagers wird eine *minimale Tiefenlage* der Lagerebene innerhalb des Wirtgesteins gefordert. Regionen, in welchen die Lagerebene weniger als 400 m unter Terrain liegen würde, werden nicht weiter betrachtet.⁵
- Damit die untertägigen Bauten mit vertretbarem technischen Aufwand gebaut und betrieben werden können, wird die *maximale Tiefenlage* der Lagerebene in Sedimentgesteinen auf 900 m unter Terrain beschränkt; für das Kristallin mit seinen günstigeren geomechanischen Eigenschaften gilt eine maximale Tiefenlage der Lagerebene von 1200 m unter Terrain (in situ Temperatur ca. 55 °C).

Im Zusammenhang mit der räumlichen Verbreitung der möglichen Wirtgesteine wird auch das Nutzungspotenzial an *untertägigen Rohstoffen* diskutiert, und es wird geprüft, ob deren *zukünftige Nutzung* zu einer unbeabsichtigten Beeinträchtigung des Lagers führen könnte (z.B. durch Anbohren) und ob deshalb ein Teil des Verbreitungsraums der möglichen Wirtgesteine vorteilhafterweise gemieden werden müsste.

Abgrenzung möglicher Gebiete

Bei der Abgrenzung möglicher Gebiete wird von folgenden Vorgaben ausgegangen:

- Die möglichen Gebiete müssen eine *Ausdehnung des Wirtgesteins* aufweisen, welche die Anordnung der untertägigen Lagerstollen unter Gewährleistung genügend langer Transportpfade zur weitgehenden Rückhaltung der Radionuklide erlaubt. Dabei kann auch eine Auf-

⁵ Die erforderliche Tiefenlage ist eng gekoppelt mit der Hebungs- bzw. Erosionsrate. Da beide unabhängig von einander beurteilt werden, werden die Grenzwerte grosszügig gewählt, damit keine Option ohne triftigen Grund ausgeschlossen wird. Dies verlangt aber, dass die verbleibenden Gebiete bzgl. lokaler Erosion nochmals betrachtet werden: Gebiete, die sowohl bzgl. Tiefenlage als auch bzgl. Hebungsrate nahe des Grenzbereichs liegen, werden bei der detaillierten Beurteilung der einzelnen Gebiete zurückgestellt.

teilung des Lagers auf verschiedene Kompartimente (evtl. in verschiedenen Stockwerken) in Betracht gezogen werden. Für die Einengung wird verwendet: Gesamtfläche \geq einige km² (3 – 5 km², je nach Lagerauslegung, welche auch die Wirtgesteinsspezifischen Bedingungen zu berücksichtigen hat).

- Da die *Mächtigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* von den lokalen Bedingungen abhängt, wird diese gebietsbezogen geprüft. Gebiete mit einer Mächtigkeit des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Gesteinsstapel mit einer hydraulischen Durchlässigkeit $\leq 10^{-10}$ m/s) von weniger als 100 m werden nicht weiter betrachtet.
- Die lokalen Bedingungen müssen eine genügende *Langzeitstabilität* gewährleisten. Dies betrifft die flächenhafte Erosion (Tiefenlage und Hebungsrate), die lokale Erosion (z.B. glazialer Tiefenschurf) sowie die Neotektonik (Störungszonen mit signifikantem Potenzial zur Reaktivierung muss mit den Lagerstollen ausgewichen werden können).

Die möglichen Gebiete werden zusätzlich bezüglich folgender Merkmale beurteilt:

- Die *lokale Ausbildung* des Wirtgesteins und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird berücksichtigt, und ihr Einfluss auf die Barrierenwirkung der Geosphäre diskutiert. Dazu gehört die Über- und Unterlagerung des Wirtgesteins durch weitere geringdurchlässige Gesteine (die so genannten Rahmengesteine), welche zusätzlich einen wesentlichen Beitrag als Transportbarriere liefern.
- Die geologisch-tektonische Komplexität der Gebiete. Ein einfacher Aufbau des Standorts wird bevorzugt, Gebiete mit signifikanter *tektonischer Zergliederung und Deformationen* sind ungünstig. Ein einfacher Aufbau erlaubt zudem eine wesentlich zuverlässigere Exploration der geologischen Situation (Geometrie des Wirtgesteins, Lokalisierung von Störungszonen, etc.).

Die hier aufgeführten Vorgaben und Beurteilungs-Merkmale entsprechen der internationalen Praxis (vgl. z.B. CCE 1992, IAEA 1994); vergleiche dazu die umfangreiche Studie zur vorhandenen Literatur (Bork et al. 2001), welche im Zusammenhang mit der Entwicklung eines möglichen Standortwahlverfahrens in Deutschland (AkEnd, 2002b) durchgeführt wurde.

Schliesslich sei darauf hingewiesen, dass in Übereinstimmung mit der internationalen Praxis die Beurteilung anhand von Vorgaben und Beurteilungs-Merkmalen in einer späteren Phase durch eine detaillierte Sicherheitsanalyse zu ergänzen ist. Mit einer Sicherheitsanalyse werden die Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen hier aufgelisteten Merkmalen explizit berücksichtigt; dies ermöglicht eine detailliertere Beurteilung. Im schweizerischen Programm liegen für die hier evaluierten Wirtgesteine und Gebiete teilweise schon detaillierte Sicherheitsanalysen und Berechnungen vor, welche hier bei der Beurteilung mit berücksichtigt werden (Nagra 1985, Nagra 1994a, Schneider et al. 1997, Nagra 2002c, sowie die vereinfachten Analysen in Nagra 1988).

3 Abgrenzung und Beschreibung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume

3.1 Die Geologie der Schweiz

3.1.1 Kenntnisstand und Dokumentation

Die geologischen Verhältnisse in der Schweiz, d.h. die räumliche Verteilung der verschiedenen Gesteinseinheiten und deren geologische Entwicklungsgeschichte (Geodynamik) ist seit mehr als 200 Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Eine erste umfassende Synthese der Kenntnisse erfolgte anfangs des letzten Jahrhunderts durch Heim (1922), die späteren Fortschritte, welche auch grundlegende Erkenntnisse zur Plattentektonik berücksichtigen, wurden von Trümpy (1960, 1980, 1985) in zusammenfassender Form veröffentlicht. Das umfangreiche gross- und kleinmasstäbliche Kartenwerk der geologischen Landesaufnahme (Bundesamt für Wasser und Geologie) mit den entsprechenden Erläuterungen ist ein weiteres Zeugnis des guten Kenntnisstands der geologischen Verhältnisse in der Schweiz.

In den Alpen und im Jura basieren die geologischen Kenntnisse aufgrund der guten Aufschlussverhältnisse weitgehend auf Oberflächenkartierungen, ergänzt durch Aufnahmen in zahlreichen Eisenbahn- und Strassentunnels. Im Mittelland, wo die Schichten flach gelagert sind und Oberflächenkartierungen deshalb wenig Aufschluss über die Verhältnisse in grösserer Tiefe geben, erfolgte im Zusammenhang mit den seit dem Zweiten Weltkrieg von der Kohlenwasserstoffindustrie durchgeführten Tiefbohrungen und ausgedehnten Seismikkampagnen ein entscheidender Kenntnissprung (vgl. Fig. 1-1). Weitere Informationen aus dem tiefen Untergrund stammen von Mineral- und Thermalwasserbohrungen sowie Bohrungen im Zusammenhang mit der Gewinnung von Salz. Ein grosser Teil dieser Daten wurde im Zusammenhang mit den Untersuchungen der Nagra vertieft ausgewertet (z.B. Nagra 1994b, Thury et al. 1994).

Wesentlich neue Erkenntnisse über den strukturellen Aufbau und die Tiefenstruktur der Alpen und des alpinen Vorlands lieferten die zwei internationalen, geophysikalisch-geologischen Untersuchungsprojekte über die Westalpen (Etude Continentale et Océanique par Reflexion et Refraction Sismique, ECORS-CROP, Roure et al. 1996) und über die schweizerisch-italienischen Zentralalpen (Nationalfonds Projekt 20, NFP-20, Pfiffner et al. 1997). Das EUCOR-URGENT- Projekt (Upper Rhine Gaben Evolution & Neotectonics) ist ein laufendes internationales Grossprojekt, an welchem über 25 Universitäten und Institutionen aus Deutschland, Frankreich, Holland und der Schweiz beteiligt sind (Giamboni et al. 2004). Es befasst sich mit der neotektonischen Entwicklung des Oberrheingrabens und seiner Umgebung. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei auch der Erdbebengefährdung in diesem dicht besiedelten Gebiet und der Nutzung der Grundwasserressourcen in den quartären Ablagerungen.

Die geologische Erkundung der Schweiz basiert zu einem signifikanten Teil auch auf zahlreichen Diplomarbeiten und Dissertationen, welche an den erdwissenschaftlichen Instituten der schweizerischen Hochschulen durchgeführt wurden. Anfänglich haben diese oft detaillierte geologische Kartierungen enthalten, später waren es vermehrt thematische, regional übergreifende Forschungsarbeiten.

Schliesslich haben die umfangreichen Untersuchungen und Studien der Nagra in der Nordschweiz (z.B. Müller et al. 1984, Laubscher 1985, Sprecher & Müller 1986, Diebold et al. 1991, Thury et al. 1994, Naef et al. 1995, Birkhäuser et al. 2001, Müller et al. 2002, Nagra 2002b), welche neben seismischen Untersuchungen und Tiefbohrungen auch regionale Studien umfassen, die Kenntnisse in diesem Gebiet, insbesondere der Verhältnisse im tiefen Untergrund und der Geodynamik, massgeblich verbessert.

3.1.2 Grossräumige geologisch-tektonische Verhältnisse

Das geologisch-tektonische Bild der Schweiz ist geprägt durch die Alpen und den Faltenjura (Fig. 3-1 und 3-2). Sie sind das Resultat einer Kollision von zwei kontinentalen Platten (der europäischen Platte mit dem adriatischen Sporn der afrikanischen Platte), bei welcher während der Kreide und dem Tertiär verschiedene Ozeanbecken geschlossen wurden (z.B. Trümpy 1980, Ziegler 1982, 1990, Schmid et al. 2004). Dabei entstand nördlich der Alpen die ausgedehnte, tektonisch bedingte Vorlandsenke des Molassebeckens, welches im Zeitraum zwischen dem frühen Oligozän (ca. 34 Mio.) und dem späten Miozän (ca. 10 Mio. Jahre) mit Erosionsmaterial der aufsteigenden Alpen gefüllt wurde (vgl. Fig. 4-9).

Der alpine Zusammenschub bewirkte eine Abscherung von Krustensegmenten an mechanisch geeigneten Horizonten bis in den Bereich des Alpenvorlandes. Ab dem späten Miozän (ab ca. 13 Mio. Jahre) ergriff diese Abscherung auch das sedimentäre Deckgebirge des zentralen und westlichen Mittellands. Dabei wurde nach der klassischen Fernschubhypothese (*Thin-skinned* Tektonik, siehe z.B. Laubscher 1961, Müller et al. 1984, Laubscher 1985) das Deckgebirge durch einen Schub aus den Alpen vom Grundgebirge vollständig abgesichert. Als duktiler Gleithorizont dienten dabei die evaporitischen Serien des Muschelkalks und des Keupers. Der Gleithorizont wurde an den steilen nordvergenten Sockelsprüngen des südlichen Permokarbondrogandes versetzt, und es kam zur Aufschiebung des Faltenjuras. Das Grundgebirge unter dem Faltenjura wurde kaum beeinträchtigt. Die entsprechende Verkürzung im Grundgebirge fand weiter südlich an der Alpenfront statt.

Nach der Auffassung anderer Wissenschaftler (z.B. Pavoni 1961, Ziegler 1990, Pfiffner & Heitzmann 1997) wurde das Grundgebirge zusammen mit dem Deckgebirge verkürzt (sog. *Thick-skinned* Tektonik). Eine Entkopplung des Deckgebirges vom Grundgebirge kann stattgefunden haben, ist aber von untergeordneter Bedeutung. Verschiedene Autoren (z.B. Ziegler 1990, Pfiffner & Heitzmann 1997) sehen eine Aufschiebung in der oberen Kruste im Bereich des Permokarbondrogandes.

Ein weiteres tektonisches Element, der zwischen dem Schwarzwald und den Vogesen liegende Oberrheingraben, ist Teil eines komplexen europäischen Rift-Systems (*oblique continental rifting*, Behrmann et al. 2003); seine Absenkung begann im späten Eozän und ein Teil der Störungen ist heute noch in Form von Blattverschiebungen aktiv (Cloetingh et al. 2003, Deichmann et al. 2000).

Ein Ergebnis der nach aussen wandernden Vorlandsschwelle der Alpen war die Aufdomung des Schwarzwalds (Laubscher 1992). In dieser Phase entwickelte sich auch eine differenzierte Zerrungstektonik mit Horst- und Grabenstrukturen, bei welcher bevorzugt ältere paläozoische Strukturen reaktiviert wurden. Eine der wichtigen Strukturen ist der (Freiburg-Bonndorf-) Hegau-Bodensee-Graben (Fig. 5-1 und 5-4).

Bedeutende Aspekte der rezenten Krustenbewegung in der Schweiz sind die Hebung der Alpen (1-2 mm/Jahr, Schlatter 1999) und das den Alpenbogen abbildende kompressive Spannungsfeld im Deckgebirge des Alpenvorlands, welches von demjenigen im Grundgebirge teilweise entkoppelt ist (Müller et al. 2002). Die seit dem späten Miozän andauernde Hebung der Alpen nimmt gegen das Alpenvorland hin stark ab und wird durch Erosionsvorgänge teilweise kompensiert. Das nördliche Mittelland sowie der Tafeljura können bezüglich des sich hebenden Alpenkörpers im Wesentlichen als lagestabil bezeichnet werden (Vertikalbewegungen < 0.2 mm/Jahr). Aufgrund von geomorphologischen Studien sowie Untersuchungen zur Entwicklung des Molassebeckens (Versenkungsgeschichte) lässt sich nachweisen, dass die Hebungsraten in den letzten Millionen Jahren in der gleichen Grössenordnung wie heute lagen (Müller et al. 2002). Auch die Richtung des regionalen Spannungsfelds hat in diesem Zeitraum keine wesentlichen Veränderungen erfahren.



Fig. 3-1: Geologisch-tektonische Karte der Schweiz und angrenzender Gebiete (vereinfacht nach Bundesamt für Wasser und Geologie 2002a, b).

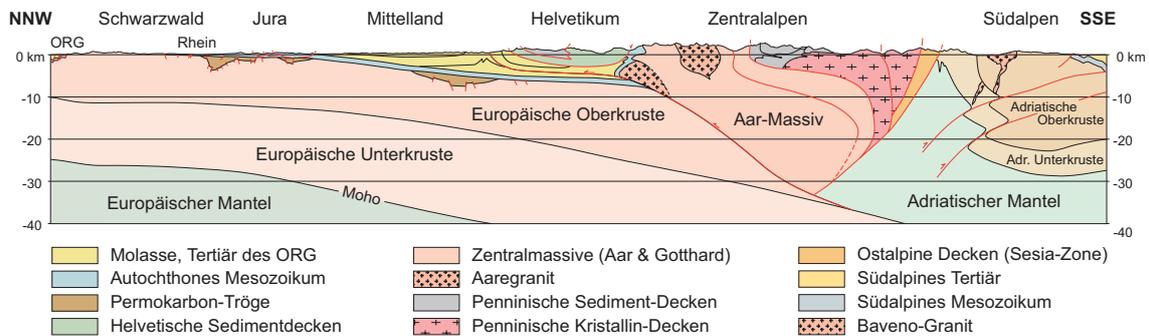


Fig. 3-2: Geologisches Profil vom Oberrheingraben (ORG) bis in die Südalpen; nach Pfiffner et al. (1997), vereinfacht und modifiziert (Permokarbontröge).

3.2 Bevorzugte geologisch-tektonische Grossräume: Abgrenzung und Beschreibung

Ausgangspunkt für die Identifikation und Beschreibung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume sind die generellen Kenntnisse zur Geologie der Schweiz (Kap. 3.1.2) und die in Kap. 2.2 erläuterten Vorgaben und Beurteilungsmerkmale der Nagra.

Der Alpenraum, der Faltenjura und der im südlichen Einflussbereich des Oberrheingrabens liegende westliche Tafeljura wurden in jüngerer Vergangenheit (d.h. seit rund 30 Mio. Jahren) von grösseren tektonischen Ereignissen und Prozessen beeinflusst und müssen daher im Hinblick auf die Anforderung der tektonischen Langzeitstabilität als ungünstig beurteilt werden: Diese Gebiete sind vergleichsweise komplex aufgebaut, und in den Alpen muss stellenweise mit grösseren Hebungen und Differenzialbewegungen gerechnet werden (Müller et al. 2002, Persaud 2002, Persaud & Pfiffner 2004). Eine neotektonische Aktivität des Faltenjuras ist nicht nachgewiesen, kann aber nicht vollständig ausgeschlossen werden (M. Burkhard, Universität Neuchâtel, pers. Mitt.). Aufgrund der komplexen kleinräumigen Deformation sind dort zudem mit grosser Wahrscheinlichkeit keine wenig deformierten Gebiete mit flacher Schichtlagerung und der erforderlichen Ausdehnung von mehreren km² zu erwarten. Aus diesen Gründen werden die Alpen, der Faltenjura und der westliche Tafeljura für die Evaluation von möglichen Gebieten für ein HAA-Tiefenlager nicht weiter berücksichtigt⁶.

Die verbleibenden geologisch-tektonischen Einheiten, d.h. der zentrale bis östliche Tafeljura und das Mittelländische Molassebecken werden als bevorzugter Grossraum betrachtet (Fig. 3-3). Sie zeichnen sich auch durch eine geringe Seismizität aus (Schweizerischer Erdbebendienst 2004). Die weiteren Überlegungen in diesem Bericht konzentrieren sich auf diesen Grossraum.

Diese Beurteilung aus heutiger Sicht ist im Wesentlichen in Übereinstimmung mit der zu Beginn der Nagra-Untersuchungen gemachten Festlegung der bevorzugten geologisch-tektonischen Grossräume in der Nordschweiz (Beilage 2 in Thury 1980; Nagra 1988).

Dieser bevorzugte Grossraum erfüllt zwar die grundsätzlichen Anforderungen; seine Lage im Einflussbereich der mitteleuropäischen Tektonik erfordert aber bei der weitergehenden Evaluation der möglichen Gebiete die Berücksichtigung folgender tektonischer Elemente:

- Die am Innen- respektive Aussenrand des Faltenjuras durch alpinen Fernschub verursachte Subjurassische Zone bzw. Vorfaltenzone (vgl. Fig. 5-3 und 5-4)
- Der Oberrheingraben und die Nord-Süd-orientierte ('rheinische') Bruchtektonik in den angrenzenden Gebieten
- Das Schwarzwaldmassiv mit den NW-SE-verlaufenden Störungen wie z.B. die Eggberg- und die Vorwald-Störung und der Bonndorf–Hegau–Bodensee-Graben (vgl. Fig. 5-1 und 5-4)

Für die Beurteilung dieser tektonischen Elemente im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum kann bei der Evaluation der möglichen Gebiete neben den oben erwähnten Daten auch auf die aktuellen seismischen und mikroseismischen Daten zurückgegriffen werden; diese geben Hinweise auf rezente Bewegungen im Bereich von tektonischen Elementen (Deichmann et al. 2000). Diese werden ergänzt durch aktuelle Daten aus der Geodäsie (Präzisionsnivelement, GPS) und aus geomorphologischen Beobachtungen.

⁶ Die Nagra hat 1988 (Nagra 1988) im westlichen Tafeljura die Ajoie als mögliches Gebiet bezeichnet. Strukturgeologisch liegt die Ajoie zwischen Oberrheingraben und Faltenjura. Vor allem als Folge der zerrungs-tektonisch bedingten Öffnung des Grabens entstand ein Netz von mehrheitlich Nord-Süd- (untergeordnet NW-SE-) verlaufenden Brüchen und Verwerfungen, die z.T. bis ins Grundgebirge reichen. Auch wenn diese Strukturen ein sicheres Endlager nicht prinzipiell ausschliessen, wird dieses Gebiet wegen seines komplexen strukturellen Aufbaus zurückgestellt.

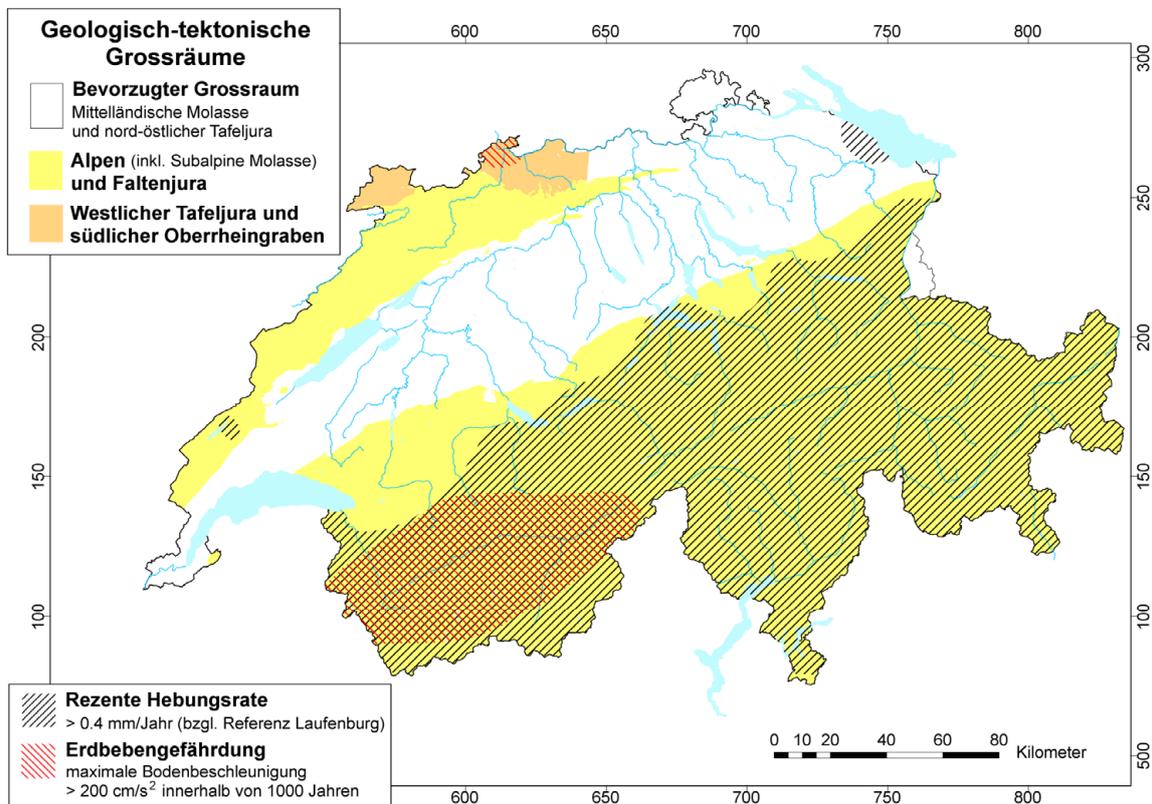


Fig. 3-3: Bevorzugter geologisch-tektonischer Grossraum (weisse Gebiete), vgl. Fig. 3-1 und 3-2.

Die weissen Gebiete bezeichnen den bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum. Die Alpen (inkl. Subalpine Molasse) und der Faltenjura werden aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte respektive ihres komplexen Aufbaus zurückgestellt. Zusätzlich wird der westliche Tafeljura aufgrund der höheren Störungsdichte (Einfluss des Oberrheingrabens) zurückgestellt. Die Gebiete mit erhöhten rezenten Hebungsrates (> 0.4 mm/Jahr) und die Gebiete mit erhöhter Seismizität liegen innerhalb der zurückgestellten geologischen Einheiten, mit Ausnahme eines kleinen Gebiets mit bezüglich der geodätischen Messungen erhöhten Hebungsrates am Bodensee.

4 Identifikation, Beschreibung und Beurteilung möglicher Wirtgesteine

4.1 Identifikation möglicher Wirtgesteine

Weltweit werden für Tiefenlager für hochradioaktive Abfälle aufgrund ihrer geringen hydraulischen Durchlässigkeit folgende Wirtgesteine in Betracht gezogen (Witherspoon & Bodvarsson 2001):

- Tonige Gesteine (Ton- und Mergelsteine, tonige Feinsand- und Siltsteine),
- Wenig gestörte Blöcke von Kristallingesteinen (Granite, Gneise, Vulkanite) und
- Steinsalz⁷.

In Argentinien, Armenien und Litauen werden unter anderen auch die evaporitischen Gesteine Gips und Anhydrit in Betracht gezogen, es existieren aber keine konkreten Projekte in diesen Gesteinen (Witherspoon & Bodvarsson 2001).

Gesteinseinheiten, die als mögliche Wirtgesteine in Frage kommen, sollen gemäss den in diesem Bericht verwendeten Vorgaben (Kap. 2.2.3) folgende Eigenschaften aufweisen:

- Geringe hydraulische Durchlässigkeit ($K \leq 10^{-10}$ m/s)
- Potenzielle Mächtigkeit von 100 m oder mehr
- Genügende Standfestigkeit (keine nicht bzw. wenig konsolidierten Sedimente)
- Kein Potenzial zur Verkarstung

Die Anforderungen betreffend hydraulischer Durchlässigkeit und Mächtigkeit gelten für die Wirtgesteine, respektive – wo zutreffend (Vorkommen von geringdurchlässigen Rahmengesteinen) – für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Alle drei Wirtgesteinsoptionen, die 1988 im Auswahlverfahren der Nagra als potenziell geeignet identifiziert und vertieft beurteilt wurden⁸ (Nagra 1988, sowie Stellungnahmen der Behörden und ihrer Experten: HSK 1990, KSA 1990, KNE 1990), kommen im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum in bevorzugter Tiefenlage vor und erfüllen diese Vorgaben, zum Teil allerdings mit Vorbehalten (siehe Kap. 4.2 bis 4.5, Kap. 6). In stratigraphischer Reihenfolge von unten nach oben, resp. von älter nach jünger sind dies (vgl. Figur 4-1):

- Das kristalline Grundgebirge (“Kristallin“) (Alter: > 280 Mio. Jahre)
- Der Opalinuston als Formation des mesozoischen Deckgebirges sowie Rahmengesteine unter- und oberhalb des Opalinustons (Alter: ca. 180 Mio. Jahre)
- Die tonreichen Gesteine in der Unteren Süsswassermolasse (USM, Alter: 28.5 – 20.5 Mio. Jahre).

⁷ Steinsalz tritt in der Schweiz schichtförmig auf. Wegen der geringen Mächtigkeiten und der Nutzung der wenigen Vorkommen als Rohstoff wird diese Option in der Schweiz nicht in Betracht gezogen (Nagra 1988).

⁸ Das kristalline Grundgebirge war nicht Bestandteil des sich auf Sedimente fokussierenden Auswahlverfahrens von 1988, die Arbeiten an dieser Option waren damals noch im Gange.

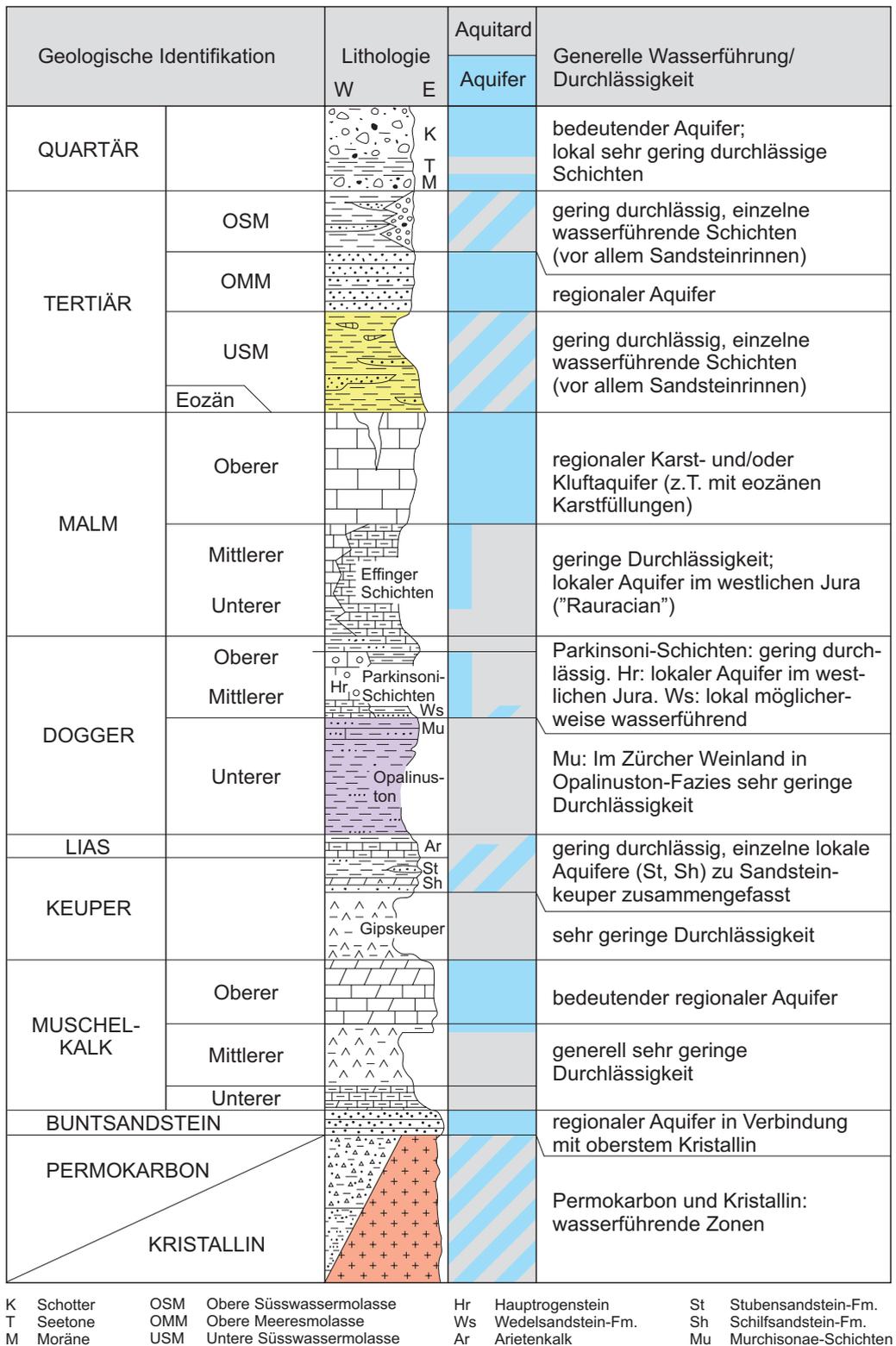


Fig. 4-1: Schematische Übersicht ('Sammelpprofil') der Gesteinsschichten im Mittelland und in der Nordschweiz mit einer hydrogeologischen Kurzcharakterisierung.

Mit Farbe hervorgehoben sind die Lithologien der für ein Tiefenlager HAA möglichen Wirtgesteine Kristallin, Opalinuston und USM.

Von den 1988 zurückgestellten Gesteinseinheiten ist aus heutiger Sicht die Obere Süsswassermolasse (OSM) der USM gleichzustellen. Die OSM und die USM sind fluvio-terrestrische Ablagerungen mit geringdurchlässigen tonreichen Abfolgen, die rinnenförmige durchlässige Sandsteinkörper enthalten; sie sind auch bezüglich ihrer hydrogeologischen Architektur sehr ähnlich (Keller 1992). Die Gebiete, in denen in der OSM ein Endlager in mehr als 400 m Tiefe errichtet werden könnte, haben aber eine viel kleinere regionale Verbreitung als die entsprechenden USM-Gebiete. Aus diesem Grund wurde die OSM im Wirtgesteins-Einengungsverfahren 1988 zurückgestellt (Nagra 1988). Hydrogeologische Beobachtungen in neuen Tunnelbauten weisen darauf hin, dass in der OSM zwar lange Strecken ohne signifikante Wasserzutritte vorkommen (Gander 2004), hydraulische Tests zeigen aber, dass die Durchlässigkeiten mit denen der USM praktisch identisch sind (Nagra 2005a). Ein Vorteil der OSM ist das Fehlen signifikanter natürlicher Gasvorkommen (vgl. Gander 2004). Gesamthaft scheint es jedoch auch aus heutiger Sicht nicht zwingend, die OSM zusätzlich in die Betrachtung einzubeziehen, insbesondere weil die regionale Verbreitung der tonreichen Gesteine der Molasse dadurch nur unwesentlich vergrössert würde, und weil sie bezüglich ihrer Eigenschaften – mit Ausnahme der signifikant geringeren natürlichen Gasführung – keine deutlichen Vorteile gegenüber der USM hat.

Prinzipiell erfüllen aufgrund der heutigen Kenntnisse auch die 1988 zurückgestellten Effinger Schichten – wie der Opalinuston eine marine Ablagerung – die Anforderungen an ein mögliches Wirtgestein, zumindest in grösserer Tiefe. Der Opalinuston besitzt aber gegenüber den Effinger Schichten wegen seines homogeneren Aufbaus und dem geringeren Kalkgehalt klare Vorteile. Die Effinger Schichten enthalten einzelne Kalkbänke, im unteren Bereich auch eine Kalkbankabfolge (Gerstenhübel-Schichten, Gygi 1969, 2000). Diese Kalkbänke sind potenzielle Kluftwasserleiter, die in Oberflächennähe zur Verkarstung neigen (Traber 2004: Bsp. Deponie Bärengaben, Würenlingen AG). Bei grösserer Überdeckung (Tunnels im Faltenjura), wurden aber nur noch vereinzelt Wasserzutritte im oberen und unteren Randbereich beobachtet. Die Nagra betrachtet die Zurückstellung der Effinger Schichten auch aus heutiger Sicht als gerechtfertigt, weil diese bezüglich ihrer Eigenschaften gegenüber dem Opalinuston ungünstiger sind und auch bezüglich der regionalen Verbreitung keine grundsätzlich neuen regionalen Möglichkeiten für ein HAA-Tiefenlager ergeben.

Für die übrigen 1988 zurückgestellten Formationen bestehen auch aus heutiger Sicht keine Gründe für eine Berücksichtigung als Wirtgestein.

Für die weiter betrachteten Wirtgesteine Kristallin, Opalinuston und USM sind bei der Beurteilung aufgrund des in Kap. 2.2 erläuterten Vorgehens folgende Merkmale vertieft zu diskutieren (Kap. 4.2 bis 4.4):

- Barriereneigenschaften (hydraulische Durchlässigkeit, Mächtigkeit, präferenzielle Fliesswege, geochemische Verhältnisse)
- Bautechnische Machbarkeit (Gesteinsfestigkeiten, natürliche Gasführung)
- Belastbarkeit der Aussagen (Charakterisierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften, internationale Erfahrungen)

Es ist zudem aufzuzeigen, dass diese Wirtgesteine in Tiefenbereichen vorkommen, die sowohl den Anforderungen bezüglich der Langzeitsicherheit als auch der bautechnischen Machbarkeit genügen. Weiter werden die im Verbreitungsraum der Wirtgesteine grundsätzlich denkbaren Rohstoffkonflikte diskutiert (vgl. Kap. 4.5).

4.2 Kristallines Grundgebirge

4.2.1 Datengrundlage

Zur Abklärung der Wirtgesteinsoption 'Kristallin' führte die Nagra zwischen 1981 und 1993 in einem rund 1200 km² grossen Gebiet in der Nordschweiz ein umfassendes Untersuchungsprogramm durch (Thury et al. 1994). Es umfasst sieben Tiefbohrungen (sechs davon erreichten das kristalline Grundgebirge), 2D-Reflexionsseismik sowie regionale Studien (inkl. Untersuchungen in Fremdbohrungen). Die Nagra führt seit 1984 im Felslabor Grimsel mit internationaler Beteiligung ein breites Spektrum von Experimenten in granitischen Gesteinen durch; sie hat sich zudem an Untersuchungen in anderen Felslabors im Kristallin (insb. in Schweden in Stripa und Äspö) beteiligt. Weiter kann sich die Nagra auf die breite Erfahrung mit Kristallin im Ausland stützen (z.B. Finnland, Frankreich, Japan, Kanada, Schweden).

4.2.2 Barriereneigenschaften

Generelle Charakterisierung

Ungestörte Kristallingesteine sind generell sehr gering durchlässig. Als Folge tektonischer Beanspruchung kommen in diesen Gesteinen jedoch häufig Störungs- und Klüftzonen vor, welche bevorzugte Wasserfliesswege darstellen. Daneben können auch lithologische Inhomogenitäten (Ganggesteine, Mineral- und Erzadern) erhöhte Wasserwegsamkeiten bewirken.

Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz besteht vorwiegend aus Graniten und Gneisen. Es ist von mächtigen, tektonisch deformierten Permokarbon-Sedimenttrögen durchsetzt, die im Verlauf des Tiefbohrprogramms und der seismischen Untersuchungen der Nagra entdeckt wurden und zumindest lokal Kohleflöze enthalten (Thury et al. 1994). Die strukturelle Ausbildung des Grundgebirges, d.h. das komplexe Muster der tektonischen Störungs- und Klüftzonen und der Verlauf der Permokarbontröge, ist das Resultat einer mehrphasigen geologischen Entwicklung, welche sich über mehr als 400 Millionen Jahre zurückverfolgen lässt (Fig. 4-2; Diebold et al. 1991, Thury et al. 1994). Die meisten Störungssysteme wurden während älterer, prä-mesozoischer Deformationsphasen angelegt. Diese Störungen bilden – neben anderen potenziell wasserführenden Systemen wie geklüftete aplitische Ganggesteine (Fig. 4-2, Bild F), vererzte Mineraladern und Klüftzonen in Graniten und Gneisen – die bevorzugten Wasserfliesswege (Thury et al. 1994, Mazurek 1998, HSK 2004). Innerhalb dieser Systeme wird oft eine röhrenartige Verteilung der Wasserfliesswege (so genannte *channels*) beobachtet, welche mit der Genese der Systeme in engem Zusammenhang steht (Mazurek 1998). Ein grosser Teil dieser Fliesswege entstand während der spätvariskischen hydrothermalen Phase bei der Mineraladerbildung vor rund 290 Millionen Jahren und ist heute noch hydraulisch aktiv (Bsp. Fig. 4-2, Bild E).

Aufgrund der allgemeinen Erfahrung aus Untersuchungen in der Nordschweiz und im Schwarzwald kann man davon ausgehen, dass die Störungen im kristallinen Grundgebirge vorwiegend steil verlaufen und ein Netzwerk bilden, in dem wenig deformierte, geringdurchlässige Blöcke mit lateraler Ausdehnung von bis zu mehreren hundert Metern auftreten, welche für die Platzierung von Lagerstollen potenziell geeignet wären (Thury et al. 1994). Wenig deformierte Blöcke mit einer lateralen Ausdehnung > 1 km² werden zwar erwartet, sind aber von der Oberfläche aus nur schwierig lokalisierbar. Ein Tiefenlager müsste voraussichtlich in verschiedene Kompartimente aufgeteilt werden.

