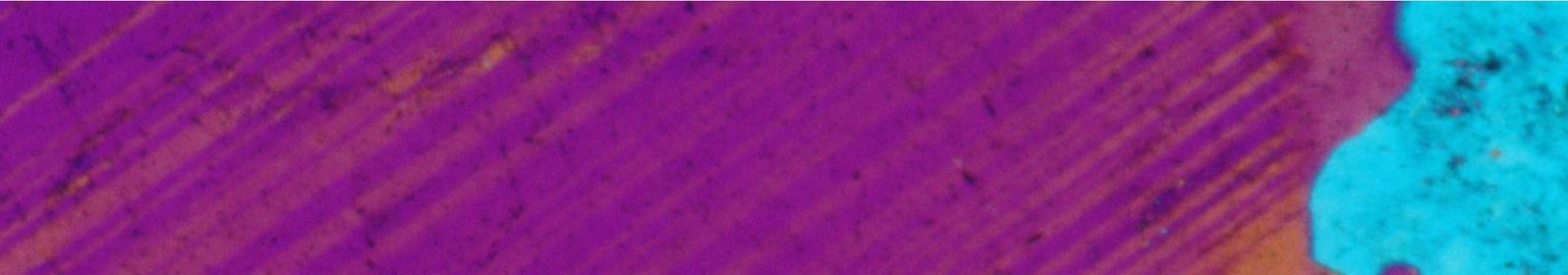




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK
Division principale de la sécurité des installations nucléaires DSN
Divisione principale della sicurezza degli impianti nucleari DSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate HSK



Geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle (HAA) Stellungnahme der HSK zum Optionenbericht NTB 05-02 der Nagra

September 2007

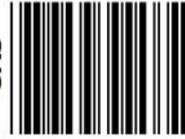


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen HSK
Division principale de la Sécurité des Installations Nucléaires DSN
Divisione principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari DSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate HSK

5232 Villigen-HSK
Tel.: 056 / 310 38 11
Fax: 056 / 310 39 07

SAS



AN-Nummer

HSK 35/108

Datum
1. September 2007

Aktenzeichen
35KTX.OPT

Typ/Charakter
Beurteilung

Klassifikation
öffentlich

Bearbeiter
GEL / FE/ ZB

Visum
Sachbearbeiter: *E. Frank*
Vorgesetzter: *RAM*

Projekt, Thema, Gegenstand (Schlagwörter)
Geologische Tiefenlagerung, HAA Wirtgesteine

Seiten 75
Beilagen
Zeichnungen

Geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle (HAA) Stellungnahme der HSK zum Optionenbericht NTB 05-02 der Nagra

Als Entscheidungsgrundlage zum weiteren Vorgehen im HAA-Programm hat der Vorsteher des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK mit Schreiben vom 12. März 2004 die Nagra aufgefordert, in einem technischen Bericht die aus ihrer Sicht bestehenden Wirtgesteinsoptionen in der Schweiz für eine geologische Tiefenlagerung hochaktiver und langlebig mittelaktiver Abfälle darzulegen (Optionenbericht). Im September 2005 hat die Nagra diesen Bericht vorgelegt und publiziert (Nagra Technischer Bericht NTB 05-02).

In der vorliegenden Stellungnahme beurteilt die HSK diesen Bericht und prüft, ob die von der Nagra dargestellten möglichen Wirtgesteinsoptionen für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver und langlebig mittelaktiver Abfälle nachvollziehbar sind und den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen. Die Stellungnahme der HSK hat nicht zum Ziel, die von der Nagra beschriebenen möglichen Wirtgesteine und Gebiete hier abschliessend zu bewerten. Dies wird im Rahmen des in Vorbereitung stehenden Sachplanverfahren erfolgen.

Verteiler:

HSK: FTEAM, SITE, GEL, GROMO, Sekretariat SAS, Archiv

1	Einleitung	3
1.1	Ausgangslage und Anlass	3
1.2	Ziel und Gliederung der Stellungnahme	4
2	Sicherheitsanforderungen und Beurteilungskriterien	6
3	Abgrenzung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume und Identifikation möglicher Wirtgesteine	8
3.1.	Geologisch-tektonische Grossräume	8
3.2.	Mögliche Wirtgesteine	11
4	Beurteilung der Wirtgesteinsoptionen	14
4.1	Kristallin	14
4.1.1	Datengrundlagen	14
4.1.2	Räumliche Verbreitung	15
4.1.3	Gesteinscharakterisierung	16
4.1.4	Durchlässigkeiten und Fliesswege	18
4.1.5	Geochemische Verhältnisse und Sorption	22
4.1.6	Abschätzung der Barrierenwirkung	23
4.1.7	Explorierbarkeit	25
4.1.8	Rohstoffkonflikte	26
4.1.9	Bautechnische Machbarkeit	27
4.2	Opalinuston	28
4.2.1	Datengrundlagen	28
4.2.2	Räumliche Verbreitung	29
4.2.3	Gesteinscharakterisierung	31
4.2.4	Durchlässigkeiten und Fliesswege	32
4.2.5	Geochemische Verhältnisse und Sorption	34
4.2.6	Abschätzung der Barrierenwirkung	35

4.2.7	Explorierbarkeit	37
4.2.8	Rohstoffkonflikte	39
4.2.9	Bautechnische Machbarkeit	40
4.3	Untere Süsswassermolasse	41
4.3.1	Datengrundlagen	41
4.3.2	Gesteinscharakterisierung und regionale Verbreitung	42
4.3.3	Durchlässigkeiten und Fließwege	50
4.3.4	Geochemische Verhältnisse und Sorption	55
4.3.5	Abschätzung der Barrierenwirkung	56
4.3.6	Explorierbarkeit	58
4.3.7	Rohstoffkonflikte	60
4.3.8	Bautechnische Machbarkeit	61
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	63
	Literaturverzeichnis	68

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Anlass

Beim Betrieb der Kernkraftwerke sowie bei anderer Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung fallen radioaktive Abfälle an. Diese müssen zum Schutz von Mensch und Umwelt sicher und dauerhaft entsorgt werden. Gemäss Kernenergiegesetz (KEG) soll dies durch die Einlagerung in geologische Tiefenlager geschehen. Verantwortlich für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle sind die Verursacher der Abfälle, in erster Linie die Betreiber der Kernkraftwerke. Die Pflicht der Entsorgung der radioaktiven Abfälle aus Medizin, Industrie und Forschung hat der Bund übernommen. Im Jahre 1972 wurde die Nagra von den Kernkraftwerkbetreibern und dem Bund gegründet und damit beauftragt, die Lagerung von radioaktiven Abfällen vorzubereiten.

Schon früh wurde die Tiefenlagerung in geologischen Schichten als das für die Schweiz am besten geeignete Konzept erkannt. Die Nagra betreibt seit rund 30 Jahren gezielte Forschungstätigkeiten zur Klärung erdwissenschaftlicher und technischer Fragen der Entsorgung radioaktiver Abfälle. Sie hat sich über die Beschaffenheit des geologischen Untergrunds der Schweiz und über die für die Tiefenlagerung infrage kommenden Wirtgesteine umfangreiche Grundlagenkenntnisse erarbeitet.

Das seit 1985 verfolgte Entsorgungskonzept sieht zwei Lager vor, eines für schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) sowie eines für hochaktive Abfälle (HAA). Zu den HAA gehören auch die abgebrannten Brennelemente aus den Kernkraftwerken. Zur Vorbereitung der Standortwahl für ein HAA-Lager hat die Nagra verschiedene mögliche Wirtgesteinsoptionen untersucht. Im Jahre 1985 hat sie dem Bundesrat einen Entsorgungsnachweis¹ auf der Grundlage eines Lagerprojekts für hochaktive Abfälle im kristallinen Untergrund der nördlichen Schweiz vorgelegt. Der Bundesrat anerkannte zwar den Nachweis der Sicherheit und der grundsätzlichen bautechnischen Machbarkeit, nicht aber die raumbezogenen Folgerungen der Nagra hinsichtlich geeigneter Gebiete im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz (Standortnachweis). Er forderte deshalb die Bewilligungsinhaber der Kernkraftwerke auf, die Forschungsarbeiten auf nicht-kristalline Gesteine, das heisst Sedimente, auszudehnen.

Die Nagra hat die Synthese der Untersuchungen des kristallinen Untergrunds im Jahre 1994 mit einer umfangreichen Berichterstattung, die auch eine erneute Sicherheitsbewertung enthielt, dokumentiert (NTB 93-01, NTB 93-22 und weitere Berichte). Die Untersuchung verschiedener Sedimentgesteine in den 1980er und 1990er Jahren führte unter anderem zur Betrachtung der Unteren Süsswassermolasse (USM) und des Opalinuston als mögliche Wirtgesteine. Der Opalinuston wurde wegen den ruhigen, praktisch ungestörten Lagerungsverhältnissen in der Region des Zürcher Weinlandes vertieft untersucht. Auf der Basis dieser Untersuchungen reichte die Nagra im Jahre 2002 den noch ausstehenden Entsorgungsnachweis für die HAA mit einem auf Opalinuston als Wirtgestein basierenden Projekt ein (NTB 02-02, 02-03, 02-05 und weitere Berichte). Gleichzeitig mit dem Einreichen des Entsorgungsnachweises im Jahre 2002 beantragte die Nagra vom Bundesrat, weitere

¹ Nachweis, dass die dauerhafte sichere Entsorgung der radioaktiven Abfälle in der Schweiz grundsätzlich möglich sei.

Sondierungen im Hinblick auf ein HAA-Tiefenlager auf die Region Zürcher Weinland zu konzentrieren.

Das UVEK und das BFE haben 2004 zwei Berichte in Auftrag gegeben. Die HSK sollte in einem Bericht in einem historischen Abriss darlegen, wie die Nagra aufgrund einer Reihe von Entscheidungen schrittweise zur Wahl des Opalinustons im Zürcher Weinland für den Entsorgungsnachweis und die beantragte Fokussierung kam. Der Stellenwert des Entsorgungsnachweises im Rahmen des Entsorgungskonzepts sollte auch erläutert werden. Dieser Bericht der HSK wurde im August 2005 veröffentlicht (HSK-AN-5262). Die Nagra ihrerseits sollte in einem technischen Bericht die aus ihrer Sicht bestehenden Wirtgesteinsoptionen und möglichen Gebiete für eine geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle darlegen (Optionenbericht). Dieser Bericht erschien im September 2005 (NTB 05-02).

Der Bundesrat hat im Juni 2006 den Entsorgungsnachweis gutgeheissen, dem Antrag der Nagra auf Fokussierung künftiger Untersuchungen auf das Zürcher Weinland aber nicht stattgegeben. Vielmehr soll ein breit angelegtes Auswahlverfahren durchgeführt werden, das nach Vergleich aller Optionen zur Wahl eines Standortes für das Tiefenlager führen soll. Das Verfahren soll gemäss dem Sachplan Geologische Tiefenlager, dessen Konzeptteil gegenwärtig unter Federführung des Bundesamtes für Energie in Entwicklung ist (BFE 2007), durchgeführt werden. Auch wenn der Bundesrat den Konzeptteil des Sachplans Geologische Tiefenlager, der eine Beschreibung des Auswahlverfahrens enthält, noch nicht verabschiedet hat, sind die ersten Schritte des Vorgehens im Grundsatz klar: Zunächst sind deutlich ungeeignete geologische Grossräume auszuschliessen und dann die für die Lagerung in Frage kommenden Wirtgesteine innerhalb der verbleibenden Grossräume aufzuzeigen. In einem weiteren Schritt sollen aufgrund der Verbreitung und Geometrie der Wirtgesteinsvorkommen mögliche Standortgebiete für das Lager identifiziert werden. Für diese ersten Schritte bildet der Optionenbericht für die Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle eine wichtige Grundlage.

1.2 Ziel und Gliederung der Stellungnahme

In der vorliegenden Stellungnahme der HSK zum Optionenbericht NTB 05-02 soll geprüft werden, ob die von der Nagra dargestellten möglichen Wirtgesteine und Gebiete für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle nachvollziehbar sind und ob die Schlussfolgerungen von der HSK aus sicherheitstechnischer Sicht unterstützt werden können. Teilfragen dieser Beurteilung sind, ob die geologischen Grossräume mit der angemessenen Sorgfalt evaluiert wurden und ob der Wissensstand über die dort vorhandenen Wirtgesteine und Wirtgesteinsvorkommen (Lage und Geometrie) ausreichend war, um die Schlüsse zu ziehen, die die Nagra schrittweise bis zur Bezeichnung der bevorzugten Wirtgesteine führten.

Die Stellungnahme der HSK hat nicht zum Ziel, die von der Nagra beschriebenen möglichen Standortgebiete im Detail zu besprechen und zu bewerten. Dies wird im Rahmen des Sachplanverfahrens erfolgen.

Der Bericht der HSK gliedert sich in 5 Kapitel. Nach einer Einleitung (Kapitel 1) legt die HSK im Kapitel 2 die Sicherheitsanforderungen und Beurteilungskriterien dar, mit deren Hilfe sie die für die Tiefenlagerung relevanten Eigenschaften der Wirtgesteine und die geologische Situation beurteilt. Die Abgrenzung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume sowie die Identifikation möglicher Wirtgesteine werden im Kapitel 3 beurteilt. Im Kapitel 4 werden

die von der Nagra dargestellten möglichen Wirtgesteinsoptionen besprochen, wobei die Frage des heutigen Wissensstandes über deren Eigenschaften und deren sicherheitstechnische Eignung für ein geologisches Tiefenlager im Vordergrund steht. Kapitel 5 enthält eine Zusammenfassung der Beurteilung und die Schlussfolgerungen der HSK.

2 Sicherheitsanforderungen und Beurteilungskriterien

Im Optionenbericht NTB 05-02 stellt die Nagra die aus sicherheitstechnischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle dar. Die entsprechenden Sicherheitsanforderungen an eine geologische Tiefenlagerung sind in der Richtlinie HSK-R-21 festgehalten. In dieser Richtlinie sind das übergeordnete Ziel der geologischen Tiefenlagerung, die dabei zu beachtenden Prinzipien sowie drei konkrete Schutzziele formuliert. Die Richtlinie enthält ferner eine Reihe von Hinweisen und Erläuterungen zur Standortevaluation, zum Sicherheitsnachweis und zu den Langzeitaspekten der geologischen Tiefenlagerung.

Die grundsätzlichen Anforderungen an ein Standortgebiet und ein Wirtgestein hat die HSK im Hinblick auf die Beurteilung des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston in einem Zusatzdokument präzisiert (HSK 23/57). Im Rahmen der Erarbeitung der sicherheitstechnischen Kriterien für das Standortauswahlverfahren des Sachplanes Geologische Tiefenlager wurden seitens der HSK in einem weiteren Bericht die für die Evaluation von Wirtgesteinen und Standorten massgebenden sicherheitstechnischen Anforderungen und Beurteilungskriterien vorbereitet und erläutert (HSK 33/001). Bei der Überprüfung des Optionenberichtes orientiert sich die HSK an diesen Vorgaben.

Für die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle ist ein langfristig wirksamer Einschluss der radioaktiven Stoffe im Lagersystem (bestehend aus technischen Barrieren, dem Wirtgestein und der weiteren geologischen Umgebung) über sehr grosse Zeiträume (bis zu einer Million Jahre) erforderlich. Das Standortgebiet muss gewährleisten, dass die für das Lagersystem günstigen Barriereigenschaften des Wirtgesteins und der umliegenden Geosphäre so lange erhalten bleiben, bis die Radioaktivität der Abfälle weitgehend abgeklungen ist. Dieses Kriterium der geologischen Langzeitstabilität wird in Kapitel 3 bei der Beurteilung der Abgrenzung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume angewandt.

Basierend auf den Funktionen der Geosphärenbarriere im Sicherheitskonzept des geologischen Tiefenlagers lassen sich für die Beurteilung folgende Grundanforderungen an das Wirtgestein ableiten:

1. **Datengrundlagen:** Für die Beurteilung der Wirtgesteinsoption muss eine genügende Datenbasis vorliegen.
2. **Räumliche Verbreitung:** Für das Wirtgestein müssen Standortgebiete vorliegen, die sich bezüglich ihrer räumlichen Verbreitung und Geometrie für die Anordnung der Tiefenlagerbauwerke eignen.
3. **Gesteinscharakterisierung:** Das Wirtgestein soll bezüglich Charakterisierbarkeit und Erfassung der sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften günstige Verhältnisse aufweisen (möglichst homogene Beschaffenheit).
4. **Durchlässigkeiten und Fließwege:** Die Beschaffenheit des Wirtgesteins muss so sein, dass die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit gering ist und dass auch allfällige lokale Wasserfließspfade sehr kleine Transmissivitäten haben (hydraulische Barrierenwirkung).
5. **Geochemische Verhältnisse und Sorption:** Die geochemischen Verhältnisse und die Wirtgesteinsbeschaffenheit sollen günstige Bedingungen bezüglich Rückhaltung (Sorption) der Radionuklide aufweisen.

-
6. **Abschätzung der Barrierenwirkung:** Die hydraulischen und geochemischen Verhältnisse sollen gesamthaft eine langfristige Barrierenwirkung des Wirtgesteins gewährleisten.
 7. **Explorierbarkeit:** Die Lagerungsverhältnisse und die Geometrie des Wirtgesteins sollen von der Erdoberfläche her gut explorierbar sein.
 8. **Rohstoffkonflikte:** Im Standortgebiet sollen keine aussergewöhnlichen Rohstoffe (z.B. Erdöl, Erdgas, Kohle, Mineral- und Thermalwasser, Geothermie) vorkommen, deren Nutzung durch das Lager verunmöglicht wird oder die Barrierenwirkung des Wirtgesteins massgeblich beeinflusst.
 9. **Bautechnische Machbarkeit:** Das Wirtgestein muss felsmechanische Bedingungen erfüllen, damit das Tiefenlager bautechnisch machbar ist.

Bei der Überprüfung der Wirtgesteinsoptionen (Kapitel 4) richtet sich die HSK nach diesen neun Beurteilungskriterien.

3 Abgrenzung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume und Identifikation möglicher Wirtgesteine

3.1. Geologisch-tektonische Grossräume

Angaben der Nagra

Die Geologie der Schweiz ist seit mehr als 200 Jahren Gegenstand intensiver Forschung. Die Forschungsergebnisse sind in Form von Diplomarbeiten, Dissertationen und wissenschaftlicher Publikationen sowie eines umfangreichen gross- und kleinmassstäblichen Kartenwerks (inkl. Erläuterungen) dokumentiert und widerspiegeln den guten Kenntnisstand der geologischen Verhältnisse in der Schweiz. Schliesslich haben auch die Kohlenwasserstoff Explorationsen der Erdölindustrie sowie die erdwissenschaftlichen Untersuchungen der Nagra der vergangenen 25 Jahre, welche neben seismischen Untersuchungen und Tiefbohrungen auch regionale Studien umfassten, die Kenntnisse der geologischen Verhältnisse und der Geodynamik massgeblich verbessert.

Das geologisch-tektonische Bild der Schweiz wird durch die Alpen und den Faltenjura geprägt. Sie sind das Resultat einer Kollision zweier kontinentaler Platten (der europäischen im Norden und des adriatischen Sporns der afrikanischen Platte im Süden), bei welcher während der Kreide und dem Tertiär verschiedene Ozeanbecken geschlossen wurden. Dann entstand nördlich der Alpen die ausgedehnte Vorlandsenke des Molassebeckens, welche im Zeitraum zwischen 34 und 10 Millionen Jahren mit dem Erosionsmaterial der aufsteigenden Alpen gefüllt wurde.

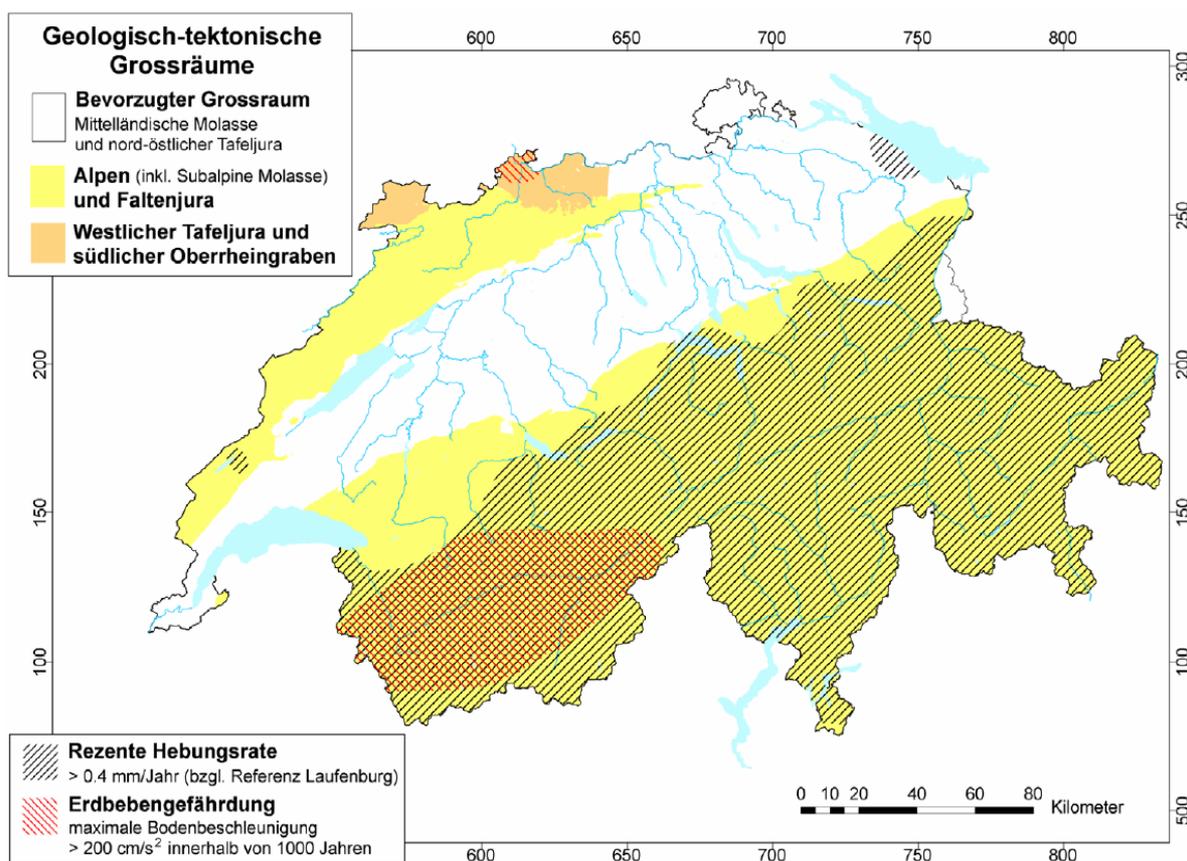
Bedeutende Aspekte der rezenten Krustenbewegungen in der Schweiz sind die Hebungen der Alpen (1-2 mm/Jahr, Schlatter 1999). Die andauernde Hebung der Alpen nimmt gegen das Alpenvorland stark ab und wird durch Erosionsvorgänge teilweise kompensiert. Das nördliche Mittelland sowie der Tafeljura können bezüglich des sich hebenden Alpenkörpers im Wesentlichen als lagestabil bezeichnet werden. Geomorphologische Studien sowie Untersuchungen zur Entwicklungsgeschichte des Molassebeckens zeigen, dass die Hebungsraten in den letzten Millionen Jahren in der gleichen Grössenordnung lagen wie heute. Dabei blieb die Richtung des regionalen Spannungsfeldes in diesem Zeitraum nahezu unverändert.

Für die Abgrenzung geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume für die geologische Tiefenlagerung der HAA verwendete die Nagra folgende Kriterien:

- Zur Gewährleistung der erforderlichen Langzeitstabilität ist eine genügende Überdeckung des Lagers notwendig. Grossräume, in welchen grössere Hebungen erwartet werden (Betrachtungszeitraum 1 Million Jahre), werden als ungünstig beurteilt. In Bezug auf die rezenten Hebungsraten werden Grossräume mit Hebungen von mehr als 0.4 mm/Jahr zurückgestellt.
- 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. Es werden deshalb strukturell einfach aufgebaute Grossräume bevorzugt.
- Im Weiteren werden von der Nagra die Grossräume bezüglich der seismischen Gefährdung beschrieben. Dabei werden neotektonische Phänomene in Zusammenhang mit Erdbeben sowie Versätze des Gesteinsverbands entlang reaktiver Störungen betrachtet und bei der Beurteilung der Gebiete berücksichtigt. Zu Störungen mit einem Potenzial für eine Reaktivierung ist ein angemessener Sicherheitsabstand einzuhalten.