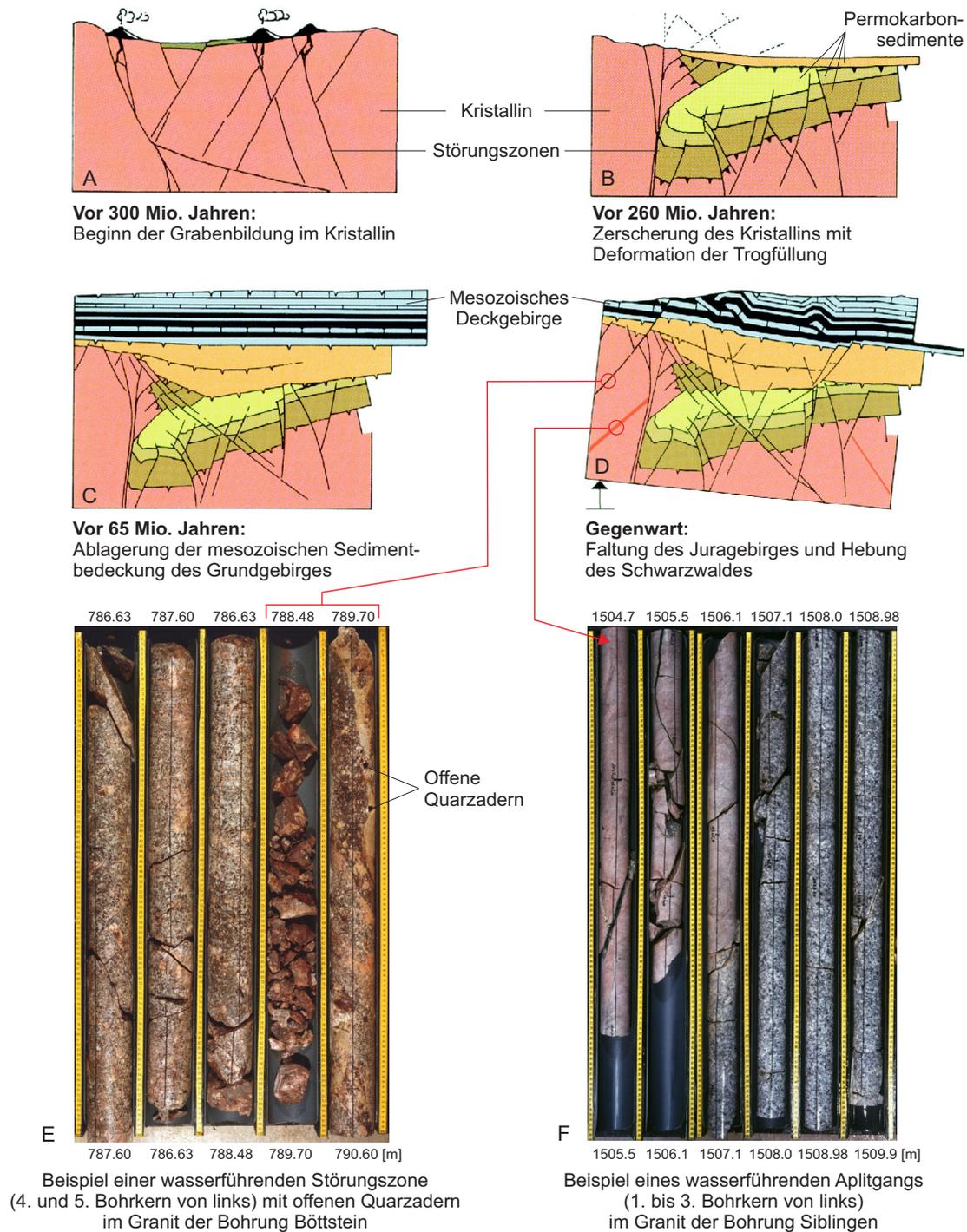


Fig. 4-2: Schematische Darstellung verschiedener geologisch-tektonischer Entwicklungsphasen der Nordschweiz mit Bildung und Reaktivierung von Störungszonen im Grundgebirge. Detaillierte Beschreibung in Diebold et al. (1991).

Hydraulische Eigenschaften, Transporteigenschaften und Selbstabdichtungsvermögen

Wie auch in anderen Gebieten beobachtet (z.B. in Finnland, TVO 1992), ist im Kristallin der Nordschweiz tendenziell eine Abnahme der mittleren Gebirgsdurchlässigkeit mit der Tiefe erkennbar (Thury et al. 1994), wobei in der Nordschweiz etwa 500 m des oberen Kristallins

generell stärker durchlässig sind, mit einem durchschnittlichen K-Wert in der Grössenordnung von 10^{-7} m/s. Unterhalb des durchlässigeren oberen Kristallins wurden mehrere hundert Meter mächtige, geringdurchlässige Blöcke durchbohrt, deren laterale Ausdehnung zur Zeit aber nicht genau bekannt ist und wohl nur anhand von geneigten Bohrungen oder von untertage weiter exploriert werden könnte. Die Gebirgsdurchlässigkeit dieser Blöcke ist kleiner als 10^{-10} m/s; die geringe Wasserführung ist an die vorne beschriebenen wasserführenden Systeme gebunden. Zwischen diesen geringdurchlässigen Blöcken treten auch in grosser Tiefe immer wieder höher durchlässige Zonen auf. Gemäss dem konzeptuellen Modell der Nagra (Thury et al. 1994) sind diese an grössere Störungen gebunden, welche nur bis zu einem gewissen Grad von der Oberfläche her explorierbar sind. Nach Ansicht der HSK (2004) müssen auch alternative Konzepte, in welchen Systeme mit kleineren Einzelklüften und Mineraladern ausserhalb grösserer Störungen hydrogeologisch aktiv sind, in Betracht gezogen werden.

Aufgrund eines Datensatzes von Stober (1995, 1996) aus dem Schwarzwald gibt es Hinweise, dass die Durchlässigkeit der Gneise rund eine Grössenordnung geringer ist als diejenige von Graniten. Die meisten Daten stammen aber aus relativ oberflächennahen Bereichen (< 300 m) und sind nicht ohne Vorbehalt auf grössere Tiefen übertragbar. In den Tiefbohrungen der Nagra wurden zwischen Graniten und Gneisen in der Nordschweiz keine generell unterschiedlichen Durchlässigkeiten beobachtet, wobei aber die Datenbasis zu gering ist für eine abschliessende Aussage.

Das Radionuklidrückhaltungsvermögen der wasserführenden Systeme hängt – neben der Transmissivität – stark von der Verteilung der Kanäle innerhalb der wasserführenden Systeme ab (Nagra 1994a). Bei gleicher Transmissivität haben Systeme mit breiten, nahe beieinander liegenden *channels* ein bedeutend grösseres Rückhaltevermögen als enge, weit auseinander liegende (Kap. 5.3 in Nagra 1994a). Das hydrothermal veränderte, tonig-poröse Umfeld der wasserführenden Systeme wirkt sich positiv auf die Radionuklidrückhaltung aus, weil dort die Radionuklide beim Transport in stagnierende Porenwässer hineindiffundieren können (so genannte Matrixdiffusion). Betreffend Verteilung der *channels* im Kristallin der Nordschweiz sind noch erhebliche Unsicherheiten vorhanden. In den Sicherheitsanalysen wird aber gezeigt, dass die behördlichen Schutzziele (HSK/R-21) auch bei pessimistischen Annahmen über die Verteilung und Eigenschaften der *channels* in den geringdurchlässigen Blöcken noch eingehalten werden kann (Nagra 1994a, Schneider et al. 1997, HSK 2004).

Die wasserführenden Systeme im kristallinen Grundgebirge haben praktisch kein Selbstheilungs- oder Selbstabdichtungsvermögen. Zwar sind in einer frühen Phase der geologischen Entwicklung des Kristallins zahlreiche offene Klüfte durch hydrothermale Tonmineralbildungen und Karbonatausfällungen aus der Zersetzung von Ca-Feldspäten und Biotit im Nebengestein abgedichtet worden (Mazurek 1998). Diese Prozesse erfolgten aber bei Temperaturen > 100 °C. Unter den heutigen Temperaturverhältnissen sind diese Reaktionen extrem langsam und im Hinblick auf die Selbstabdichtung irrelevant.

Sedimentgesteinsbedeckung

In den sedimentären Deckschichten des Grundgebirges treten über dem basalen Buntsandstein, welcher ein Verwitterungsprodukt des Grundgebirges darstellt, verschiedene sehr geringdurchlässige ton- und evaporitreiche Formationen auf (gebietsweise auch Steinsalz), welche das Grundgebirge gegen Einflüsse von der Oberfläche aus abschirmen. Der Buntsandstein ist hydraulisch mit dem Grundgebirge verbunden, die stratigraphisch höheren Aquifere (Muschelkalk, Malm) haben wegen den dazwischenliegenden geringdurchlässigen Formationen keine hydraulische Verbindung zum kristallinen Grundgebirge, und es besteht ein ausgeprägter Grundwasserstockwerkbau (Pearson et al. 1991). Einzig im Gebiet der Jura-Hauptüberschie-

bung (Thermalquellen von Baden) und im Einflussbereich des Oberrheingrabens (Pratteln) liegen aufgrund von Isotopenuntersuchungen Hinweise auf hydraulische Kurzschlüsse zwischen Muschelkalkaquifer und Grundgebirge vor (Biehler et al. 1993).

Die Sedimentgesteinsbedeckung würde ein Tiefenlager im kristallinen Grundgebirge gegen Oberflächeneinflüsse (z.B. Effekte von Vergletscherungen) gut schützen, sie beeinträchtigt aber die Explorierbarkeit des Kristallins von der Oberfläche aus (siehe unten).

Geochemische Verhältnisse

Die Tiefengrundwässer im kristallinen Grundgebirge der zentralen Nordschweiz sind meist vom Na-SO₄-Typ, relativ schwach mineralisiert (gelöste Stoffe 0.9 – 1.4 g/l), reduzierend und mit kleinem Kolloidgehalt (Thury et al. 1994). In geringdurchlässigen Blöcken können auch etwas höher mineralisierte saline Wässer vom Na-Cl-Typ auftreten. Die höchste in der Nordschweiz gemessene Konzentration von gelösten Stoffen beträgt 13 g/l. Das kristalline Grundgebirge zeigt aufgrund von hydrothermalen Veränderungen vor allem im Bereich von Kluft- und Störungszonen signifikante Tonmineralgehalte, welche für die Radionuklidsorption günstig sind (Mazurek 1998). Für ein geologisches Tiefenlager sind die geochemischen Verhältnisse in der Nordschweiz wegen der geringeren Salinität – auch verglichen mit anderen weltweit untersuchten Kristallingesteinsvorkommen – günstig.

Lagerbedingte Einflüsse

Eine Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften von geringdurchlässigen Kristallinblöcken ist durch die Auflockerungszone entlang der Lagerstollen möglich, wo ein erhöhter Wasserfluss auftreten kann. Die Charakteristika der Auflockerungszone hängen einerseits von den Gesteinseigenschaften, eventuell vorhandenen natürlichen Störungen und dem Spannungsfeld ab, andererseits aber auch vom verwendeten Ausbruchverfahren. Aufgrund weltweiter Erfahrungen in Kristallingesteinen (z.B. Marschall et al. 1999, Chandler 2003) ist die Bildung von irreversiblen Diskontinuitäten in der Auflockerungszone auf das unmittelbare Stollenumfeld (meist < 1 m, sehr selten bis 2 m) beschränkt und in manchen Fällen kaum nachweisbar (Auflockerungszone < 0.01 m im Bereich des intakten Gebirges im FEBEX-Experiment im Felslabor Grimsel, Sabet et al. 2003). Mit geeigneter Ausrichtung der Lagerstollen bezüglich des Gebirgsspannungsfelds können die negativen Effekte minimiert und durch geeignete Massnahmen bei der Versiegelung weitgehend beseitigt werden. Kristallingesteine reagieren in der Regel wenig empfindlich auf lagerbedingte Temperaturerhöhungen (Read et al. 1997, Sabet et al. 2003). Die Freisetzung von im Lager gebildeten Gasen wird im Allgemeinen als wenig problematisch eingestuft; in extrem geringdurchlässigen Blöcken bestehen diesbezüglich allerdings noch offene Fragen (Rodwell 2001).

4.2.3 Bautechnische Machbarkeit

Aus bautechnischer Sicht ist das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz – insbesondere in den wenig gestörten Lagerzonen – wenig problematisch (Nagra 1985, Obayashi Corporation 1993). In grösseren Störungszonen, welche eventuell mit den Zugangsstollen durchfahren werden, müssten gegebenenfalls während des Vortriebs Stabilisierungs- und Abdichtungsmassnahmen vorgenommen werden. Die Lagerstollen können ohne Ausbauten erstellt werden. Die Verfüllung und Versiegelung des Lagers kann gemäss international anerkannten Prinzipien durchgeführt werden. Die Untersuchungen in den Tiefbohrungen der Nagra haben gezeigt, dass die natürliche Gasführung im kristallinen Grundgebirge sehr gering und aus bautechnischer Sicht irrelevant ist.

4.2.4 Belastbarkeit der Aussagen

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderung der Kristallingesteine

Es sind keine Prozesse bekannt, welche die Barriereigenschaften der Kristallingesteine in geeigneter geologischer Situation innerhalb der nächsten Million Jahre signifikant verändern könnten. Aufgrund der Sedimentbedeckung werden auch die geochemischen Verhältnisse als stabil betrachtet, d.h. ein Eindringen oxidierender Wässer während einer Vergletscherung kann ausgeschlossen werden.

Charakterisierbarkeit

Das wichtigste Ziel der Exploration des kristallinen Grundgebirges ist die Lokalisierung der wasserführenden Systeme. Da ein grosser Teil der wasserführenden Systeme innerhalb oder im unmittelbaren Umfeld von kataklastischen Störungzonen liegen, ist die Lokalisierung solcher Störungzonen von zentraler Bedeutung. In Skandinavien und in Kanada, wo das kristalline Grundgebirge in grossen Gebieten an der Oberfläche aufgeschlossen oder nur von einer geringmächtigen Bodenschicht bedeckt ist, können die Ausbisslinien der Störungen an der Oberfläche kartiert werden (z.B. Posiva 2003a, b). In Gebieten mit Bodenbildung wird diese streifenweise entfernt (sog. *Trenching*), um die Störungen erkennen zu können (Fig. 4-3). Der Verlauf der Störungen in der Tiefe wird durch gezieltes Anbohren mit geneigten Bohrungen ermittelt.



Fig. 4-3: Freilegung der Oberfläche des kristallinen Grundgebirges durch streifenweise Entfernung der Bodenschichten (*Trenching*), Olkiluoto, Finnland (Foto: Posiva).

In Gebieten (wie z.B. in der Nordschweiz), wo das kristalline Grundgebirge von mächtigen Sedimentgesteinsabfolgen überdeckt ist, ist die Exploration der Störungen von der Oberfläche aus schwierig, da diese mit seismischen Methoden mangels seismischer Kontraste in der Regel nicht erkannt werden können (Fig. 4-4). Nur ausgeprägte Störungen, welche in jüngerer Zeit tektonisch aktiv waren und das Deckgebirge versetzt haben, können mittels Seismik aufgrund der guten Impedanz-Kontraste in den Sedimentgesteinen indirekt erfasst werden. In der Nordschweiz sind aber die meisten hydrogeologisch bedeutenden Störungen älter als das Deckgebirge. Zu ihrer Erkundung sind umfangreiche Bohrprogramme mit senkrechten und geneigten Bohrungen sowie geophysikalischen Erkundungen (*Crosshole-Tomographie*) notwendig (Kap. 11 in Thury et al. 1994). Die Zuverlässigkeit der Lokalisierung der Störungen bleibt dennoch geringer als in Gebieten mit Oberflächenaufschlüssen; abschliessende Aussagen sind erst anhand von Untertage-Untersuchungen möglich.

Wasserführende Systeme, die nicht streng an grössere Störungen gebunden sind (geklüftete Aplite, Einzelklüfte und geklüftete Zonen) sind – falls überhaupt – erst im Verlauf der Untersuchungen untertage zuverlässig lokalisierbar und detailliert quantitativ bewertbar.

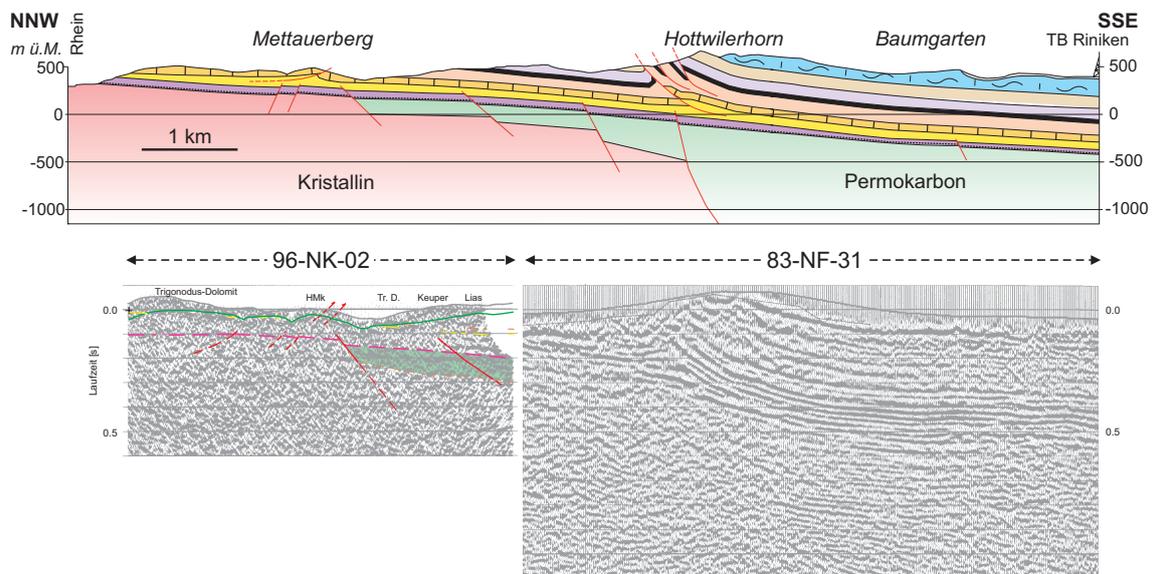


Fig. 4-4: Geologisches Profil (Mettauertal – Bohrung Riniken) basierend auf der Interpretation von zwei zusammengesetzten Seismiklinien (83-NF-31 nach Diebold et al. 1991 und 96-NK-02 nach Weber & Albert 1997).

Wie aus den Seismogrammen ersichtlich ist, zeichnen sich die Schichten des sedimentären Deckgebirges deutlich ab, während im Grundgebirge lediglich Strukturen der Permokarbon-Ablagerungen erkennbar sind. Strukturen im Kristallin, insbesondere Störungszonen, können dagegen praktisch nicht erkannt werden; sie lassen sich allenfalls aus Versätzen in darüberliegenden Sedimentschichten projizieren. Die Farbgebung der Schichten im Deckgebirge entspricht der Legende von Figur 5-7.

Internationale Erfahrungen

Weltweit werden in zahlreichen Ländern Kristallingesteine für die Tiefenlagerung der HAA untersucht (Witherspoon & Bodvarsson 2001). Die bedeutendsten Erfahrungen stammen aus den kontinentalen Schildgebieten in Schweden, Finnland und Kanada (feno-skandischer und

kanadischer Schild), siehe z.B. SKB (1999a, b); Posiva (2003a, b); Goodwin et al. (1994). In Finnland wurde 2001 eine Rahmenbewilligung für ein Lager für abgebrannte Brennelemente im Kristallin von Olkiluoto erteilt, und in Schweden sind die Untersuchungen im Kristallin so weit fortgeschritten, dass der Standortentscheid voraussichtlich 2008 getroffen wird (Einreichung der entsprechenden Gesuche).

Die Eigenschaften der von den verschiedenen nationalen Entsorgungsprogrammen untersuchten Kristallingesteine sind bezüglich Radionuklidtransport insgesamt recht ähnlich. Bei den Sicherheits- bzw. Lagerkonzepten hingegen gibt es erhebliche Unterschiede (z.B. Verwendung langlebiger Behälter).

In allen Kristallingebieten treten geringdurchlässige, wenig deformierte Blöcke in einem Netzwerk von höher durchlässigen Störungen auf. Die Art der Zergliederung hängt von der tektonischen Entwicklung der Gebiete ab und ist deshalb standortspezifisch. Grundlegende Unterschiede bestehen bezüglich der Explorierbarkeit von wasserführenden Zonen in sedimentbedeckten und an der Oberfläche aufgeschlossenen Kristallinkörpern. Die Schutzwirkung der Sedimentgesteine (falls diese tonige Formationen enthalten) vor Störeinflüssen von der Oberfläche ist zwar anerkannt, die stark reduzierte Explorierbarkeit der wasserführenden Zonen wird aber von verschiedenen Programmen als problematisch eingestuft.

In Frankreich wurde in den 90er Jahren ein umfangreiches Untersuchungsprogramm an einem sedimentbedeckten Granitkörper durchgeführt (Vienne, Andra 1999). Die von der französischen Regierung mit der Beurteilung der Endlagerprojekte beauftragte *Commission Nationale d'Evaluation* (CNE) kam zum Schluss, dass die Tiefenlagerung radioaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge eine valable Lösung darstellen könnte. Allerdings muss das Lagergebiet eine relativ grosse Ausdehnung haben, und das Lager selber muss voraussichtlich in mehrere hektometergrosse Kompartimente⁹ aufgeteilt werden, mit zahlreichen Versiegelungen der Verbindungsstollen, welche die durchlässigen, blockbegrenzenden Störungszonen durchfahren. Weil die Unsicherheiten betreffend der hydrogeologischen Verhältnisse aber auch durch zusätzliche Untersuchungen aus Sicht der CNE nicht genügend reduziert werden können, hat die Kommission eine Weiterverfolgung der Option 'Kristallin' in einem anderen Gebiet empfohlen, in welchem das Grundgebirge an der Oberfläche aufgeschlossen ist (CNE 1996, 1997). Eine solche Situation mit grossflächigen Kristallinaufschlüssen ist im geologisch-tektonisch geeigneten Gebiet der Nordschweiz nicht vorhanden.

Bezüglich der Einschlusseigenschaften des Kristallins sind die in Finnland und Schweden angetroffenen Gesteinseigenschaften nicht grundsätzlich anders (besser) als im Kristallin der Nordschweiz (vgl. SKB 1999a, b, Posiva 1999, Nagra 1994a, Thury et al. 1994, Smith et al. 2004). In Finnland und in Schweden wird allerdings ein Sicherheitskonzept verfolgt, bei dem der langfristige Einschluss durch Kupfer-Behälter gewährleistet wird, und die Hauptaufgabe der Geologie darin besteht, für die Langzeit-Integrität der technischen Barrieren eine geeignete Umgebung zu gewährleisten. Kupfer-Behälter sind im schweizerischen Entsorgungsprogramm im Sinne einer alternativen Option vorgesehen. Vergleiche der zwischen 1985 und 1999 weltweit durchgeführten Sicherheitsanalysen zeigen, dass für alle Projekte im Kristallin eine genügende Langzeitsicherheit erwartet wird (z.B. Neall 1994, Neall et al. 1995, Arbeitsgemeinschaft Nagra-Colenco-GRS 2001, Neall & Smith 2004).

⁹ Die Ausdehnung des französischen Lagers ist entsprechend dem viel grösseren Kernenergieprogramm viel grösser als das schweizerische Lager

4.3 Opalinuston und Rahmengesteine

4.3.1 Datengrundlage

Die Kenntnisse über die Eigenschaften des Opalinustons sind aufgrund einer mehrjährigen intensiven Forschungstätigkeit weit fortgeschritten. Neben den Untersuchungen in den Tiefbohrungen und den seismischen Untersuchungen in der Nordschweiz (2- und 3D-Seismik) wird im Rahmen des Internationalen Mont-Terri-Projekts seit 1996 ein breit angelegtes Untersuchungsprogramm untertage durchgeführt. Spezielle Fragen wurden im Rahmen von Dissertationen (z.B.: Nüesch 1991, Hekel 1994, Allia 1996) bearbeitet, und es existiert eine grosse Zahl weiterer regionaler Studien (u.a. in Eisenbahn- und Strassentunneln) sowie viele Laboruntersuchungen. Weiter können auch die Erfahrungen mit Tongesteinen im Ausland verwendet werden, insbesondere auf die Arbeiten in Frankreich an den Tongesteinen des Callovo-Oxfordian, welche dem Opalinuston sehr ähnlich sind (vgl. z.B. Andra 2001b, Andra 2005).

4.3.2 Barriereneigenschaften

Generelle Charakterisierung und Entstehungsgeschichte

Der 80–120 m mächtige Opalinuston¹⁰ ist ein feinkörniges Sedimentgestein (Tonstein), welches während des Aalenians (Unterer Dogger) vor rund 180 Mio. Jahre in einem flachen, auf kontinentalem Untergrund liegenden Meer abgelagert wurde (Fig. 4-5).

Der Opalinuston besteht aus feinkörnigen kontinentalen Verwitterungs- und Erosionsprodukten (Tonmineralien, Quarz sowie wenig Feldspäte), marinen Karbonaten (Muscheln, Bioklasten) sowie diagenetischen Neubildungen (Pyrit, Siderit, Calcit-Zement). Er enthält auch organisches Material, welches teilweise kontinentalen und teilweise marinen Ursprungs ist. Während der Ablagerung lag die Sedimentoberfläche im Bereich der Sturmwellenbasis und etwas darunter (20 bis 50 m Wassertiefe, Allia 1996, Wetzel & Allia 2003).

Während der Ablagerung bildeten sich wahrscheinlich infolge differenzieller Absenkungen im Bereich der Schnittpunkte von Randstörungen der Permokarbontröge mit quer dazu verlaufenden Störungen Senken und Schwellen, was zu unterschiedlichen Mächtigkeiten des Opalinustons führte (Wetzel & Allia 2003, Wetzel et al. 2003). Die Differenz zwischen geringen und grossen Mächtigkeiten beträgt im kompaktierten Zustand 20 bis 40 m. Birkhäuser et al. (2001) konnten im 3D-Seismik-Messgebiet im Zürcher Weinland ebenfalls lokale Mächtigkeitschwankungen des Opalinustons im Bereich von Strukturzonen beobachten (Mächtigkeiten im Extremfall im Bereich von 90 bis 140 m), was auf synsedimentäre Bewegungen hinweist (Birkhäuser et al. 2001, Nagra 2002b, Wetzel et al. 2003).

Nach der Ablagerung wurde der Opalinuston allmählich versenkt und durch die Auflast jüngerer Sedimente (in der zentralen und östlichen Nordschweiz maximal rund 1700 m) kompaktiert, wobei die Porosität reduziert und der grösste Teil des Porenwassers ausgepresst wurde. Während seiner Versenkungsgeschichte hat der Opalinuston Temperaturen im Bereich von 80 bis 90 °C erfahren (Nagra 2002b, Mazurek et al. in prep.). Eine der Konsequenzen der Kompaktions- und Temperaturgeschichte ist die sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit, eine Schlüsseleigenschaft in Bezug auf Wasserfluss und Stofftransport.

¹⁰ Der Name stammt vom häufig darin auftretenden Ammoniten *Leioceras opalinum*.

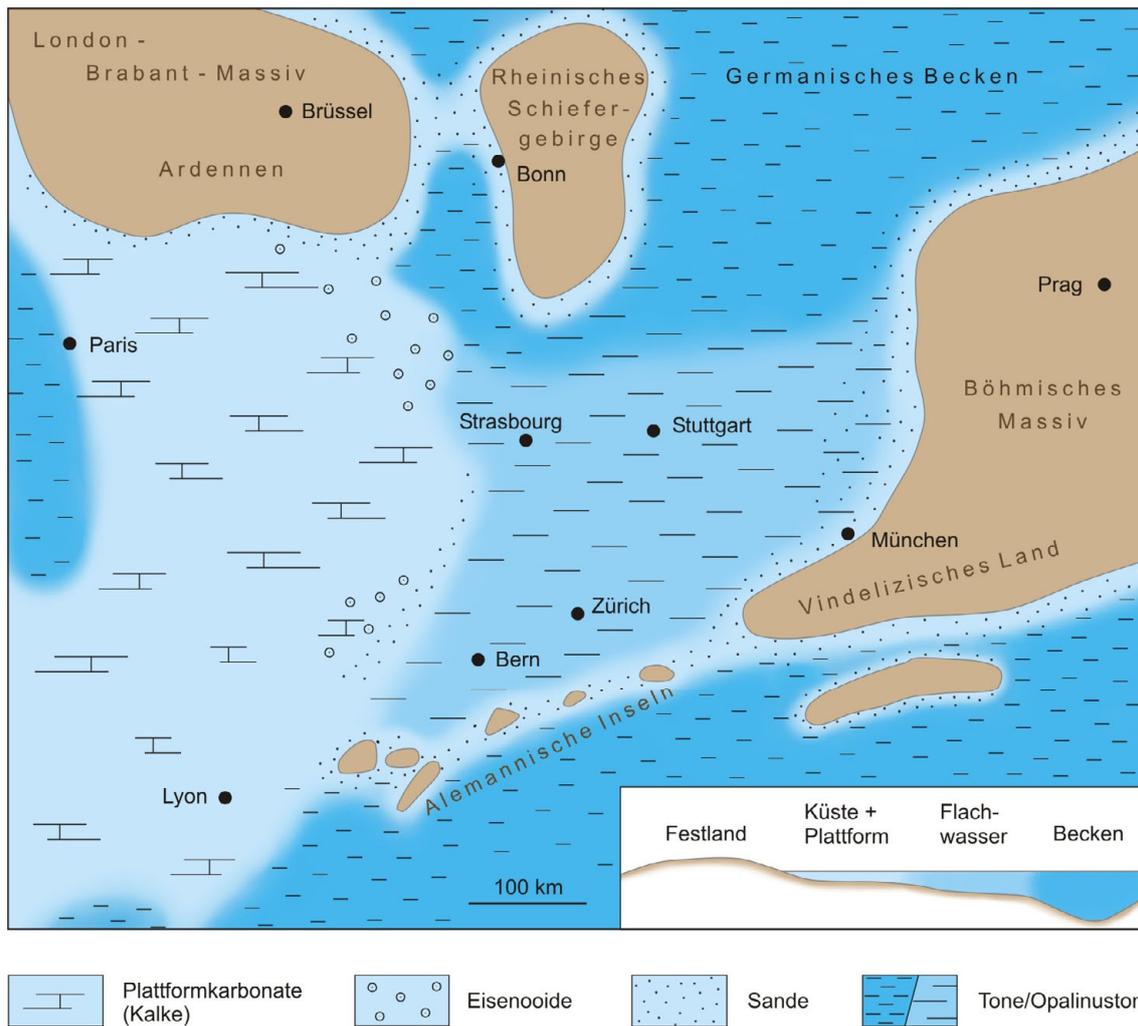
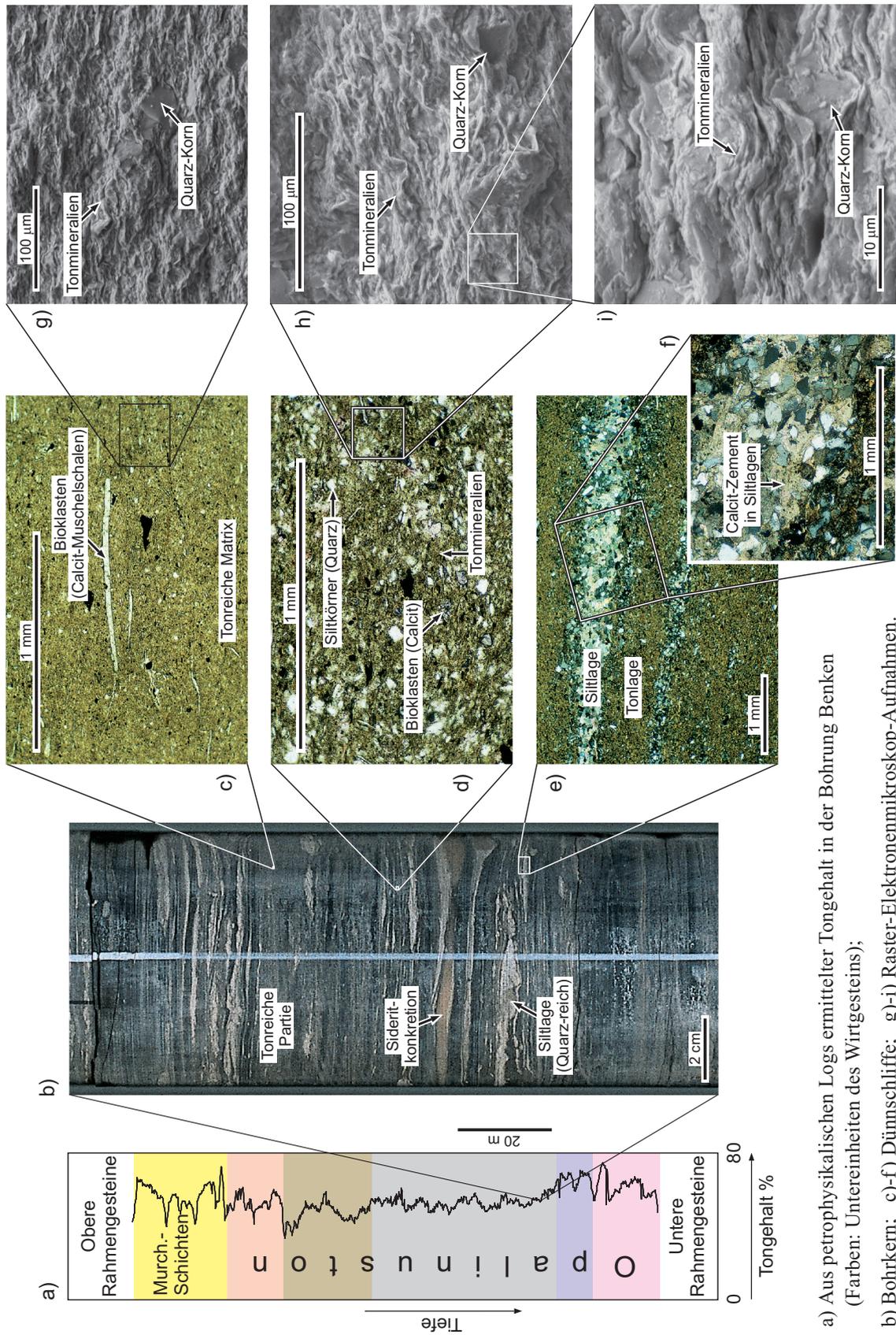


Fig. 4-5: Paläogeographische Verhältnisse zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons (nach Allia 1996).



a) Aus petrophysikalischen Logs ermittelter Tongehalt in der Bohrung Benken (Farben: Untereinheiten des Wirtgesteins);
 b) Bohrkern; c)-f) Dünnsschliffe; g)-i) Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahmen.

Fig. 4-6: Illustration des Opalinustons in verschiedenen Massstäben (Nagra 2002b).

Lithologische Variabilität

Die mineralogische Zusammensetzung des Opalinustons ist in sämtlichen untersuchten Proben der Nagra-Bohrungen (Benken, Weiach, Riniken und Schafisheim) wie auch im Faltenjura (Felslabor Mont Terri) identisch, während die relativen Verhältnisse der einzelnen Mineralien in beschränktem Mass schwanken. Typische Wertebereiche in der Nordschweiz sind Tonminerale 40–80 % (Illit 9–29 %, Illit/Smektit-Wechselagerungsminerale 4–12 %, Chlorit 3–10 %, Kaolinit 6–20 %), Quarz 15–30 %, Calcit 6–40 %, Siderit 2–3 %, Ankerit 0.3 %, Feldspäte 1–7 %, Pyrit 1–3 %, organischer Kohlenstoff 0.5–1 %.

Die laterale Variabilität der Fazies und Lithologie des Opalinustons in der Nordschweiz ist sehr gering, grossräumig ist das Gestein also ausgesprochen homogen (einheitlich), d.h. viel homogener als die meisten anderen mesozoischen Schichtglieder. In der Vertikalen ist die Homogenität eine Frage des Betrachtungsmassstabs: Insgesamt gesehen ist der Opalinuston die homogenste sedimentäre Formation der Nordschweiz. Im Dekameter-Massstab lässt sich der Opalinuston in der ganzen Nordschweiz in 5 Untereinheiten gliedern, wobei im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland die Murchisonae-Schichten im Hangenden eine zusätzliche, sechste Untereinheit des Wirtgesteins bilden (Fig. 4-6a sowie Fig. 3.3-2 in Nagra 2002b). Im Meter-Massstab besteht der Opalinuston aus einer Sequenz von meist 4 bis 8 m mächtigen, wenig prägnanten *coarsening upward* Zyklen¹¹ (Dachbank-Zyklen), welche vermutlich durch zyklische Klimaveränderungen verursacht wurden (Wetzel & Allia 2003). Die Dachbank-Zyklen sind zum Teil über weite Strecken korrelierbar, sind aber nicht in allen Profilen gleich klar entwickelt und auch nicht im gleichen Detaillierungsgrad untersucht.

Im Dezimeter- bis Millimeterbereich weist der Opalinuston aufgrund der planaren Einregelung der Tonminerale eine Feinschichtung auf (Fig. 4-6). Die Schichtung ist eine wichtige Eigenschaft des Gesteins und Ursache von Anisotropien hydrogeologischer (z.B. hydraulische Durchlässigkeit), transportbezogener (z.B. Diffusionskonstanten) wie auch felsmechanischer Eigenschaften. Die Schichtung wird überlagert durch eine stoffliche Heterogenität im cm-Bereich, z.B. durch silt- und feinsandreichere Lagen (Fig. 4-6), welche mit Sturmereignissen mit höherem Eintrag von kontinentalem Detritus zusammenhängen. Diagenetische Neubildungen in Form von Siderit-Knauern sind ebenfalls entlang der Schichtung ausgedehnter als senkrecht dazu. Die laterale Kontinuität der einzelnen flaserförmigen Silt- bzw. Sandsteinlagen wie auch der Siderit-Knauern liegt meistens im Zentimeter- bis Dezimeterbereich, d.h. es handelt sich um Heterogenitäten mit sehr beschränkter Ausdehnung. Der Porenraum der silt- und sandreichen Lagen ist weitgehend durch spätdiagenetisch gebildeten Karbonat-Zement gefüllt. Diese Lagen zeigen wegen der fehlenden Verbundenheit der Silt- und Sandlinsen und ihrer Zementierung keine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit.

Die Labor- und Feldexperimente zeigen, dass die oben beschriebene lithologische Variabilität nur eine sehr beschränkte Auswirkung auf die hydrogeologischen und geomechanischen Wirtgesteinseigenschaften hat. Die Eigenschaften der sandigen Lithologien unterscheiden sich in vielen Fällen gar nicht von denjenigen der tonreicheren Untereinheiten (z.B. hydraulische Durchlässigkeit), in einigen Fällen gibt es geringfügige systematische Unterschiede (z.B. felsmechanische Eigenschaften). Ein Vergleich der umfangreichen Opalinuston-Datensätze vom Felslabor Mont Terri und der Bohrung Benken zeigt, dass der Opalinuston im Zürcher Weinland im Mittel eine etwas geringere Porosität als im Mont Terri besitzt (12 statt 16 Vol.-%), was leicht geringere Durchlässigkeiten und Diffusionskonstanten sowie höhere Gesteinsfestigkeiten

¹¹ Zunahme der Korngrösse, resp. des Sandanteils gegen oben (wegen der abschliessenden Sandsteinlage auch Dachbank-Zyklen genannt). Die Länge der Ablagerungszyklen wird von Wetzel & Allia (2003) auf rund 20'000 Jahre geschätzt und dürfte im Zusammenhang Präzessionszyklen im Milankovitch-Band stehen, welche damals diese periodischen Klimaveränderungen verursacht haben.

im Zürcher Weinland zur Folge hat (Nagra 2002b). Diese geringfügigen Unterschiede illustrieren die zwar vorhandene, aber relativ geringe Bandbreite der lateralen Variabilität der Parameter.

Rahmengesteine

Zwischen dem Opalinuston und den regionalen Aquiferen im Hangenden (Malm) und Liegenden (Muschelkalk) befinden sich im Gebiet östlich der Aare mehrheitlich gering durchlässige tonige und evaporitische Gesteine. Diese Rahmengesteine bilden insbesondere in vertikaler, aber auch in lateraler Richtung eine zusätzliche geologische Radionuklid-Transportbarriere (Nagra 2002b, c). Die in den tonreichen Rahmengesteinen eingeschalteten, meist nur wenige Meter mächtigen sandigen, kalkigen oder dolomitischen Schichten sind zum Teil lokal wasserleitend. Weitere Angaben zur regionalen Verbreitung, siehe Kapitel 5.3.3.

Die oberen Rahmengesteine sind östlich des unteren Aaretals und westlich des Bodensees so gering durchlässig, dass es bis heute weder der Erdölindustrie noch der Nagra gelungen ist, in einer Tiefbohrung eine Wasserprobe aus diesen Schichten zu entnehmen. Weiter westlich werden die oberen Rahmengesteine zunehmend kalkiger, und mit dem Haupttrogenstein schaltet sich ein ausgedehnter Kalkstein-Aquifer ein (Fig. 5-5 und 5-6). Die Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine wird dadurch teilweise eingeschränkt. Die unteren Rahmengesteine enthalten lokal kleine Aquifere (der Arietenkalk des Lias sowie die unter dem Begriff Sandsteinkeuper zusammengefassten sandigen Formationen im Keuper), deren laterale Kontinuität aber begrenzt ist. Diese Aquifere enthalten saline, stark sulfathaltige Wässer, was auf eine vernachlässigbare Grundwasserzirkulation hinweist. Diese Grundwässer haben keine wirtschaftliche Bedeutung.

Die Rahmengesteine bewirken, dass diejenigen Radionuklide, welche nach ihrem Transport durch das Wirtgestein noch nicht zerfallen sind, falls überhaupt, nur mit einer grossen zusätzlichen zeitlichen Verzögerung in die Biosphäre gelangen könnten (vgl. Nagra 2002c). Die Radionuklide würden entweder lateral entlang der durchlässigeren Schichten in den Rahmengesteinen über kilometerlange Transportwege bis zur Exfiltrationszone (zukünftiges Flusstal) transportiert oder in vertikaler Richtung durch die tonigen Rahmengesteine in die regionalen Aquifere diffundieren. Beim Transport in den Rahmengesteinen finden auch Rückhaltungsprozesse wie Sorption oder – in geklüfteten Gesteinen – Matrixdiffusion statt.

Mächtigkeit des Wirtgesteins, resp. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der Opalinuston (inkl. Murchisonae-Schichten in Opalinuston-Fazies) erreicht im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum über grosse Gebiete eine Mächtigkeit von mindestens 100 m. Einzig im Bereich des Jura-Südfusses ist der Opalinuston z.T. geringer mächtig, dürfte aber zusammen mit den tonigen Gesteinen des oberen Lias trotzdem einen genügend mächtigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich bilden (vgl. Kap. 5.3.4.5).

Hydraulische Eigenschaften

Ein umfangreicher und zuverlässiger hydraulischer Datensatz stammt aus der Sondierbohrung Benken. Er zeigt konsistente, wenig streuende (horizontale) hydraulische Durchlässigkeiten, typischerweise von 2×10^{-14} bis 1×10^{-13} m/s (Nagra 2002b). Verglichen mit der Porositäts-Durchlässigkeitsbeziehung weltweit untersuchter Tongesteine liegen diese Werte im erwarteten Bereich.

Im Opalinuston wurden in der Bohrung Benken Überdrücke gemessen, die gemäss Modellrechnungen nur dann über geologische Zeiträume erhalten bleiben, wenn die effektive (vertikale) Durchlässigkeit $\leq 10^{-14}$ m/s ist (Nagra 2002b).

Die hydraulische Durchlässigkeit des Opalinustons ist, besonders in Oberflächennähe, stark tiefenabhängig. In Oberflächennähe kann sie aufgrund von Entlastungseffekten und Verwitterungsprozessen sehr hohe Werte bis 10^{-4} m/s aufweisen (Hekel 1994). Im Bereich von 10 bis 30 m Tiefe nimmt sie aber um mehrere Grössenordnungen ab und fällt unter 10^{-11} m/s.

Alle Untersuchungen und Beobachtungen in Bohrungen und Tunnel im Opalinuston weisen darauf hin, dass sich die hydraulische Durchlässigkeit von Störungen nicht von derjenigen des ungestörten Gesteins unterscheidet, oder zumindest ebenfalls sehr gering ist, wenn die Gesteinsüberlagerung mindestens 200 m beträgt (Gautschi 2001) – die Nachweisgrenze der Wasserführung von Störungszonen bei hydrogeologischen Kartierungen von belüfteten Tunnel liegt bei einer Transmissivität von etwa 10^{-10} m²/s. Die geringe hydraulische Durchlässigkeit der Störungen wird auf das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons zurückgeführt.

Aus dem Vergleich der Diffusionskonstanten des Wirtgesteins mit den geringen hydraulischen Durchlässigkeiten wird ersichtlich, dass bei den relevanten Transportdistanzen die Diffusion als Transportprozess dominiert. Ein wichtiges Argument für die sehr kleine advective Komponente ist die im Profil der Bohrung Benken (Nagra 2002b, Gimmi & Waber 2004) sowie am Mont Terri (Rübel et al. 2002, Pearson et al. 2003) beobachtete, für Diffusionsprozesse typische bogenförmige Verteilung der Konzentration zahlreicher Elemente und Isotope im Porenwasser (Fig. 4-7). Die Form der Profile schliesst einen namhaften advectiven Fluss senkrecht zur Schichtung aus (Nagra 2002b, Gimmi & Waber 2004). Der Wert dieser "Naturexperimente" im Zürcher Weinland und im Mont Terri liegt zudem in der Tatsache, dass sie sich auf grosse Zeiträume (Hunderttausende bis Millionen von Jahren) und bedeutende räumliche Distanzen (hundert Meter und mehr) beziehen. Im Falle der Bohrung Benken sind die bogenförmigen auf Diffusion zurückzuführenden Profile nicht nur im Opalinuston ausgebildet, sondern sowohl im Hangenden wie auch im Liegenden über diesen hinaus (Lias und Dogger, totale Mächtigkeit 250 m). Dies illustriert, dass Diffusion auch in einem bedeutenden Teil der Rahmengesteine der dominierende Transportmechanismus ist. Die Diffusionsparameter sind gut bekannt und liegen im Vergleich mit anderen Tongesteinen im erwarteten Bereich.

Selbstabdichtung

Die Feststellung, dass im Opalinuston eine Selbstabdichtung von Bruchstrukturen (Störungszonen) stattfindet, ist breit abgestützt und basiert auf unterschiedlichen Beobachtungen und Untersuchungen (z.B. Fig. 4-8). Das weitgehende Fehlen von Mineraladern und Alterationen zeigt, dass auch in der geologischen Vergangenheit keine bedeutenden Gestein-Wasser-Interaktionen, resp. keine signifikanten Wasserflüsse durch den Opalinuston stattgefunden haben. Selbstabdichtungsprozesse konnten auch im Rahmen von In-situ-Experimenten im Felslabor Mont Terri sowohl im geklüfteten Stollenumfeld (Demonstration der Selbstabdichtung der Auflockerungszone in den EU-Experimenten SELFRAC und EB) wie auch im vom Stollen wenig beeinflussten, durch *Hydrofrac*-Versuche künstlich aufgerissenen Gestein nachgewiesen werden. Felsmechanische Laborexperimente erlauben zusammen mit dem gewonnenen Systemverständnis sowie konzeptuellen Ansätzen aus der Literatur die Identifikation von zeitabhängiger Deformation (kataklastisches Fliessen, 'Kriechen' sensu lato), Quellung und Desintegration des Gesteins als die für die Selbstabdichtung relevanten Prozesse (detaillierte Erläuterungen siehe Nagra 2002b).

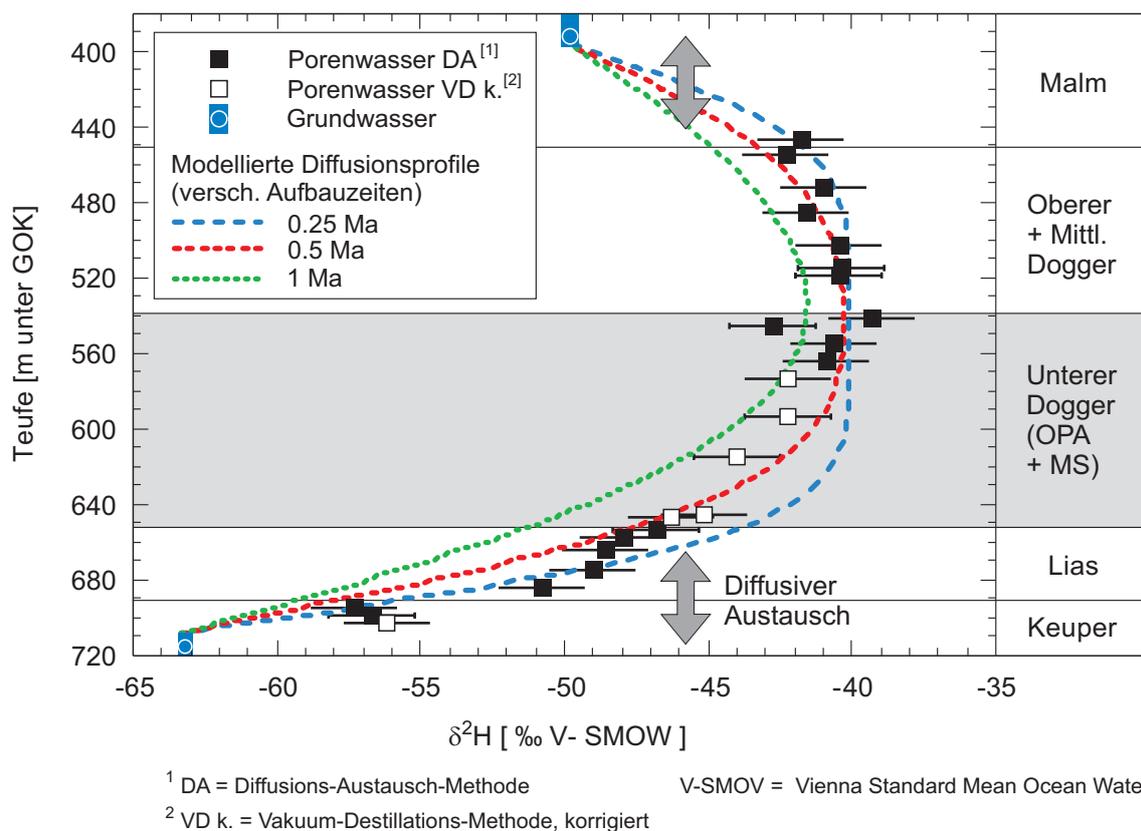


Fig. 4-7: Diffusionsprofil Bohrung Benken (nach Nagra 2002b, Gimmi & Waber 2004).

Mit verschiedenen Methoden gewonnene Messdaten für Deuterium ($\delta^2\text{H}$) in Grund- und Porenwässern Bohrung Benken. Der bogenförmige Verlauf kann nur durch diffusiven Stoffaustausch (Pfeile) zwischen Grund- und Porenwässern erklärt werden und schliesst einen substanziellen vertikalen advektiven Wasserfluss aus. Die Modellrechnungen (gestrichelte Linien) zeigen, dass für die Entstehung der beobachteten Deuteriumverteilung ca. 0.5 Mio. Jahre benötigt werden.

Geochemische Verhältnisse

Die geochemischen Bedingungen im Wirtgestein werden weitgehend durch Gleichgewichtsreaktionen mit den Mineralien (v.a. Tonmineralien, Karbonate, Pyrit, organische Stoffe) bestimmt, wobei die Pufferkapazität sehr gross ist. Einzig die Konzentration der konservativen, mobilen Elemente Chlorid, Bromid (z.T. auch Sulfat) kann sich unabhängig vom Mineralbestand, aufgrund von Änderungen ihrer Konzentration in den umgebenden Aquiferen und diffusivem Austausch in den Porenwässern des Wirtgesteins, langsam verändern. Chlorid stellt dabei die Hauptkomponente der Salinität dar. Die Elektroneutralität des Porenwassers wird durch Veränderung der Natriumkonzentration gewahrt.

Ausgehend von ursprünglich marinen Porenwässern während der Sedimentation des Opalinuston, wurde die Zusammensetzung des Porenwassers über geologische Zeiträume hinweg durch diagenetische Prozesse und durch kompaktionsbedingte Porenwasserbewegungen (Auspressen) während der Versenkung beeinflusst. Fluideinschlüsse zeugen von einer hochsalinen Phase im Verlauf der Diagenese, gefolgt von einem Verlust an Salinität bis hin zu den heutigen Werten von etwa einem Drittel der Meerwassersalinität (Situation in der Bohrung Benken). Im Opalinuston der Sondierbohrung Benken ist das Porenwasser vom Na-Cl-(SO₄)-Typ, mit einer Ionenstärke von 0.23 Mol/l und einem nominalen Chloridgehalt von 0.16 Mol/kg H₂O

(ca. 5'700 mg/kg H₂O). Der nominale pH-Wert beträgt rund 7.2 bei einem assoziierten CO₂-Partialdruck von 10^{-2.2} bar, und das Redoxpotenzial liegt im reduzierenden Bereich (Eh = -0.167 V). Die Redoxpufferkapazität des Opalinustons ist gross (Pyrit, organische Stoffe). Die Komplexbindingkapazität von wasserlöslichen organischen Substanzen im Opalinuston ist nicht signifikant.

Die geochemischen Verhältnisse im Opalinuston sind sehr stabil. Während der nächsten Million Jahre ist nur mit einer geringfügigen Erniedrigung der Porenwassersalinität zu rechnen (diffusiver Verlust < 20 %, Nagra 2002b, Gimmi & Waber 2004), die übrigen durch das Gestein gepufferten Komponenten bleiben praktisch unverändert. Es gibt keine Hinweise, dass die verschiedenen Vergletscherungen während der letzten 2.6 Millionen Jahre einen Einfluss auf die geochemischen Bedingungen gehabt haben.

Die Radionuklidsorptionseigenschaften des Opalinustons sind wegen seines hohen Tonmineralgehalts und der Porenwasserchemie sehr günstig (Nagra 2002c, Bradbury & Baeyens 2003).

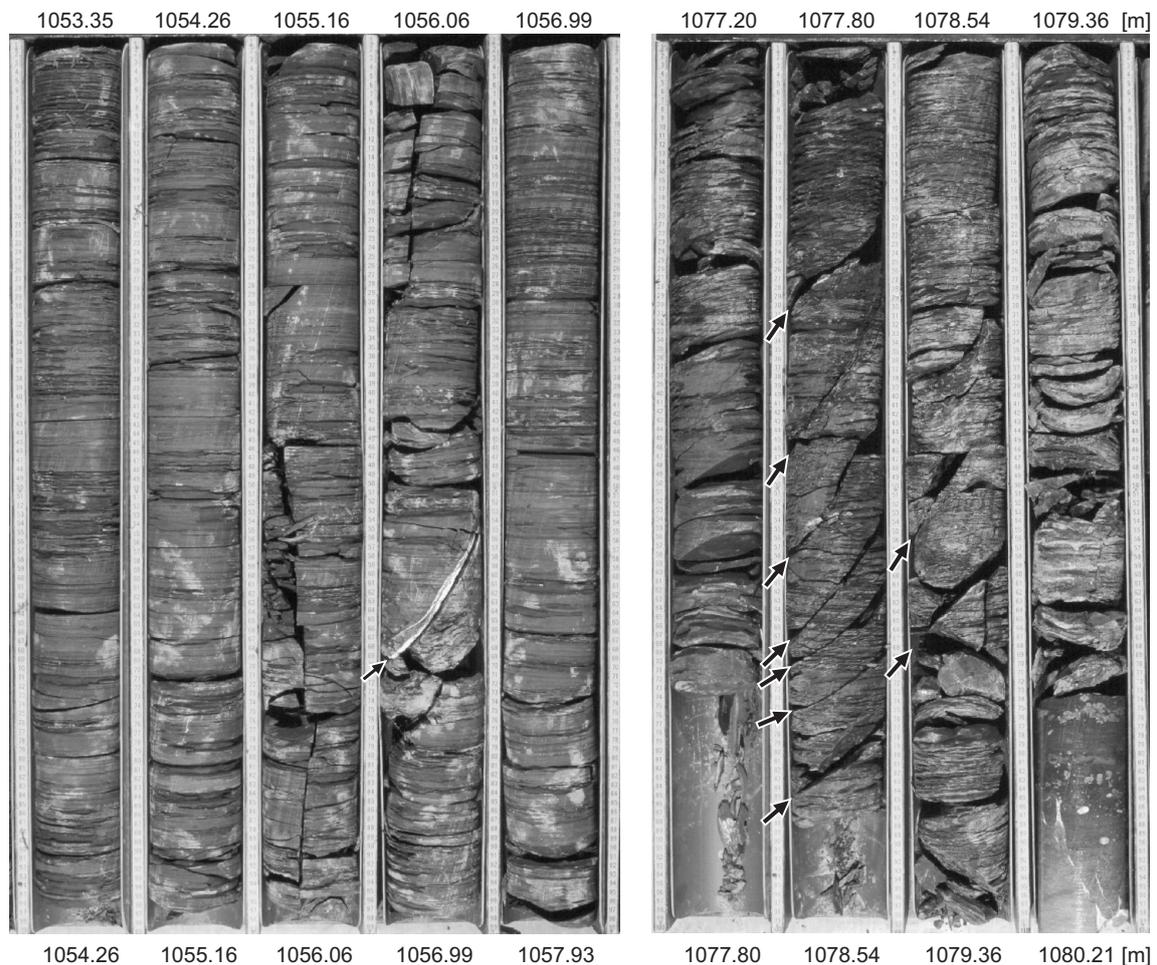


Fig. 4-8: Störungszonen (Aufschiebungen, vgl. Pfeile) im Opalinuston der Bohrung Schafisheim.

Hydraulische Tests haben gezeigt, dass die hydraulische Durchlässigkeit der Störungszonen sehr gering ist und sich nicht von derjenigen des ungestörten Bereichs unterscheidet.

Lagerbedingte Einflüsse

Die bedeutendsten lagerbedingten Einflüsse sind die Bildung einer Auflockerungszone um die Untertagebauten und die Freisetzung von im Lager (v.a. durch Metallkorrosion) gebildeten Gasen.

Entscheidend für die Grösse der Auflockerungszone ist die Lage des Stollens in Bezug auf die Ausrichtung des Spannungsfelds und die Anisotropie des Gesteins sowie der Ausbruchquerschnitt und das Ausbruchverfahren (Minimierung dieses Effekts, siehe nächstes Kapitel). Die lokale Durchlässigkeit der Auflockerungszone ist in der Bau- und Betriebsphase um mehrere Grössenordnungen erhöht. Nach Verschluss des Lagers sättigen sich die Auflockerungszone und die Bentonit- bzw. Zementverfüllung auf. Wegen der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Opalinustons dauert dieser Prozess tausende von Jahren. Die Aufsättigung und die damit verbundenen Prozesse wie zeitabhängige Deformation, Quellung und Desintegration des Gesteins in der Auflockerungszone sowie die Kompaktion der Auflockerungszone durch das Quellen des Verfüllmaterials (Bentonit) führen zu einer Selbstabdichtung der diskreten Klüfte. Im Endzustand wird erwartet, dass sich die Auflockerungszone wieder wie ein homogen poröses Medium verhält, das gegenüber dem intakten Gebirge eine leicht erhöhte Porosität und eine effektive axiale Durchlässigkeit aufweist, welche höchstens noch eine bis zwei Grössenordnungen über der Durchlässigkeit des intakten Gebirges liegt (Nagra 2002b). Die Effizienz der Selbstabdichtung ist durch die im Felslabor Mont Terri durchgeführten In-situ-Experimente SELFRAC und EB belegt (Bühler et al. 2003, 2005; Heitz et al. 2003, Mayor et al. 2005).

Die Gasfreisetzung wurde in Untertage- und Laborexperimenten untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Gasfreisetzung keine kritische Beeinträchtigung der Barriereneigenschaften des Opalinustons bewirkt. Eine detaillierte Beschreibung und Quantifizierung der erwarteten Gasproduktions- und Freisetzungsraten und -mechanismen ist in Nagra (2002b, 2004) zu finden. Zur Vertiefung des Verständnisses der Gasfreisetzung laufen zur Zeit weitere Experimente im Felslabor Mont Terri. Die Gasproduktion könnte gegebenenfalls durch alternative Behältermaterialien reduziert werden.

Da die BE/HAA-Abfälle noch über mehrere Tausend Jahre Wärme erzeugen, wurde die Auswirkung des Wärmeeintrags auf das Wirtgestein untersucht. Die maximale Temperatur an der Stollenwand ist nach einigen hundert Jahren erreicht und beträgt ca. 85 bis 95 °C¹². Auswirkungen auf die Mineralogie sind bei einer solchen Temperaturerhöhung vernachlässigbar, da der Opalinuston während seiner Versenkungsgeschichte schon ähnlich hohe Temperaturen (80 bis 90 °C, Nagra 2002b, Mazurek et al. in prep.) über sehr viel längere Zeiträume erfahren hat. Die Temperaturerhöhung bewirkt weiter thermische Spannungen, einen Porenwasser-Überdruck sowie gegebenenfalls eine Reduktion der mechanischen Festigkeit des Wirtgesteins und eine Erhöhung der 'Kriechrate'. Da zum Zeitpunkt der erhöhten Temperaturen die Lagerstollen schon verfüllt sind, führt dies zu keiner signifikanten Vergrösserung der Auflockerungszone, sondern beschleunigt allenfalls die Desintegration des Gesteins und die Homogenisierung der Auflockerungszone und damit die Selbstabdichtung.

4.3.3 Bautechnische Machbarkeit

Erfahrungen über mehr als hundert Jahre mit Untertagebauten im Opalinuston zeigen, dass die Tunnel im Opalinuston im Faltenjura meist ohne grössere Schwierigkeiten realisiert werden konnten, auch bei Überlagerungen von bis zu 800 m und trotz zahlreicher Störungen im

¹² Die in Nagra (2002c) erwähnte Maximaltemperatur von 95 °C gilt nur für den Fall, wo ausschliesslich MOX/UF₆-Abfälle eingelagert werden.

Gebirge. In Tunnelabschnitten mit erhöhter Frequenz von Scherzonen erfolgten zum Teil grössere Niederbrüche (vgl. z.B. Erfahrungen aus der Felslabor-Erweiterung Mont Terri und vom Bau des Mont-Russelin-Tunnels).

Beim Vergleich mit anderen Tunnelbauwerken müssen die unterschiedliche Ausrichtung der Stollenachse zur Gesteinsanisotropie, der Wassergehalt und insbesondere die lokale Gebirgsspannung berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten sind die Resultate aus Stollen mit Beobachtungen (z.B. Mont Terri) auf Standortgebiete mit Opalinuston übertragbar. Die numerischen Modellierungen, in welchen die felsmechanischen Kennwerte und die Spannungsverhältnisse der Bohrung Benken berücksichtigt werden, zeigen, dass für die verschiedenen Hohlräume eines geologischen Tiefenlagers in einer Tiefe von 600 bis 700 m die Standsicherheit gegeben ist (Nagra 2002b). Die erwartete instantane Konvergenz liegt im Bereich von 1 bis 2.4 %. Die Stollen und Tunnel des Tiefenlagers müssen gegen Niederbrüche aus der Firste gesichert werden. Bei den BE/HAA-Lagerstollen werden Felsanker und Netze als genügend angesehen, bei den grösseren Bauwerken sind Betonauskleidungen vorgesehen (Nagra 2002a). In Zonen erhöhter Scherzonenfrequenz (Bsp. Fig. 4-8) sind voraussichtlich spezielle zusätzliche Massnahmen erforderlich.

Um die Ausdehnung der Auflockerungszone zu minimieren, wird die Achse der Lagerstollen idealerweise parallel zur maximalen Hauptspannung ausgerichtet. Die Stollen werden mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren und bleiben nur maximal zwei Jahre unverfüllt. In Tunnelabschnitten, in welchen Versiegelungssysteme platziert werden, kann die Auflockerungszone vor Einbringen der Versiegelungselemente nach Bedarf mechanisch ausgeräumt werden.

Aus dem Gebiet der Nordschweiz sind keine Anzeichen einer signifikanten natürlichen Gasföhhrung des Opalinustons bekannt, im Gegensatz zu einigen Tiefbohrungen im süddeutschen Molassebecken, wo das organische Material im Opalinuston und in den Erdölmuttergesteinen im Liegenden wegen der grösseren Versenkung eine höhere Maturität erreicht hat. Die Gasföhhrung der Bohrspülung beim Durchbohren des Opalinustons in der Sondierbohrung Benken war praktisch null (Jäggi & Steffen 1999).

4.3.4 Belastbarkeit der Aussagen

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen

In einer geeigneten geologischen Situation werden innerhalb des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahren die Barriereneigenschaften des Opalinustons als sehr robust gegenüber geologischen Langzeitveränderungen eingestuft (Nagra 2002b).

Charakterisierbarkeit

Aufgrund der seismischen Impedanzkontraste der Sedimentgesteinsabfolge ober- und unterhalb des Opalinustons können die Ober- und Untergrenze des Wirtgesteinskörpers und die Lage von Störungszonen mit Hilfe der 2D-Seismik zuverlässig erfasst werden (Diebold et al. 1991, Naef et al. 1995). Vertikalversätze von wenigen Metern sind mit hochauflösender 3D-Seismik noch erkennbar, ebenso der laterale Verlauf von Störungen mit einer Längserstreckung von mehr als 150 m (Birkhäuser et al. 2001). Lokal können ungünstige quartärgeologische Verhältnisse an der Oberfläche die Qualität der Abbildung etwas beeinträchtigen. Aufgrund der lateralen Konstanz der lithologischen Ausbildung des Opalinustons, welche durch das marine Ablagerungsmilieu bedingt ist, sind auch seine relevanten Wirtgesteineigenschaften über grosse Distanzen extrapolierbar. Die Erfahrungen im Zürcher Weinland zeigen, dass alle wasserföhrenden

Einheiten ober- bzw. unterhalb des Opalinustons, aus welchen aufgrund ihrer erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit in der Bohrung Benken Wasserproben entnommen werden konnten, in der 3D-Seismik als Zonen mit erhöhten Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten erkennbar sind (Fig. 5.14 und 5.15 in Birkhäuser et al. 2001).

Auch die Übertragung der Wirtgesteinseigenschaften von einer Lokation (z.B. Felslabor Mont Terri) auf eine andere ist generell möglich, insbesondere weil die Auswirkungen gewisser Abweichungen in der Gesteinsausbildung bekannt sind (z.B. die gegenüber Mont Terri etwas geringeren Porosität des Opalinustons in der Bohrung Benken, die zu entsprechend niedrigeren Diffusionskonstanten und Durchlässigkeiten führt).

Internationale Erfahrungen

Tongesteine werden wegen ihrer ausgeprägten Langzeitisolationskapazität weltweit in verschiedenen nationalen Entsorgungsprogrammen als Wirtgesteine für hochradioaktive Abfälle untersucht (Witherspoon & Bodvarsson 2001). Das Spektrum reicht dabei von wenig konsolidierten, plastischen Tonsteinen wie der belgische 'Boom Clay', über mässig überkonsolidierte Tonsteine wie der Opalinuston in der Nordschweiz oder die Tonsteine des 'Callovo-Oxfordians' in Frankreich, bis zu den stark überkonsolidierten Boda-Tonschiefern in Ungarn.

Weltweit existieren verschiedene Felslabors in Tongesteinen, unter anderem in Belgien (Mol: Neerdael & Boyazis 1997, IAEA 2001), in Frankreich (Tournemire: Bonin 1998, Boisson et al. 1998, Cabrera et al. 2001; Meuse/Haute-Marne: Andra 2001b, 2005), in Japan (Horonobe (im Bau): Aoki 2002) und in der Schweiz (Mont Terri: Thury & Bossart 1999). Das Felslabor Meuse/Haute Marne ist als Vorstufe zu einem möglichen späteren Tiefenlager am gleichen Standort konzipiert. Tonsteine sind seit kurzem auch in Deutschland Gegenstand von Untersuchungen im Zusammenhang mit der Lagerung hochradioaktiver Abfälle (z.B. Hoth et al. 2003).

Im Rahmen des so genannten *Clay Club* der Nuclear Energy Agency der OECD findet ein formeller wissenschaftlicher Erfahrungsaustausch unter den Organisationen statt, welche sich mit Tongesteinen beschäftigen. Die Ergebnisse der gemeinsamen internationalen Studien werden jeweils in den Publikationsreihen der NEA veröffentlicht (z.B. Horseman et al. 1996, Mazurek et al. 2003, Boisson 2005).

Zur Zeit gibt es weltweit drei Projekte, in welchen Tongesteine als Wirtgesteine für hochradioaktive Abfälle in einem fortgeschrittenen Stadium mit umfangreichen Felduntersuchungen und damit verbundenen Sicherheitsanalysen bewertet werden. Es handelt sich um den belgischen 'Boom Clay' (Sicherheitsanalyse SAFIR 2, ONDRAF 2001a, b), die französischen 'Callovo-Oxfordian-Tonsteine' (Andra 2001a, b; Andra 2005) und das Projekt Opalinuston der Nagra (Nagra 2002a, b, c). Bei allen drei Tongesteinsformationen handelt es sich um marine Ablagerungen. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrem Konsolidierungsgrad. Der belgische Boom Clay hat in der Vergangenheit die geringste Überlagerung und Maximaltemperatur erfahren, der Opalinuston die grösste. Die Wirtgesteinseigenschaften der Callovo-Oxfordian-Tonsteine und des Opalinustons sind sehr ähnlich. Alle drei Projekte führten zu einer grundsätzlich positiven Beurteilung der Langzeitsicherheit (vgl. auch NEA 2003a, b, 2004), weitergehende Untersuchungen einzelner Aspekte sind in den nächsten Phasen der Projekte vorgesehen.

4.4 Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse (USM)

4.4.1 Datengrundlage

Die Eigenschaften der USM wurden vor allem im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration und der Exploration von unterirdischen Gasspeichern in zahlreichen Tiefbohrungen untersucht. Ausserdem liegen zahlreiche regionale wissenschaftliche Studien, insbesondere Dissertationen vor. Aufgrund der projektspezifischen Ziele (Untersuchungen von Kohlenwasserstoff-Speichergesteinen) bezieht sich der grösste Teil des hydraulischen Datensatzes auf sandsteinreiche Gesteinsabfolgen; die lückenlosen bohrlochgeophysikalischen Logs aus den Tiefbohrungen liefern jedoch wesentliche Informationen zum Aufbau der USM (Verteilung der verschiedenen Architekturelemente, d.h. eine Beschreibung der vorhandenen Sedimenttypen und ihre räumliche Anordnung). Im Rahmen der Sedimentstudie hat die Nagra diese Datensätze vertieft ausgewertet (Meier 1994a, b). Zudem hat die Nagra projektspezifische Zusatzuntersuchungen in Geothermiebohrungen durchgeführt (Blaser et al. 1994, Ammann et al. 1993).

Wichtige Erkenntnisse betreffend sicherheits- und bautechnischer Eigenschaften der USM wurden auch beim Bau zahlreicher Strassen- und Eisenbahntunnels gewonnen. Die umfangreiche Literatur wurde von Keller et al. (1990) und Keller (1992) ausgewertet; in Küpfer (2005) sind auch spätere Untersuchungen mitberücksichtigt.

4.4.2 Barriereneigenschaften

Generelle Charakterisierung und Entstehungsgeschichte

Im mittleren Tertiär (Chattian und Aquitanian, 28.5 bis 20.5 Mio. Jahre) haben sich entlang der Alpen verschiedene konglomeratreiche alluviale Schuttfächersysteme entwickelt, in welchen der Erosionsschutt der sich heraushebenden Alpen radial in das alpine Vorlandbecken transportiert wurde (Fig. 4-9). Im distalen (alpenfernen) Bereich und zwischen den Schuttfächern sind penepain-artige alluviale Schwemmebenen mit sinusförmigen bis mäandrierenden Flusssystemen entstanden, mit niedrigem Fliessgefälle und nahe der Erosionsbasis (z.B. Strunck & Matter 2002). Ausserhalb der Flussrinnen wurden vorwiegend tonreiche Sedimente abgelagert. Lokal haben sich auch kleinere, untiefe Süsswasserseen gebildet, und – während sehr trockener Klimaphasen – evaporitische Ablagerungen. Die Hauptentwässerung erfolgte durch axiale Rinnensysteme am nördlichen Rand des Beckens. Kleinere Schuttfächer mit grobkörnigen Ablagerungen entwickelten sich im Norden aus der Hebungszone des Schwarzwalds.

Im Lauf der Zeit verlagerten sich die Schwerpunkte der Schüttungssysteme, einige nahmen in der Intensität ab, neue entstanden. Die Veränderungen spiegeln sich in der unterschiedlichen Zusammensetzung der (Molasse-)Sedimente. So enthält der untere Teil der Unteren Süsswassermolasse (Chattian) im Westen tendenziell mehr Ton-Anteile als im Osten. Eine umgekehrte, aber weniger deutlich ausgeprägte Tendenz ist im oberen Abschnitt der USM (Aquitanian) im Osten feststellbar.

Keller et al. (1990) und Keller (1992) haben aufgrund detaillierter sedimentologischer Studien an natürlichen Aufschlüssen, Tongruben, Tunnel und Bohrungen ein Faziesmodell entwickelt, das den Aufbau der distalen USM durch fünf verschiedene Architektur-Elemente konzeptualisiert (Fig. 4-10 und 4-11). Diese unterscheiden sich durch ihre Genese und ihren charakteristischen faziellen Aufbau, ihre Geometrien und Dimensionen sowie auch durch ihre petrophysikalischen Eigenschaften. Es sind dies: (1) Rinnengürtel mit teilweise gestapelten (amalgamierten) Rinnenfüllungen (RG), (2) Durchbruchfächer und -rinnen (DFR), (3) Uferwälle und distale

Überschwemmungssande, (4) Überschwemmungsebenen mit Paläoböden und Sümpfen (UPS) sowie (5) lakustrische Ablagerungen (LAK). Die gegenseitige Beziehung der verschiedenen Elemente ist schematisch in Figur 4-10 dargestellt und anhand eines Aufschlusses in einer Tongrube illustriert (Fig. 4-11).

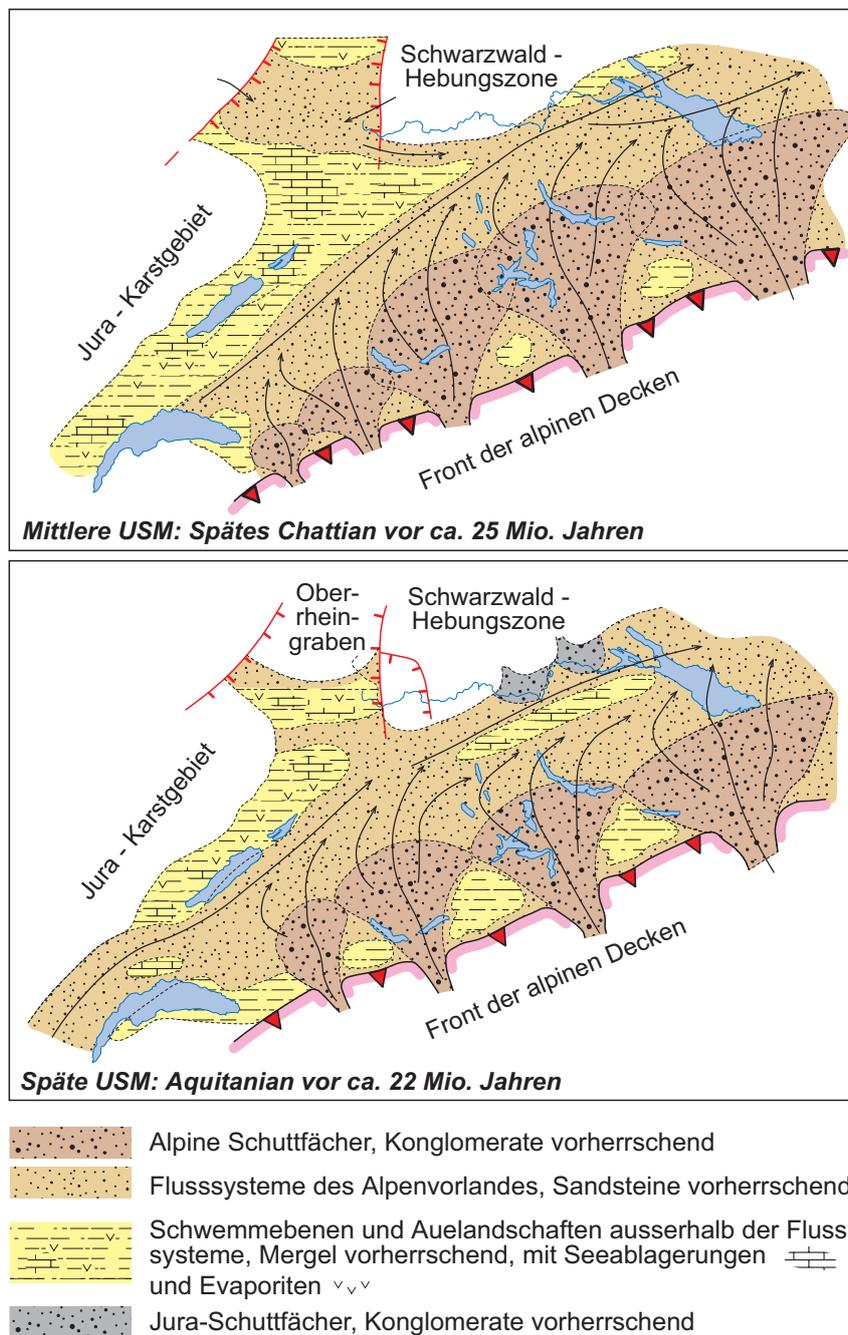


Fig. 4-9: Ablagerungsverhältnisse zur Zeit der USM (Chattian und Aquitanian), nach Berger (1996) und Kuhlemann & Kempf (2001).