Das Resultat der Anwendung dieser Vorgaben ergibt im Wesentlichen ein auf das Molassebecken von Genf bis zum Bodensee beschränktes Gebiet (Figur 3-1). Hinzu kommen die Gebiete des zentralen und östlichen Tafeljuras. Nicht berücksichtigt werden aufgrund des komplexeren strukturellen Aufbaus die Tafeljuragebiete der Ajoie und der Gegend um Basel, die beide von der Tektonik des Oberrheingrabens stark beeinflusst sind. Die Alpen scheiden aus Gründen der Langzeitstabilität (Hebung/Erosion) und wegen ihres komplexen tektonischen Aufbaus aus.



Figur 3-1: Von der Nagra für die Standortsuche bevorzugter geologisch-tektonischer Grossraum (weiss) zwischen nicht-geeigneten Gebieten mit komplexer Geologie (gelb und orange), erhöhter Erdbebengefährdung (rot schraffiert) oder grösseren rezenten Hebungsraten (schwarz schraffiert) (aus NTB 05-02).

Beurteilung der HSK

Die HSK ist mit der von der Nagra dargelegten geologisch-tektonischen Unterteilung der Schweiz in die genannten bevorzugten Grossräume im Allgemeinen einverstanden. Bei der Darstellung der geologischen Verhältnisse stützt sich die Nagra auf die neueste tektonische Karte der Schweiz (BWG 2005) und modernste Literaturdaten. Die Wahl der Grossräume Mittelländische Molasse und nord-östlicher Tafeljura ist plausibel und nachvollziehbar, es sind die einzigen Gebiete der Schweiz, in denen Sedimentschichten einigermassen ungestört und ruhig gelagert sind.

Zur Abgrenzung der Grossräume verwendet die Nagra die Kriterien der genügenden Überdeckung, der geringen differentiellen Bewegungen und Hebungsraten, der geringen tektonischen Komplexität sowie der geringen Erdbebengefährdung. Die HSK ist grundsätzlich mit diesem Vorgehen einverstanden. Sie nimmt zu den Kriterien wie folgt Stellung:

Das Kriterium einer genügenden Überdeckung ist für die Sicherstellung der langfristigen Barrierenwirkung des Wirtgesteins von fundamentaler Wichtigkeit. Die von der Nagra eingesetzte Begrenzung einer Hebungsrate auf <0.4 mm/Jahr beruht auf der Vorgabe einer Mindestüberdeckung eines Tiefenlagers von 400 m Gestein und der Annahme, dass die vorhandene Hebung der Geländeoberfläche langfristig vollständig durch Erosion kompensiert wird (NTB 05-02, S. 8). Damit wird sichergestellt, dass ein Tiefenlager innerhalb einer Million Jahre nicht freigelegt wird. Die Möglichkeit einer lokal tiefergreifenden glazialen Erosion, wie sie für diverse Flusstäler im Mittelland nachgewiesen wurde (z.B. Wildi 1984), wird hier nicht als Argument herangezogen, obwohl die Überlagerung einer geringeren Hebungsrate mit einer lokalen Tiefenerosion innerhalb einer Million Jahre zu einer Freilegung führen könnte. Bei einer späteren Eingrenzung von Standorten ist dieser Aspekt zu berücksichtigen.

Die von der Nagra herangezogenen Hebungsdaten sind auf dem neusten Stand; sie sind zum Teil im Auftrag der Nagra neu erhoben worden (Schlatter 1999). Abweichend von den üblichen Nivellementmessungen der Landestopographie (Referenzpunkt Aarburg) beziehen sich die von der Nagra verwendeten Angaben auf den Referenzpunkt Laufenburg. Der Unterschied beträgt knapp 0.1 mm/a, mit der sich Laufenburg gegenüber Aarburg hebt. Da von der Nagra mit Laufenburg eine Kristallinmessstelle am regional wichtigsten Vorfluter, dem Rhein, gewählt wurde, ist die HSK mit dieser Wahl einverstanden.

Die tektonische Komplexität ist quantitativ ein nur schwer fassbares Kriterium. Als qualitatives Kriterium ist es aber nützlich, um Gebiete miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Die von der Nagra getroffene Wahl der bevorzugten Grossräume und die Ausklammerung der tektonisch stark beanspruchten Gebiete der Alpen und des Faltenjuras ist aus Sicht der HSK klar und nachvollziehbar. Neben Alpen und Faltenjura wird auch der westliche Teil des Tafeljuras inklusive der Ajoie als tektonisch zu komplex zurückgestellt. Für diese Gebiete lässt sich ein tektonischer Einfluss durch den Oberrheingraben nachweisen (Nord-Süd verlaufende Störungen). Die Ajoie liegt ausserdem in einer strukturell stark beanspruchten Zone, die zwischen dem Oberrhein- und dem Bressegraben kinematisch vermittelt und sich an der Oberfläche durch charakteristische WSW-ENE-gerichtete Störungen bemerkbar macht (Picot et al. 2005). Die HSK ist daher auch mit der Zurückstellung des westlichen Tafeljuras und der Ajoie einverstanden.

Bei der Beurteilung der Seismizität und der Erdbebengefährdung stützt sich die Nagra auf die neusten Daten des schweizerischen Erdbebendienstes (www.seismo.ethz.ch) ab. Gebiete mit einer durchschnittlich zu erwartenden Bodenbeschleunigung von > 200 cm/s² innerhalb von 1000 Jahren werden als seismisch zu aktiv ausgeschieden. Dies betrifft das Wallis und

die Region Basel. Der Ausschluss dieser Gebiete als potentielle Standorte für ein geologisches Tiefenlager ist für die HSK nachvollziehbar.

Die seismische Gefährdung ist für die Standorte der schweizerischen Kernkraftwerke mit dem Projekt PEGASOS (Nagra 2004) neu evaluiert worden. Der wesentliche Unterschied zu den früheren probabilistischen Erdbebengefährdungsanalysen liegt darin, dass die Unsicherheiten systematisch und umfassend erfasst und die weltweit neuesten Erkenntnisse und Methoden aus der Erdbebenforschung mit einbezogen wurden (Nagra 2004 und HSK-AN-6252). Bei der Realisierung eines geologischen Tiefenlagers sind die seismischen Anforderungen während Bau-, Betriebs- und Nachbetriebsphase mit einer zur PEGASOS-Studie vergleichbaren Analyse abzuleiten, wobei die Ergebnisse der PEGASOS-Studie berücksichtigt werden können.

Der von der Nagra bevorzugte Grossraum des Mittellandes und östlichen Tafeljuras stellt einen seismisch wenig aktiven Raum dar. Die langfristige, d.h. die kommenden Millionen Jahre umfassende tektonische Entwicklung wird jedoch in der Literatur nicht einheitlich dargestellt. Gegensätzliche Thesen sehen sowohl eine nur das Deckgebirge betreffende weitere Aufschubung des Faltenjuras (z.B. NTB 85-53), als auch einen den kristallinen Sockel mit einschliessenden Zusammenschub (z.B. Mosar 1999; Becker 2000). Ausserdem wird der alpine Zusammenschub sowohl als abgeschlossen (Willett et al. 2006) als auch als anhaltend angesehen (Becker 2000). Diese verschiedenen Thesen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die mögliche tektonische und seismische Entwicklung des ausgeschiedenen Grossraumes. Bei der späteren Eingrenzung potenzieller Standortgebiete muss dieser Aspekt dargelegt und näher erörtert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die HSK mit dem von der Nagra eingegrenzten Gebiet der mittelländischen Molasse und des nord-östlichen Tafeljuras als bevorzugter geologisch-tektonischer Grossraum einverstanden ist. Dieser Grossraum umfasst Gebiete, in denen die Sedimentschichten ruhig gelagert sind und damit nahe legen, dass die Entwicklung dieses Raumes über geologisch lange Zeiträume stabil war. Bei der späteren Eingrenzung konkreter Standortgebiete wird eine detailliertere Analyse der regionalen und lokalen Strukturen erfolgen müssen. Dabei ist insbesondere möglichen tektonischen Komplikationen in den Randgebieten dieses Grossraumes (Jurasüdfuss) und in den durch die Oberrheintalgraben tektonik beeinflussten Gebieten Rechnung zu tragen.

3.2. Mögliche Wirtgesteine

Angaben der Nagra

Für die Beurteilung der verschiedenen Gesteine bezüglich ihrer Eignung als Wirtgestein für ein Tiefenlager für hochaktive Abfälle verwendete die Nagra in Anlehnung an die internationale Praxis folgende Vorgaben:

- Um eine genügende Barrierenwirksamkeit zu gewährleisten, soll das Wirtgestein eine geringe hydraulische Durchlässigkeit haben. Es werden in den bevorzugten geologisch-tektonischen Grossräumen nur diejenigen Gesteine weiter betrachtet, die eine hydraulische Durchlässigkeit (K-Wert) von weniger als 10^{-10} m/s haben.
- Die Wirksamkeit der Barriere hängt auch von der Länge der Transportpfade und damit von der Mächtigkeit des Wirtgesteins ab. Es werden nur diejenigen Gesteine bzw. Gesteinsabfolgen weiter betrachtet, für welche neben der oben erwähnten geringen

Durchlässigkeit auch eine typische Mächtigkeit von rund 100 m oder mehr erwartet werden kann.

- Zur Gewährleistung der bautechnischen Machbarkeit ist eine minimale Standfestigkeit des Gebirges erforderlich. Deshalb werden nicht bzw. wenig konsolidierte Sedimente zurückgestellt.
- Im 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 betrachtet.
- Die möglichen Wirtgesteine werden zusätzlich noch bezüglich folgender Merkmale beurteilt:
 - Die geochemischen Bedingungen zur Rückhaltung der Radionuklide
 - die hydraulische Homogenität und der Einfluss präferentieller Transportpfade,
 - das Selbstabdichtungsvermögen,
 - die Robustheit gegenüber externen wie lagerbedingten Einflüsse und
 - die Charakterisierbarkeit der Wirtgesteinseigenschaften sowie die internationalen Erfahrungen mit ähnlichen Gesteinen.

Aufgrund dieser Vorgaben identifiziert die Nagra im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum neben dem kristallinen Grundgebirge den Opalinuston und die tonreichen Gesteine der Unteren Süsswassermolasse als mögliche Wirtgesteine, zum Teil allerdings mit Vorbehalten, wie sie bereits in NTB 88-25 festgehalten wurden. Für die im Jahre 1988 zurückgestellten Sedimentformationen (Perm, Mittlerer Muschelkalk (Anhydritgruppe), Gipskeuper, Effinger Schichten und Obere Süsswassermolasse) bestehen auch aus heutiger Sicht keine Gründe für eine Berücksichtigung als Wirtgestein für ein Tiefenlager für hochaktive Abfälle.

Beurteilung der HSK

Die von der Nagra für die Evaluation der möglichen Wirtgesteine im Optionenbericht dargelegten sicherheitstechnischen Anforderungskriterien sind nach Ansicht der HSK korrekt gewählt und sind geeignet, die Vorgaben der Behörden (Richtlinie HSK-R-21, HSK 23/57 und HSK 33/001) zu erfüllen.

In Anlehnung an die Empfehlungen der AkEnd (2002) legte die Nagra die Anforderungen an die hydraulische Durchlässigkeit des Wirtgesteins auf weniger als 10^{-10} m/s fest. Die sicherheitstechnische Eignung eines Wirtgesteins hängt jedoch nicht alleine von der hydraulischen Durchlässigkeit, sondern auch vom hydraulischen Gradienten und der Länge des Fliessweges im Wirtgestein ab. Nach Ansicht der HSK ist bei der Evaluation geeigneter Wirtgesteine die Verknüpfung dieser drei Aspekte zu berücksichtigen.

Die Wahl der im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum identifizierten drei Wirtgesteinsoptionen Kristallin, Opalinuston und Untere Süsswassermolasse ist nach Ansicht der HSK nachvollziehbar und steht im Einklang mit den über rund 25 Jahren schrittweise erarbeiten und in verschiedenen Berichten (u.a. NTB 88-25, NTB 91-19, NTB 93-01, NTB 93-09, NTB 94-10, NTB 02-03) dokumentierten geologischen Erkenntnissen. Die HSK hat zu den verschiedenen Schritten und Zwischenergebnissen jeweils Stellung genommen (HSK 23/28, HSK 23/29, HSK 23/34, HSK 23/62, HSK 23/73, HSK 35/99). Nach Ansicht der HSK ergeben

sich aus der Überprüfung des Optionenberichts und den heute vorliegenden Daten keine neuen geologischen Erkenntnisse, die eine Wiedererwägung der 1988 von der Nagra zurückgestellten anderen Wirtgesteinsmöglichkeiten rechtfertigen.

4 Beurteilung der Wirtgesteinsoptionen

4.1 Kristallin

4.1.1 Datengrundlagen

Angaben der Nagra

Zur Abklärung der Eignung des kristallinen Grundgebirges als mögliches Wirtgestein für ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle führte die Nagra von 1981 bis 1994 ein umfangreiches Untersuchungsprogramm in der Nordschweiz durch (u.a. regionale Seismik-Messprogramme, hydrochemische Untersuchungen an Thermal-, Grund- und Quellwässern, 7 Tiefbohrungen, Untersuchungen in Fremdbohrungen und Untertagebauten, geologische Kartierungen, Studien zur Neotektonik und Geodäsie, Analyse der Erdbebensituation, Vergleichstudie zur Geologie und Tektonik des angrenzenden Südschwarzwaldes, hydrodynamische Modellierungen). Die Ergebnisse sind in über 100 technischen Berichten der Nagra sowie in einem Synthesebericht (NTB 93-01) dokumentiert, in welchem sämtliche Hintergrunddaten aufgeführt sind. In Ergänzung dazu führte die Nagra 1996 eine seismische Messkampagne im Mettauertal durch, mit welcher die seismische Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges weiter untersucht wurde.

Daneben läuft seit 1984 mit internationaler Beteiligung ein breites Programm von Experimenten im Felslabor Grimsel der Nagra, mit welchem die Beschaffenheit und die Eigenschaften von Kristallin, das Migrations- und Sorptionsverhalten von Radionukliden sowie anhand von Demonstrationsversuchen das Verhalten von technischen Barrieren (z.B. Bentonit) erforscht werden. Das über 20 Jahre laufende Forschungsprogramm im Felslabor Grimsel hat eine Fülle von wissenschaftlich-technischen Ergebnissen gebracht, die in zahlreichen technischen Berichten und in internationalen Zeitschriften dokumentiert sind.

Beurteilung der HSK

Mit den langjährigen Untersuchungsprogrammen zum Kristallin der Nordschweiz einerseits und den Grundlagenforschungsarbeiten im Felslabor Grimsel andererseits hat die Nagra eine breite Datengrundlage geschaffen, die es ermöglicht, eine sicherheitstechnische Beurteilung der Wirtgesteinsoption Kristallin, wie sie in der Schweiz vorliegt, durchzuführen. Nach Ansicht der HSK liegt heute eine genügende Datenbasis vor, um die grundsätzliche Eignung des Kristallins der Nordschweiz als mögliche Wirtgesteinsoption für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle beurteilen zu können. In diesem Zusammenhang wird auf die ausführliche Stellungnahme der HSK zum Sicherheitsbericht Kristallin-I verwiesen (HSK 23/73), in deren Rahmen der in der Sicherheitsanalyse verwendete erdwissenschaftliche Referenzdatensatz zum kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz kritisch überprüft und beurteilt wurde.

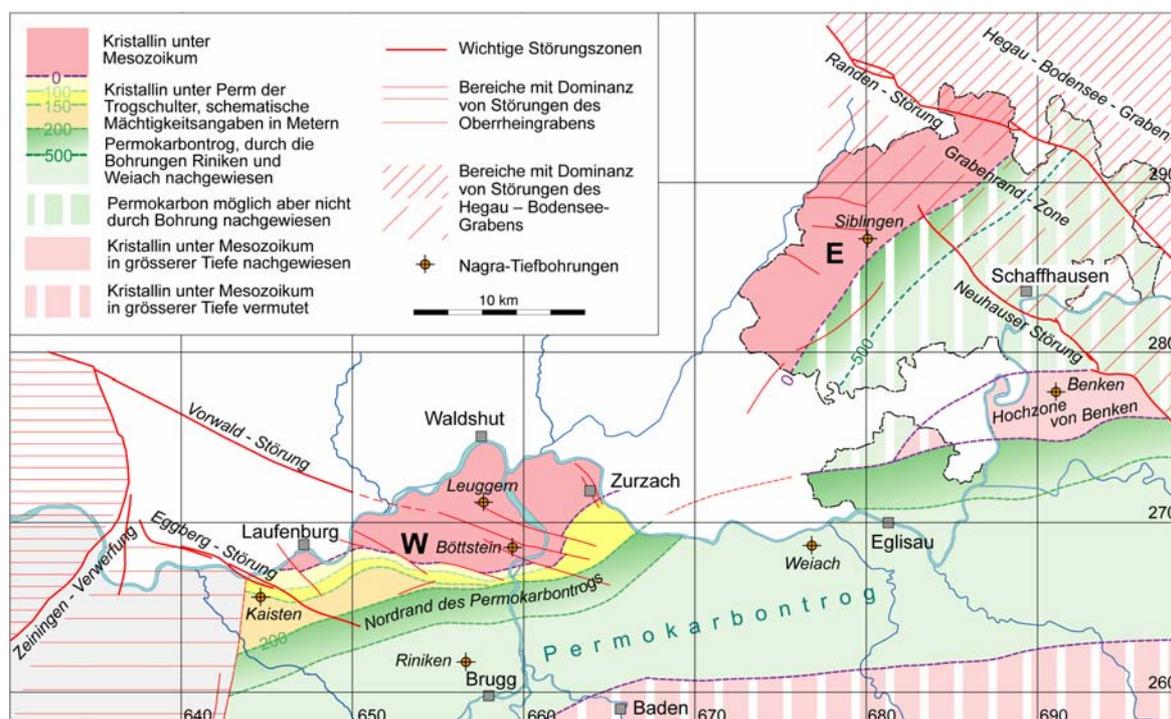
4.1.2 Räumliche Verbreitung

Angaben der Nagra

Aus Gründen der Langzeitstabilität konzentrierte sich die Suche der Nagra nach potenziell geeigneten Kristallingebieten in der Schweiz auf Gebiete ausserhalb des Alpenraumes und damit auf das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz. Den bevorzugten Tiefenbereich für ein geologisches Tiefenlager grenzte die Nagra aufgrund sicherheits- und bautechnischer Überlegungen auf minimal 500 m unterhalb der Kristallinoberfläche bzw. maximal 1200 m unter der Erdoberfläche ein.

Die für die geologische Tiefenlagerung in Frage kommenden Gebiete im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz wurden von der Nagra aufgrund der Ergebnisse der regionalen Untersuchungen auf zwei Gebiete eingegrenzt (Figur 4.1-1):

- Ein Gebiet West zwischen Laufenburg und Bad Zurzach
- und ein Gebiet Ost in der Region um Siblingen.



Figur 4.1-1: Geologisch-tektonische Verhältnisse im Grundgebirge unter der Basis des Mesozoikums für die beiden Kristallingebiete West (W) und Ost (E) (aus NTB 05-02).

Beide Gebiete sind – mit Ausnahme einiger Aufschlüsse entlang des Rheins zwischen der Eggberg- und Vorwald-Störung im Gebiet West – mit bis zu mehreren hundert Meter mächtigen Sedimentgesteinen bedeckt. Gegen Süden werden beide Gebiete durch den Nordrand des Permkarbondropfes begrenzt.

Im Vergleich zum Gebiet West, wo in den Bohrungen Böttstein und Leuggern geringdurchlässige Abschnitte von Kristallingestein durchbohrt wurden, war das Kristallin im Gebiet Ost in der Bohrung Siblingen über den ganzen Tiefenbereich bis zur Endteufe von 1522 m höher durchlässig. Die Nagra hat deshalb dieses Gebiet als weniger geeignet zurückgestellt.

Beurteilung der HSK

Der von der Nagra abgeleitete bevorzugte Tiefenbereich für ein geologisches Lager im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz erachtet die HSK als nachvollzieh- und vertretbar (siehe auch HSK 23/73). Ein wichtiges Ergebnis des Sondierprogramms Kristallin Nordschweiz war der Nachweis des Nordschweizer Permokarbondrogens, der das Verbreitungsgebiet des für ein geologisches Tiefenlager in Frage kommenden kristallinen Grundgebirges drastisch verkleinert hat. Aufbau, Struktur und Entstehungsgeschichte des Permokarbondrogens erwiesen sich als äusserst komplex. Die Beanspruchung der in- und umliegenden Gesteinseinheiten durch die Trogbildung ist tiefgreifend und betrifft auch das kristalline Grundgebirge. Diese strukturelle Entwicklung führte zu einer relativ kleinräumigen Zergliederung des Grundgebirges mit einem engen Netz von Störungszonen und einer damit verbundenen starken Zerklüftung des Gesteins. Wie die Nagra feststellt, weist das Gebiet Ost, repräsentiert durch die Bohrung Siblingen, mit den höheren Durchlässigkeitswerten kaum geeignete Voraussetzungen für die geologische Tiefenlagerung auf. Für die weitere Betrachtung bleibt somit nur das Gebiet West übrig.

4.1.3 Gesteinscharakterisierung

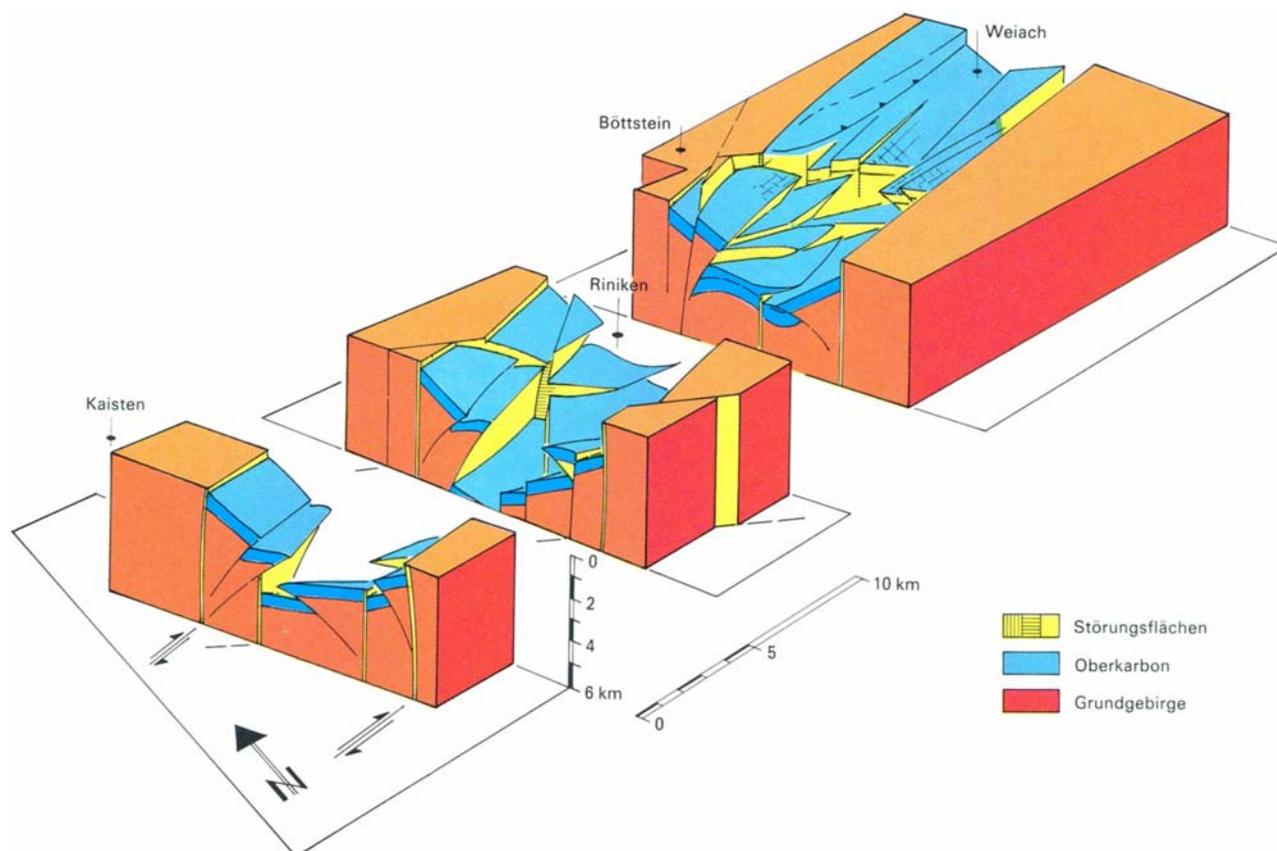
Angaben der Nagra

Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz besteht aus hochmetamorphen, von Adern durchzogenen Gneisen, welche von Graniten und Ganggesteinen durchsetzt werden (NTB 93-01, NTB 93-12). In diesem Grundgebirge entwickelte sich im späten Paläozoikum (d.h. vor rund 315 – 245 Millionen Jahren) während der Endphase der damaligen Gebirgsbildung (variszische Orogenese) der Nordschweizer Permokarbondrog, eine heute bis 10 km breite und bis zu mehreren km Tiefe, mit Sedimenten gefüllte Grabenstruktur, die sich vom Fricktal im Westen bis gegen den Bodensee im Osten hin verfolgen lässt. Damit wird in der Nordschweiz das für die geologische Tiefenlagerung potenziell in Frage kommende Gebiet im kristallinen Grundgebirge stark eingeschränkt.

Reflexionsseismische Untersuchungen (NTB 90-04) zeigen, dass die troginternen Strukturen des Nordschweizer Permokarbondrogens (Abschiebungen, Horizontalverschiebungen, Überschiebungen) neben Extension auch Anzeichen einer Einengung (sogenannte transpressive Deformation) aufweisen, bei welcher der kristalline Grundgebirgssockel in Form keilförmiger Schollen herausgepresst wurde (Figur 4.1-2). Besonders im Bereich der steil bis überkippt stehenden Trogränder führte dies zu einer starken Zergliederung und Zerrüttung des angrenzenden kristallinen Grundgebirges, wie es z.B. in der Bohrung Böttstein beobachtet wurde. In den noch verbleibenden Kristallingebieten der Nordschweiz ist wegen der Nähe zum Nordrand des Permokarbondrogens eine kleinräumige Zergliederung des Gebirges zu erwarten.

Eine weitere Zergliederung und Reaktivierung alter Strukturen im Grundgebirge erfolgte im Oligozän - Miozän durch die Tektonik des Riftsystems im Rheintalgraben, dessen Einfluss bis ins Untersuchungsgebiet der Nagra reichte und mit der Aufdomung des Schwarzwaldes

zur Bildung von Horst-Graben-Strukturen führte. Im Synthesebericht (NTB 93-01) kommt die Nagra zum Schluss, dass im engeren Untersuchungsgebiet Nord-Süd verlaufende Störungen im Zusammenhang mit dieser Hebung und Zerblockung des Schwarzwaldes stehen.



Figur 4.1-2: Schematisches Blockdiagramm des kristallinen Grundgebirges der Nordschweiz nach der geologischen Interpretation von Laubscher. Figur aus Diebold (1987).

Beurteilung der HSK

Die ins Grundgebirge abgeteuften Tiefbohrungen der Nagra haben einen Einblick in die stoffliche und strukturelle Beschaffenheit des Nordschweizer Kristallins gegeben. Die Bohrbefunde zeigten stark unterschiedliche und kaum miteinander korrelierbare Gesteinsabfolgen. Aus den Ergebnissen folgt, dass das kristalline Grundgebirge nördlich des Permokarbondrogens, ähnlich wie im unmittelbar anschliessenden Südschwarzwald, aus einer Vielfalt verschiedener Gesteine besteht. Wegen der Nähe zum Permokarbondrog ist im Vergleich zum Südschwarzwald in der Nordschweiz aber mit einer kleinräumigeren Zergliederung und einer stärkeren Zerklüftung des Kristallins zu rechnen.

Eine wichtige Schlussfolgerung der bisherigen Bohr- und Seismikkampagnen ist, dass wegen der ausgeprägten stofflichen Heterogenität und der intensiven strukturellen Zergliederung die Charakterisierung des kristallinen Grundgebirges schwierig ist. Punktueller Bohrbefunde widerspiegeln lokale Verhältnisse und sind nur bedingt für die Beurteilung des kristallinen Grundgebirges brauchbar. Die HSK teilt die Einschätzung der Nagra, dass für eine ge-

naue Charakterisierung des kristallinen Grundgebirges und für die Abgrenzung geeigneter Gesteinsbereiche Schrägbohrungen und aufwändige, untertägige Erkundungen (Sondierstollen, Schacht) notwendig wären und die Erfolgsaussichten aufgrund der grossen Ungewissheiten kaum abschätzbar sind.

4.1.4 Durchlässigkeiten und Fliesswege

Angaben der Nagra

Die Wasserführung im kristallinen Grundgebirge kann aufgrund der in den Bohrungen beobachteten Wasserzuflussstellen sowohl mit strukturellen (Klüfte, Störungen) wie auch lithologischen Diskontinuitäten (Aplitgänge, Pegmatite, Mineraladern, Erzgänge, etc.) korreliert werden. Für das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz definierte die Nagra aufgrund einer Kompilation aller Bohrerergebnisse drei Fliesssysteme: Kataklastische Zonen, geklüftete Zonen und spröd deformierte Ganggesteine (NTB 93-01 und NTB 93-12).

Für die Entstehung der für die Wasserwegsamkeit massgebenden Störungs- und Klufzonen im Grundgebirge leitete die Nagra eine mehrphasige geologische Entwicklungsgeschichte ab, welche sich bis ins Paläozoikum zurückverfolgen lässt. Die Anlage der Hauptstrukturen erfolgte dabei während den verschiedenen Deformationsphasen der variszischen Orogenese. Diese Gebirgsbildung begann vor etwa 390 Millionen Jahre und dauerte bis ins Perm (ca. 250 Millionen Jahre). Die spät- und postvariszische Entwicklung des Grundgebirges war gekennzeichnet durch eine Anzahl verschiedener tektonischer und hydrothermalereignisse, welche im Zusammenhang mit der während dieser Zeit vorherrschenden Extensions-tektonik und der Entstehung des Nordschweizer Permokarbondgrabens standen. Dabei zirkulierten hydrothermale Lösungen entlang von Sprödstrukturen (Klüfte, Störungen) und führten zu einer Überprägung des umgebenden Gesteins. Innerhalb dieser Strukturen wird oft eine röhrenartige Verteilung der Wasserfliesswege (sogenannte „channels“) beobachtet, welche mit der Genese dieser Systeme in engem Zusammenhang steht (NTB 93-12). Nach der Analyse der Nagra ist ein grosser Teil der Fliesswege während dieser Zeit entstanden und bis heute noch hydraulisch aktiv.

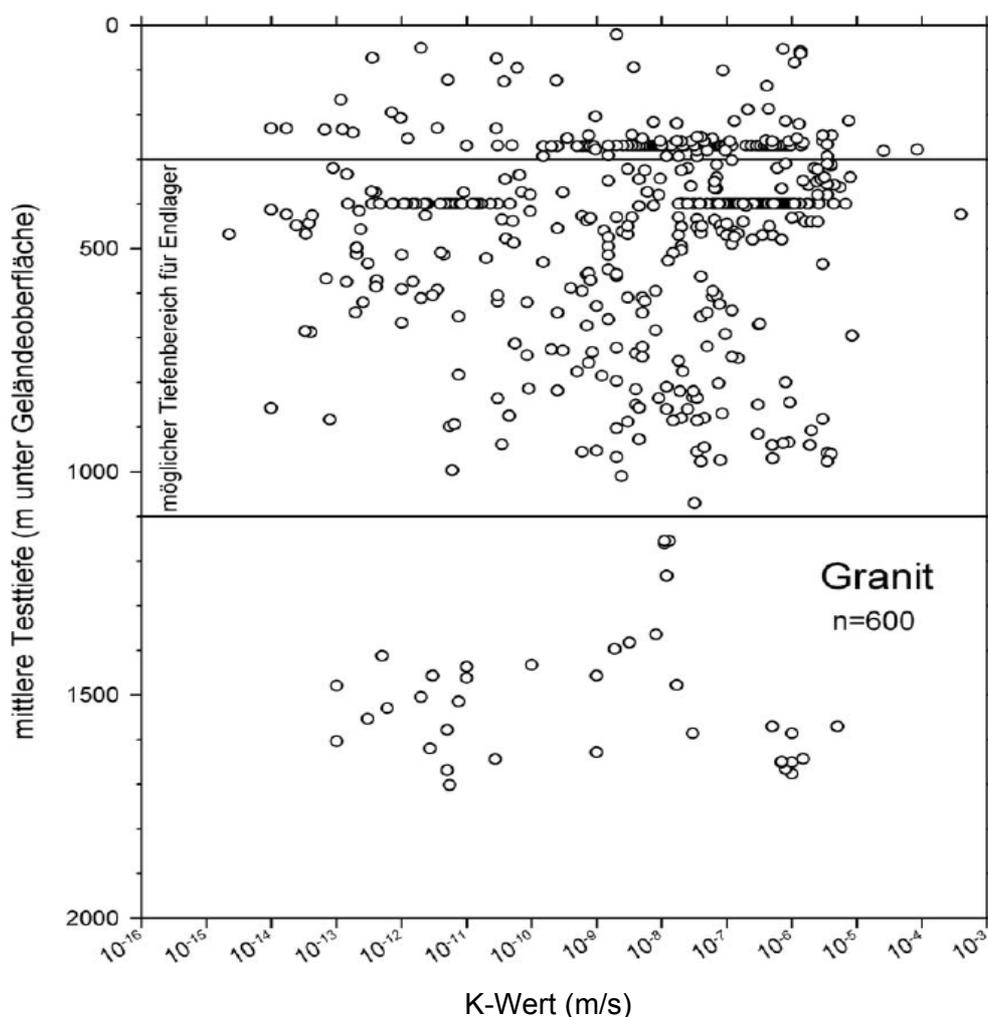
Die kleinräumige Geometrie der wasserführenden Systeme, die räumliche Anordnung der Fliessporosität (z.B. offene Klüfte, Lösungshohlräume und Drusen) sowie die stoffliche Beschaffenheit der Fliesssysteme hat die Nagra in konzeptuellen Modellen vereinfacht dargestellt. Zusammen mit den Daten zur Hydrochemie wurden diese Modelle als direkte Eingabedaten für die Quantifizierung der Nuklidverbreitung durch die Geosphäre verwendet, bei welcher Advektion, Matrixdiffusion, Sorption und radioaktiver Zerfall berücksichtigt wurden (NTB 93-01, NTB 93-12 und NTB 93-22).

Aufgrund der Sondiererergebnisse und teils in Analogie zu anderen Kristallingebieten (Schweden, Finnland, Kanada), wo die mittlere Gebirgsdurchlässigkeit mit der Tiefe tendenziell abnimmt, teilte die Nagra das Kristallin der Nordschweiz konzeptuell in zwei hydrogeologisch verschiedene Stockwerke ein, einen oberen, höher durchlässigen Bereich (hydraulische Durchlässigkeit $K = 2.8 \cdot 10^{-7}$ m/s) und einen tieferen, gering durchlässigen Bereich ($K = 4.2 \cdot 10^{-10}$ m/s). Die Grenze zwischen diesen Stockwerken legte die Nagra bei 500 m fest. Beide, schichtartig übereinander liegende Stockwerke werden im Modell grossräumig von steilen wasserführenden Störungszonen durchschlagen.

Beurteilung der HSK

Mit hydraulischen Tests und Fluid-Logging Messungen konnte die Nagra in den Sondierbohrungen überzeugend nachweisen, dass die Wasserführung im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz an diskrete Strukturen gebunden ist. Die Verknüpfung der gemessenen Transmissivitäten mit diesen Strukturen und die Abgrenzung einer niedrigen Hintergrunddurchlässigkeit für die umgebende Gesteinsmatrix bewertet die HSK als adäquaten Konzeptansatz für das Verständnis der Wasserwegsamkeiten im Kristallin.

Gemäss den Ergebnissen der Sondierbohrungen sind die gemessenen Transmissivitäten und die daraus abgeleiteten hydraulischen Durchlässigkeiten (K-Werte) im Kristallin der Nordschweiz ebenso heterogen verteilt wie die in den Bohrungen beobachteten und für die Wasserwegsamkeit massgebenden strukturellen und lithologischen Diskontinuitäten. Die Durchlässigkeiten variieren über viele Grössenordnungen (10^{-13} bis 10^{-4} m/s) und bestätigen die aus der Literatur bekannten Wertebereiche für kristalline Gesteine (Figur 4.1-3).



Figur 4.1-3: Tiefenbezogene Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten (K-Werte) in granitischen Gesteinen (aus Appel und Habler 2001; n = Anzahl der Messwerte).

Wie aus Tabelle 4.1-1 ersichtlich, wurden die höchsten Durchlässigkeitswerte und die grösste Variationsbreite im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz ermittelt. Dies dürfte auf den Einfluss der Tektonik des Nordschweizer Permokarbondrogens und die damit verbundene stärkere Zerklüftung des Gesteins zurückzuführen sein (HSK 23/73).

Ort	Tiefenbereich Meter unter Terrain	Anzahl Mess- werte	K-Werte (m/s)		
			Spannweite	Mittelwert	Medianwert
Schweiz, Grimsel	400	155	$1.81 \cdot 10^{-8} - 6.71 \cdot 10^{-6}$	$4.51 \cdot 10^{-7}$	$2.71 \cdot 10^{-7}$
Schweiz, Grimsel *	400	32	$1.50 \cdot 10^{-13} - 4.62 \cdot 10^{-11}$	$8.16 \cdot 10^{-12}$	$4.31 \cdot 10^{-12}$
Finnland, Loviisa	20-190	5	$2.00 \cdot 10^{-9} - 1.10 \cdot 10^{-6}$	$3.51 \cdot 10^{-7}$	$2.10 \cdot 10^{-7}$
Deutschland, Schwarzwald	50-135	5	$8.70 \cdot 10^{-8} - 1.36 \cdot 10^{-6}$	$7.91 \cdot 10^{-7}$	$2.10 \cdot 10^{-7}$
Nord-Schweiz	430-1700	57	$1.00 \cdot 10^{-13} - 4.00 \cdot 10^{-4}$	$7.46 \cdot 10^{-6}$	$1.20 \cdot 10^{-8}$
Kanada, Lac du Bonnet	50-880	45	$2.23 \cdot 10^{-15} - 2.41 \cdot 10^{-10}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	$2.03 \cdot 10^{-13}$
Finnland, Hästholmen	210-950	78	$1.30 \cdot 10^{-9} - 8.50 \cdot 10^{-5}$	$2.52 \cdot 10^{-6}$	$2.25 \cdot 10^{-7}$
Schweden, Stripa	335	3	$6.30 \cdot 10^{-11} - 6.50 \cdot 10^{-11}$	$6.43 \cdot 10^{-11}$	$6.50 \cdot 10^{-11}$
Japan, Tono, Kamaishi	200-1000	220	$1.00 \cdot 10^{-12} - 7.50 \cdot 10^{-6}$	$2.44 \cdot 10^{-7}$	$7.00 \cdot 10^{-9}$
Gesamt	50-1700	600	$2.23 \cdot 10^{-15} - 4.00 \cdot 10^{-4}$	$1.25 \cdot 10^{-6}$	$4.05 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 4.1-1: Überblick über in situ gemessene Gebirgsdurchlässigkeiten (K-Werte) in Graniten verschiedener Gebiete Europas, Kanadas und Japans (aus Appel und Habler 2001).

Schweiz, Felslabor Grimsel : K-Werte aus dem Bohrlochkranzversuch
 Schweiz, Felslabor Grimsel*) : K-Werte aus dem Ventilationsversuch

Aufgrund der Befunde aus den Sondierbohrungen können für die Durchlässigkeiten im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz kaum tiefenbezogene oder lateral übertragbare Gesetzmässigkeiten erkannt werden. Eine Schwierigkeit besteht auch darin, dass in den Bohrungen wahrscheinlich nicht alle wasserführenden Strukturen als solche erkannt und charakterisiert wurden. Der Grund liegt darin, dass einerseits mit vertikalen Bohrungen steil stehende Klüfte nur schwer erfasst werden, andererseits die Klüftwasserzirkulation oft nicht die Gesamtfläche der Struktur betrifft, sondern nur in räumlich begrenzten "channels" stattfindet. Mit punktuellen Bohrungen können diese „channels“ kaum erfasst werden, was zu einer Fehleinschätzung der effektiven Durchlässigkeiten und der tatsächlichen Wasserflüsse im Gestein führen kann.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der bei der Bewertung der Bohrdaten beachtet werden muss, ist die Feststellung, dass die Durchlässigkeit in geklüfteten Kristallingesteinen offenbar eine Skalenabhängigkeit aufweist. Das heisst, dass je nach Bezugs- bzw. Probengrösse die Durchlässigkeitsbestimmung unterschiedliche Resultate liefert. Dieser Effekt bewirkt beispielsweise, dass Labormessungen an kleinen Bohrkernproben (cm-Bereich) Durchlässigkeiten ergeben, die oft um zwei bis drei Grössenordnungen unter den Werten entsprechender Bohrlochmessungen (m-Bereich) liegen. Im regionalen Massstab (km-Bereich) können

die Gesteine je nach Verhältnissen um ein bis zwei Grössenordnungen höher durchlässig sein, als aufgrund der Bohrlochversuche zu erwarten ist. Der Grund dieser Skalenabhängigkeit liegt in der Heterogenität des Gesteins und der Art und Weise, wie das Trennflächengefüge ausgebildet ist und die Fliesswege miteinander vernetzt sind. Bei sehr kleinen Proben (Laborskala) besteht die Tendenz, dass Klüfte gar nicht erfasst werden und nur die Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix erfasst wird. Bei Proben im m-Bereich (Bohrungen) ist oft unklar, ob die Vernetzung der hydraulisch wirksamen Klüfte mit der Testanordnung korrekt erfasst wird. Für die Bohrlochdaten der Nagra bedeutet dies, dass die Herleitung statistischer Mittelwerte aus K-Verteilungsprofilen problematisch ist, da unterschiedliche Gesteinsvolumen miteinander verglichen werden. In der Nordschweiz wurde der Aspekt der Skalenabhängigkeit in den Sondierbohrungen nicht im Detail untersucht, die Möglichkeit einer Abhängigkeit sollte nach dem heutigen Stand der Wissenschaft aber in Betracht gezogen werden.

Bei der Zuordnung der gemessenen Transmissivitäten zu struktureologisch-lithologisch abgrenzbaren, diskreten Wasserfliesssystemen ergaben sich Unterschiede zwischen der Interpretation der Nagra und derjenigen der HSK. Sie sind im Wesentlichen auf unterschiedliche methodische Ansätze bei der Gruppierung und struktureologischen Klassierung der Zuflussspunkte zurückzuführen (HSK 23/73). Nach Auswertung der HSK sind Störungszonen bezüglich der Wasserwegsamkeit im untersuchten Kristallin der Nordschweiz wegen ihrer starken hydrothermalen Überprägung (Vertonung) nur von untergeordneter Bedeutung, 62 % der Gesamttransmissivität wurde in offenen Einzelklüften und bevorzugt in harten Gesteinen (aplitischen Ganggesteinen, felsischen und quarzitischen Zonen, Quarzadern, Mineral- und Erzgängen) beobachtet. Bei der Herleitung einer tiefenabhängigen Durchlässigkeitsverteilung müssten somit auch Häufigkeit, Verteilung und Raumlage dieser Gesteinstypen mitberücksichtigt werden.

Indirekte Hinweise auf die hydrogeologischen Verhältnisse im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz und des angrenzenden Südschwarzwaldes lassen sich aus der chemischen Zusammensetzung der Tiefengrundwässer und ihrem Gehalt an atmosphärischen Tracerstoffen (u.a. Tritium, ^{14}C) ableiten. Die Isotopensignaturen der Tiefenwässer liefern auch Hinweise über die ursprünglichen Infiltrationsbedingungen, die Verweilzeiten und die Mischungsvorgänge der Tiefenwässer. Die hydrochemischen und isotopengeochemischen Untersuchungen zeigen (NTB 88-01, NTB 91-30, NTB 93-01), dass sich im untersuchten Kristallgebiet eine chemische Evolutionsreihe von sehr jungen (Tritium-haltigen), geringmineralisierten oberflächennahen Erdalkali- HCO_3 -Wässern (Südostabdeckung des Schwarzwaldes) zu Na-HCO_3 -Tiefengrundwässern (Bohrung Siblingen) mit längeren Verweilzeiten (vermutlich eiszeitlich infiltriert) abzeichnet. Von diesen $\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$ -Tiefengrundwässern des Typs Siblingen geht die Entwicklung weiter zu den Na-SO_4 ($-\text{HCO}_3\text{-Cl}$)-Tiefengrundwässern, wie sie in den Bohrungen Böttstein, Leuggern und Zurzach angetroffen wurden. Der Chemismus dieser etwas höher mineralisierten Wässer wird durch die weitere Evolution infolge Gesteins-Wasser-Wechselwirkungen und offenbar auch durch eine Beimischung von Na-Cl -Wässern aus dem angrenzenden Permokarbondrog beeinflusst. Aus den ^{14}C -Werten ergeben sich für diese Mischwässer Modellalter von >12'000 Jahren, die aber nur für die Proben von Zurzach genauer mit 15'000 – 21'000 Jahren quantifiziert werden konnten. Aufgrund der ähnlichen chemischen Zusammensetzung dieser Wässer und der Isotopensignaturen kann man in dieser Region von einem zusammenhängenden Strömungssystem ausgehen.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass sich der hydrogeologische Modellansatz der Nagra über die schichtartige Verteilung der Durchlässigkeiten im kristallinen Grund-

gebirge der Nordschweiz mit den vorliegenden Daten nicht eindeutig begründen lässt. Die Aufteilung des kristallinen Grundgebirges in einen oberen, höher durchlässigen Bereich und einen unteren (> 500 m), gering durchlässigen Bereich ist nach Ansicht der Nagra die einfachste von mehreren möglichen Interpretationen. Das vorgeschlagene Konzept kann die hydrogeologischen Verhältnisse in den Kristallinbohrungen Kaisten, Leuggern, Weiach und Siblingen nicht befriedigend erklären, welche alle als Spezialfälle gedeutet werden müssen. Problematisch erscheint auch die Abgrenzung grosser und mächtiger wasserführender Störungszonen, die in den Sondierbohrungen in dieser Art nicht beobachtet wurden. Nach Ansicht der HSK ist die Datenbasis zu klein, um das Schichtmodell mit steilen wasserführenden Störungszonen als wahrscheinlichste Lösung vertreten zu können. Die unterschiedlichen Transmissivitäten in den Bohrungen sind Ausdruck einer komplexen Durchlässigkeitsverteilung im kristallinen Grundgebirge, die nicht durch ein vergleichsweise einfaches, schichtartiges Modell adäquat beschrieben werden können. Nach Ansicht der HSK ist der Konzeptansatz der geringdurchlässigen Kristallinblöcke, die von hochdurchlässigen Störungszonen begrenzt werden, eine zu grobe Vereinfachung. Aufgrund der vorliegenden Befunde muss man davon ausgehen, dass die tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse wesentlich komplexer sind und dass stark wasserführende Systeme, wie Ganggesteine, Klüfte und Adern, auch innerhalb grosser Kristallinblöcke vorkommen.

4.1.5 Geochemische Verhältnisse und Sorption

Angaben der Nagra

Die Grundwässer im kristallinen Grundgebirge der zentralen Nordschweiz sind im betrachteten Tiefenbereich vom Na-SO₄-Typ, relativ schwach mineralisiert (gelöste Stoffe 0.9 bis 1.4 g/L), reduzierend und mit kleinem Kolloidgehalt. In geringdurchlässigen Blöcken können auch etwas höher mineralisierte saline Wässer vom Na-Cl-Typ auftreten. Das kristalline Grundgebirge zeigt aufgrund von hydrothermalen Veränderungen vor allem im Bereich von Kluff- und Störungszonen signifikante Tonmineralgehalte, die für die Radionuklidsorption günstig sind. Für ein geologisches Tiefenlager sind die geochemischen Verhältnisse in der Nordschweiz wegen der geringen Salinität – auch verglichen mit anderen weltweit untersuchten Kristallingesteinsvorkommen – günstig. Es sind keine Prozesse bekannt, welche die Barriereigenschaften der Kristallingesteine in geeigneter geologischer Situation innerhalb der nächsten Million Jahre signifikant verändern könnten. Wegen der Sedimentbedeckung werden die geochemischen Verhältnisse als stabil betrachtet, d.h. ein Eindringen oxidierender Wässer während einer Vergletscherung kann ausgeschlossen werden.