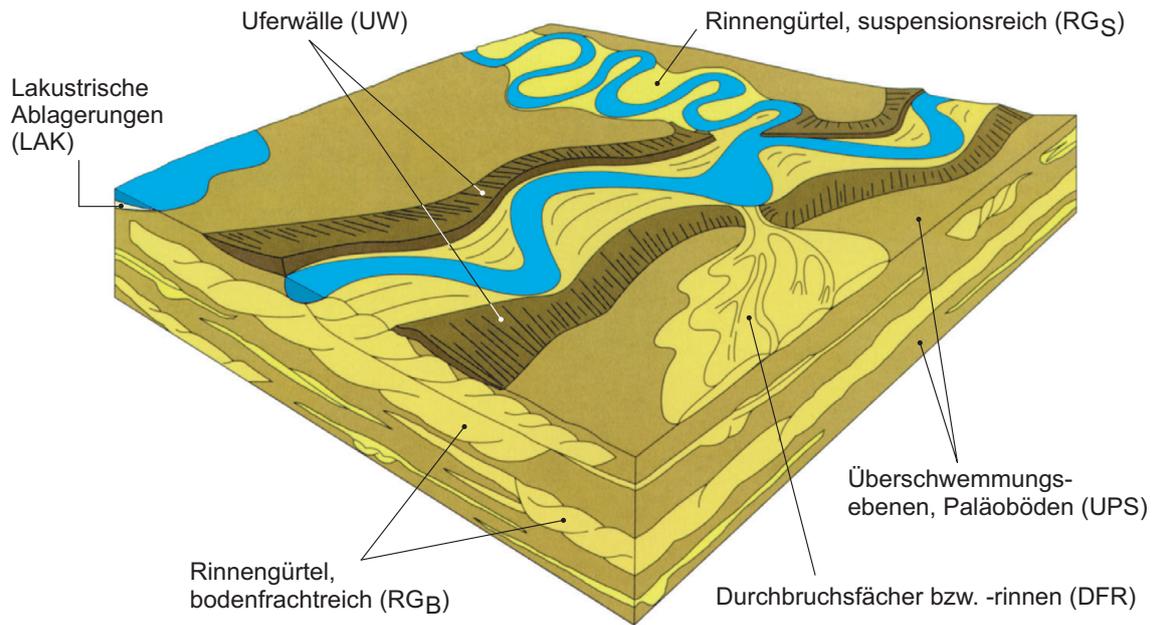


Fig. 4-10: Faziesmodell der distalen (alpenfernen) USM (nach Keller et al. 1990).



Fig. 4-11: Architektur-Elemente der distalen (alpenfernen) USM in der Tongrube Roggwil BE (aus Keller et al. 1990).

Rinnengurtel (RG), Durchbruchsfacher/-rinnen (DFR) und Überschwemmungsebenen mit Palaoboden (UPS). Weisse Pfeile: Übergang Durchbruchsrinne – Durchbruchsfacher.

Die Verteilung der verschiedenen Architektur-Elemente in einem N-S Schnitt durch die USM ist in Figur 4-12 schematisch dargestellt. Daraus geht hervor, dass die höchsten Ton- und Mergelsteinanteile im Gebiet von ehemaligen Alluvialebenen zwischen den Schuttfächern und dem axialen Rinnensystem vorkommen. Dieses Modell der alluvialen Architektur der USM wird durch kombinierte sedimentologische und seismofazielle Untersuchungen bestätigt (Schlunegger et al. 1997). Die regionale Verbreitung der verschiedenen Architektur-Elemente ist jedoch im Detail nicht bekannt.

Die verschiedenen Architektur-Elemente zeigen erwartungsgemäss ein sehr breites lithologisches Spektrum. Es begründet sich einerseits durch sedimentologische Unterschiede, vor allem infolge der hydrodynamischen Sortierungseffekte, andererseits durch diagenetische Veränderungen, in erster Linie die sehr unterschiedliche Calcit-Zementation. Die einzelnen Architektur-Elemente sind wie folgt zusammengesetzt:

- | | |
|--|---|
| (1) Rinnengürtel | Mittel- und Grobsandsteine |
| (2) Durchbruchsfächer und -rinnen | Mittel- und Feinsandsteine |
| (3) Uferwälle und Überschwemmungssande | Sandsteine und Grobsiltsteine |
| (4) Überschwemmungsebenen mit Paläoböden | Schlamm- und Mergelsteine |
| (5) Lakustrische Ablagerungen | Mergelsteine, Süsswasserkalke, lokal Gips (meist geringmächtig) |

Untere Süsswassermolasse (USM)

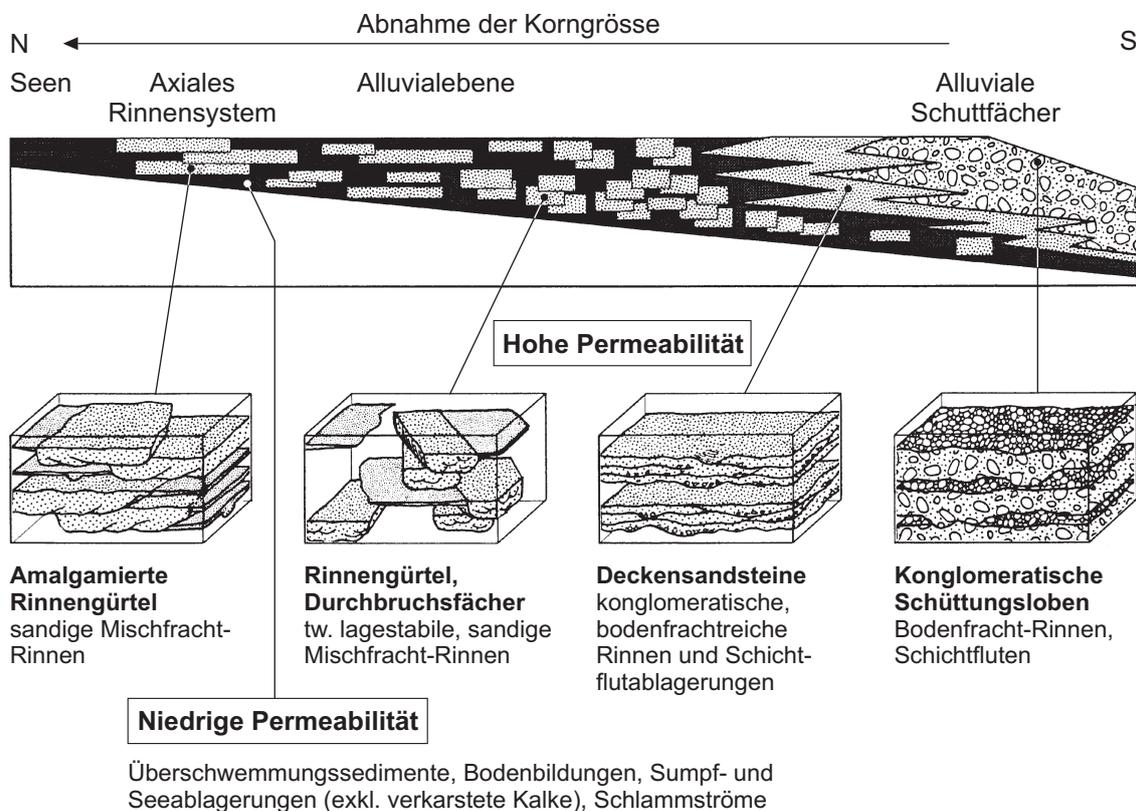


Fig. 4-12: Schematischer N-S Schnitt durch die USM (nach Keller 1992).

Der mittlere Tonmineral/Glimmer-Anteil der einzelnen Architektur-Elemente der USM variiert zwischen rund 20 % (Rinnengürtel und Durchbruchsfächer und -rinnen) und 45 % (Sedimente der Überschwemmungsebene). Detailliertere Angaben zur übrigen Mineralogie sind in Keller et al. (1990) enthalten. Der Hauptanteil der Tonminerale besteht aus Illit und Chlorit. Der Smektit-(Montmorillonit-)Anteil an der Tonmineral-Fraktion beträgt im Mittel 25 % (Peters et al. 1972). Die in der USM vorhandene Rotfärbung einzelner Lagen ist durch Oxidationsprozesse bei der Bodenbildung kurz nach der Ablagerung bedingt. Diese Lagen enthalten Eisenhydroxide und Hämatit. Pyrit ist in den grau- und grüngefärbten Lagen vorhanden.

Während der Kompaktion der Molasse hat eine grossräumige Durchmischung der Porenwässer in der Molasse stattgefunden, die zur Zementation von Teilen des Porenraums der Sandsteine durch Calcit und porenwandbedeckende authigene Tonminerale geführt hat (Matyas 1998). Der Grad der Zementation variiert von praktisch zementfrei bis vollständig zementiert (Fig. 4-13). Entsprechend variieren die hydraulischen Durchlässigkeiten der Sandsteine um mehrere Grössenordnungen (siehe unten).

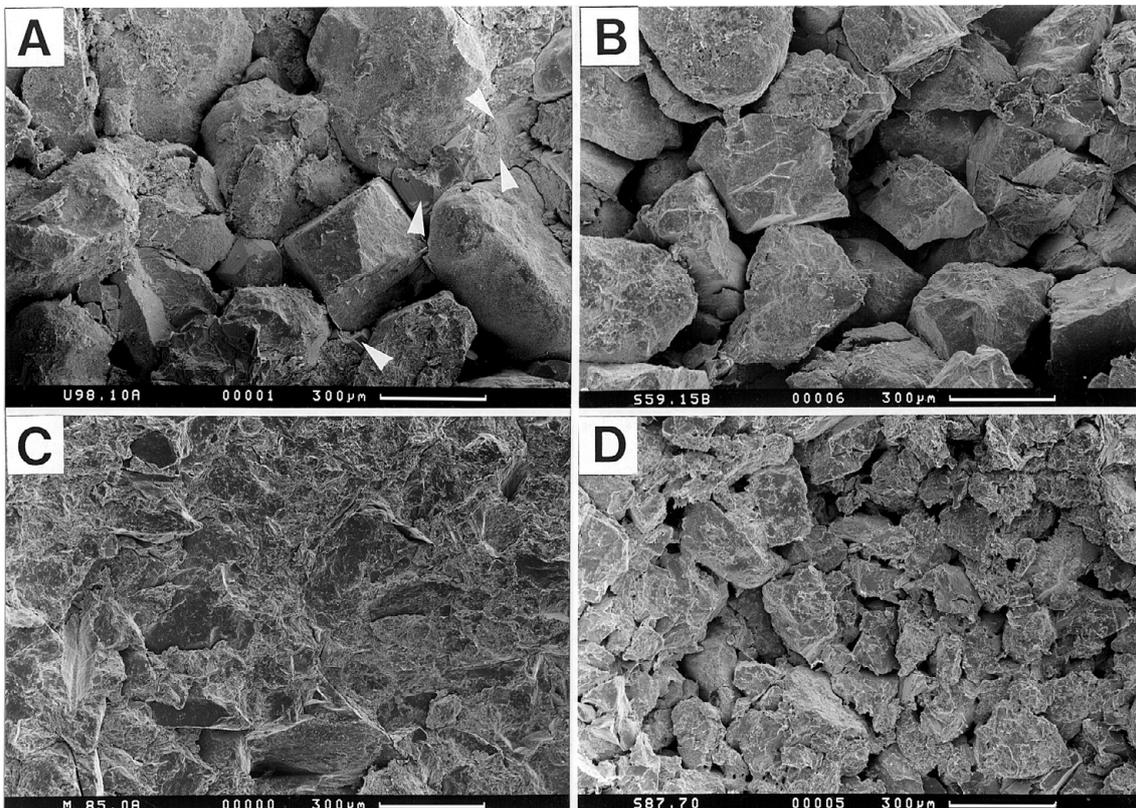


Fig. 4-13: Poröse und zementierte Sandsteine der USM (aus Keller et al. 1990).

A) Gering poröser Rinnengürtel-Sandstein mit diagenetischem intergranularem Calcit-Zement (weisse Pfeile), B) Poröser, unzementierter Rinnengürtel-Sandstein, C) Feinsandstein eines Durchbruchfächers mit geringer Porosität infolge Tonmatrix und Calcit-Zement, D) Poröser Feinsandstein eines Durchbruchfächers.

Hydraulische Eigenschaften

In der USM sind gering durchlässige siltig-tonige Gesteinsabfolgen (v.a. Überschwemmungssedimente und Paläoböden) zwar weit verbreitet, doch können sie lokal von höherdurchlässigen

unregelmässig verlaufenden und z.T. vertikal verbundenen Sandsteinrinnen (Relikte mäandrierender Flusssysteme) durchzogen sein (Fig. 4-10 und 4-12). Als Transportbarriere für ein geologisches Tiefenlager kommen ausschliesslich geringdurchlässige feinkörnige Abfolgen mit genügender lateraler Ausdehnung und Mächtigkeit in Frage, wie sie vor allem im alpenfernen Bereich der Vorlandebenen vorkommen (Meier 1994a, Schlunegger et al. 1997).

Die hydraulischen Eigenschaften der USM sind in Keller (1992) und Küpfer (2005) umfassend dargestellt und diskutiert. Von der USM im schweizerischen Mittelland existiert ein qualitativ und quantitativ eher heterogener hydrogeologischer Datensatz, der an einzelnen Aufschlüssen (Bohrungen, Untertagebauten, Tongruben) für verschiedene Zielsetzungen erhoben worden ist. Bedingt durch die spezifische Zielsetzung und Explorationsstrategie der Erdölindustrie widerspiegeln die hydraulischen Tests in den Öl- und Gasbohrungen vor allem die Eigenschaften der sandsteinreichen Zonen. Hinsichtlich der Verteilung und Mächtigkeit der Architekturelemente, insbesondere der potenziell geringdurchlässigen tonigen Abfolgen (Elemente UPS/LAK), sind die Angaben jedoch repräsentativ, da die bohrlochgeophysikalischen Logs im allgemeinen lückenlos das ganze Molasseprofil abdecken. Aus den Datenkompilationen von Keller (1992) und Küpfer (2005) ist erkennbar, dass die horizontale hydraulische Durchlässigkeit der Rinnengürtel und Durchbruchsfächer und -rinnen der USM um mehrere Grössenordnungen höher liegt (10^{-9} bis 10^{-4} m/s) als die im vorliegenden Bericht bei 10^{-10} m/s festgelegte Mindestanforderung an ein Wirtgestein für eine HAA-Tiefenlager. Beobachtungen in Tunnel in der USM bestätigen das Bild, dass Rinnensandsteine bevorzugte Fliesswege darstellen (Küpfer 2005). Je nach Grad der diagenetischen Zementation wirken die Sandsteine als Poren- oder Kluftwasserleiter (Keller et al. 1990). Von den feinkörnigen Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) liegen nur wenige hydraulische Kennwerte vor. Die K-Werte liegen im Bereich von 10^{-11} bis 10^{-8} m/s.

Im Gebiet südlich Pfaffnau (Kanton LU) wurden innerhalb eines Gebiets von rund 0.7 km^2 vier Gas-Explorationsbohrungen durch die USM abgeteuft. Dabei wurden ausgewählte sandsteinreiche Zonen im Hinblick auf ihre Gasspeicher-Eigenschaften in situ getestet und z.T. für Labortests gekernt (vgl. Fig. 14 in Küpfer 2005). Die Testergebnisse zeigen, dass die hydraulische Durchlässigkeit dieser Sandsteinschichten generell recht hoch ist. Sandige Schichtglieder wurden in allen vier Bohrungen Pfaffnau-Süd über die ganze USM-Strecke angetroffen. Sie sind aber lateral auch über die relativ kurzen Distanzen nicht korrelierbar, d.h. sie gehören geometrisch kleinräumigeren Architekturelementen an. Daraus müsste gefolgert werden, dass in diesem Gebiet kein ausreichend homogener, hydrogeologisch geeigneter Gebirgskörper mit einer typischen Mächtigkeit von 100 m und einer Fläche von einigen km^2 identifiziert werden könnte, der für ein geologisches Tiefenlager ausreicht. Auch wenn die hydraulischen Tests selektiv angesetzt wurden, ist die Wahrscheinlichkeit aufgrund der sehr kurzen und wenigen Teststrecken gross, dass sich zwischen bereits identifizierten, durchlässigen Zonen weitere solche befinden. Im Gebiet Pfaffnau lassen sich seismofaziell zwar keine eindeutigen, mächtigeren und potenziell tonreichen Abfolgen ausscheiden (Meier 1994a), die hydraulischen Test liefern aber wertvolle Angaben über die Durchlässigkeitsbandbreite der USM-Sandsteine (siehe auch nachfolgende Diskussion).

Aus den Explorationsbohrungen und den seismischen Profilen der Erdölindustrie sowie den Untersuchungen der Nagra geht hervor, dass in der USM mehr als 100 m mächtige tonreiche Gesteinsabfolgen vorkommen, die generell als potenzielle Wirtgesteine mit geringer hydraulischer Durchlässigkeit in Frage kommen. Detaillierte stratigraphische Aufnahmen zeigen allerdings, dass innerhalb solcher Abfolgen mehrere Meter mächtige Sandsteinbänke vorkommen, die vermutlich keine Wirtgesteineigenschaften aufweisen. Entsprechende Beispiele liefern die Erdölbohrungen im westlichen Mittelland (Meier 1994b), oder das Profil Talent Süd durch die *Marnes bariolées s.str.* in Figur 8 in Strunck & Matter (2002). Detailliertere Angaben finden sich in Kapitel 5.4.2.

Eine quantitative Abschätzung der grossräumigen vertikalen Durchlässigkeit der USM als Deckschicht des Malm-Aquifers wurde von Prestel (1990) aufgrund von kombinierten hydraulisch-hydrochemischen Berechnungen im Süddeutschen Molassebecken durchgeführt. Er weist nach, dass die bisher publizierten K_v -Werte von $10^{-8} - 10^{-9}$ m/s mit dem hydrochemischen Datensatz nicht erklärbar sind. Die von Prestel abgeleiteten konsistenten mittleren Werte liegen im Bereich von $10^{-11} - 10^{-12}$ m/s und sind damit eher vergleichbar mit den Abschätzungen von Lemcke & Tunn (1956) aufgrund des Absinkens des OMM-Salzwassers im süddeutschen Molassebecken (K_v -Werte von $10^{-10} - 10^{-11}$ m/s). Für den Einschluss bzw. die Rückhaltung von Radionukliden und damit die Langzeitsicherheit spielen aber vor allem die erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten präferenzialer Fliesspfade und die generell höheren horizontalen K -Werte eine wichtige Rolle.

Aufgrund der heute vorliegenden Datenbasis besteht ein erhebliches Risiko, dass sich die USM bei einer näheren Betrachtung insgesamt als zu durchlässig erweist, respektive dass die Ausdehnung der geringdurchlässigen tonreichen Partien ohne Sandsteineinlagerungen für die Erstellung eines HAA-Tiefenlagers sehr knapp bis ungenügend ist.

Selbstabdichtung

Aufgrund des relativ hohen Smektit-Anteils in der Tonfraktion kann im Sinne von Analogieschlüssen davon ausgegangen werden, dass die Sedimente der Überschwemmungsebenen eine gewisse Kapazität zur Selbstabdichtung von natürlichen und induzierten Diskontinuitäten besitzen. Die Selbstabdichtung könnte aber durch Verschleppung von sandigen Partien in die Störungen während ihrer Bildung beeinträchtigt sein.

Geochemische Bedingungen

Die hydrochemischen Verhältnisse im schweizerischen Molassebecken sind geprägt durch eine schichtförmige Abfolge von oberflächennahen Ca-HCO₃-Wässern, gefolgt von eiszeitlich infiltrierten Na-HCO₃-Wässern und – in grösseren Tiefen – noch älteren, mässig salinen Na-Cl-, Na-Cl-HCO₃- oder Na-Cl-SO₄-Wässern (Schmassmann 1990, Pearson et al. 1991). Die Schichtung der Wassertypen verläuft schief zu den Formationsgrenzen. Wasserproben aus grösserer Tiefe existieren nur von durchlässigen, sandsteinreichen Zonen der USM und der OMM. Das Porenwasser in den tonigen Abfolgen ist wie dasjenige der Sandsteine massgeblich durch die Mineralogie bestimmt (ausgenommen die Salinität). Wegen der qualitativ ähnlichen Mineralogie dürften sie sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden, insbesondere nicht in grösserer Tiefe, wo die Grundwasserzirkulation sehr langsam ist und genügend Zeit für eine Durchmischung oder diffusiven Austausch besteht.

Der Übergang vom Na-HCO₃-Typ zum Na-Cl-Typ erfolgt im zentralen bis östlichen Mittelland in einer Tiefe von 300 bis 700 m (siehe hydrochemisches N-S-Profil in Schmassmann 1990, Fig. 50). Die detailliertesten Analysen dieser beiden Wassertypen wurden an Wasserproben aus der Mineralwasserbohrung Aquì (Na-HCO₃-Wasser aus der OMM) und aus der Sondierbohrung Schafisheim (Na-Cl-Wasser aus der USM) durchgeführt. Das Na-HCO₃-Wasser hat eine Gesamtmineralisation von ungefähr 1 g/l und ist wahrscheinlich reduzierend¹³, das Na-Cl-Wasser aus der Bohrung Schafisheim ist mit einem Eh-Wert von -0.15 V nachweislich reduzierend und seine Gesamtmineralisation beträgt ca. 9 g/l (Pearson et al. 1989). Der

¹³ Der gemessene Eh-Wert von +0.32 V (Schmassmann 1990) ist sehr wahrscheinlich durch eine starke Absenkung des Grundwasserspiegels beim Pumpbetrieb bedingt. Spuren von Schwefelwasserstoff lassen eher reduzierende Verhältnisse vermuten, was für ein derartiges Wasser zu erwarten ist (Dr. L. Eichinger, Hydroisotop GmbH, mündliche Mitteilung 12.8.2004).

Chemismus der Tiefengrundwässer kann als günstig bezeichnet werden. Es wird erwartet, dass die Redox-Pufferkapazität der nicht oxidierten grauen und grünen Schichten der Molasse genügend gross ist, um grossräumig permanent reduzierende Verhältnisse zu erzeugen.

Die geochemischen Verhältnisse im Bereich der Na-Cl-Wässer werden längerfristig als relativ stabil erachtet. Langsame Übergänge vom Na-Cl-Typ zum Na-HCO₃-Typ, oder umgekehrt (je nach Richtung der hydraulischen Gradienten und der Lagertiefe), sind nicht ausgeschlossen, sind aber für die Langzeitsicherheit nicht kritisch.

Für die Sorptionseigenschaften der USM sind die Eigenschaften der tonigen Partien der Molasse günstig und mit denjenigen des Opalinuston vergleichbar. Für die sandsteinreichen Partien werden aufgrund der geringeren Tonmineralgehalte weniger gute Sorptionskapazitäten erwartet.

Lagerbedingte Einflüsse

Bei den lagerbedingten Einflüssen ist die Bildung der Auflockerungszone vermutlich der bedeutendste Effekt. Ein gewisses Mass an Selbstabdichtungsvermögen wird in den tonreichen Partien aufgrund der lithologischen Beschaffenheit der USM erwartet.

Die Maximaltemperatur, welche die Gesteine der USM während der maximalen Versenkung im späten Tertiär erfahren haben, hängt von der aktuellen Tiefenlage und Nähe zum Alpenraum ab (Schegg 1992, Schegg & Leu 1998). Sie liegt im nördlichen Teil des Molassebeckens in rund 500 m Tiefe im Bereich von 45 bis 55 °C, gegen Süden und in Tiefen unterhalb 500 m kann sie auf 80 °C ansteigen (W. Leu, Geoform AG, schriftliche Mitt. 12.8.2004). Die Empfindlichkeit gegenüber lagerinduzierten Temperatureffekten ist somit standortabhängig; sie wird nicht als kritisch eingestuft.

Aufgrund der gegenüber dem Opalinuston generell höheren hydraulischen Durchlässigkeit der USM wird die Freisetzung von im Lager gebildeten Gasen bei geringeren Gaseintrittsdrücken erfolgen als im Opalinuston, was günstig ist.

4.4.3 Bautechnische Machbarkeit

Aufgrund verschiedener Tunnelbauten in der USM besteht eine breite Erfahrung hinsichtlich bautechnischer Machbarkeit in dieser Formation. Insgesamt sind die bautechnischen Verhältnisse günstiger als im Opalinuston. In den tonreichen Abfolgen werden aber vergleichbare geotechnische Eigenschaften erwartet.

Als problematisch wird die lokal sehr ausgeprägte natürliche Gasführung der USM bewertet. In der Bohrung Pfaffnau Süd-1 wurden während eines mehrtägigen Gastests ohne Druckabnahme rund 40'000 m³ Gas abgefackelt, insgesamt während der Bohrung mehrere 100'000 m³ (Kopp 1965, Lemcke et al. 1968). Die anderen Bohrungen im Gebiet Pfaffnau erwiesen sich aber als nicht fündig. In einem Überblick über Erdgasindikationen in der Schweiz (Greber et al. 1995), welche als Grundlage für die Risikoabschätzung bei Untertagebauten dient, kommt die potenzielle Gasführung der USM deutlich zum Ausdruck.

4.4.4 Belastbarkeit der Aussagen

Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen

Innerhalb des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahre werden die Barriereneigenschaften der USM in günstiger geologischer Situation als wenig empfindlich gegenüber geologischen Langzeitveränderungen eingestuft. Am ehesten sind – wegen der gegenüber dem Opalinuston signifikant höheren hydraulischen Durchlässigkeit – gewisse Veränderungen bei der Porenwasserchemie zu erwarten, die aber nicht als kritisch betrachtet werden. Die reduzierenden Verhältnisse werden als stabil eingeschätzt.

Charakterisierbarkeit

In der USM stellen die Rinnensandsteine und Durchbruchrinnen und -fächer bevorzugte Wasserflusswege höherer hydraulischer Durchlässigkeit dar (Kap. 4.4.2). Ihre Erkennung bei der Exploration von der Oberfläche aus ist deshalb einer der kritischsten Aspekte dieser Gesteinsformation. Das Einengungsverfahren der Sedimentoptionen in der Schweiz in den 90er Jahren, insbesondere auch die Zurückstellung der USM als Reserveoption, basierte auf einer Beurteilung der Exploration mit Tiefbohrungen und 2D-Seismik. Der Nachweis des Nichtvorhandenseins von Sandsteinrinnen, resp. die Bestimmung ihrer lateralen Ausdehnung und hydraulischen Konnektivität wurde als schwierig beurteilt (Andrews et al. 1992, Nagra 1994b, HSK 2001).

In der Kohlenwasserstoff-Exploration entwickelte sich inzwischen die 3D-Seismik zu einem erfolgreichen routinemässig eingesetzten Verfahren, und es gelang unter anderem, Rinnenfüllungen alter mäandrierender Flusssysteme in mehreren hundert Metern Tiefe abzubilden (z.B. Burnett 1996). Im Sinne einer Neubeurteilung¹⁴ wurde deshalb eine Studie durchgeführt, welche zum Ziel hatte, die Explorierbarkeit der USM mit Hilfe der 3D-Seismik und moderner Interpretationsmethoden aufgrund der heutigen Kenntnisse und anhand von Datensätzen von Bohrungen in der Ost- und Westschweiz zu prüfen (Hölker & Graf 2004).

Dazu wurden zwei stochastische Faziesmodelle realisiert, die einerseits die typische USM der Westschweiz (Datensätze aus den Bohrungen Fendingen-1, Courtion-1, Chapelle-1 und Tschugg-1 in Meier 1994b) und andererseits die typische USM im östlichen Mittelland (Bohrung Bassersdorf in Blaser et al. 1994, Bohrungen Lindau-1 und Herdern-1 in Meier 1994a) simulieren. Die simulierten Architekturelemente sind Rinnengürtel (RG), Uferwälle (UW), Durchbruchfächer und -rinnen (DFR) sowie Überschwemmungsebenen (UPS). Aus den beiden 3D-Faziesmodellen wurde jeweils ein 5 km langer Schnitt herausgenommen, für welchen stochastische Impedanzmodelle (abgeleitet aus Geschwindigkeits- und Dichtemodellen) erstellt wurden (Fig. 4-14). Die Vorgaben für die stochastischen Simulationen folgen Angaben in den Berichten von Keller et al. (1990) (Dimension, Mittlere Dichte und Standardabweichungen der verschiedenen Architekturelemente) sowie Interpretationen in Meier (1994a, b) (Verteilung der Architekturelemente in den Bohrungen). Als Basis für die Geschwindigkeitsmodelle wurde das Sonic-Log von Bassersdorf verwendet, da Labormessungen an Gesteinsproben der einzelnen Faziestypen nicht verfügbar sind. Auf der Basis dieser Geschwindigkeits- und Dichtemodelle wurden synthetische seismische Profile berechnet (Fig. 4-14), die im Hinblick auf seismische Fazies sowie die Erkennbarkeit von Rinnengürteln diskutiert wurden. Die Faziesmodelle Ost und West zeigen, dass im Osten weniger grossräumige Differenzie-

¹⁴ In einer älteren Studie von Nold (1992) wurden ebenfalls die Möglichkeiten und Grenzen der Seismik bei der Abgrenzung von fazialen Architekturelementen in der USM diskutiert. Damals mussten aufgrund geringerer Rechnerkapazitäten relativ einfache Modelle verwendet werden, welche die Komplexität der USM nicht vollumfänglich berücksichtigen konnten.

rungen in sandsteinarme und sandsteinreiche Bereiche möglich sind als im Westen, wo die *Marnes bariolées* im Chattian eine über grössere Distanzen korrelierbare tonreiche Abfolge darstellen (vgl. Kap. 5.4.2).

Bei der Berechnung der synthetischen seismischen Profile wurde von idealen Voraussetzungen betreffend der Oberflächenverhältnisse ausgegangen (flache Topographie, keine Komplikationen durch quartäre Ablagerungen). Zusammenfassend kommen Hölker & Graf (2004) zu folgenden Schlussfolgerungen:

Die USM des Schweizer Mittellands ist keine ideale Formation für eine Exploration mittels 3D-Seismik. Die Heterogenität der USM existiert in einem Massstab, der an der Grenze des Auflösungsvermögens der Seismik ist. Eine Exploration erscheint nur möglich, wenn anstelle einer konventionell-strukturellen Interpretation vorrangig die Interpretation der seismischen Fazies und Attribute steht. Allerdings kann die Interpretierbarkeit durch eine ungünstige Konstellation der quartären Lockersedimente und der Geländebedingungen wie Topographie, Bewuchs und Nutzung erheblich beeinträchtigt werden.

Die Betrachtungen der theoretischen Grenzen der absoluten Auflösungsgenauigkeit zeigen, dass die einzelnen Architektur-Elemente der USM (Rinnengürtel, Durchbruchsfächer, Überschwemmungsebenen, etc.) nicht einzeln aufgelöst werden können, da sie zu klein sind im Vergleich zu den dominanten Wellenlängen der Seismik. Eine Kartierung der USM mittels Seismik erscheint nur nach Faziesbereichen möglich, d.h. dass ton- und siltsteindominierte Bereiche grundsätzlich von sandsteindominierten Bereichen unterschieden werden können. Die Verlässlichkeit solch seismisch-fazieller Betrachtungen kann jedoch durch drei Faktoren wesentlich beeinträchtigt werden:

- Ein Formations-spezifisches Risiko sind nicht erkennbare Sandsteinlagen in ton- und siltstein-dominierten Bereichen. Grössere Sandsteinlagen aus Rinnengürtelablagerungen sind zwar bedingt erkennbar; geringer mächtige Sandsteineinschaltungen, z.B. aus Durchbruchsfächern, hingegen nicht.
- Ein Quartär-spezifisches Risiko besteht in der Verschlechterung des seismischen Signals durch Streuung des Wellenfeldes in quartären Lockersedimenten, an der Quartärbasis und an der Geländeoberfläche. Diese Problematik wurde für diese Studie aber explizit ausgeklammert. Die seismischen Modelle simulieren vielmehr den Idealfall der Abbildbarkeit.
- Ein Akquisitions-spezifisches Risiko ist die Beeinträchtigung der Abbildungsqualität durch nicht zugängliche Bereiche an der Oberfläche (z.B. Siedlungen) sowie Bereiche mit mangelhafter Signalankopplung.

Die Studie zeigt aufgrund der verwendeten Bohrloch-Logs weiter, dass sandsteinfreie Bereiche von mehr als 30 bis 50 m Mächtigkeit selten sind. Die seismischen Modelle zeigen, dass Rinnengürtel unter manchen Umständen abgebildet werden, aber auch seismisch transparent sein können. Dies bedeutet, dass die Existenz von mächtigen Sandsteinlagen in einem möglichen Zielgebiet trotz fehlender Abbildung bei reflexionsseismischen Messungen nicht ausgeschlossen werden kann. Die Wahrscheinlichkeit, bei späteren Bohrungen oder beim Bau von Kavernen unerwartet auf Sandsteinlagen zu stossen, ist erheblich. D.h. auch bei positiven Explorationsbefunden kann letztlich nicht ausgeschlossen werden, dass unentdeckte Sandsteinlagen existieren, die erst beim Bau eines Tiefenlagers oder gar nicht entdeckt würden.

Eine allfällige Exploration der USM mittels 3D-Seismik müsste in einem Gebiet mit sehr einfachen quartärgeologischen Verhältnissen stattfinden und würde eine grosse Anzahl von Bohrungen bedingen. Sie wäre mit dem Risiko verbunden, auch bei positivem Befund keine belastbaren Aussagen bezüglich der Absenz von Sandsteinlagen machen zu können.

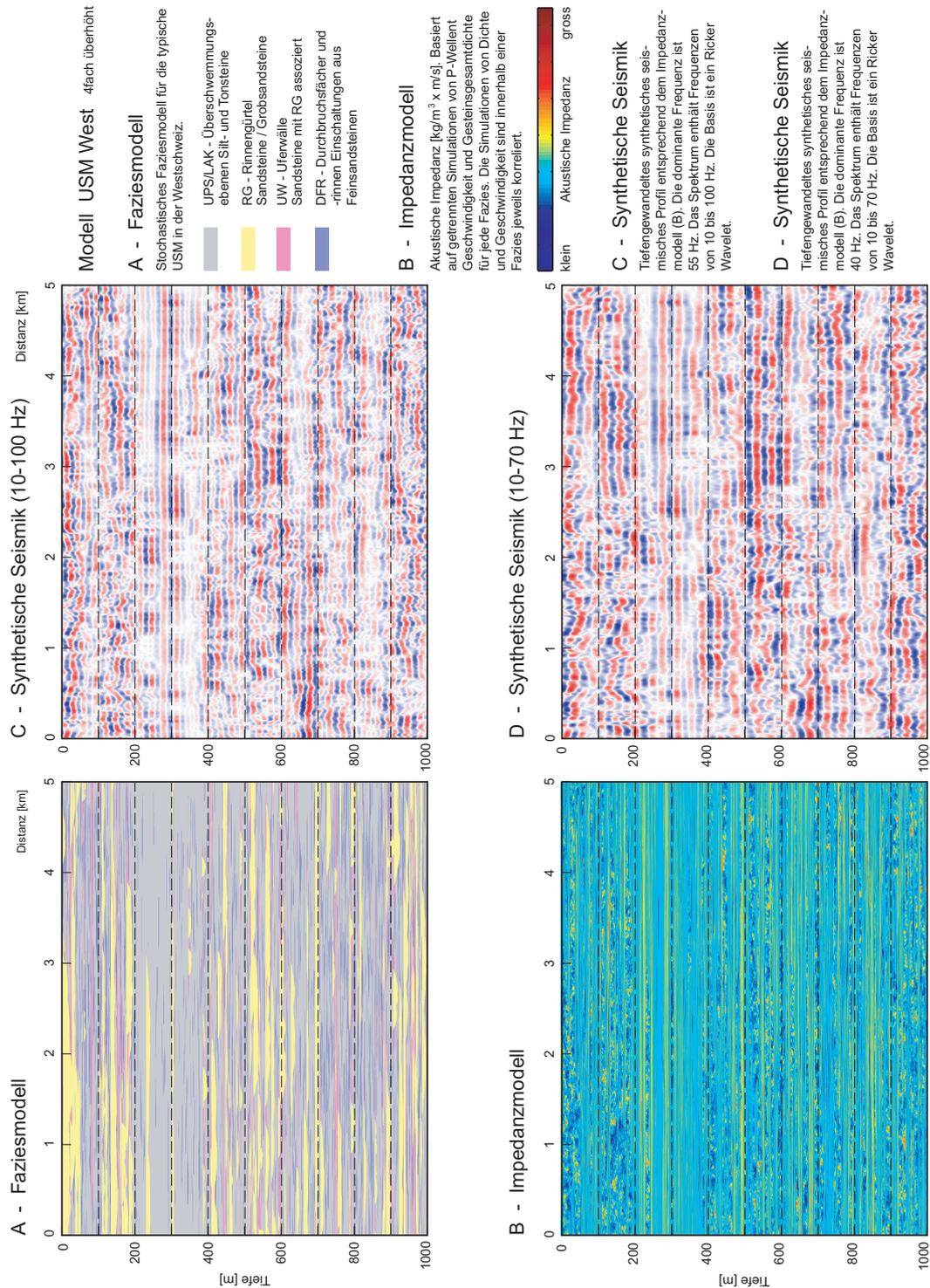


Fig. 4-14: Seismisches Modell USM West (aus Hölker & Graf 2004).

Auf der Basis eines Faziesmodells der USM (A) wurde ein akustisches Impedanzmodell (B) entwickelt und synthetische Seismogramme mit unterschiedlichen Frequenzgehalt berechnet (C, D). Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Rinnensandsteine auch unter idealen Oberflächenbedingungen nicht zuverlässig abgebildet werden können. Überschwemmungsebenen mit geringem Sandsteinanteil erscheinen in den Sektionen seismisch transparenter. Die seismischen Daten können deshalb eine Indikation über die Verteilung solcher Überschwemmungsebenen geben.

Internationale Erfahrungen

In anderen Ländern gibt es keine Entsorgungsprogramme, in welchen fluvio-terrestrische Sedimentgesteine für die Lagerung hochaktiver Abfälle in Betracht gezogen werden. Hauptgründe sind die Heterogenität solcher Formationen, mit Vorkommen von durchlässigen Sandsteinkörpern mit erwarteter reduzierter Barrierenwirkung sowie deren schwierige Explorierbarkeit. Bei den heute international untersuchten tonreichen Ablagerungen handelt es sich um Tongesteine, welche in einem marinen Ablagerungsmilieu entstanden sind. Bei der Beurteilung der Wirtgesteinsoption USM kann somit nicht auf internationale Erfahrung zurückgegriffen werden. Es ist zu erwarten, dass eine Molasse-Option wegen der offensichtlichen Gesteins-Heterogenität in einer internationalen Expertise kritisch beurteilt würde. Entsprechende Erfahrungen hat die Nagra bereits im Rahmen der Präsentation der Nagra-Sedimentstudie (1988 bis 1994) im internationalen Umfeld gemacht.

4.5 Verbreitung der möglichen Wirtgesteine

Zur Gewährleistung eines langfristig wirksamen Einschlusses ist einerseits eine Mindestüberdeckung des Lagers durch Festgestein erforderlich. Andererseits beschränkt die bautechnische Machbarkeit den Tiefenbereich nach unten. Die aus sicherheits- und bautechnischen Überlegungen abgeleiteten minimalen und maximalen Tiefen (vgl. Kap. 2.2) betragen für Sedimentgesteine 400 m und 900 m unter Terrain sowie 400 m und 1200 m unter Terrain für das Kristallin.

Die Verbreitung der möglichen Wirtgesteine in diesen Tiefenbereichen ergibt sich einerseits aus ihrer erdgeschichtlichen Entstehung (Alter resp. Position innerhalb der stratigraphischen Schichtfolge, vgl. Fig. 4-1) und andererseits aus ihrer tektonisch bedingten Lagerung. Die entsprechende Wirtgesteinsabfolge lautet von unten nach oben:

- Kristallin-Gesteine des Grundgebirges, welche als südliche Fortsetzung des Schwarzwaldmassivs den Sockel der Nordschweiz bilden,
- Opalinuston innerhalb des mesozoischen Deckgebirges,
- Tonreiche Gesteine der USM im Bereich des Molassebeckens.

Am Nordrand des Molassebeckens und im angrenzenden Tafeljura, also im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum, fallen die Oberfläche des Grundgebirges und damit auch die Gesteine des darüber liegenden Deckgebirges generell leicht nach Südosten ein, d.h. sie liegen in dieser Richtung in zunehmender Tiefe (Fig. 4-15). Im Kristallin wurden erst ab Tiefen von rund 500 m unter der Kristallinoberfläche mächtigere Gesteinspakete mit der erforderlichen geringen hydraulischen Durchlässigkeit angetroffen (vgl. Kap. 4.2.2). Aus den geometrischen Schnitten der möglichen Wirtgesteinsformationen mit den sicherheits- und bautechnisch vorgegebenen, minimalen und maximalen Tiefen (unter Terrain) lassen sich die Bereiche für mögliche Standortgebiete ermitteln (Fig. 4-15). In die geographische Karte übertragen, zeichnen sich diese Bereiche als mehr oder weniger Nordost-Südwest-orientierte Streifen ab (Fig. 4-16).

Im Verbreitungsraum werden mögliche *Konflikte infolge allfälliger Nutzung natürlicher Rohstoffe* wie folgt beurteilt:

- Die Nutzung der *Erdwärme* ist grundsätzlich überall möglich; es gibt jedoch bevorzugte Gesteinseinheiten und Regionen. Eine neue Bewertung der geothermischen Nutzung ist im Gang. Ergebnisse liegen zur Zeit erst aus dem Gebiet der zentralen und östlichen Nordschweiz vor (Signorelli et al. 2004): Folgende Aquifere sind im Gebiet der zentralen und

östlichen Nordschweiz im Hinblick auf die geothermische Nutzung interessant: Die Obere Meeresmolasse, der Obere Malm, der Obere Muschelkalk und das so genannte 'verwitterte' Kristallin. Eine leichte Wärmeflussanomalie ist im Bereich des unteren Aaretals erkennbar (Fig. 5 in Signorelli et al. 2004). Das 'verwitterte' Kristallin wird langfristig als Möglichkeit für die EGS-Nutzung (Enhanced Geothermal Energy: Nutzung im Temperaturbereich $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) betrachtet. Deshalb sind in der Nordschweiz Gebiete, in denen das Kristallin in grosser Tiefe vorkommt, d.h. unter den tiefen Permokarbontrögen, am interessantesten (Fig. 23 in Signorelli et al. 2004).

- Die *Permokarbon-Vorkommen* im Grundgebirge bergen ein gewisses Rohstoff-Potenzial (Kohle, Kohlenwasserstoffe). Die Abbauwürdigkeit ist jedoch nur punktuell gegeben und eine allfällige Nutzung auch in absehbarer Zukunft unwirtschaftlich.
- In der Unteren Süsswassermolasse ist die *natürliche Gasführung* unterschiedlich, z.T. jedoch signifikant (vgl. Kap. 4.4.3).
- *Mineral- und Thermalwassernutzungen* sind nur dort zu beachten, wo potenziell hydraulische Kurzschlüsse zwischen Fassungen und dem Wirtgestein denkbar sind (z.B. im durchlässigen Teil des kristallinen Grundgebirges). In geringdurchlässigen Wirtgesteinen wie dem Opalinuston ist diese Problematik nicht relevant. Eine zukünftige Nutzung von Aquiferen im Hangenden und Liegenden des Wirtgesteins wurde z.B. in der Sicherheitsanalyse zum Entsorgungsnachweis bereits untersucht und hat sich als unkritisch erwiesen (Kap. 7.6.3 in Nagra 2002c). Beim Bau eines Lagers müssten beim Durchqueren dieser Schichten mittels Schacht oder Rampe allerdings die im Untertagebau üblichen Vorsichtsmassnahmen (z.B. abdichtende Zementinjektionsbohrungen zur Vermeidung von Drainageeffekten) getroffen werden, vgl. Kap. 4.3.2 in Nagra 2002a).

Die oben diskutierten natürlichen Rohstoffvorkommen sind für alle Wirtgesteine im Verbreitungsraum von beschränkter Bedeutung und führen im Rahmen der hier vorgenommenen Beurteilung der geologischen Möglichkeiten zu keiner Einschränkung. Die Frage der Rohstoffkonflikte ist aber bei der Diskussion der möglichen Standorte in Zukunft weiter zu beachten.

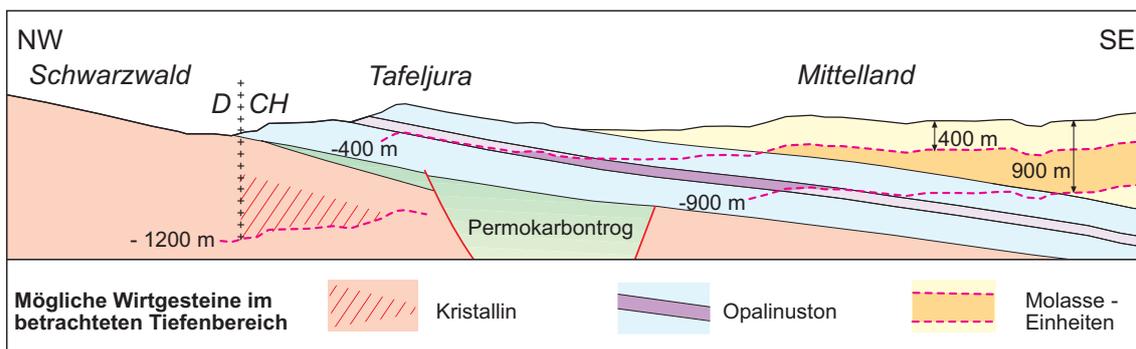


Fig. 4-15: Schematischer Profilschnitt durch die Nordschweiz zur Darstellung der Verbreitungsbereiche der möglichen Wirtgesteine (nicht massstäblich, stark überhöht).

Unter Berücksichtigung der Vorgaben betreffend bevorzugter Tiefe (unter Terrain) wird aus dieser Darstellung ersichtlich, welche Bereiche der möglichen Wirtgesteine prinzipiell in Frage kommen. Aus der lateralen Ausdehnung dieser Bereiche ergeben sich die in Figur 4-16 dargestellten Verbreitungsräume.

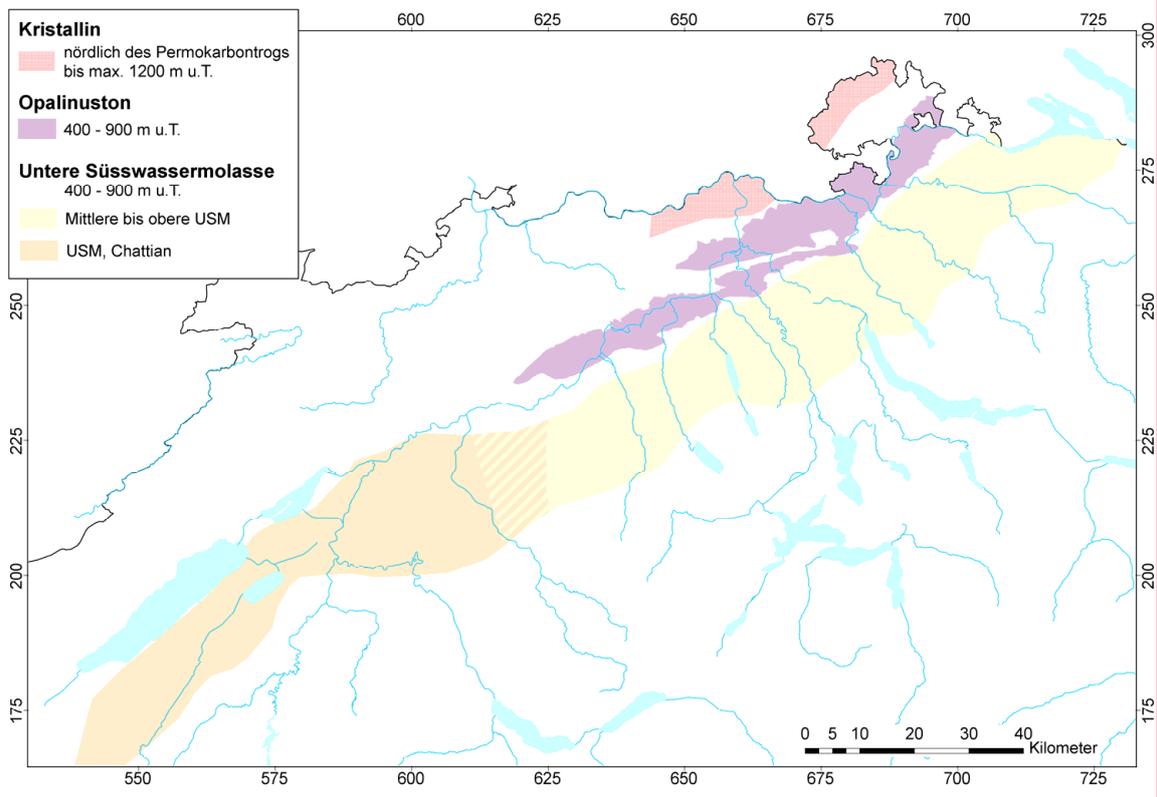


Fig. 4-16: Die Verbreitung der möglichen Wirtgesteine im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum unter Berücksichtigung der bevorzugten Tiefenlage unter Terrain.

Die Verbreitung ergibt sich aufgrund der in Figur 4-15 dargestellten struktureologischen Situation am Nordrand des Molassebeckens (durch Projektion der entsprechenden Profilabschnitte an die Geländeoberfläche).

5 Abgrenzung und Beschreibung möglicher Gebiete

5.1 Vorgehen

Die in Figur 4-16 abgegrenzten Verbreitungsräume möglicher Wirtgesteine werden hinsichtlich regionaler Unterschiede in der Barrierenwirkung der Wirtgesteine sowie Unterschieden bezüglich der geologisch-tektonischen Situation weiter gegliedert.

Als mögliche Gebiete gelten diejenigen, in welchen ein oder mehrere Teilgebiete mit genügender lateraler Ausdehnung des Wirtgesteins zur Anordnung der unterirdischen Lagerbauten vorkommen, und wo die lokale tektonische Situation (Deformationen, Zergliederung) und die lokale Ausbildung des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Zusammensetzung, Eigenschaften, Mächtigkeit) nicht ungünstig sind. Eine detailliertere Abgrenzung einzelner Teilgebiete wird im Rahmen des Sachplanverfahrens erfolgen, in welchem auch nicht-geologische Kriterien zur Anwendung kommen werden.

5.2 Kristallines Grundgebirge

5.2.1 Datengrundlage

Die Kenntnisse der geologisch-tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Grundgebirge der Nordschweiz basieren im Wesentlichen auf reflexionsseismischen Untersuchungen (mehrere hundert Kilometer 2D-Seismiklinien), sieben Tiefbohrungen der Nagra und mehreren Fremdbohrungen. Der Verlauf jüngerer, bis zur Oberfläche reichender Störungen wurde zudem anhand publizierter und in Bearbeitung stehender geologischer Karten ermittelt. Die Untersuchungen der Nagra erfolgten von 1981 bis 1993.

5.2.2 Gliederung des Verbreitungsraums

Im weiter betrachteten geologisch-tektonischen Grossraum (Fig. 3-3) konnten in der bevorzugten Tiefenlage (Fig. 4-16) aufgrund der regionalen geowissenschaftlichen Untersuchungen zwei grössere Gebiete abgegrenzt werden (Thury et al. 1994; vgl. Fig. 5-1): Ein Gebiet 'West' (Region Kaisten–Leuggern–Böttstein, AG) und ein Gebiet 'Ost' (Region Siblingen, SH). Beide Gebiete sind – mit Ausnahme einiger Aufschlüsse entlang des Rheins zwischen der Eggberg- und Vorwald-Störung – mit einem bis zu mehreren hundert Meter mächtigen Stapel von Sedimentgesteinen bedeckt. Beide Gebiete sind gegen Süden durch die tektonisch komplexe nördliche Randzone des Permokarbons begrenzt. Diese Zone fällt im Gebiet 'West' ungefähr mit der temperaturbedingten Tiefenbegrenzung zusammen.

In allen Tiefbohrungen der Nagra waren zumindest die obersten rund 500 m des kristallinen Grundgebirges stärker durchlässig (ein alter, triadischer Verwitterungshorizont). Man kann aber davon ausgehen, dass die Mächtigkeit dieser höher durchlässigen Zone lokal beträchtlich variieren kann. Aufgrund des heutigen Kenntnisstands sollte ein Tiefenlager mindestens 500 m unter der Kristallinoberfläche platziert werden.

Im Gegensatz zum Gebiet 'West', wo in den Bohrungen Böttstein und Leuggern mehrere 100 m mächtige Abschnitte mit gering durchlässigen Kristallingesteinen durchbohrt wurden, war das Kristallin im Gebiet 'Ost' in der Bohrung Siblingen bis zur Endtiefe höher durchlässig. Die hydrochemischen und isopenhydrologischen Befunde in den gering durchlässigen Abschnitten

der Bohrungen Böttstein und Leuggern weisen auf eine geringe Wasserzirkulation hin. Entsprechende Hinweise auf geringdurchlässige Blöcke sind in der Bohrung Siblingen nicht vorhanden. Die vorliegenden Informationen weisen insgesamt darauf hin, dass das kristalline Grundgebirge im ganzen Gebiet 'Ost' tektonisch stärker gestört und durchlässiger ist als im Gebiet 'West'. Aus diesem Grund wurde dem Gebiet 'Ost' zweite Priorität zugeordnet (Thury et al. 1994).

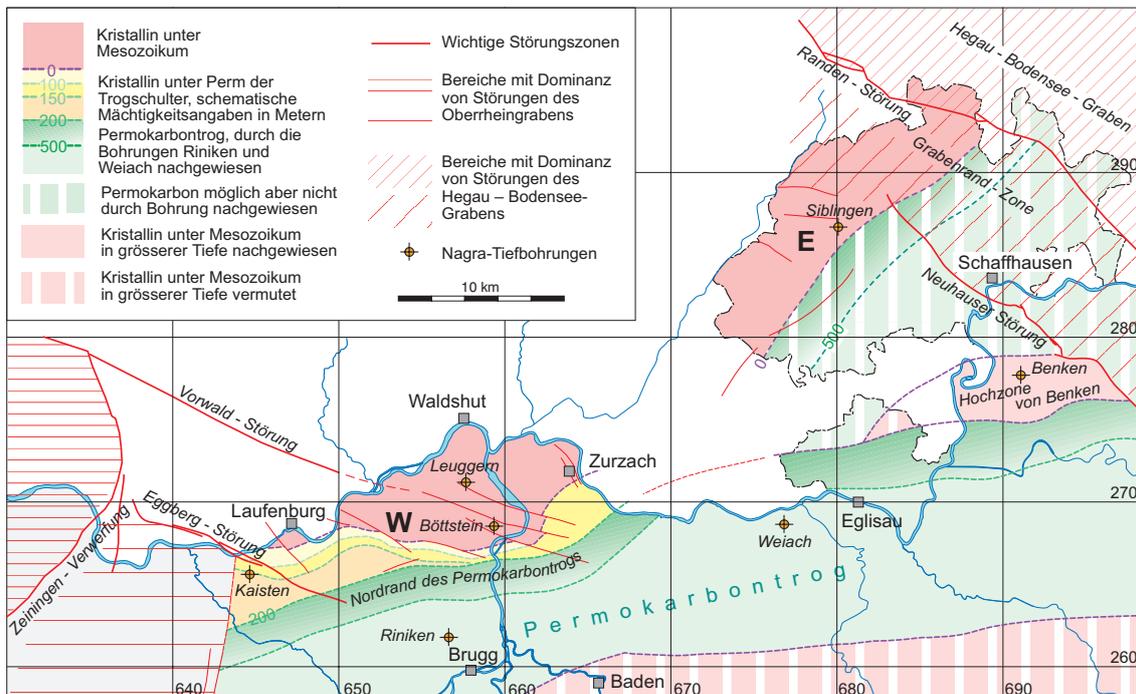


Fig. 5-1: Geologisch-tektonische Verhältnisse im Grundgebirge unter der Basis des Mesozoikums. Kristalline Gebiete 'West' (W) und 'Ost' (E).

Der Permkarbondropf begrenzt im Süden das auf Schweizer Gebiet in bevorzugter Tiefe liegende Kristalline des Grundgebirges. Dieses Kristalline ist die südliche Fortsetzung des Schwarzwaldmassivs, das hier unter einem nach Süden immer mächtiger werdenden Stapel mesozoischer Sedimentgesteine des Tafeljuras liegt (vgl. Fig. 4-4 und 4-15).

5.2.3 Beschreibung des Gebiets 'West'

Das Kristalline in bevorzugter Tiefenlage ist im Gebiet 'West' nach Westen durch die östlichsten Störungen der 'rheinisch' SSW-NNE orientierten Störungsstaffeln im Tafeljura, im Osten durch die Landesgrenze (Zurzach) und nach Süden durch den Nordrand des Permkarbondrops begrenzt. Das Kristalline ist im Gebiet 'West' durch seine geologisch-tektonische Entwicklung stark geprägt und von zahlreichen grösseren herzynischen SE-NW streichenden Störungen durchsetzt (Fig. 5-2), welche das Gebiet in Blöcke verschiedener Grösse zergliedert. In der Strukturkarte sind nur die grössten Störungen mit Indizien aus geologischen Karten und seismischen Profilen abgebildet. Dazwischen werden aufgrund der Erfahrungen in den Nagra-Tiefbohrungen der Nordschweiz zahlreiche weitere, z.T. wasserführende Störungen erwartet (Thury et al. 1994). Wegen der daraus resultierenden beschränkten Grösse der wenig gestörten Blöcke könnte es notwendig sein, das Lager in mehrere Kompartimente aufzuteilen, und im Extremfall könnten die Blöcke an einem bestimmten Standort so klein sein, dass sich kein Lager erstellen liesse.

Auch innerhalb der wenig deformierten Blöcke werden Klüfte und kleinere Störungszonen erwartet, welche die Barrierenwirkung des Kristallins einschränken. Wie in Kap. 4.2 diskutiert, ist die Exploration (Abklärung der Blockgrösse, Eigenschaften der Blöcke) wegen der Heterogenität und der Sedimentgesteinsüberdeckung schwierig, und die abschliessende Standortentscheidung verlangt voraussichtlich eine Exploration untertage. Bezüglich Langzeitstabilität bestehen aber, insbesondere auch wegen der Sedimentgesteinsüberdeckung für die nächste Million Jahre günstige Verhältnisse. Die bautechnische Machbarkeit im Kristallin bietet keine grundsätzlichen Probleme (vgl. Kap. 4.2). Die Behörden sehen im von der Nagra vertieft untersuchten Gebiet Böttstein-Leuggern jedoch eine weitere Problematik in der vergleichsweise kurzen Distanz zu den Thermalwasserbohrungen von Zurzach (möglicher Nutzungskonflikt). Nach ihrer Meinung sollten daher für eine allfällige Weiterführung von Kristallin-Untersuchungen Gebiete im westlichen Teil des Gebiets 'West', insbesondere die Zone zwischen Eggberg- und Vorwald-Störung, einbezogen werden. Die zur Konkretisierung dieser Empfehlung von den Bundesbehörden geleitete 'Arbeitsgruppe Kristallin Nordschweiz' präsentierte im Juni 1996 ihren Schlussbericht (HSK 1996) mit der Empfehlung, weitere Felduntersuchungen auf das Mettauertal zu fokussieren. Die 1996 von der Nagra in diesem Gebiet durchgeführten 2D-seismischen Untersuchungen bestätigten die beschränkte Aussagekraft dieser Explorationsmethode für kristalline Gesteinsformationen (vgl. Fig. 4-4). Die Durchführung zusätzlicher Feldarbeiten (z.B. Vertikal- und Schrägbohrungen) wurde von der Nagra zurückgestellt.

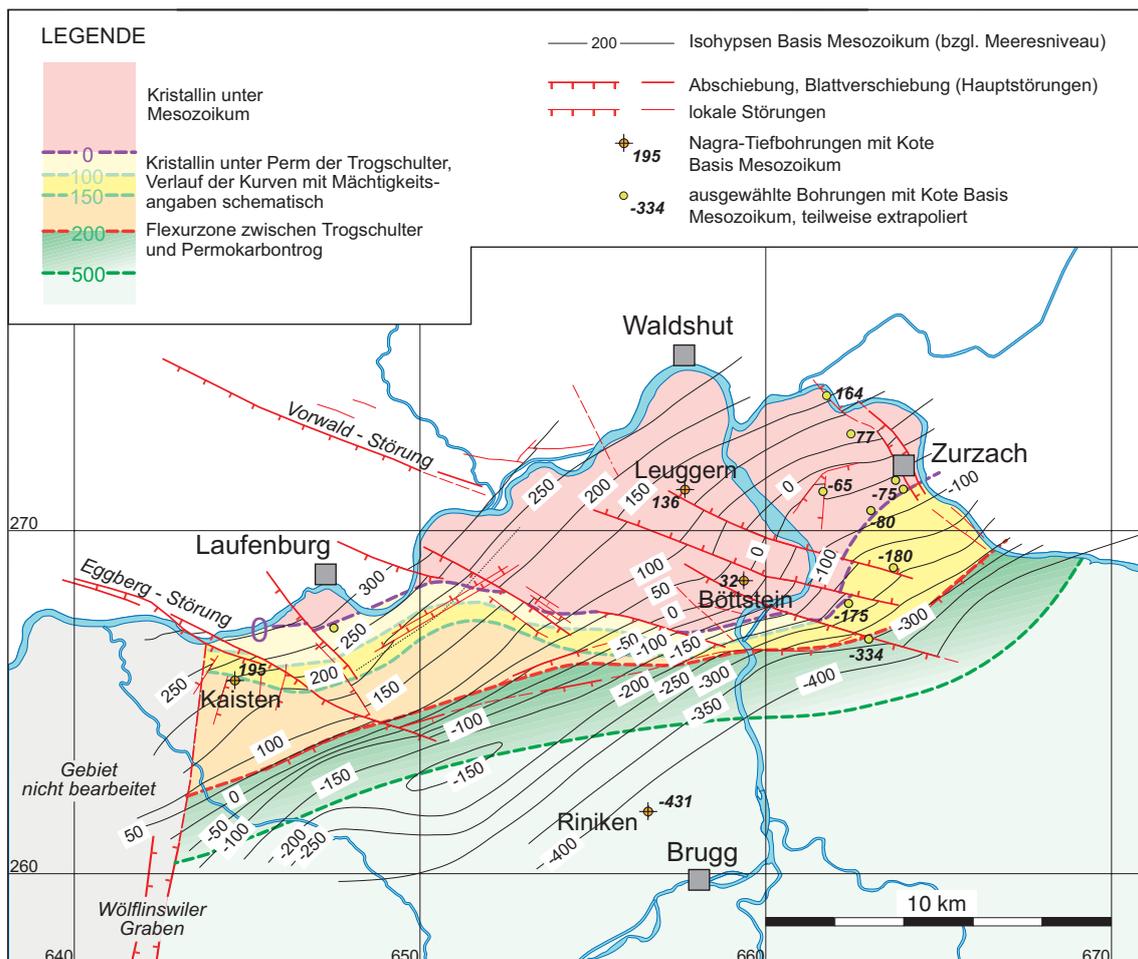


Fig. 5-2: Die Strukturkarte der Basis Mesozoikum zeigt die geologisch-tektonischen Verhältnisse im Gebiet 'West'. Vergleiche auch das geologische Profil in Fig. 4-4.

5.3 Opalinuston und Rahmengesteine

5.3.1 Datengrundlage

Die wichtigsten Grundlagen für die heutigen Kenntnisse über die Opalinuston-Vorkommen und ihre Rahmengesteine bilden das in mehreren Kampagnen aufgenommene Netz der reflexionsseismischen Linien (Nagra und Dritte, vgl. Fig. 1-1), die Tiefbohrungen der Nagra sowie Daten Dritter. Diese regionalen Daten wurden bis 1995 zusammen mit Informationen zur Oberflächengeologie interpretiert und in mehreren Technischen und zahlreichen Internen Berichten der Nagra dargestellt. Die detaillierten lokalen Untersuchungen im Zürcher Weinland ab 1998 (3D-Seismik und Sondierbohrung Benken), die Weiterführung der regionalen Untersuchungen und die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Felslabor Mont Terri haben die Kenntnisse über die regionale Geologie und die Eigenschaften des Opalinustons als Wirtgestein wesentlich ergänzt und vertieft. Zusätzlich wurden für diesen Bericht die in neuester Zeit publizierten geologischen Karten und wissenschaftlichen Arbeiten berücksichtigt.

5.3.2 Gliederung des Verbreitungsraums

Übersicht

Die tektonische Gliederung des Opalinuston-Verbreitungsraums im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum (Fig. 3-3 und Fig. 4-16) erfolgt projektbezogen aufgrund von Kenntnissen über die Deformationen und die Strukturen im Bereich des Opalinustons (Fig. 5-3 und Fig. 5-4); diese basieren auf Oberflächendaten, vor allem aber auf Untergrundinformationen aus Tiefbohrungen und Reflexionsseismik, wo sich die Basis des Opalinustons als deutlicher regionaler Markerhorizont abzeichnet (Naef et al. 1995, Birkhäuser et al. 2001). Die Gliederung des Verbreitungsraums erfolgte aufgrund einer für diesen Bericht neu überarbeiteten und ergänzten Struktur- und Isohypsenkarte der Basis des Opalinustons (Bearbeitung in einem geographischen Informationssystem, GIS). Die Opalinuston-Vorkommen der Nordschweiz liegen in der Übergangszone zwischen dem durch Kompression (Fernschub) deformierten Vorland der Alpen und dem von der Alpenfaltung nicht betroffenen Bereich weiter im Norden und Westen (Fig. 5-3 und 5-4). In den alpin beeinflussten Gebieten wurde das Deckgebirge kompressiv verformt und – von NE nach SW zunehmend – durch Fernschub im Bereich plastisch deformierbarer Schichten des Mittleren Muschelkalks vom Sockel abgeschert, nach NW verschoben und besonders im frontalen Bereich übereinander geschoben und intensiv verfaultet (Faltenjura). Die weiter extern, d.h. alpenferner liegenden Gebiete sind vom alpinen Fernschub praktisch nicht verformt. Hier überlagern die Sedimentgesteine des Deckgebirges das Grundgebirge (Kristallin und Permokarbontröge) in ihrer ursprünglichen Position (autochthones Deckgebirge).

Die unterschiedliche Deformation des Deckgebirges durch alpinen Fernschub erlaubt eine grobe Gliederung in vier tektonische Bereiche, wie sie im schematischen NW–SE-Schnitt in Figur 5-3 dargestellt sind. Der ausserhalb des alpinen Fernschubs liegende Bereich mit autochthonem Deckgebirge wird als *Tafeljura s.str.* bezeichnet; hier sind die Schichten weitgehend ruhig gelagert und kaum deformiert. Daran schliesst die üblicherweise ebenfalls dem Tafeljura zugeordnete *Vorfaltenzone* an, eine in sich wenig gestörte Sedimentgesteinsabfolge, die aber eine frontale Aufschubungszone aufweist und deshalb zumindest leicht abgeschert, also nicht mehr streng autochthon ist. Etwa westlich der Linie Eglisau–Zürich wird die Vorfaltenzone von einer stark gestörten Zone mit Auf- und Überschiebungen sowie kleinräumiger Faltenbildung, dem *Faltenjura*, überfahren. Das südlichste Schichtpaket des Faltenjuras taucht schliesslich unter die Mittelländische Molasse ab, wobei die tektonische Zergliederung rasch abnimmt.

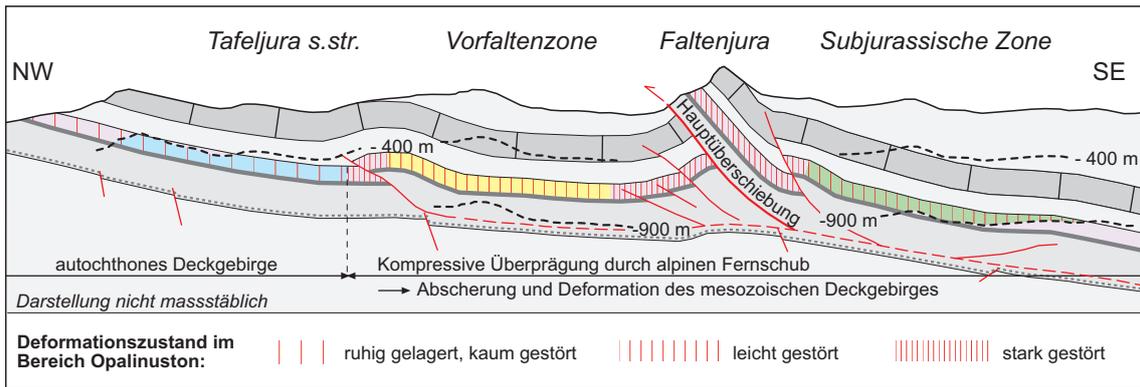


Fig. 5-3: NW-SE-Profil durch die Bereiche unterschiedlicher Deformation im Deckgebirge. Die schematische, leicht überhöhte Darstellung veranschaulicht die örtlich verschiedene strukturelle Zergliederung des Opalinustons und die Aufteilung in entsprechende tektonische Bereiche (siehe Fig. 5-4). Schwarz gestrichelte Linien: bevorzugter Tiefenbereich.

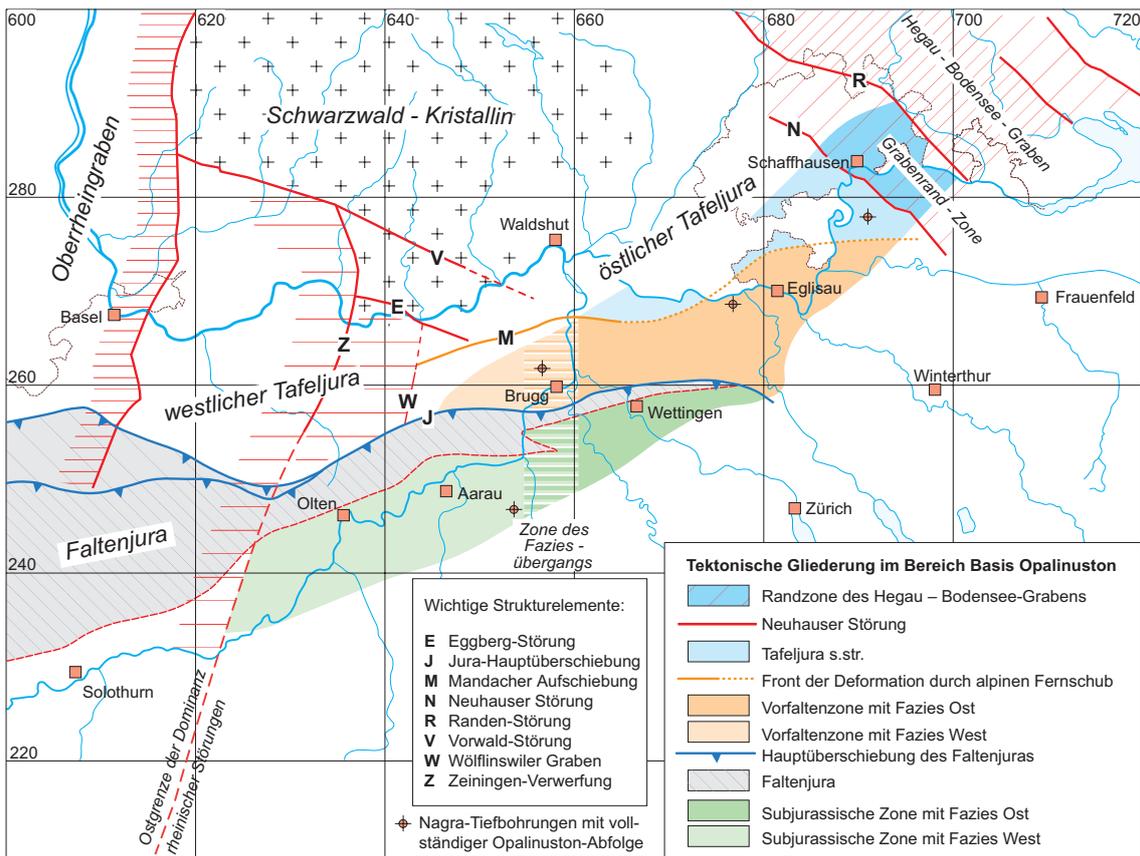


Fig. 5-4: Gliederung des Opalinuston-Verbreitungsraums in verschiedene geologisch-tektonische Bereiche. Die tektonische Gliederung orientiert sich am schematischen Profilschnitt in Figur 5-3. Weiter sind die Bereiche des mesozoischen Deckgebirges dargestellt, in denen die Rahmengesteine über dem Opalinuston vorwiegend tonig (Fazies Ost) bzw. eher kalkig (Fazies West) ausgebildet sind (siehe auch Fig. 5-5).

Diese Übergangszone vom Jura zum mittelländischen Bereich mit rasch mächtiger werdender Molasse wird als *Subjurassische Zone* bezeichnet (Heim 1922, S. 165, Baumberger 1934, S.73, Rutsch 1967, S. 244 ff., Keller 1992, S. 645 ff.).

Der östliche Teil des Opalinustongebiets grenzt an den *Hegau–Bodensee-Graben* (Fig. 5-4). Der Bereich zwischen der Randen- und der Neuhauser Störung wurde von den tektonischen Bewegungen im Zusammenhang mit der Grabenbildung noch beeinflusst und wird als westliche *Grabenrand-Zone* bezeichnet. Diese ist durch eine erhöhte Häufigkeit steiler Störungszonen gekennzeichnet.

Im Raum des unteren Aaretals befindet sich der in Figur 5-5 ausgewiesene lithologische Übergangsbereich in den oberen Rahmengesteinen (siehe Kap. 5.3.3), welcher ungefähr mit einer tektonisch stärker zergliederten Strukturzone zusammenfällt (Fig. 5-4 und 5-6). Damit ergeben sich verschiedene Bereiche, in denen die Opalinuston-Vorkommen z.T. deutlich unterschiedliche Rahmenbedingungen bezüglich der tektonischen Situation und der Eigenschaften der Rahmengesteine aufweisen (vgl. nachfolgende Diskussion).

Gebiete ausserhalb des alpinen Fernschubs

Als östlichen *Tafeljura s.str.* bezeichnet man den nicht abgescherten (autochthonen) Teil des mesozoischen Deckgebirges, welcher zwischen dem Südrand des Schwarzwald-Kristallins und der Mittelländischen Molasse resp. der Front des vom Fernschub betroffenen Teils des Tafeljuras (Vorfaltenzone) liegt. Die von geringmächtiger Molasse bedeckten Gebiete mit Opalinuston in Tiefenlagen bis max. 900 m am Nordrand des Molassebeckens werden projektbezogen ebenfalls zum Tafeljura gerechnet (z.B. das Zürcher Weinland). Die Geologie dieses Gebiets ist gut bekannt, weil sie im Gelände dank zahlreicher Aufschlüsse (insbesondere Bach- und Flusseinschnitte) detailliert erkundet werden konnte. Die Fortsetzung des Tafeljuras resp. des mesozoischen Deckgebirges gegen Südosten unter die Molassebedeckung hinein ist zudem durch zahlreiche Seismiklinien von mehrheitlich guter Qualität ausreichend bekannt. Damit lässt sich der Tafeljura bis in die betrachteten Lagertiefen gut abgrenzen und tektonisch charakterisieren.

Der Tafeljura wird im Nordosten durch den Hegau–Bodensee-Graben mit vorwiegend NW–SE verlaufenden Verwerfungen begrenzt. Diese Zone ist stärker zergliedert als der Tafeljura. Aufgrund der Auswertungen der regionalen Nagra-Seismik 1991/92 (Naef et al. 1995) wird der Bereich zwischen der westlichen Begrenzung des zentralen Grabens (Randen- bzw. Schinerberg-Verwerfung) und der Neuhauser Störung als westliche *Grabenrand-Zone* bezeichnet (Fig. 5-4). Innerhalb dieser Zone sind zwar ruhig lagernde, 'Tafeljura-ähnliche' Areale vorhanden; infolge der tektonischen Beanspruchung sind die Schichten aber stellenweise kleinräumig zergliedert. Das seismische Abbild einzelner Störungsäste, oberflächengeologische Beobachtungen an der Randen-Störung selbst sowie Herdflächenlösungen von Erdbeben führen zudem zur Vermutung, dass nach der miozänen Abschiebung in jüngerer Zeit auch horizontale Bewegungen entlang der Bruchstrukturen erfolgten (Müller et al. 2002).