Beurteilung der HSK

Die Tiefengrundwässer sind nach Ansicht der HSK vom Na-SO₄-(HCO₃-Cl)-Typ; die Wasserzusammensetzungen sind experimentell gut abgestützt und plausibel. Der Wert des Redoxpotenzials (Eh) ist hingegen mit Ungewissheiten behaftet, da über die chemischen Vorgänge, die die Redoxbedingungen bestimmen, Unklarheit herrscht. Basierend auf verschiedenen in Frage kommenden Redox-Gleichgewichten gab die Nagra in NTB 93-01 für den Eh-Wert eine theoretische Bandbreite von –240 bis –30 mV an. Die HSK erachtet diese Eckwerte als nachvollziehbar und realistisch (HSK 23/73). Wegen der Sedimentbedeckung in der Nordschweiz ist ein Eindringen oxidierender Wässer wenig wahrscheinlich. Ob es über längere Zeiträume ganz ausgeschlossen werden kann, müsste näher abgeklärt werden (Infiltration vom Schwarzwald aus).

Die Nagra geht im Optionenbericht NTB 05-02 nur summarisch auf das Rückhaltevermögen ein. Im Rahmen des Projekts Kristallin-I hat sie jedoch einen umfassenden Satz geochemischer Daten zum Kristallin in der Nordschweiz veröffentlicht (NTB 93-22). Darin enthalten sind auch Sorptionskoeffizienten für die Fliesswege der Geosphäre. Die HSK hat zu den geochemischen Daten der Nagra in ihrem Gutachten zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I Stellung genommen (HSK 23/73). Darin ist die HSK der Ansicht, dass die von der Nagra festgelegten Referenzwerte für die Sorptionsdaten überwiegend vorsichtig gewählt sind.

4.1.6 Abschätzung der Barrierenwirkung

Angaben der Nagra

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

Aufgrund der allgemeinen Erfahrung aus Untersuchungen in der Nordschweiz und im Südschwarzwald 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. Wenig deformierte Blöcke mit einer lateralen Ausdehnung $> 1 \text{ km}^2$ werden zwar erwartet, sind aber von der Oberfläche aus nur schwierig lokalisierbar. Ein Tiefenlager müsste voraussichtlich in verschiedene Kompartimente aufgeteilt werden.

Im Kristallin der Nordschweiz ist nach Ansicht der Nagra tendenziell eine Abnahme der mittleren Gebirgsdurchlässigkeit mit der Tiefe erkennbar, 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 exploriert werden kann. Die Gebirgsdurchlässigkeit dieser Blöcke ist kleiner als 10^{-10} m/s ; die geringe Wasserführung ist an die in Abschnitt 4.1.4 beschriebenen wasserführenden Systeme gebunden. Zwischen diesen geringdurchlässigen Blöcken treten auch in grosser Tiefe immer wieder höher durchlässige Zonen auf.

Die Nagra weist darauf hin, dass nach Ansicht der HSK (Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der Nagra, HSK 23/73) auch alternative Konzepte, in welchen Systeme mit kleineren Einzelklüften und Mineraladern ausserhalb grösserer Störungen hydrogeologisch aktiv sind, in Betracht gezogen werden müssen. In den Sicherheitsanalysen der Nagra wird gezeigt, dass die behördlichen Schutzziele (HSK-R-21) auch bei pessimistischen Annahmen über die Verteilung und Eigenschaften der Kanäle innerhalb der wasserführenden Systeme in den geringdurchlässigen Blöcken noch eingehalten werden können.

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. Endlagerbehälter mit Kupferumhüllung sind im schweizerischen Entsorgungsprogramm im Sinne einer alternativen Option vorgesehen.

Beurteilung der HSK

Die Durchlässigkeit des Kristallins ist eine Folge des Sprödverhaltens des Gesteins mit Bildung von Klüften und Brüchen, die einen weiten Skalenbereich von mikroskopisch feinen Rissen bis zu mächtigen Störungszonen umfassen. Die Untersuchungen im Kristallin der Nordschweiz zeigen, dass die stoffliche Beschaffenheit einen grossen Einfluss auf das Sprödverhalten des Gesteins hat. Klüfte bilden sich bevorzugt in sog. Härtingen (quarzitische Zonen, aplitische Ganggesteine, Kalksilikatlagen, Porphyrgänge, Quarzadern, Mineral- und Erzgänge). Die beschränkten Explorationsmöglichkeiten von der Oberfläche her erlauben allerdings nur eine unvollständige Abklärung dieser für die Wasserwegsamkeit wichtigen stofflichen und strukturellen Diskontinuitäten (HSK 23/73). Aufgrund der gemessenen, stark variierenden hydraulischen Durchlässigkeiten und der grossen Streuungen der K-Werte (um einen Medianwert von 10^{-8} m/s, siehe Abschnitt 4.1.4) ist es nach Ansicht der HSK fraglich, ob die im Optionenbericht von der Nagra vorgegebene Mindestanforderung an die grossräumige Durchlässigkeit von $K < 10^{-10}$ m/s im Kristallin erfüllt werden kann.

Aus sicherheitstechnischer Sicht weist das kristalline Grundgebirge aufgrund dieser heterogenen Beschaffenheit gegenüber einem homogenen Wirtgestein grundlegende Unterschiede in der Wasserführung und im Stofftransport auf. Die Nagra weist darauf hin, dass aufgrund der hydraulischen Verhältnisse im kristallinen Grundgebirge die technischen Barrieren eine wichtige Rolle spielen, da vor allem ihr korrektes Funktionieren den längerfristigen Einschluss der Radionuklide gewährleistet (Endlagerbehälter, Bentonit). Durch die Wahl und Dimensionierung der technischen Barrieren kann die Einschlussfähigkeit optimiert werden.

Da der dominierende Transportprozess die Advektion entlang von Klüften ist, können gut lösliche, schwach sorbierende Nuklide in vergleichsweise kurzer Zeit lange Transportwege im Gestein zurücklegen. Die Barrierenwirkung des geklüfteten Kristallins ist daher im allgemeinen kleiner als diejenige eines Wirtgesteins vergleichbarer Ausdehnung mit primär diffusivem Transport. Im Sicherheitsbericht zum Projekt Kristallin wurde für das betrachtete Inventar an Radionukliden primär von verglasten HAA ausgegangen. Legt man die im Projekt Opalinuston verwendete Abfallzusammensetzung aus abgebrannten Brennelementen, verglasten HAA, und langlebigen mittelaktiven Abfällen (LMA) zugrunde, sind einerseits vermehrt leicht lösliche, schwach sorbierende Nuklide wie ^{129}I , ^{36}Cl , ^{14}C (in organischer Form) im Nuklidinventar enthalten, zum anderen ist auch der zeitliche Ablauf der Freisetzung aus den eingelagerten Abfällen gegenüber den Annahmen in NTB 93-22 verändert.

Die Nagra geht nach dem Verlust der Einschlussfähigkeit der Endlagerbehälter von einer anfänglichen, sofortigen Freisetzung eines Teils des Nuklidinventars (*instant release fraction*, IRF) der abgebrannten Brennelemente aus. Die nuklidabhängige IRF beträgt einige Prozente des gesamten eingelagerten Inventars des betreffenden Nuklids; sie wird von der Nagra in NTB 02-06 für Brennelemente aus Siedewasserreaktoren mit 20 % für $^{14}\text{C}_{\text{org}}$, 5 % für ^{36}Cl , 9 % für ^{79}Se und 9 % für ^{129}I angegeben. Die anfängliche Freisetzung von Nukliden aus abgebrannten Brennelementen übertrifft so die langsame, durch eine konstante Glaskorrosionsrate vorgegebene Nuklidabgabe aus verglasten HAA nach dem Versagen der Endlagerbehälter um mehrere Grössenordnungen.

Durch eine geeignete Auslegung des Nahfeldes - also der Dimensionierung und Wahl des Verfüllmaterials der Lagerstollen - kann der überwiegende Teil der Nuklide durch Sorption zurückgehalten werden. Die Freisetzung von langlebigen, gut löslichen, schlecht sorbierenden Nukliden wird durch die technischen Barrieren (Behältermaterialien, Bentonitverfüllung)

bloss verzögert. Die sicherheitsrelevante langfristige Barrierenwirkung für diese Nuklide wird durch die Eigenschaften des Wirtgesteins und insbesondere durch die darin vorherrschenden Transportprozesse bestimmt. Zur Begrenzung der Freisetzung dieser Nuklide, sowie zum Schutz der technischen Barrieren, muss ein genügend grosser Wirtgesteinskörper mit der erforderlichen geringen hydraulischen Durchlässigkeit vorhanden sein.

4.1.7 Explorierbarkeit

Angaben der Nagra

In der Nordschweiz wird das kristalline Grundgebirge von bis zu mehreren 100 m mächtigen Sedimentgesteinen überlagert, was die Exploration des Kristallins von der Oberfläche aus schwierig macht. Die Nagra kommt deshalb bei der Beurteilung der Frage der Charakterisierung und Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges zum Schluss, dass eine zuverlässige Abgrenzung geeigneter geringdurchlässiger Gesteinsbereiche für die geologische Tiefenlagerung und eine Lokalisierung der Wasser führenden Fließsysteme nur anhand von Schrägbohrungen und Untersuchungen untertage (Schacht, Sondierstollen) möglich ist.

Beurteilung der HSK

In ihrem Gutachten zum Projekt Gewähr (HSK 23/28) und im technischen Bericht zum Gutachten (HSK 23/29) hat sich die HSK ausführlich zur Frage der Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges geäußert. Sie kam damals zum Schluss, dass sich das Kristallin der Nordschweiz in seiner lithologischen Zusammensetzung, im tektonischen Aufbau sowie in der Wasserführung als äusserst heterogenes Gestein erwiesen habe. Dass im Untersuchungsgebiet eine geeignete, genügend grosse Kristallinscholle zur Aufnahme eines Tiefenlagers vorhanden sei und gegebenenfalls auch gefunden werden kann, hat die HSK aufgrund der damals vorliegenden Befunde bezweifelt.

Seither hat die Nagra die Daten und Ergebnisse des regionalen Untersuchungsprogramms zum kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz in einem Synthesebericht zusammengestellt (NTB 93-01) und weitere geophysikalische Untersuchungen (Seismik) und geologische Arbeiten durchgeführt (Naef 1995, Polley 1997, Weber und Albert 1997). Im Untersuchungsgebiet Nord-Aargau (Mettauertal) wurde mit Hilfe von drei reflexionsseismischen Linien ein Gebiet detaillierter abgeklärt. Die Seismiklinien wurden für die lokalen Bedingungen (z.B. die un tiefe Lage der Grundgebirgsoberfläche) optimiert, um möglichst aussagekräftige Resultate zu erhalten. Die Kampagne brachte aber keine wesentliche Verbesserung der Datenqualität und damit auch der Interpretierbarkeit des Kristallins. Eine grossflächige Kartierung von Reflektoren im kristallinen Grundgebirge war nicht möglich. Insbesondere gelang es nicht, die Oberfläche des kristallinen Grundgebirges oder Störungszonen zuverlässig zu ermitteln. Die petrophysikalischen Kontraste (Reflektivität) sind im Kristallin offenbar so gering, dass allfällige Reflexionen im allgemeinen Rauschpegel schwer zu erkennen sind. Ein weiterer Grund liegt auch darin, dass viele Strukturen steil bis vertikal einfallen und sich daher mit der Reflexionsseismik nicht abbilden lassen.

Die Problematik der Erkundung des kristallinen Grundgebirges hat sich also nicht entschärft. Nach wie vor sind grundlegende Phänomene, die für die Abgrenzung geringdurchlässiger Gebirgsbereiche massgebend sind, nicht genügend bekannt:

- Verteilung und Geometrie gering geklüfteter Granitkörper im Gneisrahmen des kristallinen Grundgebirges,

- Häufigkeit und Verteilung der Gesteinsbereiche, die sich spröd verhalten (Härtlinge wie felsische und quarzitische Zonen, Ganggesteine, Kalksilikatlagen, Porphyrgänge, Erzgänge, Mineraladern, etc) und bevorzugte Wasserfliesswege bilden können,
- Frequenz und Orientierung tektonischer Strukturen (Störungen, Klüfte) und Quantifizierung der Durchlässigkeitsverhältnisse.

Das noch verbliebene Kristallin-Gebiet West kann mit den vorliegenden Kenntnissen, auch nach den zusätzlichen reflexionsseismischen Erkundungen im Mettauertal, nicht genügend belastbar charakterisiert werden. Die Tektonik seit dem Paläozoikum hat zu einer kleinräumigen Zergliederung des Grundgebirges geführt. Die Chancen, dass eine geeignete geologische Situation für ein geologisches Tiefenlager für HAA im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz gefunden werden kann, haben sich seit dem Projekt Gewähr kaum verändert. Die Einschätzung der Situation, wie sie im technischen Bericht der HSK zum Projekt Gewähr (HSK 23/29) sowie in der Stellungnahme der HSK zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I (HSK 23/73) gegeben wurde, gilt deshalb unverändert auch heute noch:

"Ob im Untersuchungsgebiet eine geeignete, genügend grosse Kristallinscholle zur Aufnahme des Endlagers vorhanden ist und gegebenenfalls auch gefunden werden kann, lässt sich mit den heute vorliegenden Befunden noch nicht beurteilen. Selbst wenn die gesuchte Kristallinscholle existiert, dürfte die Standortsuche schwierig, zeitraubend und aufwendig sein. Die schwer prognostizierbare heterogene Struktur des Grundgebirges wird eine grosse Zahl von Sondierbohrungen erforderlich machen, die unerwünschte, für den Standort abträgliche Perforationen des Wirtgesteins mit sich ziehen".

4.1.8 Rohstoffkonflikte

Angaben der Nagra

Die Nagra äussert sich in Kapitel 4.5 des Optionenberichts generell zur Frage allfälliger Rohstoffvorkommen und den möglichen Nutzungskonflikten. Für das Kristallin der Nordschweiz sieht die Nagra bei der Erdwärme und bei den Tiefengrundwässern (Thermal- und Mineralwasser) ein gewisses Nutzungspotenzial, das bei der Diskussion möglicher Standorte zu beachten wäre.

Beurteilung der HSK

Die erdwissenschaftlichen Untersuchungen der Nagra im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz brachten, mit zwei Ausnahmen, keine bedeutenden Rohstoffvorkommen zu Tage. Die Ausnahmen betreffen die geothermischen Verhältnisse und die Thermalwasservorkommen im kristallinen Grundgebirge im Gebiet West (Kaisten – Leuggern – Böttstein - Bad Zurzach). In den Sondierbohrungen Böttstein, Leuggern und in den verschiedenen Thermalwasserbohrungen von Bad Zurzach haben die Bohrbefunde eine ausgeprägte Wärmeanomalie mit Wärmeflussmaxima von 169 mW/m^2 (gegenüber Basiswerten von $60\text{-}80 \text{ mW/m}^2$ im Mittelland) ergeben. Aus der Gesamtbeurteilung der Daten und aufgrund der geologisch-tektonischen Verhältnisse kommt als Erklärung dieser geothermischen Verhältnisse einzig das vertikale Aufströmen von heissen Tiefenwässern in Frage (Basler & Hofmann 1992, Schärli und Rybach 2002). Das Ausmass und die Stärke der Anomalie deuten auf einen Zusammenhang mit dem Nordrand des Permokarbondrogens und der damit verbundenen erhöhten tektonischen Zerrüttung des kristallinen Grundgebirges bis in grosse Tiefen

hinab. Hinweise auf aufsteigende Wässer ergeben sich auch aus den Messungen der hydraulischen Formationsdrücke in den Sondierbohrungen Böttstein und Leuggern.

In Bad Zurzach wird seit mehreren Jahrzehnten aus dem kristallinen Grundgebirge artesisch gespanntes Thermalwasser aus verschiedenen Förderbohrungen gewonnen und genutzt (Thermalbad, Mineralwasserproduktion). Die geförderte Menge liegt nach Angaben des Kantons Aargau heute bei über 1 m³/Minute. Im Felsgrundwasserleiter des Grundgebirges zeichnet sich ein markanter Absenktrichter ab, dessen Einfluss bis ins Gebiet von Leuggern und Böttstein reicht (NTB 93-01). Da die in Leuggern und Böttstein angetroffenen Tiefenwässer des kristallinen Grundgebirges vom Wärmeinhalt wie auch in hydrochemischer Hinsicht mit dem Thermalwasser von Bad Zurzach übereinstimmen, muss das Gebiet von Bad Zurzach-Leuggern-Böttstein als eine einheitliche Thermalwasserprovinz betrachtet werden. Die Evaluation eines möglichen Standortgebietes für ein geologisches Tiefenlager derart nahe einer genutzten Thermalwasserzone bzw. einer Zone aufsteigender Tiefenwässer erachtet die HSK als problematisch.

4.1.9 Bautechnische Machbarkeit

Angaben der Nagra

Aus bautechnischer Sicht erachtet die Nagra das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz als wenig problematisch, sofern keine grösseren Störungszonen durchfahren werden müssen. Bei grösseren Störungszonen müssten während des Vortriebes Stabilisierungs- und Abdichtungsmassnahmen vorgenommen werden und die Einbauten verstärkt werden.

Beurteilung der HSK

Nach Ansicht der HSK ist der Bau eines geologischen Tiefenlagers im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz unter den von der Nagra angenommenen Eigenschaften des Gebirges grundsätzlich machbar, wenn auch technisch bei grosser Überlagerung anspruchsvoll (z.B. Spannungsumlagerungen mit Bergschlag, Wasserzuflüsse). Für das Abteufen der Schächte kann auf Erfahrungen im Untertagebau zurückgegriffen werden. Besondere Beachtung muss der Frage der Wasserhaltung während der Bau- und Betriebsphase des Tiefenlagers geschenkt werden, da im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz bei der Erschliessung des Lagers (Rampe, Schacht, Zugangstollen) örtlich mit stark wasserführenden Zonen gerechnet werden muss.

4.2 Opalinuston

4.2.1 Datengrundlagen

Angaben der Nagra

Die Nagra hat ihre Kenntnisse zu den Eigenschaften des Opalinustons in mehrjähriger intensiver Forschungstätigkeit erlangt. Die Daten zum Opalinuston stammen aus Untersuchungen in Tiefbohrungen, aus seismischen Profilen in der Nordschweiz, aus den seit 1996 laufenden Programmen im Felslabor des Mont Terri, aus Dissertationen (z.B. Allia 1996), Studien in Eisenbahn- und Strassentunneln und Laboruntersuchungen. Wichtige Erfahrungen stammen auch aus den französischen Arbeiten in einem dem Opalinuston sehr ähnlichen Tongestein (Andra 2005). Die Nagra bezeichnet deshalb den Kenntnisstand als weit fortgeschritten.

Beurteilung der HSK

Für den Opalinuston ist eine solide Datengrundlage vorhanden, die erlaubt, die Geometrie und die Eigenschaften dieses Gesteins als potenzielles Wirtgestein für ein Tiefenlager im Detail zu beurteilen. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Untersuchungen der Nagra zum Opalinuston, zu seiner seismischen Erkundung, zu seiner hydrogeologischen und lithologischen Eigenschaften detailliert und von hoher wissenschaftlicher Qualität sind (HSK 35/99). Der Opalinuston wurde nebst den Oberflächenaufschlüssen in zahlreichen Bohrungen erschlossen und insbesondere in vier Nagra-Bohrungen (Schafisheim, Riniken, Weiach, Benken), der Kernbohrung Beznau (NTB 84-34) und im Felslabor Mont Terri eingehend charakterisiert. Ein umfassendes Forschungsprogramm der Nagra widmet sich den Eigenschaften dieses Gesteins.

Aufgrund der vorhandenen Daten lässt sich feststellen, dass die Eigenschaften des Opalinustons durch die einheitlichen Ablagerungsbedingungen dieses Sediments (Figur 4.2-1) homogen und über weite Strecken interpolierbar sind. Damit ist ein Teil der im Mont Terri und in den Bohrungen gewonnenen sedimentologischen Kenntnisse zum Opalinuston in guter Annäherung auf den gesamten nordschweizerischen Raum übertragbar. Die seismische Erkundung der Nordschweiz ist detailliert erfolgt (NTB 05-02, Figur 1-1) und erlaubt über die groben Züge hinaus eine gute Voraussage der Lagerungsverhältnisse des Opalinustons und der regionalen bis lokalen tektonischen Komplexität in den Schichten oberhalb des Grundgebirges.



Figur 4.2-1 Paläogeographische Situation zur Zeit der Ablagerung des Opalinustons vor 180 Millionen Jahren (aus NTB 05-02).

4.2.2 Räumliche Verbreitung

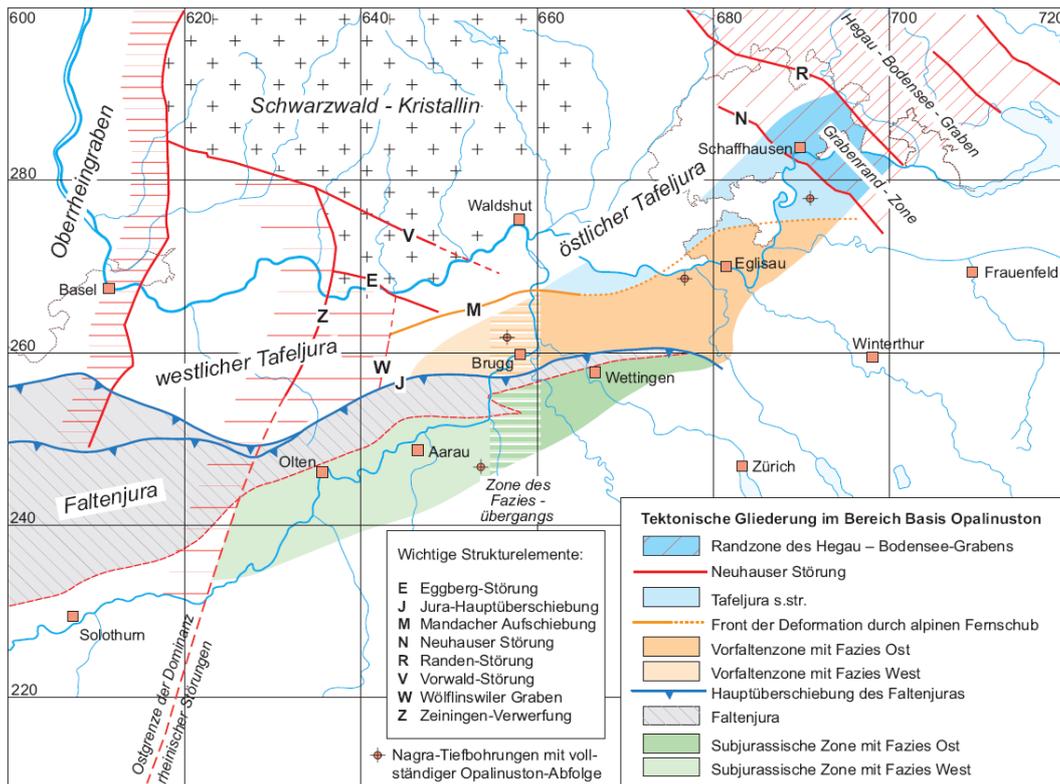
Angaben der Nagra

Die Vorkommen des Opalinustons im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum liegen in einer Übergangszone zwischen dem durch alpinen Fernschub deformierten Alpenvorland und einem vom alpinen Fernschub nicht betroffenen Gebiet weiter im Nordosten. Je alpenferner die Gebiete liegen, desto weniger sind sie vom alpinen Fernschub deformiert worden. Die Nagra geht von einer bevorzugten Lagertiefe von 400 bis 900 m aus und grenzt (von Norden nach Süden) vier tektonisch unterschiedliche Gebiete ab:

- Der Tafeljura (einschliesslich Nordrand des Molassebeckens), der ausserhalb des alpinen Fernschubs liegt.
- Die Vorfaltenzone, die durch eine frontale Aufschiebung und eine leichte Abscherung charakterisiert, sonst aber wenig gestört ist.
- Der Faltenjura, eine tektonisch stark beanspruchte Zone mit diversen Auf- und Überschiebungen sowie kleinräumiger Faltenbildung und
- die subjurassische Zone, die den südlich des Faltenjuras anschliessenden Bereich mit Übergang zum Molassebecken bildet und in der der tektonische Schuppenbau von

Norden nach Süden rasch ab- und die Überdeckung mit Molassesedimenten gleichzeitig zunimmt.