Vom Fernschub mitgeprägte Gebiete

Durch den alpinen Fernschub wurde das Deckgebirge des zentralen und westlichen Mittellandes im Bereich der evaporitreichen Schichten des Mittleren Muschelkalks (Steinsalz, Gips, Anhydrit) vom Unterbau abgeschert und nach Nordwesten verschoben. Der Faltenjura wird als frontale Stauchzone dieser alpinen Vorlanddeformation interpretiert. Er teilt das vom Fernschub überprägte Gebiet mit Opalinuston-Optionen in zwei Teile (Fig. 5-3 und Fig. 5-4):

Die extern, d.h. nördlich des Faltenjuras liegende *Vorfaltenzone* umfasst nur leicht abgescherte und intern mässig deformierte Teile des Deckgebirges vor der Hauptüberschiebung (siehe Fig. 5-3). Diese Zone ist zwar im herkömmlichen (geographisch-morphologischen) Sinn ein Teil des Tafeljuras, weil sich die kompressive Beanspruchung sowohl landschaftlich wie oberflächengeologisch kaum abzeichnet (siehe z.B. Geologische und Tektonische Karten der Schweiz 1:500'000, Bundesamt für Wasser und Geologie, neue Version in Vorbereitung). Projektbezogen wird die Vorfaltenzone infolge ihres kompressiven Deformationsstils (und der leichten Abscherung) vom Tafeljura s.str. getrennt. Westlich der Aare ist dieser kompressiv überprägte Bereich nördlich der Jura-Hauptüberschiebung durch die Mandacher Aufschiebung auch oberflächengeologisch nachweisbar und schon lange bekannt. Ihre Fortsetzung nach Osten ins Gebiet nördlich der Lägeren wurde zwar schon länger vermutet; eine entsprechende, wenn auch stetig abnehmende Deformation konnte aber erst mit der 2D-Seismik der Nagra (Naef et al. 1995) aufgrund rampenartiger Strukturen im frontalen Bereich zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Die *Subjurassische Zone* bildet den internen, südlich an den Faltenjura anschliessenden Bereich des Deckgebirges am Übergang zum Molassebecken (Rutsch 1967). Der in den Seismiklinien erkennbare Strukturplan zeigt Ähnlichkeiten zur Vorfaltenzone, wobei grössere Bereiche mit relativ ruhig gelagertem Opalinuston erkannt werden können. Der intensive Schuppenbau am Südrand des Faltenjuras nimmt mit wachsender Überdeckung durch Molasseschichten nach SE rasch ab. Generell taucht der mesozoische Schichtstapel im Bereich der Subjurassischen Zone als mässig bis wenig geneigte, lokal etwas gestörte Rampe unter das Molassebecken. Das vorherrschende kompressive Regime manifestiert sich in Form von Aufschiebungen sowie in schichtparallelen Scherhorizonten. Erstere wurden beispielsweise auch im Opalinuston der Bohrung Schafisheim direkt nachgewiesen (Fig. 4-8).

5.3.3 Stratigraphische Gliederung (Opalinuston und Rahmengesteine)

Wie in Kap. 4.3 erläutert, ist die laterale Variabilität des Opalinustons bezüglich der Gesteinszusammensetzung ausgesprochen gering; im regionalen Rahmen kann er diesbezüglich nicht weiter aufgegliedert werden. Diese Aussage gilt mit Vorbehalten auch für die unteren Rahmengesteine, welche eine wechselhafte, mehrheitlich aus gering durchlässigen ton- und/oder evaporitreichen Schichten bestehende Sequenz zwischen dem Opalinuston und dem regionalen Muschelkalk-Aquifer im Liegenden bilden (Fig. 5-5). Sie werden zwar von lokal wasserführenden Schichten (Arietenkalk, Gansinger Dolomit, Schilfsandstein etc.) unterbrochen. Diese Horizonte können aber nicht als regional bedeutende Aquifere bezeichnet werden. Generell wird festgestellt, dass im Osten eher eine sandreiche und im Westen eher eine karbonatreiche Mischfazies¹⁵ vorherrscht.

Demgegenüber besteht in der Beschaffenheit der Gesteinsabfolgen über dem Opalinuston ein Unterschied zwischen 'Ost' und 'West' (Fig. 5-5). Nach Ablagerung des Opalinustons entwickelte sich im westlichen Teil des Untersuchungsgebiets eine ausgedehnte Karbonatplattform mit vorwiegend kalkreichen Sedimenten. Im 'Unteren Dogger' gibt es im Westen zwar noch eine karbonatreiche Mischfazies, mit einem kleinräumigen Wechsel von kalkreichen, mergelreichen und teilweise auch sandigen Schichten, welche insgesamt noch als potenzielle Rahmengesteine zu betrachten sind. Später kam es aber zur flächenhaften Ausbildung der Karbonatplattform, wo zur Zeit des 'Mittleren Doggers' in Küstennähe die über 100 m mächtigen Kalke des Hauptrogensteins entstanden. Diese bilden heute einen wichtigen Festgesteins-Aquifer im Jura westlich der Aare und sind deshalb nicht mehr Teil der einschlusswirksamen oberen Rahmen-

¹⁵ Als Mischfazies werden Gesteinsabfolgen bezeichnet, in welchen unterschiedliche Anteile verschiedener Sedimentgesteine in Wechselfolge vorkommen

gesteine. Nach Osten und wahrscheinlich auch weiter im Süden (z.B. Bohrung Pfaffnau) wurden hingegen auch nach Ablagerung des Opalinustons während des gesamten Doggers tonreiche Sedimente in einem flachmarinen Milieu bei Wassertiefen von einigen Dekametern abgelagert. Weiter im Osten (Bodenseeraum, Süddeutschland) sind die Sedimente dieser Zeit von sandreichen Abschnitten geprägt (vgl. Kap. 3.2.3 und Beil. 3.2-5 in Nagra 2002b); Ausläufer dieser Fazies sind im Wedelsandstein der Bohrung Benken erkennbar, wo dessen Durchlässigkeit infolge des höheren Tongehalts aber gering ist (Nagra 2002b).

Die Übergangszone zwischen der Fazies 'West' (Kalk) und der Fazies 'Ost' (Ton-Mergel-Sand) folgt etwa dem Längengrad von Brugg, auf einer Breite von einem bis wenigen Kilometern (schraffierter Bereich in Fig. 5-4). Im Gebiet Bözberg und im östlichen Bereich des Gebiets Jurasüdfuss ist die Mächtigkeit der oberen Rahmengesteine am geringsten.

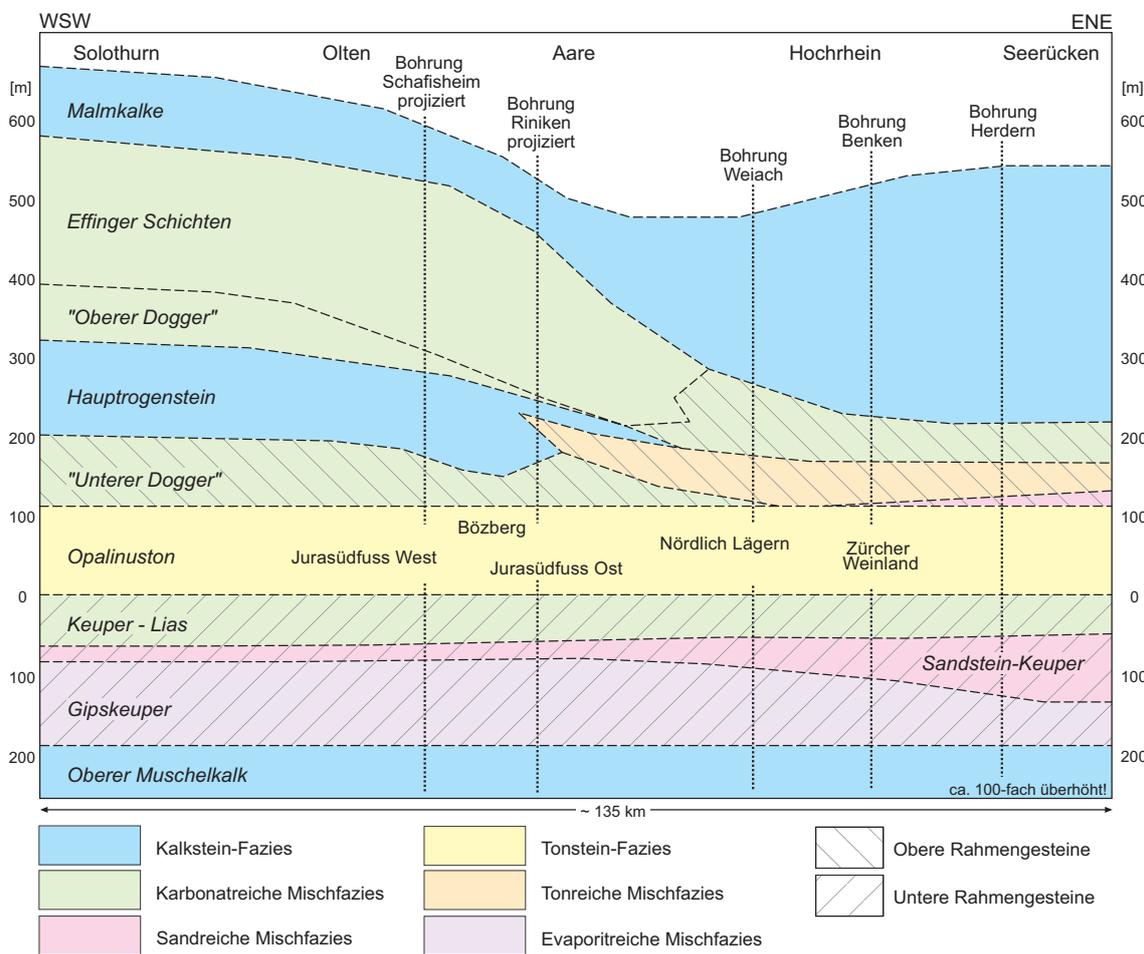


Fig. 5-5: Stark vereinfachte, schematische Darstellung der regional von Ost nach West ändernden sedimentären Fazies im mesozoischen Deckgebirge über und unter dem Opalinuston, insbesondere der unterschiedlich ausgebildeten Rahmengesteine.

Das Profil beruht auf Informationen aus Bohrungen und Aufschlüssen im Gelände.

5.3.4 Abgrenzung und Beschreibung möglicher Gebiete

Innerhalb der in den Figuren 5-4 und 5-6 bezeichneten tektonisch-faziellen Bereichen mit Opalinuston werden unter Berücksichtigung folgender Aspekte mögliche Teilgebiete abgegrenzt:

- Tektonische Situation (lokaler Deformationszustand, tektonische Zergliederung, 'Komplexität')
- Genügende Ausdehnung geeigneter Wirtgesteinsbereiche unter Berücksichtigung genügender Abstände zu auslegungsbestimmenden¹⁶ Störungen

Auf der Grundlage einer detaillierten Strukturkarte der Opalinuston-Basis werden die Opalinuston-Vorkommen (Mitte Opalinuston 400 – 900 m unter Terrain) in Bereiche mit unterschiedlichem Deformationsgrad aufgeteilt (Fig. 5-6). Im Nahbereich der seismisch kartierten Störungen wird entweder ein Sicherheitsabstand angenommen oder – wo erkennbar – die Breite der gestörten Zone ausgewiesen; diese linearen Elemente werden als ungeeignet eingestuft. Weitere Bereiche, wo Hinweise auf eine erhöhte tektonische Zergliederung bestehen (vertikal schraffierte Bereiche in Figur 5-6), werden zurückgestellt. Für die verbleibenden Flächen kann angenommen werden, dass der Opalinuston ruhig gelagert oder nur mässig gestört ist; diese Bereiche im Tafeljura, in der Vorfaltenzone und in der Subjurassischen Zone werden weiter betrachtet, mit Ausnahme des östlichsten Teils der Subjurassischen Zone, wo die laterale Ausdehnung des Opalinustons in bevorzugter Tiefe ungenügend ist. Zur Illustration und allgemeinen Nachvollziehbarkeit der Gliederung dienen die geologisch-tektonischen Profile in Figur 5-7 entlang der in Figur 5-6 eingezeichneten Profilsuren.

In den verbleibenden ruhig gelagerten bis mässig gestörten Flächen lassen sich folgende Gebiete abgrenzen (vgl. Fig. 6-1):

- Zürcher Weinland
- Nördlich Lägeren
- Bözberg
- Jurasüdfuss

Diese Gebiete werden nachfolgend bezüglich *tektonischer Situation, Ausbildung der Rahmengesteine, Raumverhältnissen* sowie *Langzeitentwicklung und -stabilität* (Anzeichen neotektonischer Aktivität) beschrieben. Hinsichtlich Langzeitstabilität wird auch das *Potenzial für glaziale Übertiefungen* diskutiert. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese in Zukunft dort akzentuieren können, wo bereits heute solche Übertiefungen bestehen, und dass die maximalen Erosionstiefen regional vergleichbar mit denen der Vergangenheit sein werden (vgl. Nagra 2002b und Müller et al. 2002 sowie diesbezügliche Fragen und Antworten im Rahmen des von den Behörden eingerichteten „Technischen Forums Entsorgungsnachweis“; weitere Informationen siehe www.technischesforum.ch).

¹⁶ Grössere Störungen, denen aus bau- oder sicherheitstechnischen Überlegungen bei der Platzierung von Lagerstollen ausgewichen werden muss, werden als auslegungsbestimmend bezeichnet. Mit Zugangsstollen können solche Störungen aber durchfahren werden. Vergleichbare Prinzipien werden auch in kristallinen Wirtgesteinen (z.B. in Skandinavien) angewendet.

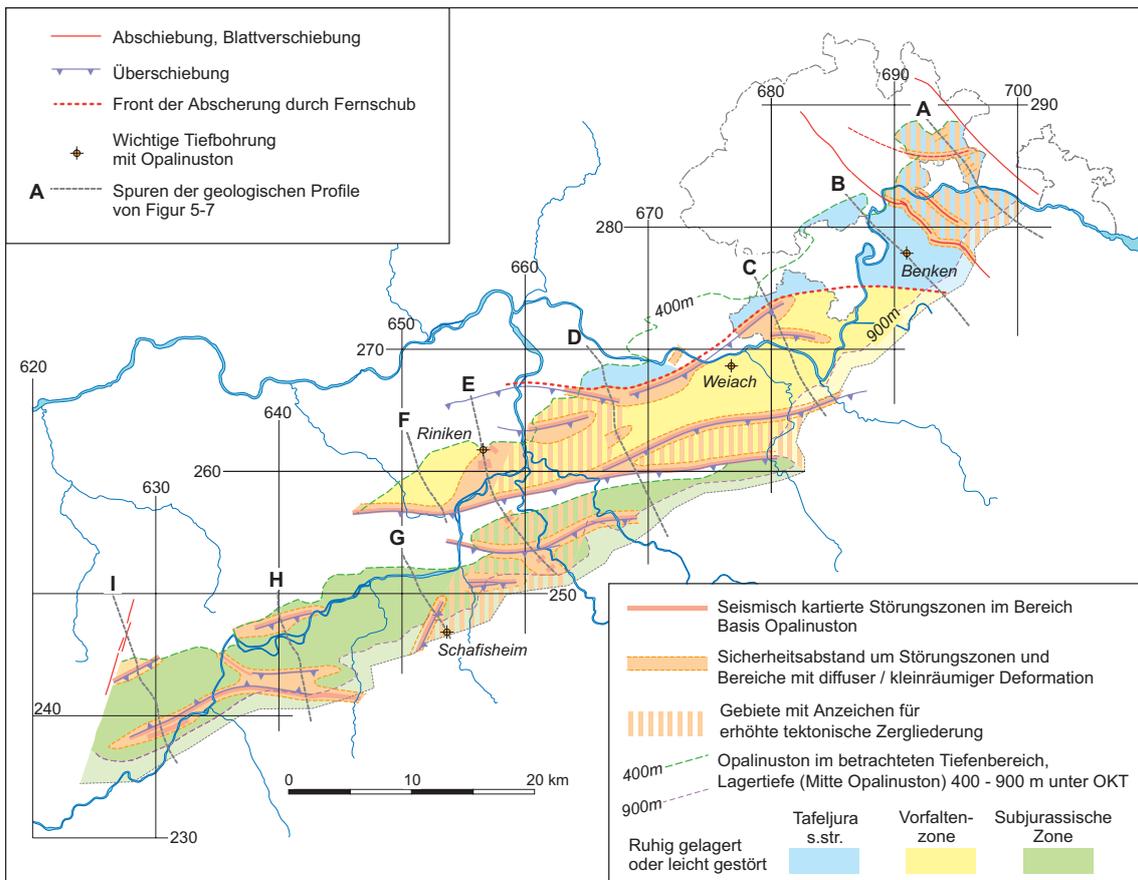


Fig. 5-6: Detailliertere tektonische Gliederung der im bevorzugten Tiefenbereich liegenden Opalinuston-Vorkommen in der Nordschweiz.

Fig. 5-7: Geologische Profile im Verbreitungsraum mit Opalinuston. ▶▶▶

Die Profile in Fig. 5-7 (gegenüberliegende Seite) zeigen den unterschiedlichen Deformationsstil im Verbreitungsraum. Bis auf den Nordabschnitt von Profil I wurden alle Profile entlang von seismischen Linien der Nagra konstruiert und sind entsprechend belegt. Die im bevorzugten Tiefenbereich liegenden Abschnitte des Opalinustons sind mit satten Farben hervorgehoben. Lage der Profile, siehe Figur 5-6.

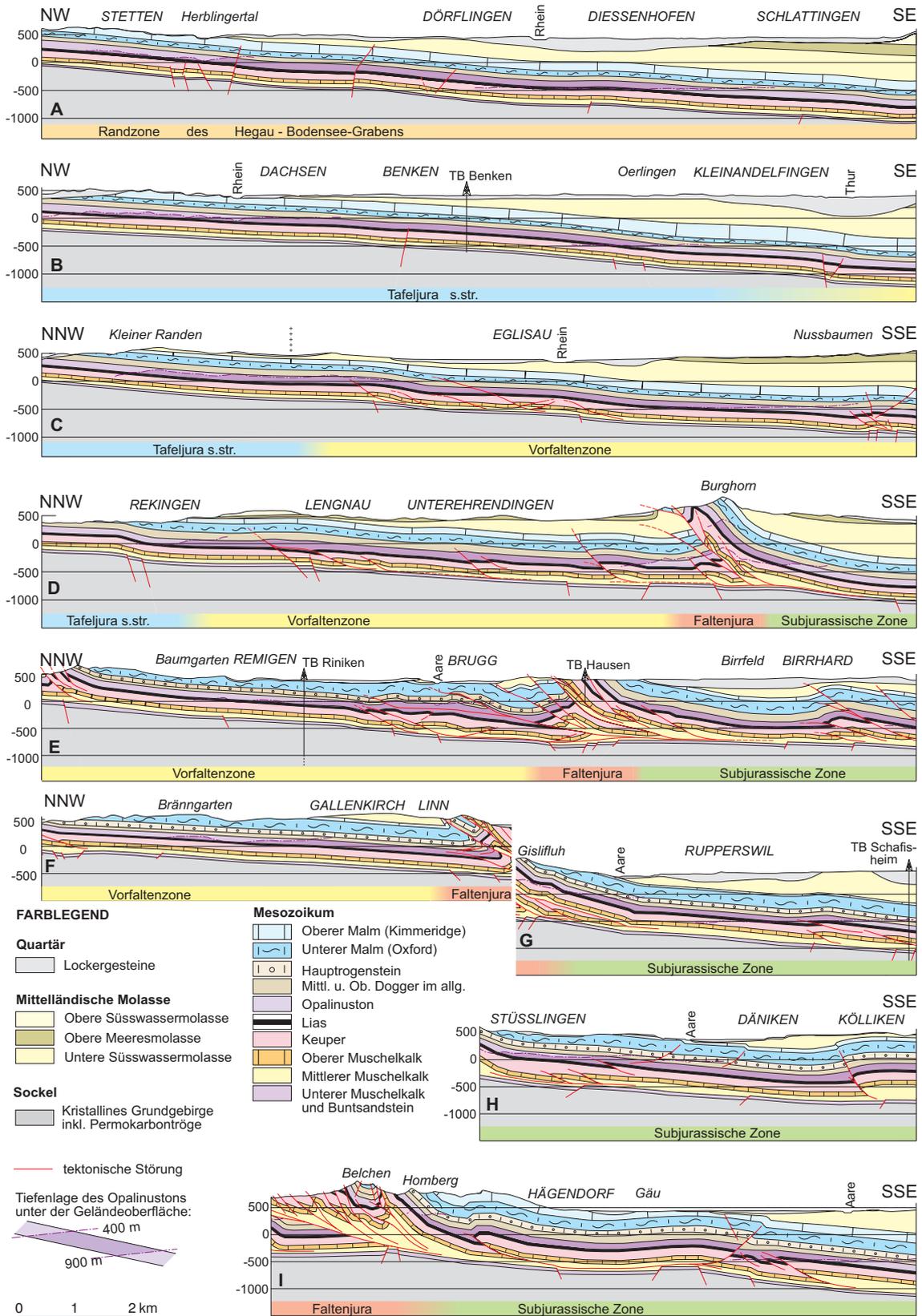


Fig. 5-7: Geologische Profile im Verbreitungsraum mit Opalinuston. (Erläuterungen siehe gegenüberliegende Seite)

5.3.4.1 Zürcher Weinland

Die detaillierten Kenntnisse zur Geologie dieses Gebiets sind in den Technischen Berichten zum Entsorgungsnachweis sowie in zahlreichen Referenzberichten ausführlich dargestellt. Wesentlich sind folgende Punkte:

Tektonische Situation, Raumverhältnisse

Der Opalinuston¹⁷ ist im ganzen Gebiet weitgehend ungestört und liegt als Fläche mit grosser Ausdehnung in bevorzugter Tiefe (Fig. 5-7, Profil B). Kompressive, durch den alpinen Fernschub verursachte Deformationstrukturen können nicht nachgewiesen werden. Allerdings bestehen Anzeichen, dass der Süden des Gebiets in der Übergangszone zum alpin überprägten Deckgebirge liegt. Insgesamt werden die Raumverhältnisse untertage als günstig beurteilt.

Rahmengesteine

Das Gebiet liegt im Bereich der Fazies 'Ost'. Der Opalinuston und die einschlusswirksamen Rahmengesteine bilden hier eine knapp 300 m mächtige Serie von weitgehend wasserundurchlässigen, tonreichen Gesteinsabfolgen. Die Rahmengesteine bilden eine sehr wirksame zusätzliche Transportbarriere.

Langzeitentwicklung und -stabilität

Es gibt keine Anzeichen für neotektonische Aktivität. Im südlichen Abschnitt des Gebiets verläuft das glazial übertiefte Thurtal. Um Risiken im Zusammenhang mit glazialer Tiefenerosion möglichst gering zu halten, müsste dem Thurtal bei der Platzierung eines Tiefenlagers ausgewichen werden.

5.3.4.2 Nördlich Lägeren

Tektonische Situation, Raumverhältnisse

Das Gebiet Nördlich Lägeren wird durch grösserräumige tektonische Strukturen in verschiedene Teilgebiete gegliedert (vgl. Fig. 5-6). Zwei Teilgebiete zeigen in der Seismik Anzeichen einer stärkeren tektonischen Zergliederung (vertikal schraffierte Bereiche in Fig. 5-6) und werden deshalb als ungünstig beurteilt; die anderen drei Teilgebiete enthalten Bereiche, in denen der Opalinuston nicht oder nur wenig gestört ist (vgl. Profile C und D in Fig. 5-7). Letztere kommen potenziell als Standortgebiete in Betracht und werden nachfolgend charakterisiert.

Zwei kleinere Teilgebiete liegen im Tafeljura s.str. respektive im Übergangsbereich Vorfaltenzone – Tafeljura s. str.. Die Schichten im Bereich Opalinuston sind dort generell flach bis leicht nach SSW-fallend und ruhig gelagert. Es sind keine bedeutenden Störungen bekannt.

Das grösste Teilgebiet liegt in der Vorfaltenzone und wurde von Naef et al. (1995) eingehend untersucht und in Bezug auf die tektonische Situation dargestellt. Zwischen der frontalen Rampe des Fernschubs im NW und der Stadel–Irchel-Antiklinale im SE liegt dieses Teilgebiet als weitgehend ungestörtes Deckgebirgselement. Es existiert aber nachweislich eine basale Abscherungszone im Mittleren Muschelkalk; möglicherweise sind auch andere tonreiche

¹⁷ Im Zürcher Weinland sind auch die Murchisonae-Schichten im Hangenden in Opalinuston-Fazies ausgebildet und werden projektbezogen dem Wirtgestein zugeordnet (Nagra 2002b).

Formationen (z.B. der Opalinuston) durch schichtparallele Scherzonen betroffen (analog den Deformationen in der Subjurassischen Zone, vgl. Fig. 4-8), was seismisch aber nicht nachweisbar ist. In der Nagra-Tiefbohrung Weiach, welche in diesem Teilgebiet liegt, ist der Opalinuston praktisch ungestört, d.h. es wurden keine derartigen Scherzonen beobachtet.

In den nördlichen Teilgebieten sind die Raumverhältnisse untertage eher knapp, im südlichen Teilgebiet in der Vorfaltenzone sind sie ausreichend bis grosszügig; es besteht eine entsprechende Flexibilität für Anlagen der geforderten Grösse. Grosse Teile des Gebiets liegen aber sehr tief (Fig. 5-7, Profil C), was aus bautechnischer Sicht ein Erschwernis darstellt.

Rahmengesteine

Das Gebiet Nördlich Lägeren ist Teil des Faziesgebiets 'Ost', wo die Rahmengesteine eine sehr wirksame zusätzliche Transportbarriere bilden. Im westlichsten Teil ist schon ein Übergang zur Fazies 'West' möglich.

Langzeitentwicklung und -stabilität

Konkrete Hinweise auf neotektonische Aktivität sind in keinem der Teilgebiete vorhanden. Hingegen ist nicht auszuschliessen, dass die relativ geringen Herdtiefen der Erdbeben von Eglisau Hinweise auf Bewegungen im Deckgebirge des nordöstlichen Teilgebiets darstellen (Kap. 4.3.7 in Deichmann et al. 2000). Diesem Punkt müsste bei einer weitergehenden Untersuchung des Gebiets Rechnung getragen werden.

Im Ostteil wird das Gebiet Nördlich Lägeren vom glazial übertieften Glatttal durchquert. Dort ist somit ein Potenzial für glaziale Tiefenerosion vorhanden, was bei der Anordnung eines Lagers zu berücksichtigen wäre. Weiter westlich beweisen grossflächige Deckenschottervorkommen (teilweise > 2 Mio. Jahre alt, vgl. Müller et al. 2002), dass hier die Erosion über lange Zeit äusserst bescheiden war. Glaziale Tiefenerosion ist hier nicht zu erwarten.

5.3.4.3 Bözberg

Dieses Gebiet in der Vorfaltenzone des Aargauer Juras ist sowohl durch einige aussagekräftige Seismiklinien (Diebold et al. 1991) wie auch durch die im Detail bekannte Oberflächengeologie gut dokumentiert (Neukartierung von Blatt Frick des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000 praktisch abgeschlossen).

Tektonische Situation, Raumverhältnisse

Das Gebiet wurde durch Fernschub von seiner Unterlage leicht abgeschert, was durch die frontale Mandacher Aufschiebung belegt ist (Fig. 5-7, Profile E und F). Eine interne Deformation der abgescherten Schichttafel durch kompressive Lokalstrukturen oder relevante Verwerfungen kann aber nicht nachgewiesen werden. Die ruhig gelagerte, leicht nach SE einfallende Schichttafel erinnert stark an den Tafeljura, weshalb dieser Bereich im erweiterten, d.h. morphologisch-oberflächengeologischen Sinn auch zum Tafeljura gerechnet wird. Die Raumverhältnisse untertage sind zwar ausreichend, aber die Ausdehnung des Opalinustons in Tiefen > 400 m unter Terrain ist eher knapp.

Rahmengesteine

Die stratigraphischen Verhältnisse können durch die am Ostrand des Gebiets liegende Nagra-Bohrung Riniken charakterisiert werden. Dort ist zwar bereits der Haupttrogenstein vorhanden; er wird aber auch noch von einem Abschnitt Parkinsoni-Fazies überlagert (Fig. 5-5), was bedeutet, dass man sich noch im Bereich des Faziesübergangs 'Ost'-'West' befindet. Da nach Westen der Haupttrogenstein rasch dominiert, muss das Gebiet Bözberg insgesamt als Teil des Faziesgebiets 'West' betrachtet werden.

Langzeitentwicklung und -stabilität

Geodätische Messungen wie auch geologisch-morphologische Rekonstruktionen zeigen, dass der Tafeljura zwischen Faltenjura und Hochrhein westlich der Aare minimale Hebungsraten aufweist und dass keine Indizien für neotektonische Aktivitäten vorhanden sind (Müller et al. 2002).

Das Gebiet liegt ausserhalb eines Haupttals und vergleichsweise weit von den Alpen entfernt; es besitzt deshalb kaum Potenzial für glaziale Tiefenerosion.

5.3.4.4 Jurasüdfuss

Tektonische Situation, Raumverhältnisse

Das Gebiet Jurasüdfuss lässt sich aufgrund der strukturellen Verhältnisse in zwei Teilgebiete aufteilen:

Im *östlichen Teil* weisen die seismischen Informationen darauf hin, dass der Jurasüdfuss zwischen Olten und Aarau auf einer relativ ungestörten, nach SE abtauchenden Schichtplatte liegt (vgl. Profile G und H in Figur 5-7). Dieser Befund stützt sich auch auf eine von der Bohrung Schafisheim nach W zum Nordrand der Born-Antiklinale verlaufende Reflexionsseismik-Linie. Das Teilgebiet ist durch Fernschub kompressiv überprägt mit lokal auftretenden Schichtumbiegungen, tektonischen Verdickungen und Aufschiebungen. Solche Phänomene können um die Bohrung Schafisheim rekonstruiert werden und sind im Bohrprofil selbst auch nachweisbar (Fig. 4-8). Konzeptuell sind deshalb im Gebiet Jurasüdfuss-Ost entsprechende Erscheinungen ebenfalls zu erwarten.

Der *westliche Teil* ist durch eine wenige Kilometer breite Synklinale zwischen Faltenjura-Südrand und der Born-Antiklinale charakterisiert (Fig. 5-7, Profil I). Obwohl das Teilgebiet durch Fernschub abgeschert wurde, wird hier ein grösseres Areal mit flach liegendem, praktisch ungestörtem Opalinuston erwartet (in Seismik-Linie nachgewiesen). Kleinräumige, seismisch nicht erfassbare kompressive Strukturen im Opalinuston können aber nicht ausgeschlossen werden.

Die Raumverhältnisse untertage sind genügend, bieten aber wenig Flexibilität.

Rahmengesteine, Mächtigkeit des Opalinustons

Das Gebiet Jurasüdfuss ist Teil der Fazieszone 'West' mit Haupttrogenstein und karbonatreichem ‚Unteren Dogger‘ (Fig. 5-4 und 5-5; der Haupttrogenstein ist in der angrenzenden Juragebirgskette aufgeschlossen). In der knapp 10 km weiter südlich liegenden Erdölbohrung Pfaffnau-1 wurde allerdings kein Haupttrogenstein mehr nachgewiesen. Die zwischen Opalinuston und

Hauptrogenstein-Basis liegende, einige Dekameter mächtige Schichtabfolge ist kalkiger ausgebildet als die Rahmengesteine im Osten, ihr Beitrag als einschlusswirksame obere Rahmengesteine ist deshalb weniger gut als im Osten.

Aufgrund der vorliegenden Daten muss damit gerechnet werden, dass die Mächtigkeit des Opalinustons in grossen Teilen des Gebiets Jurasüdfuss weniger als 100 m beträgt (in der Bohrung Schafisheim 79 m, evtl. tektonisch bedingte Reduktion). Falls hingegen auf die geringe hydraulische Durchlässigkeit des oberen Lias (im Liegenden des Opalinustons) abgestützt und diese nachgewiesen würde, könnte der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine Mächtigkeit von 100 m oder mehr erreichen.

Langzeitentwicklung und -stabilität

Im Vergleich zum vorgelagerten Tafeljura wurden im Faltenjura leichte rezente Hebungen gemessen. Ob dies als Indiz für eine gewisse neotektonische, rezente Aktivität des Faltenjuras und damit auch der Subjurassischen Zone zu interpretieren ist, bleibt unklar (vgl. Müller et al. 2002). In jedem Fall sind die Bewegungen sehr gering.

Im westlichen Teil des Gebiets Jurasüdfuss fehlen Hinweise auf glaziale Übertiefungen; das Potenzial für zukünftige Tiefenerosion ist dort beschränkt. Südöstlich von Aarau ist eine bedeutende glaziale Übertiefung (unteres Seetal) bekannt. Nördlich davon ist das Aaretal zwar breitflächig bis auf Niveau > 300 m ü.M. ausgeräumt; der Nachweis glazialer Übertiefung fehlt aber. Weil das gesamte Teilgebiet im Bereich des Aare-Haupttals liegt, besteht aber gemäss der konzeptuellen Vorgaben auch flächendeckend ein realistisches Potenzial für zukünftige glaziale Tiefenerosion im Bereich des Aaretals.

5.4 Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse

5.4.1 Datengrundlage

Die Kenntnisse über die regionale Ausbildung der Molasse beruhen im Wesentlichen auf den Ergebnissen der Tiefbohrungen und der reflexionsseismischen Untersuchungen der Kohlenwasserstoffindustrie. Ergänzende Informationen stammen aus Gasspeicherprojekten, Strassen- und Eisenbahntunneln, Geothermiebohrungen, Tongruben sowie wissenschaftlichen Arbeiten der Universitäten und der geologischen Landesaufnahme. Die seismischen Messungen und die bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen in Tiefbohrungen der Kohlenwasserstoffindustrie¹⁸ sowie die Geothermiebohrung Bassersdorf wurden von der Nagra in den für die Tiefenlagerung potenziell in Betracht kommenden Regionen projektspezifisch detaillierter ausgewertet (Meier et al. 1994a, b; Hölker & Graf 2004). Diese Daten lieferten in erster Linie Informationen über die tektonischen Verhältnisse und die Verbreitung tonreicherer Abschnitte in der USM.

5.4.2 Gliederung des Verbreitungsraums

Aus geologisch-sicherheitstechnischer Sicht kommen für die Platzierung eines HAA-Tiefenlagers nur tonreiche Abfolgen in der USM als Wirtgestein in Betracht. Die Auswertung eines umfassenden seismischen und bohrlochgeophysikalischen Datensatzes durch Meier (1994a, b)

¹⁸ Bohrungen Kreuzlingen-1, Berlingen-1, Herdern-1, Boswil-1, Pfaffnau-1, Pfaffnau Süd-1, Tschugg-1, Ruppoldsried-1, Fendringen-1, Courtion-1, Chapelle-1

hat gezeigt, dass mächtigere tonreiche Abfolgen grösserer lateraler Ausdehnung im westlichen Mittelland im unteren Teil der USM (Chattian), im zentralen und östlichen Mittelland hingegen im oberen und mittleren Teil (vor allem Aquitanian) abgelagert wurden. Daraus ergibt sich die in den Figuren 4-16, 5-9 und 5-10 dargestellte Gliederung. Beide tonreichen Abfolgen enthalten Einschaltungen von Rinnensandsteinen, wobei die tonreiche Abfolge im westlichen Molassebecken deutlicher in Erscheinung tritt als im zentralen und östlichen Teil (siehe unten).

Generell war die post-molassische Erosion im westlichen Molassebecken deutlich grösser als im Osten, d.h. der westliche Teil wurde stärker herausgehoben (Lemcke 1974, Schegg & Leu 1998). Eine signifikante, durch höhere Kompaktion bedingte Reduktion der Gesteinsporositäten und -durchlässigkeiten im Westen ist aber bis heute nicht schlüssig nachgewiesen worden (Mündl. Mitt. W. Leu, Geoform AG).

5.4.3 Stratigraphische Verhältnisse

Stratigraphische Verhältnisse im westlichen Molassebecken

Detaillierte stratigraphische Beschreibungen der USM im westlichen Molassebecken finden sich in Jordi (1955, 1989, 1995). In einer Studie zur westlichen Molasse bezeichnet Jordi (1989) die *Marnes bariolées s.l.* als Schichtfolge, welche sich eventuell für die Endlagerung eignen könnte. Im Gebiet des westlichen Jurasüdfusses enthalten die *Marnes bariolées s.l.* lokale Sand-schüttungen z.T. aus dem nördlich gelegenen Jurakarstgebiet (*Grès et calcaires à glauconie*, vgl. Strunck 2001), gegen das Molassebecken hin schalten sich vermehrt beckenparallele Sandstein-Rinnengürtel aus dem Raum Hoch-Savoyen/Genfersee ein, und die Sandschüttungen aus dem Norden sind nur noch in geringmächtigen Lagen vorhanden, was durch Schwer-mineraluntersuchungen belegt ist (z.B. Maurer 1983, Jordi 1995, Strunck & Matter 2002).

Der untere Teil der *Marnes bariolées s.l.* ist generell sehr sandsteinreich (*Grès de Goumouens s.str.* und *Grès du type Goumouens*) und fällt aufgrund der heutigen Erfahrung als Wirtgestein ausser Betracht. Der obere Teil, die *Marnes bariolées s.str.*, stellt vermutlich die am einheitlichsten aufgebaute tonreiche Abfolge der USM im ganzen Molassebecken dar, die Mächtigkeiten über 100 m erreichen kann. Die *Marnes bariolées s.str.* entsprechen zumindest teilweise dem oberen Teil einer seismisch kartierbaren Einheit (Ablagerungssequenz, resp. Seismofazies), die von Meier (1994b) als 'Mergelreiches Intervall' ausgeschieden wurde (Fig. 5-8). Aber auch die *Marnes bariolées s.str.* enthalten unregelmässig verteilt bis zu mehrere Meter mächtige Sandsteineinschaltungen, was sowohl in Oberflächenaufschlüssen (Profil Oulens, Fig. 4.1.9 in Strunck 2001; Profil Talent Süd, Fig. 8 in Strunck & Matter 2002) sowie in den bohrlochgeophysikalischen Logs und den daraus abgeleiteten Lithologs verschiedener Tiefbohrungen¹⁹ zum Ausdruck kommt (Fig. 5-8 sowie Detailprofile²⁰ in Meier 1994b).

¹⁹ Die Tiefbohrungen widerspiegeln die Verhältnisse im Tiefenbereich, der für die Tiefenlagerung relevant ist. Die Oberflächenaufschlüsse liegen weiter westlich.

²⁰ Die detaillierten Datensätze der in Fig. 5-8 gezeigten Bohrungen sind nicht publiziert und können deshalb hier nicht wiedergegeben werden, vgl. Fussnote 2 in Strunck & Matter (2002)

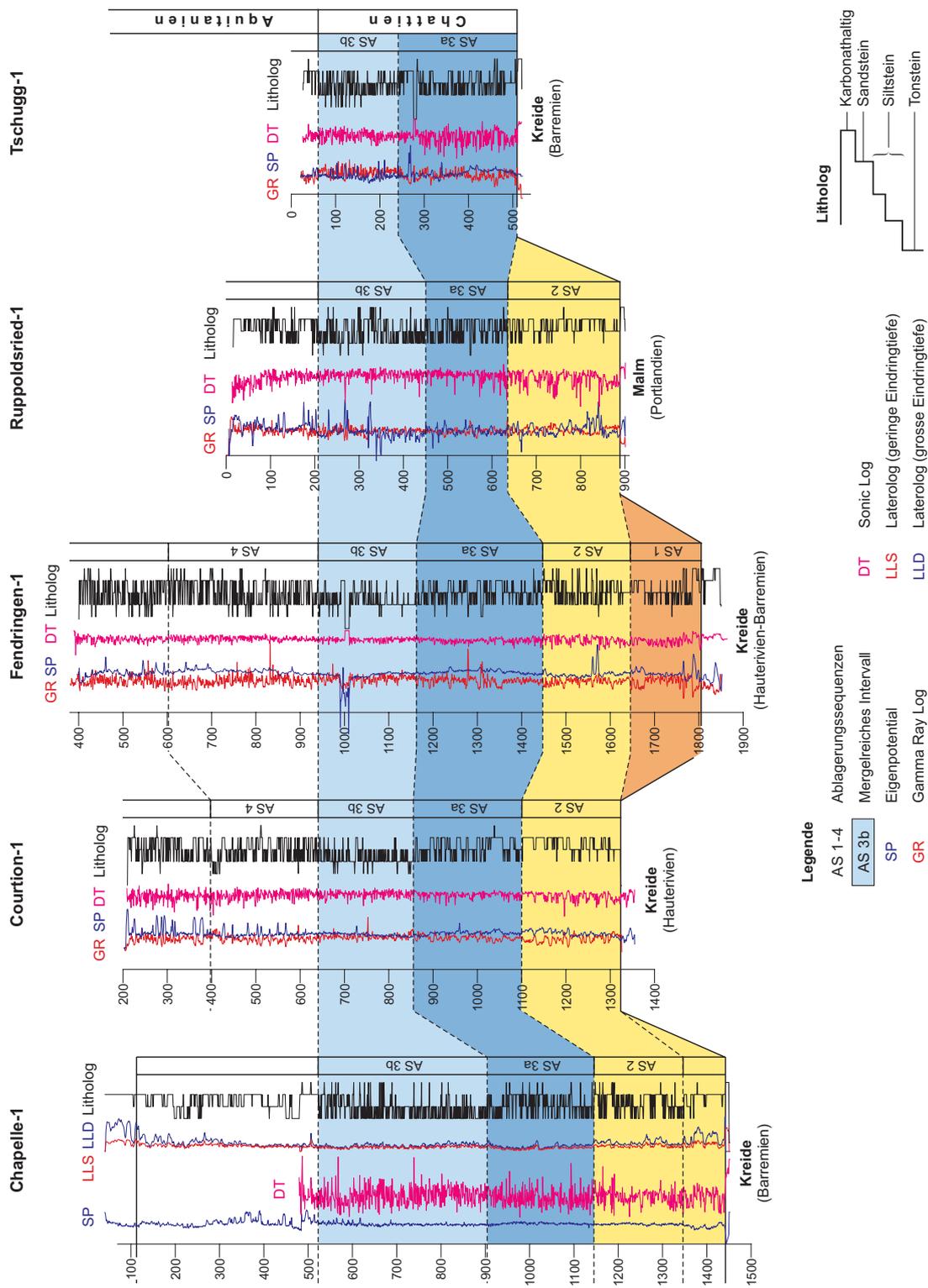


Fig. 5-8: Seismostratigraphisch definierte Ablagerungssequenzen und Lithologs von Tiefbohrungen in der USM des westlichen Molassebeckens (verkleinert aus Nagra 1994b und Meier 1994b).

Der obere Teil der Ablagerungssequenz AS3 (hellblau) repräsentiert das tonreichste Intervall der USM im westlichen Molassebecken. Gegen Norden (Bohrungen Ruppoldsried und Tschugg) nimmt der Sandsteinanteil deutlich zu.

Stratigraphische Verhältnisse im zentralen und östlichen Molassebecken

Die Auswertung der bohrlochgeophysikalischen Untersuchungen zahlreicher Tiefbohrungen durch die USM des zentralen und östlichen Mittellandes zeigt, dass tonreiche Abfolgen mit Mächtigkeiten von knapp 100 m, ohne klar erkennbare Rinnensandsteine, nur in Ausnahmefällen und auf sehr unterschiedlichem stratigraphischem Niveau vorkommen (Zone der roten Ziegeleitone im mittleren/oberen Bereich der USM in der Bohrung Hünenberg, Fig. 5.30 in Nagra 1988; unterster Bereich der USM der Bohrung Kreuzlingen-1, Meier 1994a). Auch die so genannte 'Oberaquitane Mergelzone' zeigt in den Tiefbohrungen einen sehr heterogenen Aufbau mit zahlreichen Sandsteineinschaltungen (Fig. 37 in Meier 1994a). Die seismofazielle Auscheidung von tonreichen (mergelreichen) Abfolgen ist schwierig und teilweise unzuverlässig. Die in Fig. 5-10 aufgezeigte Verbreitung tonreicher Bereiche der mittleren USM ist deshalb im besten Fall als Tendenz zu betrachten.

5.4.4 Tektonische Verhältnisse

Tektonische Verhältnisse im westlichen Molassebecken

Auf der Strukturkarte in Fig. 5-9, welche im wesentlichen auf den tektonischen Karten von Jordi (1990) und Meier (1994b) basiert, ist erkennbar, dass das Gebiet westlich bis südwestlich des Neuenburgersees durch einige prominente Störungszonen, welche im Zusammenhang mit der Bildung des Faltenjuras stehen, zergliedert und komplex deformiert ist (subjurassische Tektonik). Die Gebiete südöstlich des Neuenburgersees und des Bielersees (Berner Seeland), in denen das Chattian in geeigneter Tiefe auftritt, zeichnen sich durch eine weitgehend flache Lagerung der Gesteine aus, mit grossräumig angelegten, wenig ausgeprägten Syn- und Antiklinalen. Die Basis des Tertiärs ist lokal durch kleinere Aufschiebungen versetzt, von denen die meisten ungefähr parallel zum Streichen des Faltenjuras verlaufen. Von diesen Störungen sind die meisten an der Oberfläche nicht mehr sichtbar, weil ihre Aktivität im Laufe des Tertiärs zum Erliegen kam.

Von Bedeutung ist – neben einer neotektonischen Störung im Gebiet des Neuenburgersees, welche die jungen Seesedimente versetzt (La Lance, Gorin et al. 2003) – die N-S verlaufende seismisch aktive Fribourg-Zone (Kastrup 2002). Es handelt sich um eine N-S verlaufende Blattverschiebung, welche durch drei Erdbebenschwärme mit Herdtiefen von rund 7 km im kristallinen Grundgebirge zum Ausdruck kam (Kastrup 2002, S. 13). Die Re-Interpretation der 2D-Seismik in diesem Gebiet zeigt eine komplexe Serie von NNE-SSW orientierten Störungen, welche sich von der Basis des Mesozoikums bis zur Basis des Tertiärs verfolgen lassen (siehe Figuren 2.9 und 2.10 in Kastrup 2002, welche aus den unpublizierten Arbeiten von Meier (1994b) und Berger & Gundlach (1990) stammen). Berger (1994, Fig. 7.12) interpretiert diese Struktur als grabenartige Struktur und bringt sie in Verbindung mit den östlichen Randstörungen des Oberrheingrabens. Im W-E-Profil von Meier (Fig. 2.10 in Kastrup et al. 2002) ist eine grabenartige Struktur allerdings kaum erkennbar, und sie äussert sich auch nicht in den geologischen Karten dieses Gebiets.

Tektonische Verhältnisse im zentralen und östlichen Molassebecken

Im zentralen und östlichen Molassebecken sind die tektonischen Verhältnisse einfacher als im westlichen Teil. Die Schichten sind weitgehend flach gelagert, mit grossräumigen, wenig ausgeprägten Syn- und Antiklinalstrukturen (Fig. 5-10, basierend auf Meier 1994a). Die in den 2D-Seismiklinien festgestellten, alpenparallel verlaufenden, durch kompressive Tektonik bedingten Aufschiebungen an der Basis des Tertiärs sind nicht bis an die Oberfläche verfolgbar

(Bundesamt für Wasser und Geologie 2000b), d.h. ihre Aktivität kam im Verlauf des Tertiärs zum Erliegen. Im nordöstlichsten Teil des Gebiets sind distensive Strukturen (Abschiebungen) vorherrschend.

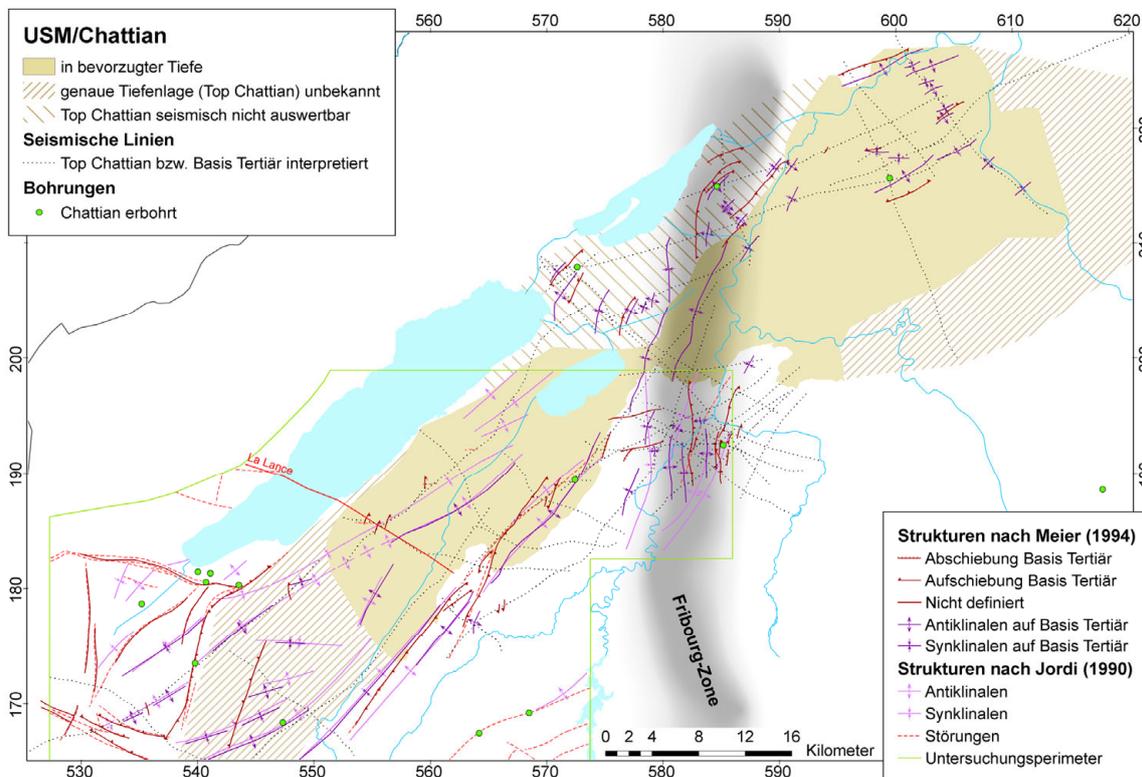


Fig. 5-9: Verbreitung des Chattian im westlichen Molassebecken in bevorzugter Tiefenlage sowie tektonische Strukturen (Störungen und Faltenachsen an der Basis des Tertiärs, ergänzt durch Oberflächendaten).

Die Verbreitungskarte 'Chattian' ist das Resultat einer GIS-Verschneidung der detaillierten Terrainoberfläche mit der Isophypsenkarte 'Top Chattian' von Meier (1994b).

Oberflächendaten nach Jordi (1990). Kleinere Abweichungen gegenüber Jordi (1993) sind nicht berücksichtigt (z.T. möglicherweise Verzerrungseffekte). Daten Basis Tertiär nach Meier (1994b). Fribourg-Zone: Seismisch aktive Störungszone im Grundgebirge nach Kastrup (2002). La Lance: Neotektonisch aktive Störungszone (Gorin et al. 2003).

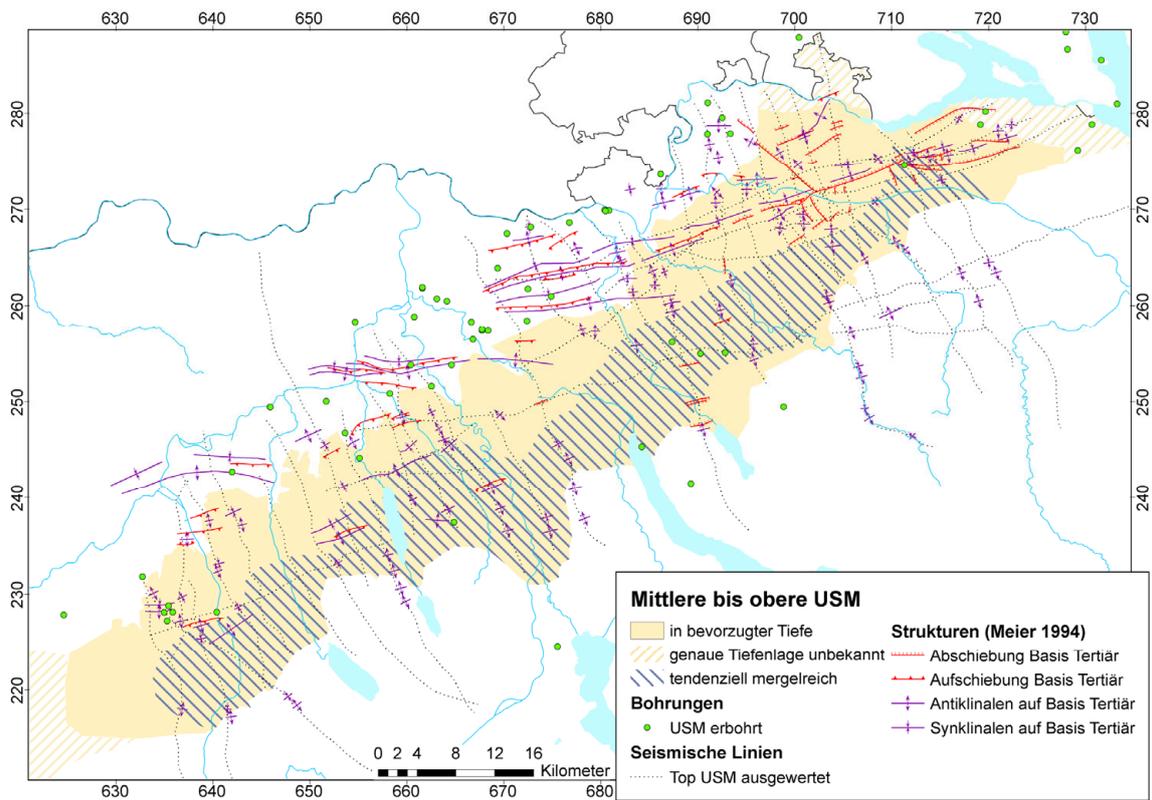


Fig. 5-10: Verbreitung der mittleren und oberen USM im zentralen und östlichen Mittelland in bevorzugter Tiefenlage sowie tektonische Strukturen (Störungen und Faltenachsen an der Basis des Tertiärs, nach Meier 1994a). Schraffiert: Tendenziell tonreichere Bereiche.

Die Verbreitungskarte 'mittlere und obere USM' ist das Resultat einer GIS-Verschneidung der detaillierten Terrainoberfläche mit der Isophysenkarte 'Basis OMM' (= 'Top USM') von Meier (1994a).

5.4.5 Mögliche Gebiete

Prinzipiell kommen in der Molasse alle Gebiete in Frage, in denen tonreiche Gesteine in geeigneter Tiefe vorkommen, ausgenommen die Bereiche mit signifikanten Störungen und die Gebiete unter glazial übertieften Tälern (Kompilation der Nagra auf GIS-Basis, Nagra 2005b). Wegen der über grössere Gebiete korrelierbaren tonreichen Abfolgen im Chattian wäre der westliche Bereich des Molassebeckens gegenüber dem zentralen und östlichen Bereich für die Tiefenlagerung zu bevorzugen, trotz der etwas komplexeren tektonischen Verhältnisse im Westen. Aufgrund der inhärenten Heterogenität der USM ist eine weitere Einengung nicht angebracht. Wegen des unregelmässigen Verlaufs der Sandsteinrinnen müsste auch nach umfangreichen Explorationsarbeiten mittels 3D-Seismik und zahlreichen Bohrungen immer noch damit gerechnet werden, dass einzelne durchlässige Rinnengürtel unerkannt geblieben sind.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

6.1 Die Optionen: mögliche Wirtgesteine und Gebiete

Die langjährigen Abklärungen der Nagra haben zu einer Anzahl von Gebieten mit Wirtgesteinen geführt (Fig. 6-1), welche aus heutiger Sicht – mit auf die geologischen Bedingungen abgestimmten technischen Barrieren – die geologischen Voraussetzungen für ein sicheres geologisches Tiefenlager für HAA grundsätzlich erfüllen. Es sind dies das Kristallin im Grundgebirge der Nordschweiz im Gebiet 'West', der Opalinuston in den Gebieten Zürcher Weinland, Nördlich Lägeren, Bözberg und Jurasüdfuss sowie die tonreichen Gesteine der Unteren Süsswassermolasse (USM).

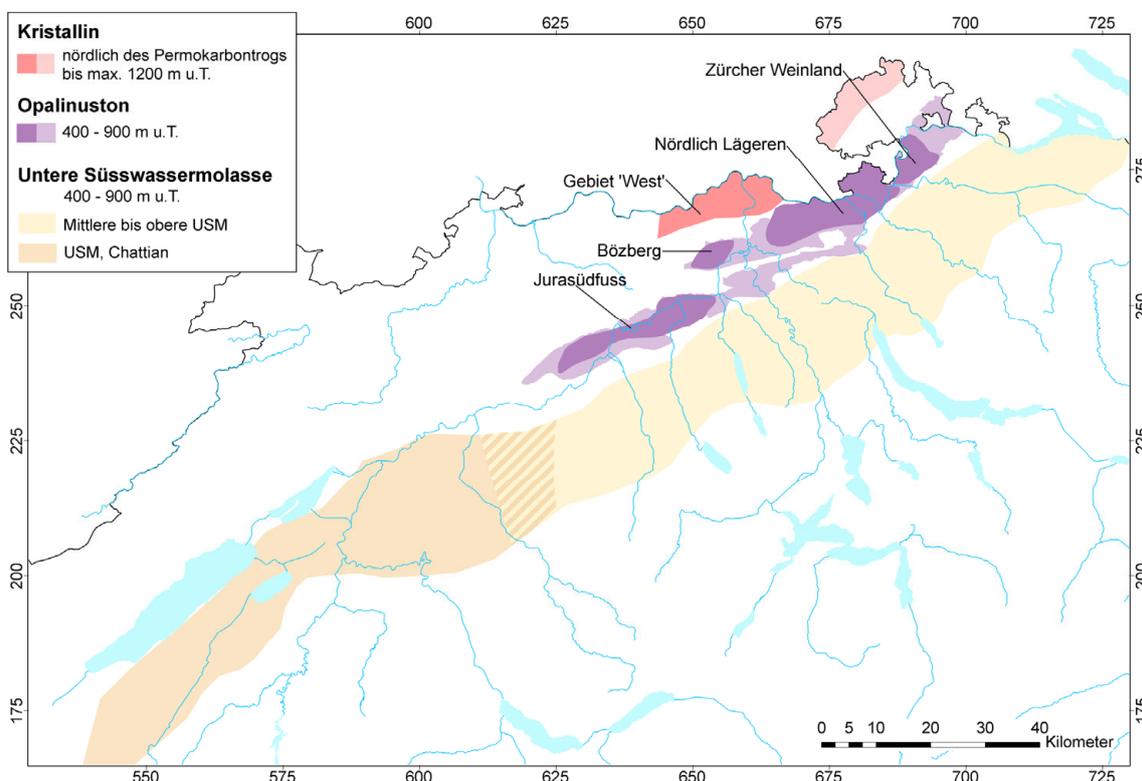


Fig. 6-1: Überblick über die räumliche Verbreitung der möglichen Wirtgesteine (in den bevorzugten Tiefenbereichen) und Abgrenzung möglicher Gebiete (dunklere Farbtöne).

Beim Kristallin wird das Gebiet 'West' bevorzugt, beim Opalinuston werden vier mögliche Gebiete abgegrenzt und benannt, und bei den tonreichen Gesteinen der Unteren Süsswassermolasse wird der westliche Teil mit der generell tonreicheren Ausbildung bevorzugt.

Zwischen diesen möglichen Wirtgesteinen und Gebieten gibt es aus geologisch-sicherheits-technischer Sicht deutliche Unterschiede. Diese betreffen die Qualität der geologischen Barriere (Redundanz des Barrierensystems), die Komplexität des Wirtgesteins bzw. der geologisch-tektonischen Situation und damit verbunden die Möglichkeit, dass sich bei einer allfälligen Realisierung erhebliche Schwierigkeiten ergeben könnten.

6.2 Begründung, Beschreibung und Beurteilung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete

6.2.1 Begründung und Bezeichnung der möglichen Wirtgesteine und Gebiete

Die in diesem Bericht dokumentierte Begründung und Beurteilung der aus geologisch-sicherheitstechnischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete basiert auf einem systematischen Vorgehen und zieht für die Beurteilung Merkmale bei, welche dem internationalen Stand der Praxis entsprechen. Die Gesamtbetrachtung der geologischen Gegebenheiten in der Schweiz führt zu folgenden Resultaten:

- *Bevorzugte geologisch-tektonische Grossräume:* Unter dem übergeordneten Aspekt der Langzeitsicherheit wird der *geologisch-tektonische Grossraum „Nördliches Molassebecken des Mittellandes und nordöstlicher Tafeljura“* wegen der geologischen Langzeitstabilität und seines vergleichsweise einfachen strukturellen Aufbaus bevorzugt.
- *Mögliche Wirtgesteine:* Innerhalb dieses Grossraums werden folgende Gesteine wegen ihrer Eigenschaften, insbesondere der geringen hydraulischen Durchlässigkeit und der erwarteten räumlichen Ausdehnung, als mögliche Wirtgesteine identifiziert: a) *Kristallin*, b) *Opalinuston* (teilweise kombiniert mit wenig durchlässigen tonreichen Rahmengesteinen, welche als zusätzliche Transportbarriere wirken), c) *Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse* als Reserveoption.
- *Räumliche Verbreitung der Wirtgesteine:* Aus den vorhandenen Informationen lässt sich im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum die Verbreitung der möglichen Wirtgesteine in (bezüglich Langzeitstabilität und bautechnischer Machbarkeit) bevorzugten Tiefenlagen ableiten. Unter Berücksichtigung der relevanten grossräumigen tektonischen Elemente können die daraus resultierenden geographischen Räume auf Karten dargestellt werden (Fig. 6-1).
- *Geologische Beschreibung der Verbreitungsräume und Bezeichnung möglicher Gebiete:* Die Verbreitungsräume werden geologisch beschrieben und in Bereiche mit ähnlichen geologischen Merkmalen unterteilt. Die Beurteilung dieser Bereiche lässt die Abgrenzung möglicher Gebiete zu:
 - *Kristallin:* Kristallin in bevorzugter Tiefenlage kommt in zwei relativ kleinen Gebieten nördlich des Permokarbons vor, das Gebiet 'West' und das Gebiet 'Ost', vgl. Fig. 5-1. Diese Gebiete unterscheiden sich in den beobachteten Gesteinsdurchlässigkeiten und dem Grundwasseralter. Das Gebiet 'Ost' wird wegen der erwarteten weniger günstigen geologischen Bedingungen zurückgestellt.
 - *Opalinuston:* In einem Teil des Verbreitungsraums (Gebiete östlich der Aare) sind die (oberen) Rahmengesteine so ausgebildet, dass sie eine zusätzliche wirksame Transportbarriere bilden. Im Verbreitungsraum gibt es auch deutliche Unterschiede bezüglich der tektonisch bedingten gross- und kleinräumigen Deformationen (Gebiete im Tafeljura, in der Vorfaltenzone und in der Subjurassischen Zone). Weiter gibt es im Verbreitungsraum auch Unterschiede in der Mächtigkeit des Opalinustons. Aufgrund der lokalen geologisch-tektonischen Verhältnisse lassen sich folgende mögliche Gebiete abgrenzen: Das Gebiet Zürcher Weinland, das Gebiet Nördlich Lägeren, das Gebiet Bözberg und das Gebiet Jurasüdfuss.
 - *Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse:* Innerhalb des Verbreitungsraums der USM gibt es im Westen Teilgebiete, wo die Ausbildung des Wirtgesteins tendenziell günstiger ist (Häufigkeit der Sandsteineinlagerungen tendenziell geringer, d.h. insgesamt tonreicher).

Die hier aufgeführten möglichen Gebiete stimmen grundsätzlich mit den früheren Aussagen der Nagra zu den verschiedenen geologischen Möglichkeiten für die geologische Tiefenlagerung der HAA überein (Nagra 1988, 1994b, 2003a, 2003b).

6.2.2 Beschreibung und Beurteilung der möglichen Wirtgesteine

Die möglichen Wirtgesteine werden nachfolgend beschrieben und beurteilt:

- *Kristallin*: Kristalline Gesteine können sich als Wirtgestein eignen. In Finnland – wo die Rahmenbewilligung für das Lager für abgebrannte Brennelemente 2001 erteilt wurde – und in Schweden – wo die Standortwahl für das Lager für abgebrannte Brennelemente im Jahr 2008 (Einreichung Baugesuch) vorgesehen ist – beruhen die Projekte für abgebrannte Brennelemente auf kristallinem Grundgebirge als Wirtgestein. In diesen Ländern wird ein Sicherheitskonzept verwendet, bei dem der Einschluss der Radionuklide in erster Linie durch einen sehr langlebigen Kupferbehälter gewährleistet wird; die Hauptaufgabe der Geologie besteht darin, für die Langlebigkeit dieser Behälter geeignete Bedingungen über die erforderlichen Zeiten zu bieten (Posiva 2003a, SKB 2004). Auch in der Schweiz wurde das kristalline Grundgebirge in Hinblick auf ein HAA-Lager intensiv erkundet und anlässlich zweier Meilensteine von der Nagra als eine grundsätzlich machbare Option beurteilt (Nagra 1985, Thury et al. 1993, Nagra 1994a); auch die HSK (HSK 2004) sieht im Zusammenhang mit ihrer Beurteilung des Sicherheitsberichts der Nagra (Nagra 1994a) prinzipiell die Möglichkeit eines sicheren Lagers, hat aber bezüglich der Chancen für eine erfolgreiche Exploration eines Standorts (Nachweis genügend grosser Blöcke mit geeigneten Gesteinseigenschaften) mehr Vorbehalte als die Nagra. Die Gebiete mit Kristallinvorkommen im Grundgebirge der Nordschweiz, welche bezüglich ihrer Tiefenlage für eine geologische Tiefenlagerung in Frage kommen, sind wegen des Permokarbondrogs von sehr beschränkter Ausdehnung. Das kristalline Grundgebirge ist in diesen Gebieten zudem stark tektonisiert und in einzelne Blöcke zergliedert. Es ist durchaus möglich, dass wegen der beschränkten Grösse der wenig deformierten Blöcke das Lager in mehrere Kompartimente aufgeteilt werden müsste. Es besteht auch die Möglichkeit, dass ein Standort an mangelnder Blockgrösse scheitert, d.h. ein Lager in zu viele Kompartimente aufgeteilt werden müsste. Da die einzelnen wenig deformierten Blöcke durch kleinere Störungen und Klüfte in ihrer Barrierenwirkung beeinträchtigt sein können, würde es eventuell notwendig sein, ein alternatives Sicherheitskonzept zu verwenden, bei dem der langfristige Einschluss primär durch langlebige Lagerbehälter gewährleistet wird. Wegen der Sedimentbedeckung über dem Kristallin der Nordschweiz ist die Abklärung der Blockgrösse und ihrer Eigenschaften schwierig; für eine zuverlässige Erkundung wären eine grössere Anzahl Bohrungen und ein Schacht mit Erkundungsstollen notwendig.
- *Opalinuston*: Der Opalinuston wurde schon früh im Entsorgungsprogramm als potenzielles Wirtgestein identifiziert (vgl. VSE et al. 1978) und wird seit mehr als 10 Jahren eingehend untersucht. Auch in anderen Ländern werden tonreiche Sedimentgesteine als Wirtgestein in Betracht gezogen (z.B. Belgien, Frankreich, Japan, Spanien). Der in Frankreich am potenziellen Standort Bure (Meuse/Haute-Marne) intensiv untersuchte Tonstein des Callovo-Oxfordian ist dem Opalinuston sehr ähnlich (Andra 2001b, 2005). Die Eignung des 1994 als potenzielles Wirtgestein erster Priorität gewählten Opalinustons für weitere Untersuchungen und für den Entsorgungsnachweis wurde durch die umfangreichen Untersuchungen und die Folgerungen aus dem Projekt Opalinuston und der Dokumentation zum Entsorgungsnachweis (Nagra 2002a, b, c) bestätigt. Der Opalinuston bildet aufgrund seiner Eigenschaften eine sehr gute geologische Radionuklidbarriere. Die günstige Beurteilung des Opalinustons durch die Nagra wurde auch durch Experten des Bundes (KNE 2005) und

durch die vom Bundesamt für Energie mit dem Review des Sicherheitsberichts beauftragte internationale Expertengruppe (NEA 2004) bestätigt.

Die östlich der Aare in grösserer Mächtigkeit vorhandenen tonreichen Rahmengesteine des Opalinuston bilden eine zusätzliche Transportbarriere. Die in der Bohrung Benken im Opalinuston und in den tonigen Abfolgen der Rahmengesteine vorgefundene Porenwasserzusammensetzung zeigt, dass es sich um sehr altes Wasser handelt, das sich während geologischer Zeiträume nicht wesentlich verändert hat; dies bestätigt die gute Barrierenwirkung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine. Das Gestein ist allerdings bautechnisch anspruchsvoll, und die Frage der Freisetzung von im Lager produziertem Gas verlangt wegen der sehr kleinen Durchlässigkeit spezielle Beachtung.

- *Tonreiche Gesteine der Unteren Süsswassermolasse:* Die USM hat als geologische Einheit eine grosse räumliche Verbreitung. Die für die geologische Tiefenlagerung prinzipiell in Frage kommenden ton- und mergelreichen Serien innerhalb dieser Molasseinheit haben aber eine beschränkte Ausdehnung. Sie liegen im Wesentlichen in ehemaligen Schwemmebenen zwischen oder vor den sandstein- und konglomeratreichen alpinen Schuttfächern. Aber auch in diesen Arealen kommen höher durchlässige Sandsteinlagen (fossile mäandrierende Flusssysteme) vor, die lateral und vertikal hydraulisch verbunden sein können und die Wirksamkeit des Einschlusses vor allem in horizontaler aber auch in vertikaler Richtung stark beeinträchtigen können. Auch unter Berücksichtigung der neusten Methoden der geophysikalischen Exploration (3D-Seismik) können einzelne kritische (weil verstärkt durchlässige) Sandsteinrinnen meist nicht oder nur unzuverlässig erfasst werden, unter anderem weil der seismische Kontrast und die Mächtigkeit der Rinnen zu gering sind.

Wegen ihres auch im lokalen Massstab heterogenen, nur ungenügend explorierbaren Aufbaus und insbesondere wegen des Vorkommens von höher durchlässigen Sandsteinrinnen werden die tonreichen Gesteine der USM für die Lagerung der HAA in Anlehnung an den 1994 von den Behörden und ihren Experten mitgetragenen Vorschlag der Nagra (vgl. Nagra 1994b) weiterhin als Reserve-Option betrachtet (vgl. Nagra 1994b); die seit 1994 neu dazu gekommenen Erkenntnisse haben die Vorbehalte zu diesem Wirtgestein und seiner Explorierbarkeit eher noch verstärkt.

Falls die tonreichen Gesteine der USM weiter verfolgt würden, wäre dies mit einem Sicherheitskonzept zu verbinden, bei dem der langfristige Einschluss primär durch sehr langlebige Lagerbehälter zu gewährleisten wäre.

Gesamthaft gesehen bieten aus Sicht der Nagra alle Wirtgesteine – mit auf die geologischen Bedingungen abgestimmten technischen Barrieren (insbesondere die Wahl des Behältermaterials) – die Voraussetzungen für ein sicheres Tiefenlager. Für das Kristallin und die Untere Süsswassermolasse sind jedoch die wegen ihrer Heterogenität vorhandenen und wegen der schwierigen Explorierbarkeit auch nach einer umfangreichen Standortabklärung verbleibenden Ungewissheiten grösser als beim Opalinuston. Der Opalinuston liefert wegen seiner sehr guten Eigenschaften als Transportbarriere den grössten Beitrag zur Barrierenwirkung des Gesamtsystems und die Aussagen zu seinen Barriereigenschaften an einem konkreten Standort sind gut belastbar. Deshalb hat die Nagra vorgeschlagen, die weiteren Arbeiten im HAA-Programm prioritär auf den Opalinuston zu konzentrieren.

6.2.3 Beschreibung der möglichen Opalinuston-Gebiete

Nachfolgend werden die wichtigsten Aspekte und Merkmale der möglichen Gebiete für das von der Nagra bevorzugte Wirtgestein Opalinuston zusammengefasst.

- Im Gebiet *Zürcher Weinland* hat der Opalinuston eine erhebliche laterale Ausdehnung, und das Gebiet bietet deshalb Flexibilität bei der Anordnung der untertägigen Lagerbauwerke. Wegen der leichten Neigung des Wirtgesteins nach Süden kann innerhalb des Gebiets die Tiefenlage der untertägigen Lagerstollen im relevanten Bereich frei gewählt und daher den örtlichen Bedingungen angepasst werden. Die tektonische Situation im Zürcher Weinland mit einem leicht kompressiven Regime, aber ohne signifikante Deformation des Opalinustons, führt dazu, dass der Opalinuston nur sehr wenige Störungszonen von Bedeutung enthält. Im Gebiet sind die Rahmengesteine tonreich ausgebildet und bilden eine zusätzliche wirksame Transportbarriere.
- Das Gebiet *Nördlich Lägeren* liegt grösstenteils in der durch alpinen Fernschub kompressiv beanspruchten Vorfaltenzone. Das Gebiet wird durch grösserräumige tektonische Strukturen in verschiedene Teilgebiete unterschiedlicher Grösse gegliedert. Auch innerhalb der Teilgebiete gibt es teilweise verschiedene kleinere Strukturen, denen mit den untertägigen Lagerstollen mit Vorteil ausgewichen würde. Das Gebiet ist insgesamt relativ kleinräumig strukturiert. Zudem liegt der Opalinuston im südlichen Teil des Gebiets in grösserer Tiefenlage (bis 900 m unter Terrain) und damit in einem Bereich, in dem zunehmend bautechnische Schwierigkeiten auftreten können. Die nördlichen Teilgebiete sind bezüglich Tiefenlage und tektonischer Beanspruchung günstiger als der südliche Teil des Gebiets, sie sind aber räumlich sehr begrenzt. Wegen ihrer tonreichen Ausbildung bilden die Rahmengesteine im ganzen Gebiet eine zusätzliche wirksame Transportbarriere.
- Im Gebiet *Bözberg* ist die verfügbare Fläche mit Opalinuston in geeigneter Tiefe relativ klein und bietet wenig Flexibilität für die Anordnung der Untertagebauten. Die Überdeckung des Opalinustons ist relativ gering und bewegt sich im Bereich der minimalen Anforderungen. In diesem Gebiet sind die Formationen über dem Opalinuston (obere Rahmengesteine) generell kalkiger ausgebildet als östlich der Aare, was ihre Funktion als Zusatzbarriere einschränkt. Dabei spielt der Haupttrogenstein als regionaler Kluftwasser-Aquifer eine wichtige Rolle.
- Das Gebiet *Jurasüdfuss* liegt im Subjurassischen Bereich, ist daher tektonisch erheblich beansprucht und wird durch grössere tektonische Strukturen in zwei Teilgebiete gegliedert. Die wenig deformierten Opalinuston-Areale sind klein und bieten wenig räumliche Flexibilität. Auch innerhalb der ruhiger gelagerten Abschnitte muss mit fernschub-bedingten Kleinstrukturen gerechnet werden. Dies gilt insbesondere für die seismisch kaum explorierbaren schichtinternen Scherhorizonte, wie sie etwa in der Bohrung Schafisheim nachgewiesen wurden, und denen mit den untertägigen Lagerstollen kaum ausgewichen werden kann. Auch wenn diese Zonen aufgrund des Selbstabdichtungsvermögens hydraulisch kaum signifikant sein dürften, stellen sie eine Schwächung des Wirtgesteins dar. Weiter gibt es Hinweise, dass die Mächtigkeit des Opalinustons in einem Teil des Gebiets weniger als 100 m beträgt. Falls der geringdurchlässige obere Lias (im Liegenden des Opalinustons) einbezogen wird, würde der einschlusswirksame Gebirgsbereich voraussichtlich eine Mächtigkeit von mehr als 100 m erreichen. Ein Teil des Gebiets liegt tief (um 900 m unter Terrain), und es könnte zu grösseren bautechnischen Schwierigkeiten kommen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es aus Sicht der Nagra verschiedene Gebiete mit dem Wirtgestein Opalinuston gibt, welche die geologischen Voraussetzungen für ein sicheres Endlager grundsätzlich erfüllen.

6.3 Kenntnisstand

Basierend auf einem breiten Kenntnisstand zur Geologie der Schweiz aus der geologischen Forschung und aus Untersuchungen der öffentlichen Hand (z.B. im Zusammenhang mit dem Bau der Verkehrsinfrastruktur) und der Industrie (z.B. Kohlenwasserstoffexploration) hat die Nagra seit 1982 – unter Berücksichtigung der aus anderen Quellen anfallenden geologischen Informationen – schrittweise durch fokussierte Untersuchungen die Kenntnisse erweitert und vertieft. Nach regionalen Untersuchungen in der Nordschweiz erfolgten gezielte Untersuchungen im Hinblick auf projektorientierte Fragestellungen. Anschliessend wurden im Konsens mit den Behörden und ihren Experten für die weiteren Untersuchungen und für die Erbringung des Entsorgungsnachweises die Option erster Priorität – das Wirtgestein Opalinuston und das Gebiet Zürcher Weinland – ausgewählt und lokale Detailuntersuchungen durchgeführt. Die schrittweise Einengung der Optionen erfolgte durch Zurückstellen von Möglichkeiten, die sich zwar durchaus innerhalb des Spektrums der generellen Vorgaben bewegen, aber in der Gesamtbeurteilung als nachrangig eingestuft wurden.

Der heutige Kenntnisstand ist geeignet, um aus geologisch-sicherheitstechnischer Sicht die für die geologische Tiefenlagerung der HAA möglichen Wirtgesteine und Gebiete zuverlässig zu identifizieren und diese bezüglich der wichtigen geologisch-sicherheitstechnischen Eigenschaften zu beschreiben. Damit ist es möglich, die relevanten Unterschiede insbesondere zwischen den verschiedenen Wirtgesteinen, aber auch zwischen den möglichen Gebieten aus geologischer Sicht aufzuzeigen.