Die Gebiete bilden eine NE-SW-streichende Zone, die sich in etwa von Schaffhausen bis Olten erstreckt (Figur 4.2-2). Diese Zone wird gegen Osten durch die Störungen des Hegau-Bodensee-Grabens abgeschnitten, im Westen endet die Zone am Rand einer verlängerten Ostgrenze der Dominanz rheinischer Störungen.



Figur 4.2-2: Verbreitung des Opalinustons in der Nordschweiz in bevorzugter Tiefenlage. Die Gebiete lassen sich in vier tektonisch unterschiedlich beanspruchte Regionen unterteilen (aus NTB 05-02).

Beurteilung der HSK

Der von der Nagra als bevorzugt bezeichnete Tiefenbereich von 400 bis 900 m ist aus Sicht der HSK vernünftig gewählt. Gebiete mit glazialer Tiefenerosion sind zu meiden. Die von der Nagra vorgeschlagenen Grenzwerte ergeben sich aus Überlegungen zur minimal erforderlichen Überdeckung eines Tiefenlagers und der bautechnischen Machbarkeit. Aus dem Opalinuston liegen bautechnische Erfahrungen bis in Tiefen von 800 m vor (NTB 02-03). In Tiefen >800 m könnten daher noch unbekannte bautechnische Komplikationen auftreten, die eine verstärkte Ausbruchsicherung nötig machen und die sich auf die Langzeitsicherheit des Lagers negativ auswirken könnten.

Aus den gewählten Grenzen des Tiefenbereiches ergeben sich die Nord- und Südgrenzen der für die Tiefenlagerung bevorzugten Zone mit Opalinuston. Die West- und Ostbegrenzungen sind aus Sicht der HSK vernünftig gewählt, auch wenn die westliche Begrenzung im Prinzip nur auf einer vermuteten Zunahme tektonischer Beanspruchung in der Verlängerung

der Ostgrenze der Zeiningen-Verwerfung (Figur 4.2-2) beruht und aus Sicht der HSK nur eine unscharfe Grenzziehung möglich ist.

Die Wahl der im weiteren Verlauf von der Nagra vorgeschlagenen vier Regionen Jurasüdfuss, Bözberg, Nördlich Lägern und Zürcher Weinland (von W nach E) kann von der HSK nachvollzogen werden. Diese Gebiete werden aber hier nicht weiter verglichen, da die weitere Einengung und Beurteilung von Standortgebieten im Rahmen des Sachplanverfahrens erfolgt.

4.2.3 Gesteinscharakterisierung

Angaben der Nagra

Der Opalinuston der Nordschweiz besteht aus einer 80 bis 120 m mächtigen Serie dunkelgrauer Tonsteine (Pelite) mit eingeschalteten Silt- und Feinsandlagen, Kalkbänkchen sowie diagenetisch entstandenen Lagen mit Karbonat-Konkretionen. Der Opalinuston besteht mineralogisch überwiegend aus Tonmineralien, Quarz, Kalzit und weiteren Karbonaten, wenig Feldspäten, Pyrit, und geringen Mengen an organischem Material.

Der Opalinuston wurde in einem flachen Meer von wenigen Dekametern Wassertiefe abgelagert (Figur 4.2-1). Bereits zur Zeit der Ablagerung kam es jedoch aufgrund differentieller Absenkungen zu Unterschieden in der Mächtigkeit des Opalinustons. Nach der Ablagerung wurde der Opalinuston allmählich mit jüngeren Sedimenten überdeckt, versenkt und kompaktiert. Dabei wurde der Porenraum stark reduziert und das Porenwasser zum grössten Teil ausgepresst. Die Versenkung auf maximale 1700 m führte dazu, dass das Gestein Temperaturen im Bereich von 80-90 °C erfuhr. Die sedimentäre und durch Versenkung und Kompaktion verstärkte Schichtung ist das dominante Strukturelement des Opalinustons. Sie ist eine wesentliche Ursache für die Anisotropie verschiedener Gesteinseigenschaften. Während der Versenkungsgeschichte wurde auch der Porenraum der silt- und sandreichen Lagen mit Karbonat-Zement verfüllt, so dass diese Lagen keine hydraulischen Wegsamkeiten darstellen.

Von besonderem Interesse sind die oberhalb und unterhalb des Opalinustons auftretenden Rahmengesteine. Als Rahmengesteine bezeichnet die Nagra die überwiegend gering durchlässigen Gesteinspakete zwischen dem Wirtgestein Opalinuston und dem nächsten regionalen Aquifer über (Malm) und unter (Muschelkalk) dem Opalinuston. Sie bilden in vertikaler und lateraler Richtung eine zusätzliche Barriere für den Radionuklidtransport. Die unteren Rahmengesteine bestehen aus einer wechselhaften, mehrheitlich aus gering durchlässigen ton- und/oder evaporitreichen Schichten bestehenden Abfolge, die von lokal wasserführenden Schichten unterbrochen wird. Die stark sulfathaltigen Porenwässer dieser lokalen Aquifere (Arietenkalk im Lias, Sandsteine im Keuper) weisen jedoch auf eine vernachlässigbare Grundwasserzirkulation hin.

Demgegenüber besteht in der Beschaffenheit der Gesteinsabfolgen oberhalb des Opalinustons ein Unterschied zwischen 'Ost' und 'West'. Die oberen Rahmengesteine sind östlich des unteren Aaretals pelitisch und daher sehr gering durchlässig, während sie weiter westlich zunehmend kalkiger werden und sich mit dem Haupttrogenstein ein regionaler Aquifer einschaltet, welcher die Barrierenwirkung der Rahmengesteine im Westen einschränkt.

Beurteilung der HSK

Die Nagra hat die lithologischen Eigenschaften des Opalinustons sorgfältig und umfassend untersucht. Der weitgehend aus Tonen bestehende Opalinuston wurde während des frühen Doggers in einem flachen Meer abgelagert. Der Ablagerungsraum war morphologisch gegliedert und durch während der Ablagerung vorhandene Absenkungen geprägt (Wetzel und Allia 2003, Wetzel et al. 2003). Nach Allia (1996) lassen sich verschiedene Gesteinsfazies-Typen unterscheiden. Diese bilden vertikale Abfolgen (Dachbankzyklen), in denen gegen oben der Silt- und Sandanteil zunimmt. Derartige Zyklen sind lateral im Bereich von 1 bis 10 km verfolgbar, ohne dass sich insgesamt der tonreiche Charakter des Gesteins ändert. Trotz der beobachteten Variation im Tonmineralgehalt entspricht der Opalinuston daher lithologisch und geotechnisch einem Pelit (Wetzel 2005). Die von der Nagra gemachten Aussagen können von der HSK nachvollzogen werden.

Die einschlusswirksamen oberen Rahmengesteine werden unter dem Einfluss der westlich des unteren Aaretals auftretenden Kalke des Haupttrogensteins reduziert. Die im Keuper erkennbare Zunahme sandiger Faziesanteile (zwischen den Bohrungen Benken und Herdern) tritt mehrheitlich erst östlich der Gebiete mit bevorzugter Tiefenlage des Opalinustons auf und ist damit für die von der Nagra ausgeschiedene Zone nicht mehr relevant. Hinsichtlich der Rahmengesteine ergeben sich damit im Osten günstigere Bedingungen.

Die von der Nagra kompilierten Angaben zur Versenkungsgeschichte des Opalinustons und den erreichten Maximaltemperaturen (kürzlich in Mazurek et al. 2006 zusammengefasst) sind im Einklang mit diversen Beobachtungen zur sedimentologischen und tektonischen Entwicklungsgeschichte der Nordschweiz. Neuere Arbeiten von Timar-Geng et al. (2006) und Cederbom et al. (2004) weisen auf alternative geologische Zeit-Temperatur-Entwicklungen hin. Die möglichen alternativen Zeit-Temperatur-Pfade des Opalinustons und die daraus resultierenden maximal erreichten Temperaturen wären diesbezüglich ergänzend abzuklären.

4.2.4 Durchlässigkeiten und Fließwege

Angaben der Nagra

Mineraladern und Alterationen fehlen im Opalinuston weitgehend. Dieses Fehlen illustriert, dass es im Opalinuston in der geologischen Vergangenheit zu keinen bedeutenden Gestein-Wasser-Wechselwirkungen gekommen ist und keine signifikanten Wasserflüsse stattgefunden haben. Gebildete Bruchstrukturen wurden durch Selbstabdichtungsprozesse wieder geschlossen.

Die Versenkung, Kompaktion und thermische Überprägung des Opalinustons haben bewirkt, dass die Porosität des Gesteins heute im Mittel bei 12% (Benken) bis 16% (Mont Terri) liegt. Der Porenraum der silt- und sandreichen Lagen ist durch spätdiagenetischen Karbonat-Zement weitgehend gefüllt worden. Diese Lagen zeigen wegen der fehlenden Verbundenheit und ihrer Zementation keine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit. Der hohe Tonmineralgehalt des Opalinustons von 40-80% führt zu sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten von typischerweise 10^{-14} bis 10^{-13} m/s. In Oberflächennähe kann die Durchlässigkeit aufgrund von Entlastungs- und Verwitterungseffekten zunehmen, aber in Tiefen von über 10 bis 30 m nehmen die Durchlässigkeiten um mehrere Größenordnungen ab und fallen unter 10^{-10} m/s. Die hydraulischen Durchlässigkeiten in Störungszonen sind von denjenigen ungestörter Be-

reiche nicht zu unterscheiden, was auf das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons zurückgeführt wird.

Bei diesen Durchlässigkeiten und Distanzen ist Diffusion der dominante Transportprozess. Ein weiteres wichtiges Argument für die sehr kleine advective Komponente ist die im Profil der Bohrung Benken sowie im Mont Terri beobachtete, für Diffusionsprozesse typische bogenförmige Verteilung der Konzentration zahlreicher Elemente und Isotope im Porenwasser. Die Form der Konzentrationsprofile schliesst einen namhaften advectiven Fluss senkrecht zur Schichtung aus (NTB 02-03). Für die Ausbildung der bogenförmigen Diffusionsprofile werden hunderttausende bis Millionen von Jahren benötigt. Die Profile illustrieren, dass die Diffusion über den Opalinuston hinaus auch in einem bedeutenden Teil der Rahmengesteine der dominierende Transportprozess ist.

Beurteilung der HSK

Aufgrund der vor allem aus den Arbeiten der Nagra zum Entsorgungsnachweis stammenden Datengrundlage beurteilt die HSK die hydrogeologische Argumentation der Nagra als nachvollziehbar und plausibel (HSK 35/99, Kap. 2.4). Die abgeleiteten Durchlässigkeitsverhältnisse stützen sich neben Messungen aus der Bohrung Benken auch auf Daten weiterer Bohrungen der Nordschweiz und Messungen aus dem Felslabor Mont Terri ab. Diese Messungen ergeben K-Werte zwischen 10^{-14} und 10^{-12} m/s. Die vertikalen Durchlässigkeiten (K_v) des Opalinustons sind aufgrund der ausgeprägten sedimentologisch-diagenetisch angelegten Anisotropie geringer als die horizontalen Durchlässigkeiten (K_h). Nach Labortests (NTB 02-03) ist K_v 2- bis 6-mal geringer als K_h .

Die Bestimmung der Durchlässigkeit des Opalinustons erfolgte einerseits mittels hydraulischer Packertests in der Bohrung Benken, andererseits wurden Durchlässigkeitsmessungen an Bohrkernproben im Labor (Permeametertests) durchgeführt. Aus Sicht der HSK ist die Bestimmung der Durchlässigkeiten gemäss internationalem Stand der Technik durchgeführt worden. Die vorgelegten K-Werte und angegebenen Bandbreiten der Messwerte können deshalb als vernünftig betrachtet werden. Die im Felslabor Mont Terri gemessenen, leicht höheren Durchlässigkeitswerte im Opalinuston sind mit der geringeren Versenkung am Mont Terri kompatibel. Der von der Nagra bestimmte Bereich der K-Werte konnte durch unabhängige Messwerte (Nussbaum und Bossart 2004) bestätigt werden.

Neben den Durchlässigkeitswerten für den Opalinuston hat die Nagra auch eine Anzahl von Durchlässigkeitswerten für die Rahmengesteine und die umgebenden regionalen Aquifere ermittelt, welche die vorgelegte Einteilung in Aquifere und Aquitarde unterstützen und die hydrochemisch festgestellten Porenwasserstockwerke erklären. Während jedoch die Stratigraphie in der östlichen Nordschweiz bezüglich K-Werte durch die Bohrung Benken als aufgeklärt betrachtet werden kann, liegen für die Nordschweiz westlich der Aare nur wenige Daten vor, so dass die Angaben zu den hydraulischen Eigenschaften der Rahmengesteine im Moment zumindest partiell unvollständig bleiben. In der Bohrung Schafisheim wurde im Hauptrogenstein eine Vielzahl von Klüften beobachtet, die die Interpretation als regionaler Aquifer unterstützt.

Die HSK hat in ihrem Gutachten zum Entsorgungsnachweis (HSK 35/99, S. 39) ausgeführt, dass die entsprechend geringen Durchlässigkeiten dazu führen, dass Wasser für den Durchfluss von mehreren Dekametern Opalinuston einige Millionen Jahre benötigt. Advectiver Transport von gelösten Stoffen in Wasser durch den Opalinuston ist damit äusserst langsam.

Die Messungen der Nagra zeigen ausserdem (Bohrungen Schafisheim und Riniken, Felslabor Mont Terri), dass im Opalinuston beobachtete Störungszonen keine grösseren hydraulischen Durchlässigkeiten aufweisen, sondern durch Kriechen/Quellen des Opalinustons wieder abgedichtet wurden und heute hydraulisch keine Bedeutung haben.

Die von der Nagra in der Bohrung Benken bestimmten Isotopenprofile erlauben, für die vorliegenden Porenwasser Verweilzeiten für ausgewählte Isotopentracer im Bereich von hunderttausenden bis Millionen Jahren abzuschätzen. Ergänzend zu diesen Diffusionsprofilen hat die Nagra ausserdem He- und Ar-Isotopenmessungen vorgelegt (NTB 02-03, Kap. 4.7), die aufzeigen, dass das Porenwasser im Opalinuston mit dem umliegenden Gestein über sehr lange Zeiträume in Wechselwirkung stand. Die HSK hat die durch die Nagra hergeleiteten Verweilzeiten überprüft und deren Herleitung nachvollzogen (HSK 35/99, Kap. 2.4.3). Die Verweilzeiten lassen vermuten, dass es sich beim salinen Porenwasser im Opalinuston um Überreste eines marinen Formationswassers handelt, das seit Ablagerung des Opalinustons nie vollständig ausgetauscht wurde und mit den umgebenden Gesteinen nur diffusiv in Verbindung stand.

4.2.5 Geochemische Verhältnisse und Sorption

Angaben der Nagra

Die geochemischen Bedingungen werden weitgehend durch Gleichgewichtsreaktionen mit den Mineralien bestimmt. Ausgehend von ursprünglich marinen Porenwässern während der Sedimentation des Opalinustons, 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, einem pH-Wert von rund 7.2 und einem Redoxpotenzial im reduzierenden Bereich (-167 mV). Die Redoxpufferkapazität ist gross (Pyrit, organische Stoffe). Die Komplexierungskapazität 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, 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 hätten.

Sorptionskoeffizienten für Radionuklide im Opalinuston wurden von der Nagra im Rahmen des Projekts Opalinuston hergeleitet (NTB 02-05, NTB 02-19). Sie stammen in den Fällen von Cs(I), Sr(II), Ni(II), Eu(III), Th(IV), Sn(IV) und I(-I) aus eigenen Messungen an Opalinuston. Auch in der Literatur sind gut dokumentierte Sorptionsmessungen vorhanden, die auf Opalinuston anwendbar sind. Aufgrund chemischer Analogien hat die Nagra bekannte Sorptionskoeffizienten auf Elemente übertragen, die bisher wenig oder überhaupt nicht auf Sorption im Opalinuston untersucht worden sind. Insgesamt kommt die Nagra zum Schluss, dass die Sorptionseigenschaften des Opalinustons wegen seines hohen Tonmineralgehalts und der Porenwasserchemie sehr günstig sind.

Beurteilung der HSK

Die Angaben der Nagra zu den geochemischen Bedingungen im Opalinuston stützen sich auf verschiedene indirekte Beobachtungen. Diese Beobachtungen stammen aus Experimenten mit Opalinustonproben aus der Bohrung Benken, aus Messungen im Felslabor Mont Terri und aus Modellrechnungen über bekannte Wechselwirkungen zwischen den Bestandteilen des Opalinustons und dem Wasser. Die HSK hat in ihrem Gutachten zum Entsorgungsnachweis das Vorgehen der Nagra als gut dokumentiert und nachvollziehbar bewertet. Insgesamt sind die geochemischen Verhältnisse im Opalinuston gut bekannt und wegen des äusserst geringen Wasserflusses auf lange Zeit sehr stabil. Zu erwähnen ist auch, dass die chemische Zusammensetzung des Grundwassers im Opalinuston derjenigen des Bentonit-Porenwassers sehr ähnlich ist. Bezüglich eines allfälligen Tiefenlagers hat dies einen geringen diffusiven Austausch zwischen Nah- und Fernfeld zur Folge und trägt zur Langzeitstabilität des Bentonit-Nahfelds bei.

Die von der Nagra in NTB 02-05 verwendeten Sorptionskoeffizienten im Opalinuston wurden von der HSK beurteilt (HSK 35/99, Kap. 4.7.3). Die Einschätzung der HSK deckt sich weitgehend mit derjenigen der Nagra. Die gemessenen Sorptionswerte sind zum Teil sehr hoch, was auf den hohen Anteil an Schichtsilikaten und auf die günstigen geochemischen Bedingungen zurückzuführen ist. Die Messungen zeigen weiter, dass die Sorptionsmechanismen des Opalinustons mit denen des Bentonits vergleichbar sind. Aus dieser Tatsache folgt, dass das Radionuklid-Rückhaltevermögen des Opalinustons mit dem von Bentonit vergleichbar ist.

4.2.6 Abschätzung der Barrierenwirkung

Angaben der Nagra

Wie bereits unter 4.2.4 erwähnt wird aus dem Vergleich der Diffusionskonstanten des Wirtgesteins mit den geringen hydraulischen Durchlässigkeiten ersichtlich, dass bei den relevanten Transportdistanzen die Diffusion als Transportprozess dominiert. Ein wichtiges Argument für die sehr kleine advektive Komponente ist die im Profil der Bohrung Benken sowie am Mont Terri beobachtete, für Diffusionsprozesse typische bogenförmige Verteilung der Konzentration zahlreicher natürlicher Tracerstoffe und Isotope im Porenwasser.

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 oberhalb wie auch unterhalb über diesen hinaus. 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.

Die Rahmengesteine bewirken als zusätzliche Barriere, 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 kön-

nen. Die Einschlussfähigkeit der Geosphäre wird unter Einbezug dieser Gesteine weiter erhöht und so die Freisetzung von Nukliden in die Biosphäre zusätzlich reduziert.

Beurteilung der HSK

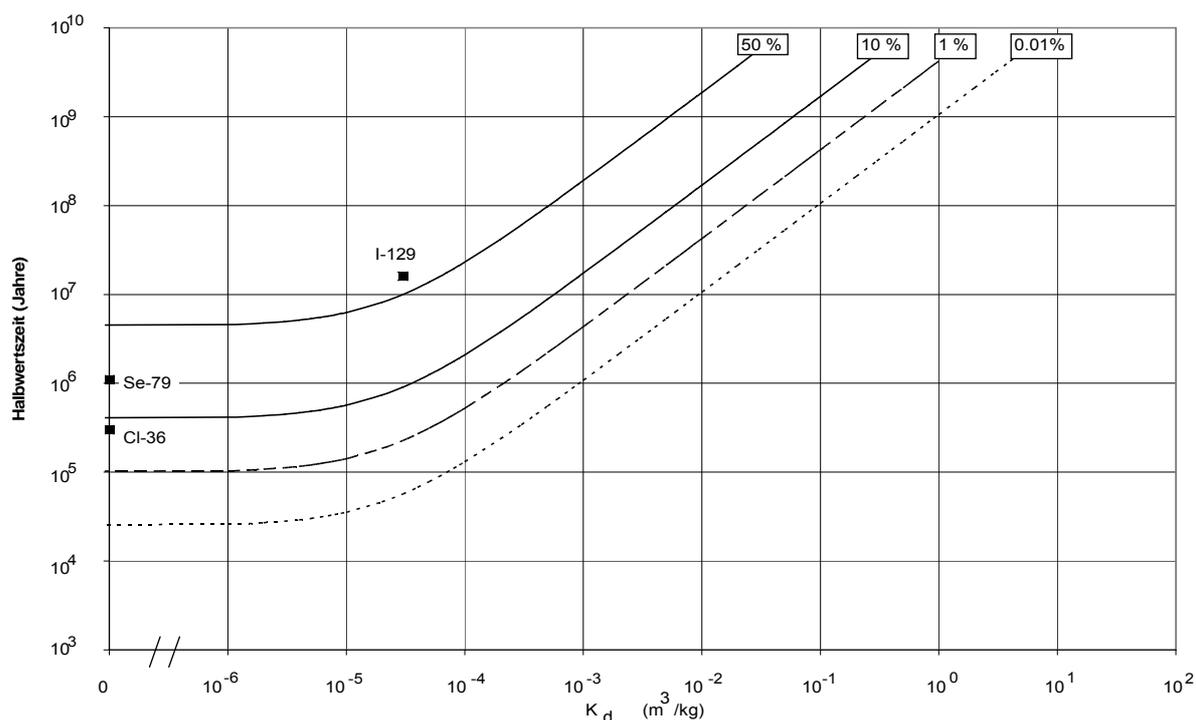
Der Opalinuston stellt eine wirksame Barriere für den Transport der meisten sicherheitsrelevanten Nuklide dar. Die HSK stimmt mit der Nagra darin überein, dass die Diffusion der für die Nuklidmigration im Opalinuston massgebliche Prozess ist. Diese Schlussfolgerung ist im Einklang mit den Resultaten der Isotopen-Messungen an Porenwasserproben des Wirtgesteins und der Rahmengesteine. In geringerer Masse kann auch Advektion zum Transport von Radionukliden beitragen.

Die nuklidspezifische Rückhaltefähigkeit des Opalinustons hängt von der Mächtigkeit des Wirtgesteins, der Porosität, dem Diffusionskoeffizienten, vom Sorptionskoeffizienten K_d sowie der Halbwertszeit eines Radionuklids ab. Die Porosität des Opalinustons ist von seiner Versenkungsgeschichte abhängig. Das Porenwasser ist aufgrund der nach der Sedimentation erfolgten Kompaktion auf viele, äusserst kleine Poren verteilt. Wegen der kleinen Porengrösse und des hohen Tonanteils im Opalinuston ist die hydraulische Durchlässigkeit, aber auch die Gasdurchlässigkeit sehr gering.

Die Nagra diskutierte in ihren Berichten zum Entsorgungsnachweis deshalb die Frage, ob der durch Korrosionsprozesse im Tiefenlager entstehende Gasdruck durch Rissbildung die Rückhalteeigenschaften des Wirtgesteins einschränken könnte. Die HSK kam in ihrer Beurteilung des Entsorgungsnachweises (HSK 35/99, Kap. 4.7.5) zum Schluss, dass irreversible Schäden im Wirtgestein durch die auftretenden Gasdrücke nicht zu erwarten sind. Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager und zum Transport des entstehenden Gases durch den Opalinuston führen, müssten bei einem allfälligen Tiefenlagerprojekt aber eingehender untersucht werden.

Der grösste Teil der Nuklide zerfällt bereits während des Transports im Opalinuston, falls die für die Migration durch die Gesteinsschicht benötigte Zeit ein Vielfaches der Halbwertszeit beträgt. Für die Opalinustonschichten im Zürcher Weinland konnte gezeigt werden, dass nur einige langlebige und schwach sorbierende Nuklide diese Barriere ohne grosse Abschwächung durchqueren können (Figur 4.2-3).

Die Freisetzung der langlebigen, schwach sorbierenden Nuklide in die Biosphäre wird durch das Wirtgestein zwar zeitlich verzögert, aber nicht verhindert. Stärker sorbierende Nuklide wie die langlebigen Actiniden (z.B. ^{235}U) und auch ein schwach sorbierendes, aber weniger langlebiges Nuklid wie organisches ^{14}C benötigen für die Durchquerung des Opalinustons



Figur 4.2.6-1: Wirksamkeit des Opalinustons als Ausbreitungsbarriere. Die Linien zeigen in Abhängigkeit des Sorptionskoeffizienten (K_d) und der Halbwertszeit eines Radionuklids den Anteil des Nuklidflusses, der in einem stationären Zustand die Wirtgesteinsbarriere durchqueren würde. Die Freisetzung von ^{129}I wird hauptsächlich durch die langsame Diffusion stark verzögert. Andere Nuklide wie ^{79}Se und ^{36}Cl zerfallen wegen ihrer kürzeren Halbwertszeit vermehrt im Opalinuston (vgl. Figur 6.7-9 in NTB 02-05).

rund 100-mal länger als ihre jeweilige Halbwertszeit und zerfallen damit innerhalb des Wirtgesteins. Die von der HSK geprüften Resultate des im Rahmen des Projekts Opalinuston betrachteten Referenzfalls der Nagra zeigen, dass

- die Strahlendosen hauptsächlich von wenigen schwach sorbierenden, gut löslichen Nukliden wie ^{129}I , ^{36}Cl und in geringerem Masse auch von ^{79}Se stammen,
- die Actiniden von der Bentonitverfüllung und vom Opalinuston in starkem Masse durch Sorption zurückgehalten werden und
- das berechnete Dosismaximum nach rund 1 Million Jahren erreicht und das behördliche Schutzziel von 0.1 mSv/a um mehr als drei Grössenordnungen unterschritten wird.

4.2.7 Explorierbarkeit

Angaben der Nagra

Unter Verweis auf die von ihr durchgeführten regionalen und lokalen Seismik-Messkampagnen hält die Nagra fest, dass

- der Opalinuston aufgrund der lateralen Konstanz der Schichten und der lithologischen Ausbildung über grosse Distanzen extrapolierbar ist,

- die Ober- und Untergrenze des Opalinustons mit Hilfe der 2D- und 3D-Seismik zuverlässig erfasst werden kann,
- sich Vertikalversätze von wenigen Metern mit hochauflösender 3D-Seismik erkennen lassen,
- die seismische Information dazu benutzt werden kann, qualitative Angaben über potenziell erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten in den umgebenden Gesteinen zu machen, und
- die seismische Auflösung lokal durch Quartärüberlagerungen beeinträchtigt wird.

Die Übertragung der Wirtgesteinseigenschaften von einer Lokation auf eine andere ist generell möglich, weil die Auswirkungen gewisser Abweichungen in der Gesteinsausbildung bekannt bzw. gering sind.

Beurteilung der HSK

Die seismischen Untersuchungen der Nagra im Zürcher Weinland haben gezeigt, dass unter den dort günstigen Randbedingungen eine sehr detaillierte Exploration des Untergrundes (inklusive einer Kalibrierung der Ergebnisse anhand einer Bohrung) möglich ist. Die Untersuchungen im Zürcher Weinland betreffen ein Gebiet, in dem die Geometrie und Struktur der quartären Überdeckung keine grösseren Komplikationen bei der seismischen Auflösung verursacht. In anderen Gebieten dürfte diese Auflösung durch verschlechterte Randbedingungen, z.B. durch glaziale Trogtäler und verstärkte Topographie schwieriger sein. In diesem Sinne ist die Auflösung, wie sie in den seismischen Arbeiten der Nagra im Zürcher Weinland erreicht wurde, als sehr günstig anzusehen und kann in gleichem Masse nicht überall erwartet werden.

Dasselbe Argument gilt für die tektonische Auflösung. Auch hier stellt das Zürcher Weinland einen günstigen Fall dar, der eine sehr feinmaschige Auflösung tektonischer Störungen und damit eine detaillierte Explorierbarkeit zulässt. In Orten mit mächtigeren Quartärablagerungen ist mit einer geringeren Auflösung tektonischer Elemente zu rechnen.

Für die laterale Extrapolation der Gesteinseigenschaften hat die Nagra dank ihren eigenen und anderen Bohrungen eine grosse Menge an Vergleichsdaten zur Hand, die belegen, dass die massgeblichen Parameter zwischen den Vorkommen in der Nordostschweiz und der Nordwestschweiz nur beschränkt variieren. Grössere lithologische Variationen sind aufgrund der in der Nordschweiz beobachteten Homogenität und der flach-marinen Ablagerungsbedingung kaum zu erwarten.

An der Ober- und Unterkante des Opalinustons existieren in den seismischen Signalen gut erkennbare seismische Kontraste, die die Mächtigkeit des Opalinustons und des einschliesswirksamen Gesteinsbereichs auf wenige Meter genau eingrenzen lassen. Die HSK teilt die Ansicht der Nagra, dass der Opalinuston seismisch gut explorierbar ist, auch wenn in einigen Gebieten ausserhalb des Zürcher Weinlandes voraussichtlich mit weniger günstigen Randbedingungen für die seismischen Untersuchungen zu rechnen ist.

4.2.8 Rohstoffkonflikte

Angaben der Nagra

Die Frage möglicher Rohstoffkonflikte (Erdwärme, Kohlenwasserstoffe, Kohle, Mineral- und Thermalwasser) wird im Optionenbericht summarisch für alle Wirtgesteine angesprochen. Spezifisch für den Opalinuston hält die Nagra fest, dass

- aus der Schweiz (im Gegensatz zum süddeutschen Raum) im Opalinuston keine Gasführung bekannt ist,
- dieses Gestein aufgrund der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten bezüglich Gewinnung von Wasser unattraktiv ist,
- eine zukünftige Nutzung von Aquiferen oberhalb wie unterhalb des Opalinustons im Rahmen der Sicherheitsanalysen zum Entsorgungsnachweis untersucht und sich als unkritisch erwiesen hat (NTB 02-05, Kap. 7.6.3) und
- eine Nutzung der weit unterhalb der Opalinustonschichten lagernden Permokarbon-Vorkommen (gewisses Potenzial für Kohle, Kohlenwasserstoffe) auch in absehbarer Zukunft unwirtschaftlich ist.

Die Nagra kommt zum Schluss, dass natürliche Rohstoffe für die betrachteten Wirtgesteine im Verbreitungsraum nur von beschränkter Bedeutung sind und im Rahmen des vorgelegten Optionenberichts zu keinen Einschränkungen führen. Die Frage der Rohstoffkonflikte ist aber bei der zukünftigen Diskussion möglicher Standorte weiter zu beachten.

Beurteilung der HSK

Die HSK stellt fest, dass der Opalinuston selbst keine aussergewöhnlichen Rohstoffe aufweist. Wie von der Nagra ausgeführt, ist die Frage möglicher Rohstoffkonflikte deshalb auf die darüber und darunter liegenden Gesteinschichten begrenzt. Die Nagra hat dieses Thema im Rahmen des Entsorgungsnachweises Projekt Opalinuston (NTB 02-03, Kap. 3.8 und 3.9) spezifisch für das Zürcher Weinland wie auch für die gesamte Nordschweiz behandelt und zu den möglichen Konflikten Stellung genommen. Die Ausführungen der Nagra werden hier der Vollständigkeit halber zur Beurteilung herangezogen.

Die Wärmeflusskarte der Nordschweiz zeigt eine graduelle Zunahme des Wärmeflusses von SSE (Alpenrand, Werte $< 80 \text{ mW/m}^2$) nach NNW bis zum Rhein ($100 - 120 \text{ mW/m}^2$), d.h. die Richtung der Zunahme verläuft etwa senkrecht zum Streichen der Alpenfront bzw. des Molassebeckens. Das Bild wird überlagert durch zwei Anomalien mit erhöhtem Wärmefluss (bis 169 mW/m^2), eine bei Bad Zurzach und eine in der Region Bad Schinznach-Baden, welche sich nur durch den advektiven Wärmetransport aufsteigender Thermalwässer entlang tektonischer Störungen (Nord- und Südrand des Permokarbondrogens) erklären lässt (Schärli und Rybach 2002). Das Verbreitungsgebiet des Opalinustons in geeigneter Tiefenlage reicht in das Thermalwassergebiet Bad Schinznach-Baden hinein. Bei der Diskussion möglicher Standorte müsste dieser Aspekt berücksichtigt werden.

In den über dem Opalinuston vorhandenen Schichten gibt es heute nur wenige genutzte Mineralwasservorkommen (Aqui in der Oberen Meeresmolasse, Eglisau in der Unteren Süsswassermolasse und Malm). Eine gewisse Bedeutung könnten langfristig die Tiefengrundwässer im Muschelkalk und Buntsandstein bekommen, die aber zum heutigen Zeitpunkt nicht genutzt werden.

Kohle- und Erdgasvorkommen, die ein gewisses Nutzungspotenzial haben könnten, beschränken sich auf den Nordschweizer Permokarbondrog, in welchem mehrere metermächtige Kohleflöze erbohrt und geringe Methankonzentrationen beobachtet wurden. Wegen der zu grossen Tiefenlage der Kohlevorkommen ist eine bergmännische Ausbeutung unwirtschaftlich und damit wenig wahrscheinlich.

Abbauwürdige Trias-Salzvorkommen sind in der Nordschweiz nur zwischen Augst und Bad Zurzach (und auf der deutschen Seite im Klettgau) bekannt. Beim Vorkommen in der Bohrung Benken handelt es sich um ein Salz-Anhydrit-Tongemisch lokalen Ausmasses.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass im Verbreitungsgebiet mit Opalinuston in bevorzugter Tiefe vor allem diejenigen Gebiete über dem Nordschweizer Permokarbondrog (Potenzial für Kohle/Gas) und deren Randpartien (erhöhter Wärmefluss) gewisse Rohstoffkonflikte auslösen könnten. Bei der Diskussion möglicher Standorte sind diese Aspekte zu beachten.

4.2.9 Bautechnische Machbarkeit

Angaben der Nagra

Erfahrungen über mehr als 100 Jahre mit Untertagebauten im Opalinuston zeigen, dass die Tunnel im Opalinuston im Faltenjura meist ohne grössere Schwierigkeiten gebaut werden konnten, auch bei Überlagerungen von bis zu 800 m und trotz zahlreicher Störungen im Gebirge. In Tunnelabschnitten mit erhöhter Frequenz von Scherzonen erfolgten zum Teil grössere Niederbrüche. Bei einer Übertragung dieser Erfahrungen auf Tunnelbauwerke in anderen Gebieten müssen die unterschiedliche Ausrichtung der Stollenachsen zur Gesteinsanisotropie, der Wassergehalt und insbesondere die lokale Gebirgsspannung berücksichtigt werden.

Numerische Modellierungen der Nagra zeigen, dass für die verschiedenen Hohlräume eines Tiefenlagers im Opalinuston des Zürcher Weinlandes in einer Tiefe von 600-700 m Standsicherheit gegeben ist. Die Stollen und Tunnel werden leicht konvergieren und müssen zumindest in den Firsten mit Ankern und Netzen gegen Niederbrüche gesichert werden. Bei Untertagebauwerken im Opalinuston mit grösseren Ausbruchquerschnitten sind Betonauskleidungen vorgesehen. In Bereichen mit erhöhter Scherzonenfrequenz sind voraussichtlich zusätzliche Massnahmen erforderlich. Um die Ausdehnung der Auflockerungszone zu minimieren, wird die Achse der Lagerstollen idealerweise parallel zur maximalen Hauptspannung ausgerichtet. Die Einlagerungsstollen für HAA werden mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren und bleiben nur maximal zwei Jahre unverfüllt.

Beurteilung der HSK

Die in der Schweiz vorhandenen Erfahrungen zum Tunnelbau im Opalinuston zeigen, dass die in diesem Gestein auftretenden bautechnischen Verhältnisse technisch beherrscht werden können. Die Gesamtlänge des Stollensystems eines geologischen Tiefenlagers, übernommen aus dem kürzlich von der Nagra eingereichten Entsorgungsnachweis (siehe NTB 02-02), übersteigt zwar deutlich die Länge der bis heute im Opalinuston erstellten Bauwerke. Es ist aber davon auszugehen, dass an einem Lagerstandort bezüglich Tektonik, Anisotropie mechanisch-hydraulischer Gesteinsparameter und Gebirgsspannung günstigere Verhältnisse als bei vielen Tunnelbauten im Faltenjura vorliegen werden.

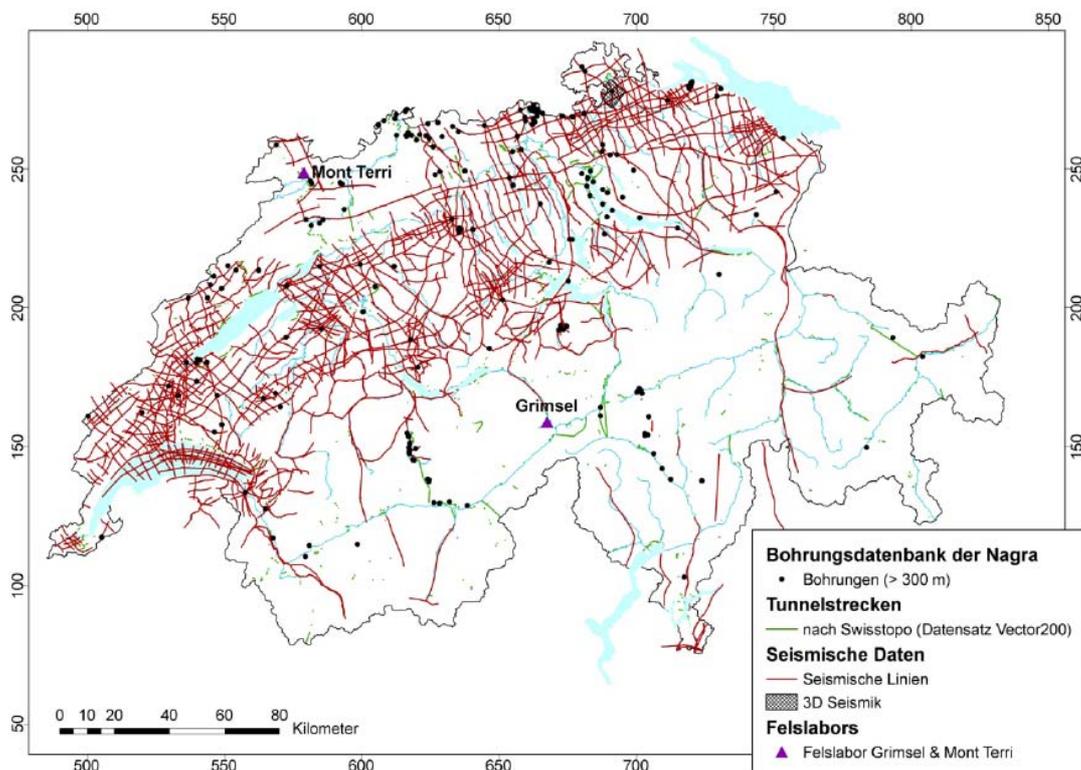
Die HSK ist in ihrem Gutachten zum Entsorgungsnachweis im Detail auf die bautechnische Machbarkeit im Opalinuston eingegangen (HSK 35/99, Kap. 3.2) und kommt zum Schluss, dass der bautechnische Nachweis für ein Lager für abgebrannte Brennelemente, hochaktive und langlebige mittelaktive Abfälle erbracht ist. Der Nagra wurden einige Kritikpunkte und Bemerkungen betreffend Dimensionierung und Auslegung des Lagers mitgeteilt, welche aber die grundsätzliche Machbarkeit des Lagers nicht in Frage stellen.

4.3 Untere Süsswassermolasse

4.3.1 Datengrundlagen

Angaben der Nagra

Die Eigenschaften der Unteren Süsswassermolasse (USM) im Gebiet des Schweizer Mittel-landes wurden in der Vergangenheit vor allem im Rahmen der Erdölexploration und der Abklärung von unterirdischen Gasspeichermöglichkeiten untersucht. Dazu wurden zahlreiche Tiefbohrungen abgeteuft und umfangreiche geophysikalische Messungen durchgeführt (Figur 4.3-1). Der grösste Teil der Untersuchungen bezog sich dabei auf sandsteinreiche Gesteinsabfolgen. Da lückenlose geophysikalische Logs aus den Bohrungen vorliegen, geben diese Datensätze auch wesentliche Informationen über die durchteuften tonigen und mergeligen Abfolgen der USM. Daneben liegen zahlreiche wissenschaftliche Studien verschiedener Hochschulen vor, die sich mit der Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Molassebeckens im Allgemeinen und den Ablagerungsbedingungen und sedimentpetrographischen Fragestellungen im Detail befasst haben.



Figur 4.3-1: Karte der Tiefbohrungen und seismischen Messlinien in der Schweiz (aus NTB 05-02).

Für die Abklärung der Eignung der USM als mögliches Wirtgestein für ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle hat die Nagra diese Datensätze vertieft ausgewertet. Zudem wurden projektspezifische Zusatzuntersuchungen in Fremdbohrungen (Bassersdorf, Burgdorf, Langenthal) und in Untertagebauten (SBB-Bahntunnel Grauholz) durchgeführt sowie verschiedene Studien zur Sedimentologie und Hydrogeologie der USM in Zusammenarbeit mit der Universität Bern und geologischen Büros erstellt.

Wichtige Erkenntnisse betreffend die bautechnischen Eigenschaften der USM wurden im Rahmen von Untertagebauten (Strassen- und Bahntunneln) gewonnen und von der Nagra in die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit einbezogen.

Beurteilung der HSK

Aufgrund des geologischen Aufbaus und der im tieferen Untergrund liegenden potenziellen Mutter- und Speichergesteine für Kohlenwasserstoffe hat das Molassebecken schon früh das Interesse der Erdölindustrie geweckt. In den vergangenen Jahrzehnten wurden deshalb verschiedene Untersuchungskampagnen zur Exploration von Kohlenwasserstoffen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in zahlreichen Berichten festgehalten. In der Sedimentstudie NTB 88-25 hat die Nagra den damaligen Kenntnisstand zusammengefasst und im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle bewertet. Die HSK kam in ihrer Stellungnahme zur Sedimentstudie zum Schluss, dass die Einengung auf die beiden Wirtgesteinsoptionen Opalinuston und Untere Süsswassermolasse zwar mitgetragen, eine Festlegung von Standortregionen aber als verfrüht erachtet werde (HSK 23/34). Sie forderte deshalb zusätzliche Abklärungen, insbesondere zur Verbreitung und Beschaffenheit der USM im westlichen Teil des Molassebeckens.

Die Nagra führte daraufhin bis 1994 ein Studienprogramm zur USM durch. Es umfasste Seismik-Auswertungen, teilweise mit aufwendigen Neuprozessierungen der Rohdaten, ergänzenden Studien zur Sedimentologie und Hydrogeologie der USM und Untersuchungen in Bohrungen und Tunnelbauwerken. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in zahlreichen Technischen Berichten der Nagra festgehalten. Für eine detaillierte Analyse dieser Arbeiten wird auf den HSK-Expertenbericht Bitterli (2007) verwiesen. Aufgrund dieser Unterlagen kommt die HSK zum Schluss, dass für die Wirtgesteinsoption USM eine genügende Datenbasis vorliegt, um eine Beurteilung vornehmen zu können.

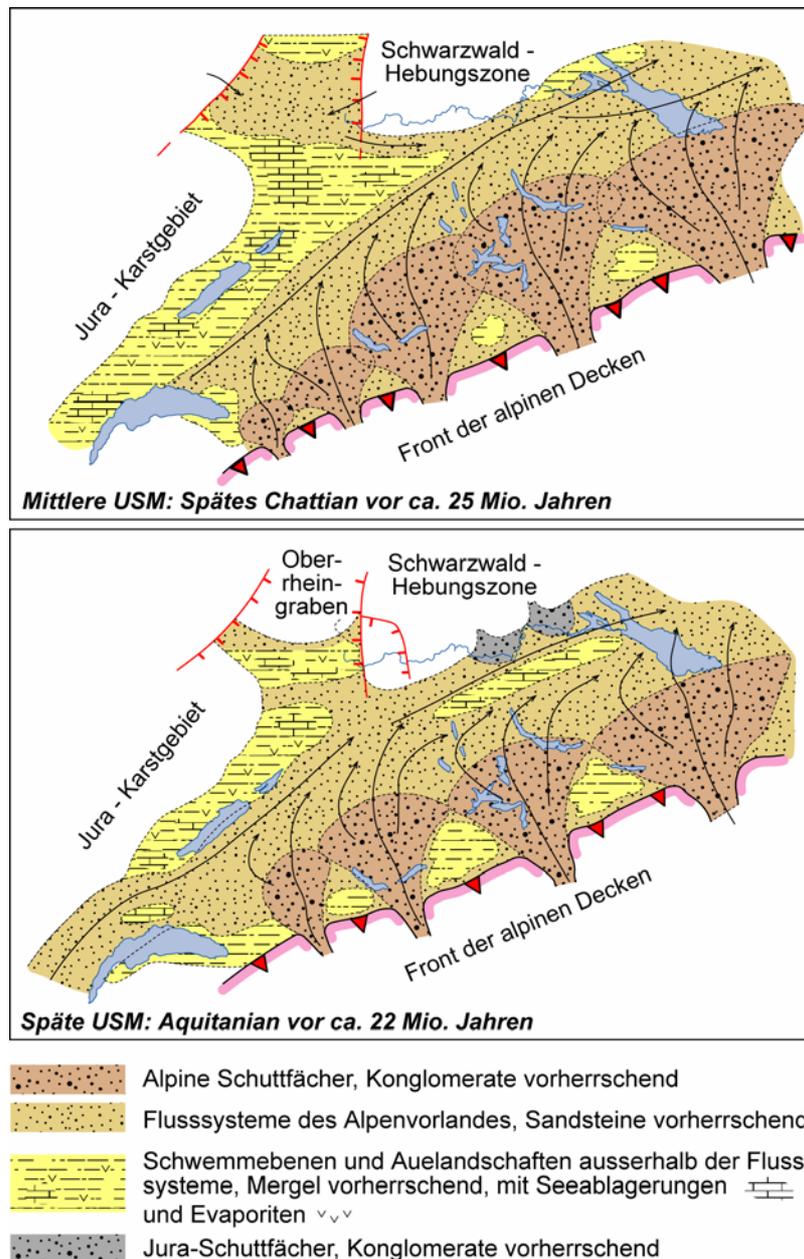
4.3.2 Gesteinscharakterisierung und regionale Verbreitung

Angaben der Nagra

Der Optionenbericht NTB 05-02 gibt einen generellen Überblick über die Entstehungsgeschichte und Beschaffenheit der USM und ihre regionale Verbreitung. Detaillierte Angaben finden sich in zahlreichen Hintergrundberichten (u.a. NTB 88-25, NTB 90-41, NTB 91-19, NTB 94-10, Keller 1992, Meier 1994a und 1994b, Küpfer 2005). Zum Verständnis der lithologischen Verhältnisse der USM ist es nötig, die Ablagerungsbedingungen und Fazies der USM näher zu kennen, die geometrischen Verhältnisse aufzuzeigen und die sedimentpetrographischen und diagenetischen Aspekte darzulegen. Der Optionenbericht geht auf diese Aspekte ein. Nachfolgend werden sie kurz zusammengefasst.