Der Kenntnisstand für die in diesem Bericht vorgenommene Beschreibung und Beurteilung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- *Die Identifikation und Beschreibung der bevorzugten geologisch-tektonischen Grossräume:* Dazu besteht gut etabliertes geologisches Wissen, das teilweise durch Untersuchungen der Nagra bestätigt bzw. vertieft worden ist. Die vorhandenen Kenntnisse erlauben es, die relevanten Unterschiede (grossräumige Bedingungen bzgl. Langzeitstabilität, Komplexität der Situation) zwischen den verschiedenen Grossräumen zuverlässig aufzuzeigen und fundiert den bevorzugten Grossraum abzugrenzen.
- *Die Identifikation und Beschreibung von möglichen Wirtgesteinen sowie die Darstellung ihrer räumlichen Verbreitung:* Diese basiert auf einem breiten Satz von Informationen und Daten aus zahlreichen Tiefbohrungen (Nagra, Kohlenwasserstoffexploration, Mineral- und Thermalwasser, Geothermie), von ausgedehnten Seismikkampagnen (Forschung, Erdölindustrie und Nagra), aus den Felslabors im Kristallin (Grimsel) und im Opalinuston (Mont Terri), aus Eisenbahn- und Strassentunnels sowie aus Kraftwerkstollen, von zahlreichen Forschungsarbeiten der Universitäten und Hochschulen sowie von Informationen und Erfahrungen zu gleichen oder ähnlichen Wirtgesteinen aus dem Ausland. Die vorhandenen Kenntnisse erlauben eine belastbare Diskussion der relevanten Unterschiede zwischen den Wirtgesteinen (Barrierewirkung, geotechnische Eigenschaften, Charakterisierbarkeit).
- *Die Identifikation und Beschreibung von möglichen Gebieten:* Als Grundlage dient die geologische Charakterisierung aufgrund von Kartierungen (Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000), Tiefbohrungen der Nagra und andere Bohrungen (Kohlenwasserstoffexploration, Mineral- und Thermalwasser, Geothermie), der umfassenden Auswertungen der Seismik der Nagra sowie gezielten vertieften Auswertungen der Seismik Dritter. Mit den vorhandenen Kenntnissen können mögliche Gebiete und Räume abgegrenzt und die entscheidenden Unterschiede – Barrierewirkung (z.B. Ausbildung Rahmengesteine), Komplexität der geologisch-tektonischen Situation, Ausdehnung Wirtgestein, Explorierbarkeit, etc. – aufgezeigt werden.

Die für den Entsorgungsnachweis gewählte Wirtgesteinsoption Opalinuston mit dem Zürcher Weinland als Untersuchungsgebiet wurde projektspezifisch detaillierter untersucht, und es wurde daher eine fortgeschrittene Projektreife erreicht. Für die Identifikation, die Beschreibung und die Beurteilung der Optionen aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht genügen die vorhandenen regionalen Kenntnisse, welche es auch erlauben, die entscheidenden Unterschiede aufzuzeigen und zu beurteilen. Auf der bestehenden Basis können aus sicherheitstechnisch-geologischer Sicht die Prioritäten für die nächsten Schritte gut begründet gesetzt werden.

6.4 Ausblick

Für eine gesamtheitliche Beurteilung und vergleichende Bewertung der möglichen Gebiete für die Tiefenlagerung der BE/HAA/LMA wird das Verfahren gemäss 'Sachplan Geologische Tiefenlager' zur Anwendung kommen. Dabei sind neben den sicherheitstechnisch-geologischen Kriterien auch andere Elemente (Raumplanung, sozio-ökonomische Aspekte, etc.) zu beurteilen (BFE 2005b). Der Konzeptteil des Sachplans – welcher die dazu notwendigen Kriterien und das Vorgehen verbindlich festlegt – wird zur Zeit von den Behörden des Bundes erarbeitet. Das Sachplanverfahren soll zu einem Vorschlag für einen bevorzugten Standort führen, für den ein Rahmenbewilligungsgesuch vorbereitet wird. Erst die vom Bundesrat zu erteilende Rahmenbewilligung wird den Standort festlegen. Der Bundesratsentscheid muss gemäss Kernenergiegesetz vom Parlament genehmigt werden; der Entscheid des Parlaments wiederum untersteht dem fakultativen Referendum.

Referenzen

- AkEnd (2002a): Stellungnahme zum Auswahlverfahren Opalinuston im Zürcher Weinland. Im Auftrag der Deutsch-Schweizerischen Kommission für die Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen (DSK). Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Deutschland.
- AkEnd (2002b): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Deutschland.
- Allia, V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Diss. Univ. Basel, Schweiz.
- Amman, M., Birkhäuser, P., Bläsi, H.-R., Lavanchy, J.-M., Löw, S., Meier, B. & Müller, W.H. (1993): Untere Süswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Nagra Tech. Ber. NTB 92-03.
- Andra (1999): Actes des journées scientifiques Andra 1997: Etude du Massif de Charroux-Civray: Bar-le-Duc, 13–14 octobre 1997. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.
- Andra (2001a): Dossier 2001 Argile sur l'avancement des études et recherches relatives à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formation géologique profonde: Rapport de synthèse. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), Châtenay-Malabry, France.
- Andra (2001b): Référentiel géologique du site de Meuse / Haute-Marne. Rapp. A RP ADS 99-005. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.
- Andra (2005): Référentiel du site de Meuse / Haute-Marne. Rapp. A RP ADS 99-005. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.
- Andrews, R.W., Dershowitz, W., Black, J. & Hufschmied, P. (1992): Evaluation of exploration strategies for hydrogeologic characterization of a repository area in the Opalinus Clay and Lower Freshwater Molasse. Nagra Tech. Rep. NTB 91-15.
- Aoki, K. (2002): Recent activities at underground research laboratories in Japan. Proc. Internat. Symp. NUCEF 2001. Rep. JAERI-Conf 2002-04. Japan Atomic Energy Research Institute, Kashiwa, Japan, 361–362.
- Arbeitsgemeinschaft Nagra-Colenco-GRS (2001): Auswertung von Langzeitsicherheitsanalysen hinsichtlich Kriterien für die Auswahl von Endlagerstandorten. Auftrag Bundesamt für Strahlenschutz BfS, Deutschland, Mai 2001. (<http://www.akend.de/aktuell/berichte/pdf/auswertung.pdf>)
- Baumberger, E. (1934): Die Molasse des Schweizerischen Mittellandes und Juragebietes. In: Geol. Führer d. Schweiz, Fasc. I, 57–75.
- Bäckblom, G. & Munier, R. (2002): Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results. Tech. Rep. TR-02-24. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm, Sweden.
- Behrmann, J.H., Herrmann, O., Horstmann, M., Tanner, D.C. & Bertrand, G. (2003): Anatomy and cinematics of oblique continental rifting revealed: a 3D case study from the SE Upper Rhine Graben (Germany). Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 87/7, 1–17.
- Berger, J.P. (1996): Cartes paléogéographiques-palinspastiques du bassin molassique suisse (Oligocène inférieur - Miocène moyen). N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 202:1, 1–44.

- Berger, Z. (1994): Satellite hydrocarbon exploration, interpretation and integration techniques. Springer, Berlin, Germany.
- Berger, Z. & Gundlach, T. (1990): The contribution of satellite interpretation to exploration in West Germany and Switzerland. BEB, Task Force Exploration Strategy, Report No. 3, unpublished.
- BFE, Bundesamt für Energie (2005a): Aebersold, M.: Nukleare Entsorgung. Es geht voran. Vortrag an Generalversammlung Forum VERA, 26. April 2005.
- BFE, Bundesamt für Energie (2005b): Bühlmann, W. & Aebersold, M.: Mit Sachplan die geologische Tiefenlagerung abklären. Forum Raumentwicklung, 1/2005.
- Biehler, D., Schmassmann, H., Schneemann, K. & Sillanpää, J. (1993): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Dogger-, Lias-, Keuper- und Muschelkalk-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 92-08.
- Birkhäuser, Ph., Roth, Ph., Meier, B. & Naef, H. (2001): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 00-03.
- Blaser, P., Gubler, T., Küpfer, T., Marschall, P., Matter, A., Matyas, J., Meier, B.P., Müller, W.H., Schlanke, S., Schlunegger, F. & Wyss, E. (1994): Geothermiebohrung Bassersdorf: Charakterisierung der Oberen Meeresmolasse und der Unteren Süswassermolasse. Nagra Tech. Ber. NTB 94-01.
- Boisson, J.-Y., Cabrera, J. & De Windt, L. (1998): Etude des écoulements dans un massif argileux, laboratoire souterrain de Tournemire: Rapport final. EUR 18338 FR. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg..
- Boisson, J.-Y. (Ed.) (2005): Catalogue of characteristics of argillaceous rocks studied with respect to radioactive waste disposal issues: Belgium, Canada, France, Germany, Hungary, Japan, Spain, Switzerland, United Kingdom and the United States. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- Bonin, B. (1998): Deep geological disposal in argillaceous formations: Studies at the Tournemire site. J. of Contaminant Hydrol. 35, 315–330.
- Bork, M., Kindt, A., Nierste, G. & Walterscheidt, K.-H. (2001): Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. GRS-A-2834. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), Köln, Deutschland.
- Bradbury, M.H. & Baeyens, B. (2003): Far-field sorption data base for performance assessment of a high-level radioactive waste repository in an undisturbed Opalinus Clay host rock. Nagra Tech. Rep. NTB 02-19.
- Bühler, C., Heitz, D., Trick, T. & Frieg, B. (2003): In-situ self-sealing of the EDZ as a consequence of loading. In: Proceedings of a European commission CLUSTER conference “Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories”, Luxembourg, Nov. 3–5, 2003. EUR 21028 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 281–286.
- Bühler, C., Trick, T. & Frieg, B. (2005): Selfrac (SE) Experiment: Long term dilatometer experiment. Mont Terri Project, Technical Note TN 2003-17 (in preparation). Federal Office of Water and Geology, Swiss Geol. Surv., Bern, Switzerland.
- Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.) (2000a): Geologische Karte der Schweiz 1:500'000 (provisorische GIS-Beta-Version). Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern, Schweiz.

- Bundesamt für Wasser und Geologie (Hrsg.) (2000b): Tektonische Karte der Schweiz 1:500'000 (provisorische GIS-Beta-Version). Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern, Schweiz.
- Burnett, M. (1996): 3-D-Seismic expressions of a shallow fluvial system in West Central Texas. In: Weimer, P. & Davis, T.L. (eds.): AAPG Studies in Geology 42, and SEG 3-D Geophysical Development Series 5. AAPG/SEG, Tulsa, USA, 45–56.
- Cabrera, J., Beaucaire, C., Bruno, G., de Windt, L., Genty, A., Ramambasoa, N., Rejeb, A., Savoye, S. & Volant, P. (2001): Projet Tournemire: Synthèse des programmes de recherche 1995–1999. Rapp. DPRE/SERGD 01-19. Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, Paris, France.
- CCE (1992): Endlagerung radioaktiver Abfälle: Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers. Serie "Euradwaste", Nr. 6, EUR 14598 DE. Kommission der Europäischen Gemeinschaften (CCE), Luxemburg.
- Chandler, N.A. (2003): Numerical modelling of repository sealing systems as applied to the analysis of underground research laboratory experiments. OPG Rep. 06819-Rep-01200-10099-R00. Ontario Power Generation (OPG), Toronto, Canada.
- Cloetingh, S., Ziegler, P., Cornu, T & the ENTEC Working Group (2003): Investigating environmental tectonics in Northern Alpine Foreland of Europe. EOS Trans. Amer. Geophys. Union 84/36, 349–357.
- CNE (1996): Rapport d'évaluation No. 2. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France.
- CNE (1997): Rapport d'évaluation No. 3. Commission Nationale d'Evaluation relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (CNE), Paris, France.
- Deichmann, N., Ballarin Dolfin, D. & Kastrup, U. (2000): Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 00-05.
- Diebold, P., Naef, H. & Ammann, M. (1991): Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz. Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. Nagra Tech. Ber. NTB 90-04, und Landeshydrologie und -geologie, Bern, Geol. Ber. Nr. 14.
- EKRA (2000): Wildi, W., Appel, D., Buser, M., Dermange, F., Eckhardt, A., Hufschmied, P., Keusen, H.-R. & Aebersold, M.: Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle: Schlussbericht. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA), Bern, Schweiz.
- Gander, P. (2004): Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse. Unpubl. Nagra Arb. Ber.
- Gautschi, A. (2001): Hydrogeology of a fractured shale (Opalinus Clay): Implications for deep geological disposal of radioactive wastes. Hydrogeol. J. 9, 97–107.
- Giamboni, M., Ustaszewski, K., Schmid, S.M., Schumacher, M. & Wetzler, A. (2004): Plio-Pleistocene deformation in the Rhine-Bresse transform zone: geological and geomorphological evidence of ongoing transpressional reactivation of Paleozoic and Paleogene structures. Int. J. Earth Sciences (Geol. Rdsch.) 93/2, 207–223.
- Gimmi, T. & Waber, H.N. (2004): Modelling of profiles of stable water isotopes, chloride, and chloride isotopes of pore water in argillaceous rocks in the Benken borehole. Nagra Tech. Rep. NTB 04-05.
- Goodwin, B.W., Mc Connell, D.B., Andres, T.H., Hajas, W.C., LeNeveu, D.M., Melnyk, T.W., Sherman, G.R., Stephens, M.E., Szekeley, J.G., Bera, P.C., Cosgrove, C.M., Dougan, K.D., Keeling, S.B., Kitson, K.I., Kummen, B.C., Oliver, S.E., Witzke, K., Wojciechowski, L. & Wikjard, A.G.

- (1994): The disposal of Canada's nuclear fuel waste: Post-closure assessment of a reference system. Rep. AECL-10717, COG-93-7. Atomic Energy of Canada Limited, Pinawa, Manitoba, Canada.
- Gorin, G., Morend, D. & Pugin, A. (2003): Bedrock, Quaternary sediments and recent fault activity in central Lake Neuchâtel, as derived from high-resolution reflection seismics. *Eclogae geol. Helv.* 96, Supplement 1, 3–10.
- Greber, E., Leu, W. & Wyss, R. (1995): Erdgasindikationen in der Schweiz: Grundlagen zur Charakterisierung des Gasgefahrenpotentials im Untergrund. *Schweiz. Ing. u. Architekt* 24, 567–572.
- Gygi, R.A. (1969): Zur Stratigraphie der Oxford-Stufe (oberes Jura-System) der Nordschweiz und des süddeutschen Grenzgebietes. *Beitr. geol. Karte Schweiz* 55, 1–123.
- Gygi, R.A. (2000): Annotated index of lithostratigraphic units currently used in the Upper Jurassic of northern Switzerland. *Eclogae geol. Helv.* 93, 125-146.
- Heim, A. (1922): *Geologie der Schweiz*. Tauchnitz, Leipzig, Deutschland, 1919–1922.
- Heitz, D., Trick., T. & Bühler, C. (2003): Selfrac: Long term plate load experiment. Mont Terri Project, Technical Note 2003-51. Federal Office of Water and Geology, Swiss Geol. Surv., Bern, and EC-Programme Euratom/Nuclear Fission.
- Hekel, U. (1994): Hydrogeologische Erkundung am Beispiel des Opalinustons (Unteres Aalenium). *Tübinger geowissensch. Arbeiten C18*, Univ. Tübingen, Deutschland.
- Hölker, A. & Graf, R. (2004): Explorierbarkeit der USM mit 3D-Seismik. Unpubl. Nagra Arb. Ber.
- Horseman, S.T., Higgo, J.J.W., Alexander, J. & Harrington, J.F. (1996): Water, gas and solute movement through argillaceous media. Nuclear Energy Agency Rep. CC-96/1, OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- Hoth, P., Krull, P. & Wirth, H. (2003): Screening methodology for site selection of a nuclear waste repository in shale formations in Germany. Proc. OECD/NEA Geosphere Stability Workshop, Braunschweig, 9-11 December 2003. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- HSK (1986): Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). HSK 23/28. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Würenlingen, Schweiz.
- HSK (1990): Stellungnahme zur Sedimentstudie der Nagra (NTB 88-25). HSK 23/34. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Würenlingen, Schweiz.
- HSK (1993): Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. HSK Richtlinie R-21/d. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Würenlingen, Schweiz.
- HSK (1994): Brief von A. Zurkinden, HSK, an E. Kiener, BEW, 18. März 1994: Lagebeurteilung der Sedimentprojekte.
- HSK (1996): Arbeitsgruppe Kristallin Nordschweiz: Schlussbericht der Arbeitsgruppe (Juni 1996). HSK, Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2001): Kurzer Überblick über das Auswahlverfahren eines Sedimentstandortes für die Endlagerung hochaktiver Abfälle. HSK 23/62. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Würenlingen, Schweiz.

- HSK (2004): Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der Nagra. HSK 23/73. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Würenlingen, Schweiz.
- HSK (2005): Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Bericht in Bearbeitung.
- IAEA (1994): Siting of geological disposal facilities. IAEA Safety Guides, Safety Series No. 111-G-4.1. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
- IAEA (1995): The principles of radioactive waste management. IAEA Safety Fundamentals, Safety Series No. 111-F. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, Austria.
- IAEA (2001): The HADES underground research facility (URF), Mol, Belgium. In: The use of scientific and technical results from underground research laboratory investigations for the geological disposal of radioactive waste. IAEA-TECDOC 1243. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 43–46.
- Jäggi, K. & Steffen, P. (1999): Sondierbohrung Benken: Geologisches Sampling, Bohrgasmessungen, Sampler Logs 1:200. Unpubl. Nagra Int. Ber.
- Jordi, H.A. (1955): Geologie der Umgebung von Yverdon (Jurasüdfuss und mittelländische Molasse). Beitr. Geol. Karte Schweiz 84, NF99.
- Jordi, H.A. (1989): Westschweizerisches Molasseplateau, tektonisch-stratigraphische Übersicht. EPA-Nr. 217.456. Bundesamt f. Energiewirtschaft, Komm. Nukleare Entsorgung, Bern, Schweiz.
- Jordi, H.A. (1990): Tektonisch-strukturell Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 56/130, 1–11.
- Jordi, H.A. (1993): Tectonique du bassin molassique et son substratum jurassique-crétacé dans la région Orbe–Yverdon–Grandson. Bull. Soc. vaud. Sci. Nat. 82/3, 279–299 (également: Bull. Lab. Géol. et Mus. Géol. Univ. Lausanne 321).
- Jordi, H.A. (1995): Atlas géologique de la Suisse 1:25'000, 1203 Yverdon-les-Bains, Notice explicative. Service hydrogéologique et géologique national, Berne, Suisse.
- Kastrup, U. (2002): Seismotectonics and stress field variations in Switzerland. Diss. ETH Zürich Nr. 14527.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG) vom 21. März 2003 (Stand 28. Dezember 2004). SR 732.1.
- Keller, B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. Eclogae geol. Helv. 85/3, 611-651.
- Keller, B., Bläsi, H.-R., Platt, N.H., Mozley, P.S. & Matter, A. (1990): Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrungen Langenthal. Nagra Tech. Ber. NTB 90-41.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004 (Stand 1. Februar 2005). SR 732.11.
- KNE (1990): Kommission Nukleare Entsorgung (KNE): Stellungnahme zur Sedimentstudie der Nagra (NTB 88-25). KNE, Bern, Schweiz.
- KNE (2005): Kommission Nukleare Entsorgung (KNE): Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra: Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Mach-

- barkeit. Expertenbericht zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). HSK 35/98. KNE, Bern, Schweiz..
- Kopp, J. (1965): Der Erdgasfund von Pfaffnau. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 31/81, IX-X.
- KSA (1990): Vernehmlassung: Zwischenbericht zur Sedimentstudie. Kommission für die Sicherheit von Atomanlagen (KSA), Würenlingen, Schweiz.
- Kuhlemann, J. & Kempf, O. (2001): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. *Sedimentary Geology* 152, 45–78.
- Küpfer, Th. (2005): Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse. Unpubl. Nagra Arb. Ber.
- Laubscher, H.P. (1961): Die Fernschubhypothese der Jurafaltung. *Eclogae geol. Helv.* 54/1, 221–282.
- Laubscher, H.P. (1985): The eastern Jura: Relations between thin skinned and basement tectonics, local and regional. *Nagra Techn. Ber. NTB* 85-53.
- Laubscher, H.P. (1992): Jura kinematics and the Molasse basin. *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 653–675.
- Lemcke, K. (1974): Vertikalbewegungen des vormesozoischen Sockels im nördlichen Alpenvorland vom Perm bis zur Gegenwart. *Eclogae geol. Helv.* 67, 121–133.
- Lemcke, K., Büchi, U.P. & Wiener, G. (1968): Einige Ergebnisse der Erdölexploration auf die mittelländische Molasse der Zentralschweiz. Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing. 35/87, 15–34.
- Lemcke, K. & Tunn, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer Verkarsteten Malmunterlage. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing. 23/64, 35–56.
- Marschall, P., Fein, E., Kull, H., Liedtke, L., Müller-Lida, I. & Shao, H. (1999): Grimsel Test Site, Investigation Phase V (1997–2002): Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). *Nagra Tech. Rep. NTB* 99-07.
- Matyas, J. (1998): Carbonate cements in the Tertiary sandstones of the Swiss Molasse basin: Rrelevance to palaeohydrodynamic reconstruction. *Spec. Publ. int. Assoc. Sediment.* 26, 141–162.
- Maurer, H. (1983): Sedimentpetrographische Analysen an Molasseabfolgen in der Westschweiz. *Jb. Geol. Bundesanst. Wien*, 126/1, 23–69.
- Mayor, J.-C., García-Siñeriz, J.-L., Alonso, E., Alheid, H.-J. & Blümling, P. (2005): Engineered barrier emplacement experiment in Opalinus Clay for the disposal of radioactive waste in underground repositories. *Enresa, publicación tecnica* 02/2005.
- Mazurek, M. (1998): Geology of the crystalline basement of Northern Switzerland and derivation of geological input data for safety assessment models. *Nagra Tech. Rep. NTB* 93-12.
- Mazurek, M., Pearson, F.J., Volckaert, G. & Bock, H. (2003): Features, Events and Processes evaluation catalogue for argillaceous media. Nuclear Energy Agency Report NEA4437. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- Mazurek, M., Hurford, A.J. & Leu W. (in prep.): Deciphering the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin.

- Meier, B. (1994a): Untere Süsswassermolasse des zentralen und östlichen Mittellandes: Regionale Interpretation bestehender Seismik und petrophysikalische Analyse von Fremd- und Eigenbohrungen. Unpubl. Nagra Int. Ber.
- Meier, B. (1994b): Untere Süsswassermolasse des westlichen Mittellandes: Regionale Interpretation bestehender Seismik und petrophysikalische Analyse von Fremdbohrungen. Unpubl. Nagra Int. Ber.
- Müller, W.H., Huber, M., Isler, A. & Kleboth, P. (1984): Erläuterung zur Geologischen Karte der zentralen Nordschweiz 1:100'000. Nagra Tech. Ber. NTB 84-25.
- Müller, W.H., Naef, H. & Graf, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 99-08.
- Naef, H., Birkhäuser, Ph. & Roth, Ph. (1995): Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägeren–Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 94-14.
- Nagra (1985): Projekt Gewähr 1985: Vols. 1–8, Vol. 9 (English Summary). Nagra Gewähr Berichte NGB 85-01/09.
- Nagra (1988): Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz. Nagra Tech. Ber. NTB 88-25.
- Nagra (1991): Sedimentstudie Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen. Nagra Tech. Ber. NTB 91-19.
- Nagra (1994a): Kristallin-1: Safety assessment report. Nagra Tech. Rep. NTB 93-22.
- Nagra (1994b): Nagra: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. Nagra Tech. Ber. NTB 94-10.
- Nagra (2002a): Projekt Opalinuston: Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-02.
- Nagra (2002b): Projekt Opalinuston: Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Tech. Ber. NTB 02-03.
- Nagra (2002c): Project Opalinus Clay: Safety report: Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Tech. Rep. NTB 02-05.
- Nagra (2003a): Projekt Opalinuston: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle: Zusammenfassender Überblick. 2. überarbeitete Auflage. Nagra, Wettingen, Schweiz.
- Nagra (2003b): Sicherheit für die Zukunft: Geologische Tiefenlagerung. Nagra Focus 4, Oktober 2003, 12–17.
- Nagra (2004): Effects of post-disposal gas generation in a repository for SF/HLW/LILW sited in Opalinus Clay. Nagra Tech. Rep. NTB 04-06.
- Nagra (2005a): Ergebnisse der geologischen, hydrogeologischen und geochemischen Untersuchungen im Uetlibergtunnel. Unpubl. Nagra Arb. Ber. (in Vorbereitung).

- Nagra (2005b): Kompilation übertiefte Täler. Unpubl. Nagra Arb. Ber. (in Vorbereitung).
- NEA (1995): The environmental and ethical basis of geological disposal: a collective opinion of the Radioactive Waste Management Committee. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2003a): SAFIR 2: Belgian R&D programme on the deep disposal of high-level and long-lived radioactive waste. An international peer review. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2003b): The French R&D programme on deep geological disposal of radioactive waste. An international peer review of the "Dossier Argile 2001". OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- NEA (2004): Die Sicherheit der geologischen Tiefenlagerung von BE, HAA und LMA in der Schweiz: Eine internationale Expertenprüfung der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse der Tiefenlagerung im Opalinuston des Zürcher Weinlands. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France.
- Neall, F. (Ed.) (1994): Kristallin-I – Results in Perspective. Nagra Tech. Rep. NTB 93-23.
- Neall, F., Smith, P., Sumerling, T. & Umeki, H. (1995): Die Sicherheitsanalyse des Schweizer HAA-Endlagers im internationalen Vergleich. Nagra Informiert 25, 47–55.
- Neall, F.B. & Smith, P.A. (Eds.) (2004): H12: Examination of safety assessment aims, procedures and results from a wider perspective. JNC Report TY1400 2004-001, JNC, Tokai, Japan.
- Neerdael, B. & Boyazis, J.P. (1997): The Belgium underground research facility: Status on the demonstration issues for radioactive waste disposal in clay. Nuclear Engineering and Design 176/1-2, 89-96.
- Nold, M. (1992): Pilotstudie USM – Möglichkeiten und Grenzen der Seismik bei der Abgrenzung von faziellen Architektur-Elementen in der Unteren Süsswassermolasse. Unpubl. Nagra. Int. Ber.
- NRC (1996): Siting Criteria. In: Code of Federal Regulations, Title 10, Part 60, Disposal of high-level radioactive wastes in geologic repositories. 10 CFR Part 60, § 60.122.
- Nüesch, R. (1991): Das mechanische Verhalten von Opalinuston. Diss. Nr. 9349, ETH Zürich, Switzerland.
- NUMO (2004): Evaluating site suitability for a HLW repository: Scientific background and practical application of NUMO's siting factors. NUMO-TR-04-04. Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO), Tokyo, Japan.
- Obayashi Corporation (1993): Kristallin-I: Repository layout study based on rock mechanics considerations: Numerical and engineering investigation of tunnel stability in a fracture zone (Final Report of Task 1). Unpubl. Nagra Int. Rep.
- ONDRAF (2001a): SAFIR II: Safety assessment and feasibility interim report. NIROND-2001-06 E. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched fissile materials (ONDRAF), Brussels, Belgium.
- ONDRAF (2001b): Technical overview of the SAFIR 2 report. NIROND-2001-05 E. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched fissile materials (ONDRAF), Brussels, Belgium.
- Pavoni, N. (1961): Faltung durch Horizontalverschiebung. Eclogae geol. Helv. 80, 516-534.
- Pearson, F.J., Balderer, W., Loosli, H.H., Lehmann, B.E., Matter, A., Peters, T., Schmassmann, H., & Gautschi, A. (1991): Applied isotope hydrogeology. A case study in northern Switzerland. Elsevier, Amsterdam, Netherlands (Nagra Tech. Rep. NTB 88-01).

- Pearson, F.J., Lolcama, J.L. & Scholtis, A. (1989): Chemistry of waters in the Böttstein, Weiach, Riniken, Schafisheim, Kaisten and Leuggern boreholes. Nagra. Tech. Rep. NTB 86-19.
- Pearson, F.J., Arcos, D., Bath, A., Boisson, J.-Y., Fernández, A.M., Gaebler, H.E., Gaucher, E., Gautschi, A., Griffault, L., Hernan, P. & Waber, H.N. (2003): Geochemistry of water in the Opalinus Clay formation at the Mont Terri Rock Laboratory – Synthesis Report. Berichte des Bundesamtes für Wasser und Geologie – Serie Geologie, Nr. 5. Bern, Switzerland.
- Persaud, M. (2002): Active tectonics in the Eastern Swiss Alps. Diss. Univ. Bern, Switzerland.
- Persaud, M. & Pfiffner A.O. (2004): Active deformation in the Eastern Swiss Alps: Post-glacial faults, seismicity and surface uplift. *Tectonophysics* 385 (1-4), 59–84.
- Pfiffner, O.A. & Heitzmann, P. (1997): Geological interpretation of the seismic profiles of the central traverse (lines C1, C2 and C3-north). In: Results of NRP 20 deep structure of the Swiss Alps. Birkhäuser, Basel, Switzerland.
- Pfiffner, O.A., Kühni, A. & Jemelin, L. (1977): Hydrogeologischer Atlas der Schweiz, 8.2 Geologische und hydrogeologische Profile, Teil 1: Geologie, Profil 2. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, Schweiz.
- Pfiffner, O.A., Lehner, P., Heitzmann, P., Müller, S. & Steck, A. (1997): Deep structure of the Swiss Alps, Results of NRP 20. Birkhäuser, Basel, Switzerland.
- Posiva (1999): Vieno, T. & Nordman, H.: Safety assessment of spent fuel disposal in Hästholmen, Kivetty, Olkiluoto and Romuvaara: TILA-99. Posiva Report 99-07. Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- Posiva (2003a): Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants: Programme for research, development and technical design for 2004–2006. Rep. Posiva TKS-2003. Posiva Oy, Helsinki, Finland.
- Posiva (2003b): Baseline Conditions at Olkiluoto. Rep. Posiva 2003-2, Posiva Oy, Olkiluoto, Finland.
- Prestel, R. (1990): Untersuchungen zur Diagenese von Malm-Karbonatgesteinen und Entwicklung des Malm-Grundwassers im süddeutschen Molassebecken. Diss. Inst. f. Geol. u. Paläont., Univ. Stuttgart, Deutschland.
- Read, R.S., Martino, J.B., Dzik, E.J., Oliver, S., Falls, S. & Young, R.P. (1997): Analysis and interpretation of AECL's Heated Failure Tests. OPG Rep. 06819-REP-01200-0070-R00. Ontario Power Generation (OPG), Toronto, Canada.
- Rodwell, W.R. (2001): The EC/NEA status report: conclusions and outstanding issues. In: Workshop proceedings on Gas generation and migration in radioactive waste disposal: Safety-relevant issues, Reims, France, 26-28 June 2000. OECD/NEA, Issy-les-Moulineaux, France, 99–101.
- Roure, F., Bergerat, F., Damotte, B., Mugnier, J.-L. & Polino, R. (1996): The ECORS-CROP Alpine seismic traverse. *Mem. Geol. Fr.* 170.
- Rübel, A.P., Sonntag, Ch., Lippmann, J., Pearson, J.F. & Gautschi, A. (2002): Solute transport in formations of very low permeability: Profiles of stable isotope and dissolved noble gas contents of pore water in the Opalinus Clay, Mont Terri, Switzerland. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66/8, 1311–1321.
- Rutsch, R.F. (1967): Biel-Bern-Thun: Querprofil durch das Molassebecken vom Südrand des Kettenjuras bei Biel bis zum Alpennordrand im Gurnigelgebiet (Exk. Nr. 15). In: *Geol. Führer d. Schweiz*, Heft 4, 238–253.

- Sabet, B.B., Shao, H., Autio, J., Elorza, F.J., Canamon, I. & Perez, J.C. (2003): EDZ assessment in the FEBEX II project. In: Proc. of the CLUSTER Conference "Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories", Luxembourg, Nov 3–5, 2003. EUR 21028 EN. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 137–142.
- Schegg, R. (1992): Thermal maturity of the Swiss Molasse Basin: Indications for paleogeothermal anomalies? *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 745–764.
- Schegg, R. & Leu, W. (1998): Analysis of erosion events and palaeogeothermal gradients in the North Alpine Foreland Basin of Switzerland. In: Düppenbecker, S.J. & Illiffe, J.E. (eds): *Basin Modelling: Practice and Progress*. Geol. Soc. London Spec. Publ. 141, 137–155.
- Schlatter, A. (1999): Neotektonische Untersuchungen in der Nordostschweiz: Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien und Übersicht über die Ergebnisse der geodätischen Messungen. Unpubl. Nagra Int. Ber.
- Schlunegger, F., Matter, A., Burbank, D.W., Leu, W., Mange, M. & Mátyas, J. (1997): Sedimentary sequences, seismofacies and evolution of depositional systems of the Oligo/Miocene Lower Freshwater Molasse Group, Switzerland. *Basin Res.* 9, 1–26.
- Schmassmann, H. (1990): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Nagra Tech. Ber. NTB 88-07.
- Schmid, S.M., Fügenschuh, B., Kissling, E. & Schuster, R. (2004): Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 97, 93–117.
- Schneider, J.W., Zuidema, P., Smith, P.A., Gribi, P. & Niemeyer, M. (1997): Preliminary calculations of radionuclide release and transport from a repository for spent nuclear fuel in Switzerland: Proceedings of WM'97, Tucson, Arizona, U.S.A., 2-6 March 1997.
- Schweizerischer Erdbebendienst (2004): Hazard maps for Switzerland, <http://histserver.ethz.ch/hazard/>
- Signorelli, S., Andenmatten Berthoud, N. & Kohl, T. (2004): Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Jahresberichte 2004. Schweiz. Geophys. Komm. <http://www.sgpk.ethz.ch/jahresbericht/2004/kohl.pdf>
- SKB (1999a): Deep repository for spent nuclear fuel: SR 97: Post-closure safety. Tech. Rep. TR 99-06. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm, Sweden.
- SKB (1999b): Deep repository for spent nuclear fuel: SR 97: Waste, repository design and sites. Tech. Rep. TR-99-08. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm, Sweden.
- SKB (2004): RD&D-Programme 2004 for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste, including social science research. Tech. Rep. TR 04-21. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management (SKB), Stockholm, Sweden.
- SKI (2001): SKI's and SSI's joint review of SKB's Safety Assessment Report, SR 97: Review Report. SKI Report 01:4 / SSI Report 01-03. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), Stockholm, Sweden.
- SKI (2002): The Swedish Nuclear Power Inspectorate's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear materials and nuclear waste. Inspectorate Regulatory Code SKIFS 2002:1. Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), Stockholm, Sweden.
- Smith, P., Gribi, P., Schneider, J. & Zuidema, P. (2004): Comparison of geometry-, flow- and transport-related aspects of the geosphere in the Kristallin-I, SR 97 and TILA-99 projects. Unpubl. Nagra Arb. Ber.

- Sprecher, C. & Müller, W.H. (1986): Geophysikalisches Untersuchungsprogramm Nordschweiz: Reflexionsseismik 82. Nagra Tech. Ber. NTB 84-15.
- Stober, I. (1995): Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges. Enke, Stuttgart, Germany.
- Stober, I. (1996): Hydrogeological investigations in crystalline rocks of the Black Forest, Germany. Terra Nova 8, 255–258.
- Strunck, P. & Matter, A. (2002): Depositional evolution of the western Swiss Molasse. *Eclogae geol. Helv.* 95, 197–222.
- Strunck, P. (2001): The Molasse of Western Switzerland. Ph.D. thesis, Univ. Bern, Switzerland.
- STUK (2000): Posiva's application for a decision in principle concerning a disposal facility for spent nuclear fuel: STUK's statement and preliminary safety appraisal. STUK-B-YTO 198. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK), Helsinki, Finland.
- STUK (2001): Long term safety of disposal of spent nuclear fuel, 23 May 2001. YVL Guide 8.4. Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK), Helsinki, Finland.
- Thury, M. (1980): Erläuterungen zum Nagra-Tiefbohrprogramm als vorbereitende Handlung im Hinblick auf das "Projekt Gewähr". Nagra Techn. Ber. NTB 80-07.
- Thury, M. & Bossart, P. (eds.) (1999): Mont Terri Rock Laboratory: Results of the hydrogeological, geochemical, and geotectonical experiments performed in 1996 and 1997. *Landeshydrologie und -geologie, Geol. Ber. Nr. 23.* Bern, Switzerland.
- Thury, M., Gautschi, A., Mazurek, M., Müller, W.H., Naef, H., Pearson, F.J., Vomvoris, S. & Wilson, W. (1994): Geology and hydrogeology of the crystalline basement of Northern Switzerland. Nagra Tech. Rep. NTB 93-01.
- Traber, D. (2004): Hydrogeologie des untern Malm (Oxfordian): Renggeri-Ton, Terrain à Chailles und Effinger Schichten. Unpubl. Nagra Arb. Ber.
- Trümpy, R. (1960): Paleotectonic evolution of the central and western Alps. *Bull. Geol. Soc. America.* 71, 843-908.
- Trümpy, R. (1980): Geology of Switzerland. Part A: An outline of the geology of Switzerland. Wepf & Co., Basel, Switzerland.
- Trümpy, R. (1985): Die Plattentektonik und die Entstehung der Alpen. Orell Füssli, Zürich, Schweiz.
- TVO (1992): Final disposal of spent nuclear fuel in the Finnish bedrock. Report YJT-92-32E. Teollisuuden Voima Oy, Helsinki, Finland.
- UVEK (2004a): Brief von Bundesrat Moritz Leuenberger an die Nagra, 12. März 2004.
- UVEK (2004b): Radioaktive Abfälle: Alternativen zum Zürcher Weinland. Medienmitt. des Eidg. Dep. f. Umwelt, Verkehr, Energie, Kommunikation. Bern, 28. Sept. 2004.
- UVEK (2005): Brief von Bundesrat Moritz Leuenberger an die Nagra, 7. Juli 2005.
- VSE et al. (1978): Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke / Gruppe der Kernkraftwerkbetreiber und -projektanten, Konferenz der Überlandwerke, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra): Konzept für die nukleare Entsorgung in der Schweiz. VSE, Zürich, Schweiz.

- Weber, H.P. & Albert, W. (1997): 2D-Seismik Kristallin 1996 Nord-Aargau: Geologische Interpretation. Unpubl. Nagra Int. Ber.
- Wetzel, A. & Allia, V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. *Eclogae geol. Helv.* 96, 451-469.
- Wetzel, A., Allenbach, R. & Allia, V. (2003): Reactivated basement structures affecting the sedimentary facies in a tectonically 'quiescent' epicontinental basin: an example from NW Switzerland. *Sedimentary Geology* 157, 153–172.
- Witherspoon, P.A. & Bodvarsson, G.S. (Eds.) (2001): Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review. LBNL-49767. Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley, USA.
- Ziegler, P.A. (1982): Geological atlas of Western and Central Europe. Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Ziegler, P.A. (1990): Geological atlas of Western and Central Europe. Second and completely revised edition. Shell Internationale Petroleum Maatschappij B.V. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.