Ablagerungsbedingungen, Fazies und Architekturelemente der USM

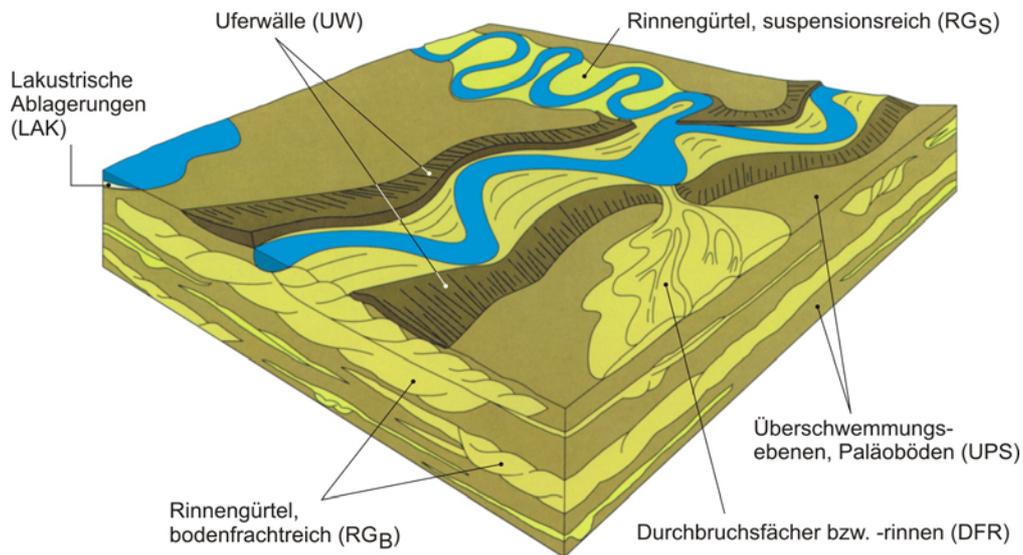
Das Molassebecken entstand im Rahmen der alpinen Gebirgsbildung als Vorlandbecken nördlich der Alpen, in welches die Erosionsprodukte der sich heraushebenden Alpen geschüttet wurden (Berger 1996). Entsprechend dieser paläogeographischen Situation finden sich nahe dem Gebirge (proximaler Bereich) sehr grobkörnige Ablagerungen (Schuttfächer der alpinen Gebirgsflüsse, Konglomerate vorherrschend). Im alpenferneren, sogenannten distalen Bereich, gelangten zunehmend feinkörnigere Sedimente über ein System von Flüssen und Seen in einer breiten Schwemmebene (Alluvialebene) zur Ablagerung, wo Sand-, Silt- und Mergelsteine dominieren (Figur 4.3-2).



Figur 4.3-2: Paläogeographische Verhältnisse zur Zeit der Ablagerung der USM (aus NTB 05-02).

Das Zielgebiet für die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle liegt im Bereich der distalen Überschwemmungsebenen, da hier mit einem höheren Anteil an feinkörnigen Sedimenten (Tongehalt) gerechnet werden kann. Da die Absenkung des Beckens im Verlauf der jüngeren Erdgeschichte gegen die Alpen hin stärker war, nimmt die Mächtigkeit der Molasse Sedimente gegen Süden zu.

Die Untersuchungen der USM (u.a. NTB 90-41, Keller 1992) zeigen, dass die auf den ersten Blick grosse Vielfalt an Gesteinen in einige wenige Typen von Ablagerungen (Lithofaziestypen) zusammengefasst werden kann. Die Lithofaziestypen bilden im Gesteinsverband gut unterscheidbare Abfolgen, die sich anhand ihrer Genese, ihrer Geometrie und Ausdehnung zu sogenannten Architekturelementen zusammenfassen lassen (siehe Figur 4.3-3).



Figur 4.3-3: Faziesmodell und Architekturelemente der distalen USM (aus NTB 05-02).

Für den distalen Bereich der USM unterschied Keller (1989, 1992) die folgenden fünf Architekturelemente:

- | | | | |
|----|-----|---|---|
| 1) | RG | Rinnengürtel | Mittel- und Grobsandsteine |
| 2) | DFR | Durchbruchsfächer und -rinnen | Mittel- und Feinsandsteine |
| 3) | UW | Uferwälle und Überschwemmungssande | Sandsteine und Grobsiltsteine |
| 4) | UPS | Überschwemmungsebenen | Schlamm- und Mergelsteine |
| 5) | LAK | Seeablagerungen (lakustrische Ablagerungen) | Mergelsteine, Süsswasserkalke, lokal Gips |

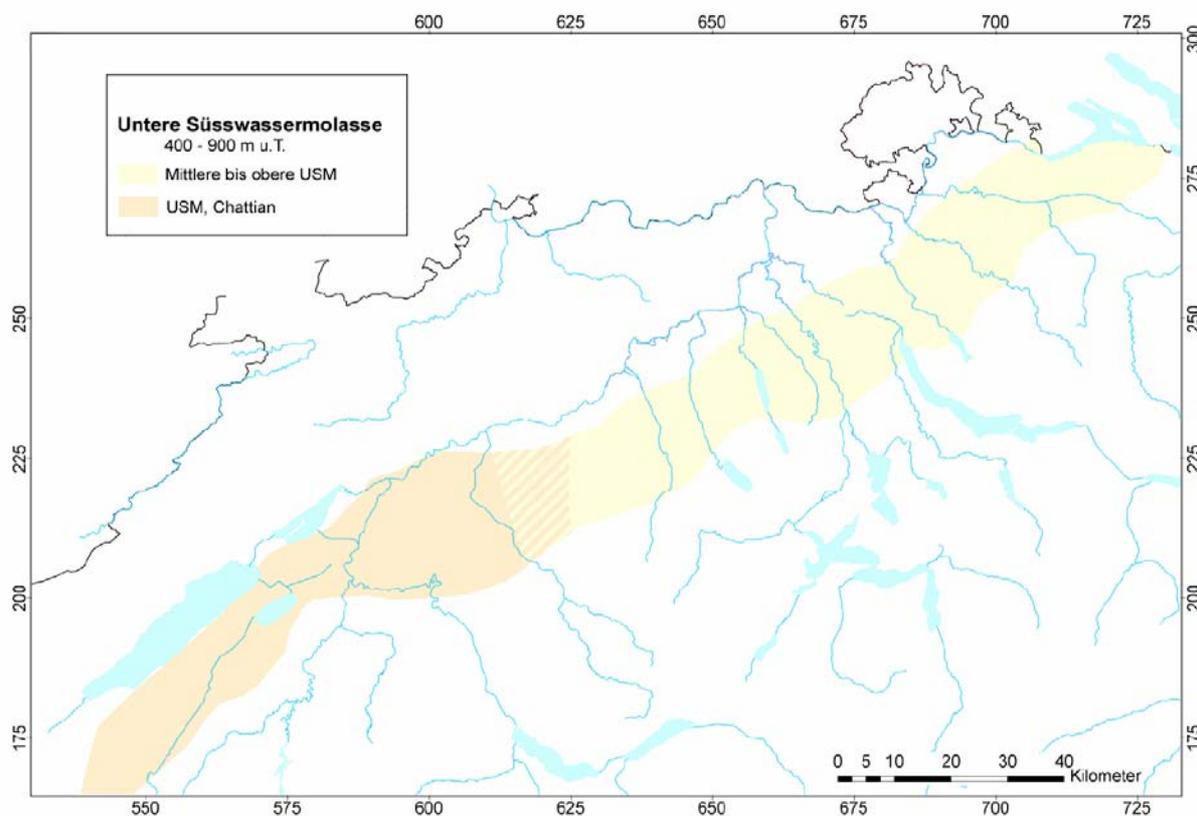
Diagenese der USM

Während der Versenkung und der damit verbundenen Kompaktion der USM hat in der Molasse eine grossräumige Durchmischung der Porenwässer stattgefunden, die zur Zemen-

tation von Teilen des Porenraumes der Sandsteine durch Kalzit und porenwandbedeckende Tonmineralien geführt hat. Der Grad der Zementation variiert dabei von nahezu unzementiert bis vollständig zementiert. Die Maximaltemperatur, welche die Gesteine der distalen USM während der tiefsten Versenkung im späten Tertiär erfahren haben, liegt im nördlichen Teil des Molassebeckens für einen Tiefenbereich von rund 500 m bei 45 bis 55°C. Die Nagra schätzt die Empfindlichkeit der USM gegenüber lagerinduzierten Temperatureinflüssen als nicht kritisch ein.

Räumliche Verbreitung der distalen USM

Als Transportbarriere für ein geologisches Tiefenlager für hochaktive Abfälle kommen ausschliesslich geringdurchlässige feinkörnige Abfolgen in Frage, wie sie vor allem im alpenfernen (distalen) Bereich der Vorlandbecken vorkommen (Meier 1994a, 1994b, Schlunegger et al. 1997). Die Auswertung seismischer und bohrlochgeophysikalischer Daten zeigt, dass der untere Teil der USM (Chattian) im Westen tendenziell mehr Tonanteile als im Osten enthält. Eine umgekehrte, aber weniger deutlich ausgeprägte Tendenz ist im oberen Abschnitt der USM (Aquitanian) im Osten feststellbar (Figur 4.3-4). Die tonreichen Abfolgen enthalten in beiden Gebieten Einschaltungen von Rinnensandsteinen. Wegen der über grössere Gebiete korrelierbaren tonreichen Abfolgen im Chattian wäre der westliche Bereich des Molassebeckens gegenüber dem Osten für die Tiefenlagerung zu bevorzugen. Aufgrund der inhärenten Heterogenität der USM und der Problematik der Rinnensandsteine als potenzielle Freisetzungspfade erachtet die Nagra eine weitere Einengung als nicht angebracht.



Figur 4.3-4: Verbreitung der distalen USM im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum in geeigneter Tiefenlage von 400 – 900 m u. T. (nach NTB 05-02).

Beurteilung der HSK

Die Charakterisierung der Sedimentationsverhältnisse der USM wurde von der Nagra sorgfältig vorgenommen und in verschiedenen technischen Berichten dokumentiert. Nachfolgend werden einige generelle Bemerkungen zur Ablagerungsgeschichte der Molasse gemacht, die lithologischen, diagenetischen und sedimentpetrographischen Aspekte der USM diskutiert und schliesslich die räumliche Verbreitung potentiell geeigneter USM-Gebiete beurteilt.

Generelle Bemerkungen

Das Molassebecken entwickelte sich vom Oligozän bis ins mittlere Miozän, d.h. vor 34 bis 10 Ma (Ma = Millionen Jahren) als klassisches Vorlandbecken, wobei die Kruste des Vorlandes durch das Herannahen des alpinen Deckenstapels und dessen Erosionsprodukte belastet wurde und absank. Dabei verlagerte sich die Beckenachse kontinuierlich nordwärts, in der Westschweiz mit etwa 7-9 km/Ma während des Oligozäns, danach während des Miozäns auf 2 km/Ma abnehmend (Homewood et al. 1986). In der Ostschweiz hingegen verlagerte sich die Beckenachse zu Beginn des Oligozäns mit etwa 3 km/Ma und im Miozän mit <2 km/Ma nach Norden. Während der Sedimentation aktive N-S-streichende Lateralverschiebungen queren das Becken und sind mit Mächtigkeitsanomalien der oligozänen Sedimente assoziiert (Diem 1986). Während der Absenkung des Beckens bildeten sich auch parallel zur Beckenachse streichende Abschiebungen mit Sprunghöhen von über 200 m (z.B. Ziegler 1990). Im Zusammenhang mit den jüngsten alpinen Deckenbewegungen und der Jurafaltung wurde das Molassebecken zusammengeschieben (aufgeschobene subalpine Molasse), herausgehoben und teils erodiert. Die Erosion wird im Raum Genf auf 2 km, im Raum Zürich auf 0.3 km geschätzt (Schegg und Leu 1998). Aufgrund dieser tektonischen Entwicklungsgeschichte ist nach Ansicht der HSK in der USM auch mit Sprödstrukturen (Störungen, Klüfte) zu rechnen.

Bemerkungen zur Lithologie

Die Ablagerungen der USM sind faziell im Wesentlichen zwei Ablagerungsbereichen zuzuordnen, einem proximalen, alpennahen Bereich mit alluvialen Schuttfächern und einem distalen, alpenfernen Bereich mit ausgedehnten Fluss- und Überschwemmungsebenen, in denen die Entwässerung vorherrschend nach Osten gerichtet war. Zeitweise bestand eine Verbindung zum Oberrheingraben, und im Raum Genf wird ein von Südwesten hinein reichender Meeresarm vermutet (Trümpy 1980; Berger et al. 2005). Das Auftreten brackischer Organismen im Bereich der distalen USM weist auf ein nur wenig über dem damaligen Meeresspiegel liegendes Ablagerungsgebiet (Berger 1985, 1992). Die distalen Sedimente der USM wurden von Keller (1992) sedimentologisch umfassend untersucht und nach dem Prinzip der Architekturelemente (Miall 1985) in die bereits erwähnten fünf Elemente (RG, DFR, UW, UPS und LAK) gegliedert, deren Geometrie quantifiziert und petrographisch analysiert. Diese Unterteilung wird seither in der USM angewandt und hat sich bewährt. Das Vorgehen entspricht nach Ansicht der HSK dem heutigen Stand der Wissenschaft und wird der Fragestellung gerecht.

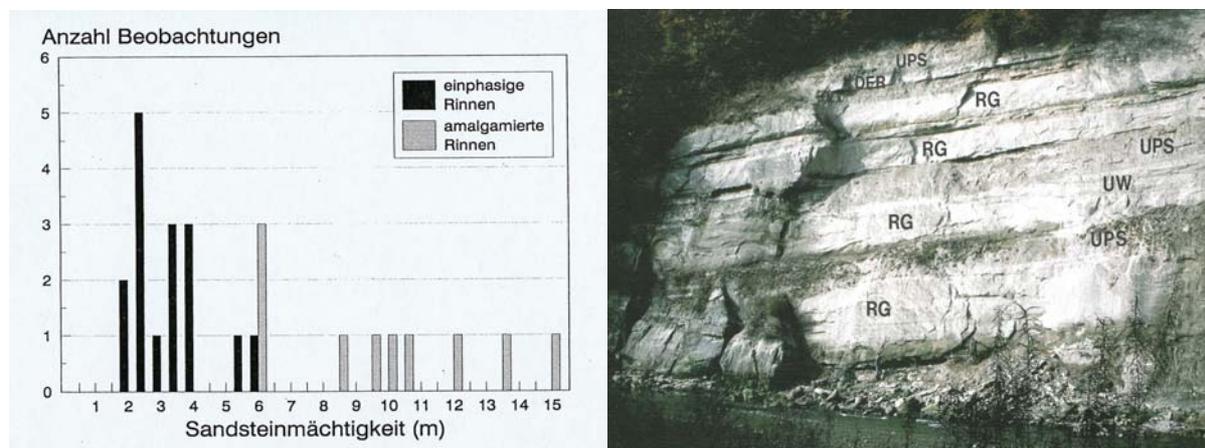
Bemerkungen zur Sedimentpetrographie

Aufgrund der mineralogischen Analysen bestehen die Gesteine der USM hauptsächlich aus Quarz, Feldspäten, Karbonat, Tonmineralien und Glimmer (NTB 90-41, Keller 1992). Die verschiedenen Architektur- und Fazieselemente unterscheiden sich dabei deutlich in ihrer mittleren mineralogischen Zusammensetzung, wobei vor allem die Abnahme des Tongehaltes in den Sandsteinen der Rinnengürtel und Durchbruchssystemen auffällt (Tabelle 4.3-1). Der Hauptteil des Tonanteils besteht aus Illit und Chlorit.

Architektur-Element	Anzahl Messungen	Quarz (%)	Feldspäte (%)	Karbonate (%)	Tonminerale + Glimmer (%)
RG Rinnengürtel	29	35	29	14	22
UW Uferwälle	10	22	17	27	34
DFR Durchbruchsysteme	17	32	28	17	22
UPS Überschwemmungsebenen	9	18	17	20	45

Tabelle 4.3-1: Mittlere mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen Architekturelemente der distalen USM (NTB 90-41). Für das Architekturelement LAK liegen keine Daten vor.

Wegen ihrer möglichen Funktion als präferentielle Wasserfließpfade sind die Sandsteine der Rinnengürtel und Durchbruchsysteme von besonderem Interesse. Die Rinnengürtel variieren zwischen 150 und 1500 m in der Breite, zwischen 2 und 15 m in der Mächtigkeit (einphasige Rinnen zwischen 2 und 6 m, mehrphasige sogenannte amalgamierte Rinnen zwischen 6 und 15 m, Figur 4.3-5) und haben Längen von mehreren km. Der vertikale Abstand zwischen zwei Intervallen in Rinnengürtel-Fazies variiert zwischen 2 und über 20 m.



Figur 4.3-5: Links: Histogramm der Mächtigkeit einphasiger und übereinander liegender (amalgamierter) Rinnensandsteine in der distalen USM (aus NTB 90-41).

Rechts: Übereinander gestapelte Rinnengürtel (RG) mit Zwischenlagen von Uferwall-Sedimenten (UW), Sandsteinen von Durchbruchfächern (DFR) und Mergeln der Überschwemmungsebene (UPS). Aufschluss entlang der Emme bei Gerlafingen, Kanton Solothurn (aus NTB 90-41).

Die Geometrie und das Auftreten der Rinnengürtel-Sandsteinkörper ändert sich von proximal nach distal, da nach Norden hin die Subsidenz abnimmt und daher die Stapelung der Rinnen enger wird. Die Anlage von Rinnengürteln und ihre geometrische Verteilung in Vorlandbecken hängen einerseits vom angelieferten Sediment, andererseits von der Subsidenz ab (Bridge 2003). Quantitative Untersuchungen dieses Aspektes liegen nicht vor. Die Nagra schätzt allerdings grob die Häufigkeit der Rinnengürtelabfolgen für das zentrale Molasse-Becken ab (NTB

90-41). In grösseren Aufschlüssen mit etwa 20 bis 30 m Wandhöhe (z.B. Ziegelei-Gruben) sind die Rinnengürtel so häufig, dass mindestens ein Rinnengürtel pro Aufschluss zu beobachten ist. Die vertikale Verbindung der Rinnengürtel-Sandsteine wurde grob evaluiert: 2 bis 3 Stockwerke sind miteinander verbunden.

Bemerkungen zur Diagenese

Die diagenetische Überprägung der Gesteine der distalen USM wird im Optionenbericht kurz beleuchtet, und es wird auf die Kompaktionsgeschichte und die damit verbundene Zementation des Porenraumes hingewiesen. Nach Keller (1992) lassen sich den Architekturelementen typische Porositäts-Wertebereiche zuordnen. Die Gesamtporosität ist dabei in den grobkörnigen Sandsteinen der Rinnengürtel (RG) am grössten (Medianwert 20 %) und bei den Durchbruchflächen und -rinnen (DFR) bereits deutlich niedriger (Medianwert 14.5%). Kleinere Gesamtporositäten sind in den Feinsedimenten der Uferwälle (UW) und den tonigeren Sedimenten der Überschwemmungsebenen (UPS) zu beobachten (Medianwert 7.5%). Seeablagerungen (LAK) sind selten, es liegen dazu keine Daten vor.

In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben zur Versenkungs- und Temperaturgeschichte der Molassegesteine und den damit verbundenen diagenetischen Umwandlungen (u.a. Monnier 1982, Schegg 1992, Schegg und Leu 1998, Cederbom et al. 2004, Mazurek et al. 2006). Für die Beurteilung möglicher lagerinduzierter Temperatureffekte sind Kenntnisse über die thermische Vorbelastung und die Diagenese der USM wichtig. Schegg und Leu (1998) und Mazurek et al. (2006) untersuchten die Versenkungs- und Hebungsgeschichte des Molassebeckens, wie sie sich in den Apatit-Spaltspuraltern und im Reifegrad des organischen Materials dokumentieren. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich die geothermischen Gradienten im Verlaufe der Erdgeschichte verändert haben. In der Kreidezeit sind erhöhte Werte von 35 bis 50°C/km zu beobachten, während im späten Miozän, also nach der tiefsten Versenkung der Molassegesteine, deutlich tiefere Werte von $\leq 20^\circ\text{C}/\text{km}$ abgeleitet werden.

Wird für ein geologisches Tiefenlager in der distalen USM eine Lagertiefe von 500 m angenommen und schätzt man die maximale post-obermiozäne Erosion ab, die sich aus der Arbeit von Schegg und Leu (1998) auf 400 m (Ost-Schweiz, Bohrung Lindau) bzw. 1700 m (West-Schweiz, Bohrung Courtion) eingrenzen lässt, dann dürfte die maximale Paläotemperatur in der USM etwa bei 30°C bis 54°C gelegen haben. Für ein geologisches Tiefenlager können nach Ansicht der HSK daraus folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die thermische Vorbelastung der USM ist relativ gering und dürfte in der vorgesehenen Lagertiefe 55°C nicht überschritten haben. Bei dieser geringen thermischen Vorbelastung wäre bei einer Lagerauslegung von HAA/BE und einer Wärmeleistung der Abfälle, wie sie im Projekt Opalinuston (NTB 01-04) dargelegt wurden, mit einer deutlichen Erwärmung der USM und thermisch induzierten Veränderungen im Gestein zu rechnen, was Auswirkungen auf die Barriereigenschaften der USM haben kann.
- Die tonreichen Sedimente der USM enthalten organischen Kohlenstoff (bis 1.2 Gew.%, NTB 88-25). Es ist unklar, wie diese Substanzen auf die Temperaturerhöhung reagieren und ob allenfalls CO_2 , HCO_3^- oder andere kohlenstoffhaltige Verbindungen abgespalten werden. Erhöhte CO_2 -Gehalte im Porenwasser können die Löslichkeiten gewisser Minerale erhöhen und zur Bildung einer sekundären Porosität führen (Füchtbauer 1988).

Bemerkungen zur räumlichen Verbreitung der USM

Die von der Nagra zusammengestellten Daten zeigen, dass im östlichen Molassebecken in der USM mächtigere tonreiche Abfolgen eher selten sind. Nach den Bohrdaten und den seismofaziellen Auswertungen ist die am ehesten in Frage kommende oberaquitane Mergelzone mit zahlreichen Sandsteineinschaltungen heterogen aufgebaut (Meier 1994a). In der Bohrung Weiach erwies sich die USM als besonders sandreich, der Anteil des Architekturelementes RG beträgt hier 50 %. Die lokalen Unterschiede reflektieren die unterschiedliche Distanz des Ablagerungsraumes zum Hauptentwässerungssystem, wo vorwiegend Sandsteine der Rinnengürtel (RG) und der Durchbruchssysteme (DFR) zur Ablagerung kamen.

In der Westschweiz blieb der Ablagerungsraum über die ganze Zeit der Sedimentation der USM ein Gebiet mit geringem Relief und reduzierten Abflussraten (Strunck und Matter 2002). Tonig-mergelige Serien sind hier deshalb etwas mächtiger ausgebildet. Die Untersuchungen zeigen aber, dass auch hier mit unregelmässig verteilten und bis zu einigen Metern mächtigen Sandsteineinschaltungen zu rechnen ist. Gegenüber der Ostschweiz sind die tektonischen Verhältnisse im westlichen Molassebecken komplexer. Dies hängt mit der tektonischen Lage des Westschweizer Molassebeckens, der jungen Auffaltung des Faltenjuras und des Einflusses der Tektonik des Oberrheingrabens (Fribourg-Zone) zusammen, die zu einer stärkeren Verformung der USM führte.

Betrachtet man die in NTB 90-41 und Hölker und Graf (2004) ermittelte Auftretenshäufigkeit der verschiedenen Architekturelemente in den Molassegebieten West und Ost (Tabelle 4.3-2), so zeichnet sich für das Gebiet West ein deutlich höherer Anteil an tonigen Sedimenten der UPS ab. In beiden Gebieten ist mit Rinnensandsteinen sowie Durchbruchsfächern und -rinnen zu rechnen, deren räumliche Verteilung schwierig zu erkunden ist. Im östlichen Molassebecken ist der Anteil an Sandsandsteinen (RG und DFR) grösser, was dieses Gebiet nach Ansicht der HSK für die geologische Tiefenlagerung weniger geeignet macht. Aufgrund der tektonischen Lage ist im Vergleich zum östlichen Molassebecken im Gebiet West mit einer stärkeren Deformation und einer höheren Bruch- und Verwerfungsichte zu rechnen.

Architektur-Element	West (Hölker und Graf 2004)	Ost I (Hölker und Graf 2004)	Ost II (NTB 90-41)
RG Rinnengürtel	24.5	36.0	22.7
UW Uferwälle	5.5	11.0	14.4
DFR Durchbruchssysteme	16.0	23.0	27.8
UPS Überschwemmungsebenen	54.0	30.0	35.1

Tabelle 4.3-2: Anteil (in %) der in Bohrungen beobachteten Architekturelemente der USM der Gebiete West (Fendingen, Courtion, Chapelle, Tschugg), Ost I (Bohrungen Bassersdorf, Lindau, Herdern) und Ost II (Bohrungen Weiach, Schafisheim, Langenthal RB 101, RB 102 und RB 103). LAK wurden nicht beobachtet.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass die USM wegen ihrer lithologischen Heterogenität eine schwierig zu charakterisierende Wirtgesteinsoption ist. Der Vorgang der Se-

dimentbildung in einer Überschwemmungsebene mit mäandrierenden Flusssystemen ist komplex. Wohl ist das Grundverständnis der Bildungsbedingungen der Rinnensandsteine, Durchbruchsrinnen und Durchbruchsfächer heute vorhanden, ihre genaue Anordnung und Ausdehnung kann aber daraus im Detail nicht ermittelt werden.

4.3.3 Durchlässigkeiten und Fliesswege

Angaben der Nagra

Als natürliche Transportbarriere für ein geologisches Tiefenlager kommen in der USM ausschliesslich geringdurchlässige feinkörnige Abfolgen mit genügender Mächtigkeit und lateraler Ausdehnung in Frage, wie sie vor allem im alpenfernen (distalen) Bereich der Vorlandebenen vorkommen. Geringdurchlässige siltig-tonige Gesteinsabfolgen sind zwar weit verbreitet, doch können sie lokal von höherdurchlässigen, unregelmässig verlaufenden und zum Teil vertikal verbundenen Sandsteinrinnen (Relikte mäandrierender Flusssysteme) durchzogen sein.

Die hydraulischen Eigenschaften der USM sind in Keller (1992) und Kúpfer (2005) zusammengefasst. Von der USM liegt ein qualitativ und quantitativ eher heterogener hydrogeologischer Datensatz vor, der für verschiedene Zielsetzungen erhoben wurde. Die Datensätze der Erdölindustrie widerspiegeln aufgrund ihrer spezifischen Zielsetzungen vor allem die Eigenschaften der sandsteinreichen Zonen. Hinsichtlich der Verteilung und Mächtigkeit der verschiedenen Architekturelemente sind die Angaben jedoch repräsentativ, da die bohrlochgeophysikalischen Logs im Allgemeinen das ganze Molasseprofil lückenlos erfassen. Aus der Kompilation der Daten ist erkennbar, dass die hydraulische Durchlässigkeit der Sandsteine der Rinnengürtel und Durchbruchssysteme um mehrere Grössenordnungen höher liegt (10^{-8} bis 10^{-4} m/s) als die im Optionenbericht bei 10^{-10} m/s festgelegte Mindestanforderung an ein Wirtgestein für ein HAA-Tiefenlager (NTB 05-02, Seite 19). Beobachtungen beim Tunnelbau bestätigen das Bild, dass Rinnensandsteine bevorzugte Fliesswege darstellen. Je nach Grad der diagenetischen Zementation wirken die Sandsteine als Poren- oder Kluftwasserleiter. Von den feinkörnigen Sedimenten der Überschwemmungsebene (UPS) liegen nur wenige hydraulische Kennwerte vor. Die Durchlässigkeiten liegen im Bereich von $K = 10^{-11}$ bis 10^{-8} m/s.

Ergebnisse aus Explorationsbohrungen und seismischen Profilen der Erdölindustrie sowie Untersuchungen der Nagra zeigen, dass in der USM mehr als 100 m mächtige tonreiche Gesteinsabfolgen vorkommen, die als potenzielle Wirtgesteine in Frage kommen. Detaillierte stratigraphische Aufnahmen zeigen aber, dass innerhalb solcher Abfolgen mehrere Meter mächtige Sandsteinbänke auftreten, die vermutlich keine Wirtgesteinseigenschaften aufweisen.

Im Gebiet südlich Pfaffnau (Kanton LU) wurden innerhalb eines Gebiets von rund 0.7 km² vier Gas-Explorationsbohrungen durch die USM abgeteuft. Sandige Schichtglieder wurden in allen vier Bohrungen 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 km² identifiziert werden könnte, der für ein geologisches Tiefenlager ausreicht.

Aufgrund der heute vorliegenden Datenbasis kommt die Nagra zum Schluss, dass ein erhebliches Risiko besteht, dass sich die USM bei einer näheren Betrachtung insgesamt als zu durchlässig erweist, respektive dass die Ausdehnung der geringdurchlässigen tonreichen Par-

ten ohne Sandsteineinlagerungen für die Erstellung eines HAA-Tiefenlagers sehr knapp bis ungenügend ist.

Beurteilung der HSK

Die HSK beurteilt die vorgelegten hydrogeologischen Daten als nachvollziehbar. Die von Keller (1992) aufgrund lithofazieller und geometrischer Merkmale vorgenommene Gliederung der USM in sogenannte Architekturelemente darf als grosser Fortschritt für die hydrogeologische Charakterisierung der USM gewertet werden. Die aufgeführten Durchlässigkeitswerte stützen sich auf verschiedene Datenquellen und unterschiedliche Messmethoden ab (u.a. Labormessungen an Bohrkernproben, hydraulische Packertests in Bohrungen und Pumpversuche, Drill Stem Tests in Erdölbohrungen), die im Synthesebericht von Küpfer (2005) sorgfältig analysiert, bewertet und einander gegenüber gestellt wurden. Die Durchlässigkeitswerte streuen dabei zwischen 10^{-11} und 10^{-4} m/s. Die grosse Streuung kann mit der Faziesgliederung der USM und dem von Keller (1992) entwickelten Konzept der verschiedenen Architekturelemente sowie der Heterogenität der Proben verstanden werden. Aus den Datenkompilationen von Keller (1992) und Küpfer (2005) lassen sich für die verschiedenen Architekturelemente der USM die Porositäten (Medianwerte) und Bandbreiten der hydraulischen Durchlässigkeitswerte zusammenstellen (Tabelle 4.3-3).

Architekturelemente der USM	Porosität	Durchlässigkeit
	Medianwerte	K-Wert (m/s)
RG Rinnengürtel	20 %	10^{-7} bis 10^{-4}
DFR Durchbruchsfächer und Durchbruchsrinnen	14.5 %	10^{-8} bis 10^{-6}
UW Uferwälle und Überschwemmungssande	7.5 %	10^{-10} bis 10^{-7}
UPS Überschwemmungsebene mit Paläoböden	7.5 %	10^{-11} bis 10^{-8}
LAK Lakustrische Sedimente	keine Daten	keine Daten

Tabelle 4.3-3: Porositäten und hydraulische Durchlässigkeiten der verschiedenen Architekturelemente der USM (nach Keller 1992).

Die verschiedenen Architekturelemente wechseln vertikal im Meter- bis Dekameterbereich bzw. horizontal im Dekameter- bis Kilometerbereich und bauen die USM als Gesamtheit auf. Die effektive hydraulische Durchlässigkeit der USM wird durch die am konkreten Ort vorliegende Anordnung und hydraulische Verknüpfung der verschiedenen Architekturelemente und die Grösse des betrachteten Gesteinsvolumens bestimmt (Skalenabhängigkeit).

Für den Skalenbereich eines geologischen Tiefenlagers (ungefähre horizontale Ausdehnung von 1 km x 2 km) ist eine Abschätzung der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit wegen des heterogenen Aufbaus der USM komplex und schwierig. Die HSK hat deshalb durch einen externen Experten (Hölker 2006) ein stochastisches Modell der Durchlässigkeitsverhältnisse der USM erstellen lassen. Die Modellierung geht dabei in einem ersten Schritt von dem von Hölker und Graf (2004) entwickelten 3D-Faziesmodell der USM aus, in welchem anhand konkreter Daten aus Erdölbohrungen für zwei Gebiete (Gebiet West: Fendingen, Courtion,

Chapelle, Tschugg; Gebiet Ost: Bassersdorf, Lindau, Herdern) die Häufigkeit und Verteilung der verschiedenen Architekturelemente (RG, UW, DFR und UPS/LAK) in je einem 1 km x 5 km x 1 km grossen Gesteinsblock simuliert wurden. Die Simulation der stochastischen Verteilung der Architekturelemente wurde mittels PETREL, einer 3D-Reservoir-Modellierungssoftware, durchgeführt. RG, UW und DFR wurden dabei als Elemente modelliert, die entsprechend der statistischen Vorgaben bezüglich Grösse und Form variieren und in die Hintergrundfazies UPS/LAK eingefügt wurden.

Die beiden Gebiete West und Ost unterscheiden sich bezüglich Auftreten und Häufigkeit der verschiedenen Architekturelemente sowie deren in diesen Gebieten in den Bohrungen beobachteten typischen Aggregation. Das Gebiet West zeichnet sich im Vergleich zum Gebiet Ost durch einen deutlich höheren Tonanteil (UPS) aus (vgl. Tabelle 4.3-2). Im Gebiet Ost ist der Anteil an Sandsteinen (RG, DFR) entsprechend grösser.

In einem zweiten Schritt ermittelte Hölker (2006) für die verschiedenen Typen von Architekturelementen die hydraulischen Durchlässigkeiten und ihre statistischen Verteilungen und fügte sie ins USM Faziesmodell ein. Für die Herleitung der Durchlässigkeiten wurden drei unterschiedliche Datenquellen herangezogen:

- Szenarium 1: K-Werte aus Messungen an Bohrkernproben (plugs)
- Szenarium 2: K-Werte aus hydraulischen Packertests in un tiefen Bohrungen (< 250 m)
- Szenarium 3: K-Werte bestimmt oder abgeschätzt aus Drill Stem Tests in Erdölbohrungen (Tiefe > 500 m)

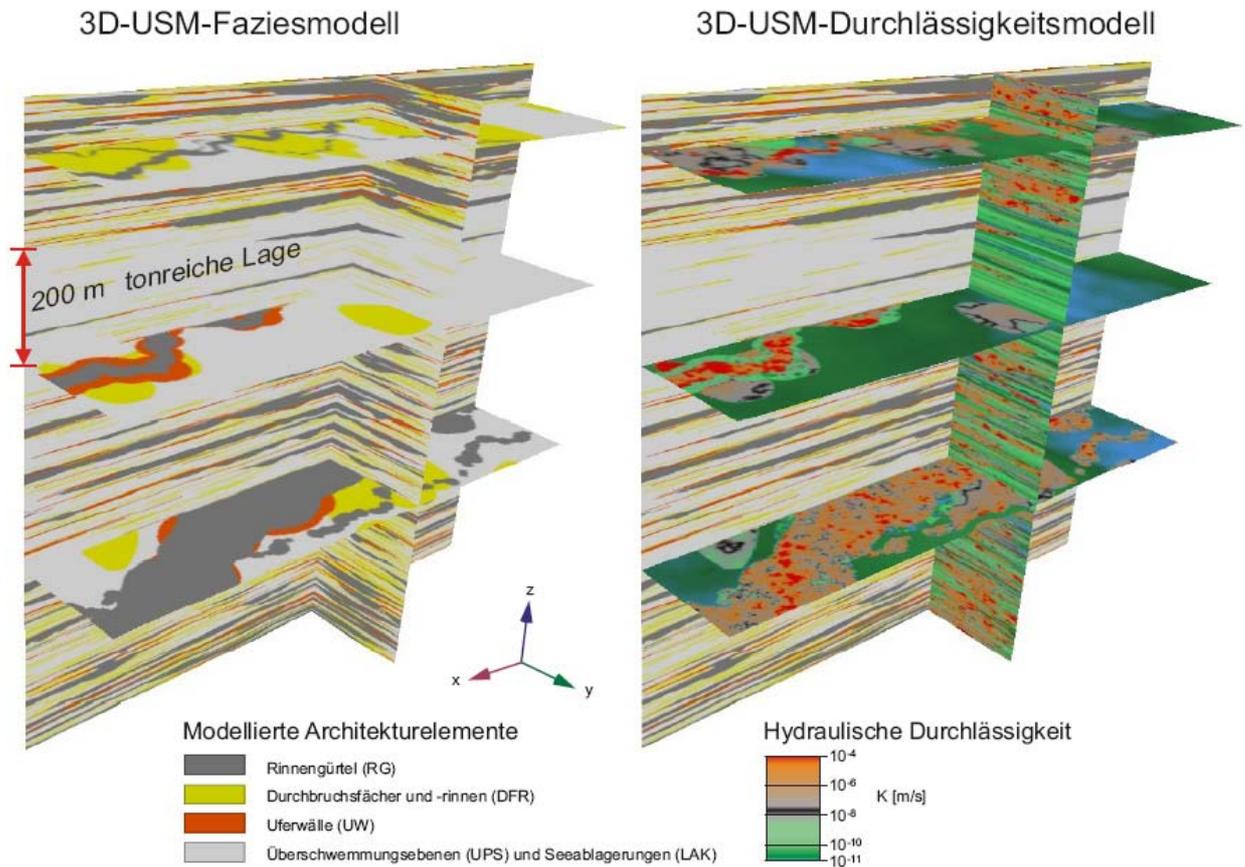
In Tabelle 4.3-4 sind die so ermittelten statistischen Durchlässigkeitsverteilungen für die verschiedenen Architekturelemente der USM zusammengestellt.

Architekturelement	Szenario	K (m/s)	Korrelationslängen für K (m)		
			a _x	a _y	a _z
RG Rinnengürtel	1	$3.2 \cdot 10^{-6}$			
	2	$4.0 \cdot 10^{-7}$	50	50	5
	3	$1.0 \cdot 10^{-7}$			
DFR Durchbruchsfächer und Durchbruchsrinnen	1	$3.2 \cdot 10^{-7}$			
	2	$4.0 \cdot 10^{-7}$	500	500	2
	3	$1.0 \cdot 10^{-8}$			
UW Uferwälle und Überschwemmungssande	1&2	$3.2 \cdot 10^{-9}$			
	3	$1.0 \cdot 10^{-10}$	30	30	2
UPS/LAK Überschwemmungsebenen und Seeablagerungen	1&2	$3.2 \cdot 10^{-10}$	4000	4000	3
	3	$1.0 \cdot 10^{-11}$			

Parameter und Einheiten: K: Aus logarithmischer Normalverteilung berechneter Erwartungswert der hydraulischen Durchlässigkeit (m/s)

Tabelle 4.3-4: Statistische Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeiten (K-Wert) für die verschiedenen Architekturelemente der USM (nach Hölker 2006).

Aus den drei definierten Szenarien und den beiden Modellgebieten West und Ost resultierten insgesamt 6 Durchlässigkeitsmodelle für die USM, die in Hölker (2006) dokumentiert sind. Für die Diskussion der Ergebnisse konzentriert sich die HSK im Folgenden auf die tonreichste, also bestmögliche Fazies-situation im Gebiet West, wo im Tiefenbereich von 200 bis 400 m eine 200 m mächtige tonreiche Lage auftritt (Figur 4.3-6).



Figur 4.3-6: Ausgewählte Schnitte aus dem 3D-USM-Faziesmodell und dem entsprechenden 3D-USM-Durchlässigkeitsmodell für das Gebiet West (Szenarium 1). Vertikal 10-fach überhöht dargestellt (nach Hölker 2006).

Figur 4.3-6 zeigt ausgewählte Schnitte aus dem 1 km x 5 km x 1 km grossen 3D-USM-Faziesmodell West mit der Verteilung der Architekturelemente (links) und der Simulation der Durchlässigkeitsverteilungen (rechts), wie sie mit dem Datensatz des Szenariums 1 ermittelt wurden.

Deutlich erkennbar ist der heterogene Aufbau der USM und die uneinheitliche Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit in horizontaler wie vertikaler Richtung. Die Darstellung illustriert die starke Anisotropie der Wasserwegsamkeiten in der USM, die beim Vergleich der verschiedenen Schnittflächen deutlich wird. Besonders in horizontaler Ebene treten die Rinnensandsteingürtel (RG) und Durchbruchsfächer (DFR) mit ihrer grossen lateralen Ausdehnung und den erhöhten Durchlässigkeiten in Erscheinung.

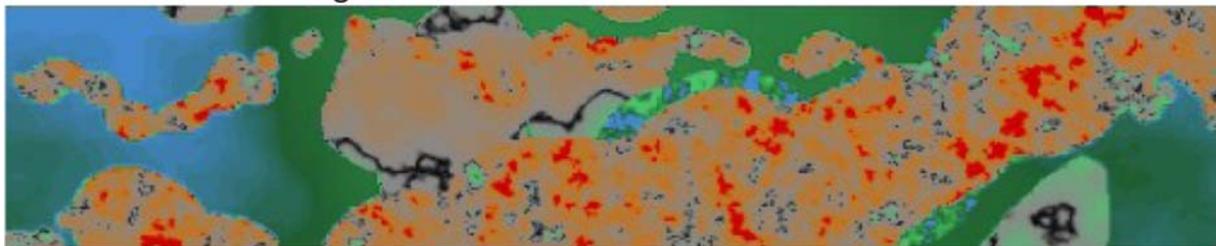
Als Beispiel ist in Figur 4.3-7 in einem Horizontalschnitt des 3D-USM-Modells West die typische fazielle und hydraulische Ausbildung der Ablagerungen mäandrierender Flüsse und Durch-

bruchsfächer in einer Überschwemmungsebene wiedergegeben, woraus die Bedeutung der Sandsteine der Rinnengürtel als bevorzugte Fließspfade klar ersichtlich wird.

3D-USM-Faziesmodell



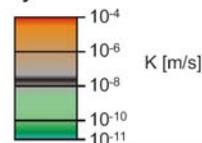
3D-USM-Durchlässigkeitsmodell



Modellierte Architekturelemente

- Rinnengürtel (RG)
- Durchbruchsfächer und -rinnen (DFR)
- Uferwälle (UW)
- Überschwemmungsebenen (UPS) und Seeablagerungen (LAK)

Hydraulische Durchlässigkeit



Figur 4.3-7: Beispiel von Rinnengürteln (RG), Durchbruchsfächern (DFR), Uferwällen (UW) und Überschwemmungsebenen/Seeablagerungen (UPS/LAK) in einem Horizontalschnitt des 3D-USM-Fazies- und Durchlässigkeitsmodells des Gebietes West (Szenarium 1, aus Hölker 2006).

Um die Grundwasserverhältnisse im Umfeld eines Tiefenlagers in der USM überblicken und die für Sicherheitsbetrachtungen relevanten Wasserfließmengen durch ein Lager abschätzen zu können, hat die HSK die Ingenieurgeologie der ETH Zürich beauftragt, basierend auf dem von Hölker (2006) entwickelten Durchlässigkeitsmodell der USM des Gebietes West die zu erwartenden Wasserflüsse durch ein hypothetisches Lager zu untersuchen. Für das 3D-Hydromodell wurde dabei der tonreichste Bereich im Gebiet West ausgewählt, wo im Tiefenbereich von rund 200 bis 400 m eine 200 m mächtige tonreiche Schicht beobachtet werden kann (Figur 4.3-6). Die Dimensionen des hydrogeologischen Modells wurden auf 3000 m x 1000 m x 200 m (Länge x Breite x Höhe), diejenige der einzelnen Blockelemente auf 20 m x 20 m x 20 m festgelegt.

Die Ergebnisse der nach der Methode der Finiten Elemente durchgeführten Berechnungen sind in Fidelibus und Löw (2007) dokumentiert, wobei von der gleichen Lagerauslegung wie beim Projekt Opalinuston (NTB 02-02, NTB 02-06) ausgegangen und der vertikale Fluss durch die gesamte Lagerfläche untersucht wurde. Als hydraulische Randbedingungen wurde an der Basis der 200 m mächtigen tonreichen Schicht eine hydraulische Druckhöhe von 410 m und an der Oberkante eine Druckhöhe von 400 m angenommen. Die Analyse lieferte charakteristische vertikale Flüsse durch die Gesamtläche des Lagers in der Grössenordnung von 10^2 bis 10^4 m³/Jahr, je nach Szenarium. Dieser Fluss ist im Vergleich zum Referenzfall im Projekt Opalinuston um 3 bis 5 Grössenordnungen höher. Die Berechnungen zeigen, dass wegen der aus-

geprägten Heterogenität der Durchlässigkeitsverteilung die Fließrichtungen in der Natur komplex und auf der gegebenen Skala kaum prognostizierbar sind (Fidelibus und Löw 2007).

Als Fazit der Modellberechnungen kann festgehalten werden, dass auch bei einer optimalen Platzierung eines Lagers im tonreichsten Teil der USM des Gebietes West die Fließmengen durch das Lager um viele Größenordnungen höher sind als im Opalinuston. Der stark inhomogene Aufbau der USM macht nach Ansicht der HSK eine realistische und belastbare Modellierung der Fließverhältnisse schwierig. Bei dem klar anisotropen Durchlässigkeitsfeld der USM werden aufgrund der höheren Durchlässigkeiten in horizontaler Richtung und der besseren Konnektivität der permeablen Lagen (Rinnensandsteine, Durchbruchsfächer) in dieser Richtung die horizontalen Flüsse wichtig.

4.3.4 Geochemische Verhältnisse und Sorption

Angaben der Nagra

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 (NTB 88-07, Pearson et al. 1991). Die Schichtung der Wassertypen verläuft schief zu den Formationsgrenzen. Wasserproben aus grösseren Tiefen existieren nur von durchlässigen, sandsteinreichen Zonen der USM und der oberen Meeresmolasse (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 grösseren Tiefen, wo die Grundwasserzirkulation sehr langsam ist und genügend Zeit für eine Durchmischung oder für 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. 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/Liter und ist wahrscheinlich reduzierend. Im Na-Cl-Wasser aus der Bohrung Schafisheim wurde bei einer Gesamtmineralisation von ca. 9 g/Liter ein Eh-Wert von –0.15 V gemessen. Den Chemismus der Tiefengrundwässer bezeichnet die Nagra als günstig. Sie erwartet, dass die Redox-Pufferkapazität der nicht oxidierten 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 je nach Lagertiefe) sind nicht ausgeschlossen, sind aber für die Langzeitsicherheit nicht kritisch.

In Bezug auf die Sorptionseigenschaften der USM erachtet die Nagra die Eigenschaften der tonigen Partien der Molasse als günstig und mit denjenigen des Opalinustons vergleichbar. Für die sandsteinreichen Partien erwartet sie aufgrund der geringeren Tonmineralgehalte weniger gute Sorptionskapazitäten.

Beurteilung der HSK

Die Angaben der Nagra stützen sich auf Wasserproben aus oberflächennahen Gesteinsschichten und – in grösserer Tiefe – auf solche aus durchlässigen, sandsteinreichen Zonen der USM und OMM. Für tonreiche, geringdurchlässige Bereiche nimmt sie an, dass die Wasserzusammensetzung hauptsächlich durch die Mineralogie des Gesteins bestimmt ist. Die Annahmen der Nagra stützen sich auf generelle geochemische Betrachtungen und erscheinen nach Ansicht der HSK plausibel.

Die Sorptionseigenschaften des Gesteins sind von zentraler Bedeutung für die Retardierung der Radionuklide. Die HSK geht mit der Auffassung der Nagra einig, dass die Eigenschaften der tonreichsten Bereiche der USM mit dem Opalinuston vergleichbar sind. Die für Opalinuston gültigen Sorptionskoeffizienten müssten jedoch entsprechend der Ionenaustauschkapazitäten, der spezifischen Oberflächen und der jeweiligen Zusammensetzung der Porenwässer skaliert werden.

Die Sorption in sandsteinreichen Partien der USM, wo der hauptsächliche Nuklidtransport stattfinden dürfte, wird für die meisten Radionuklide wegen des geringen Tongehaltes deutlich kleiner sein als in den tonreichen Zonen. In einer früheren Studie (NTB 89-02) hat die Nagra Sorptionskoeffizienten für Sedimentgesteine empfohlen. Aufgrund eines Vergleichs der durchschnittlichen Zusammensetzung von Sandsteinen mit derjenigen von Tonen und Mergeln schätzte sie die Sorptionskoeffizienten in Sandsteinen um den Faktor fünf kleiner als in Tonsteinen und Mergeln. Bei Kohlenstoff und Jod ging sie davon aus, dass zwischen den genannten Gesteinstypen kein wesentlicher Unterschied im Sorptionsverhalten besteht. Nach Ansicht der HSK kann diese Näherung höchstens als eine grobe erste Abschätzung der Sorptionskoeffizienten in Sandsteinen verwendet werden. Falls die USM als Wirtgestein in Betracht gezogen wird, sind systematische Untersuchungen der Sorptionseigenschaften unabdingbar.

Die Redoxverhältnisse, die für die Rückhaltung einiger Radionuklide von Bedeutung sind, können wegen der Heterogenität der USM stark variieren. Die USM enthält sowohl oxidierte (rötliche) als auch reduzierte (gräuliche und grünliche) Gesteinsbereiche. Die Annahme der Nagra, dass die Redox-Pufferkapazität der gräulichen und grünlichen Schichten der USM genügend gross ist, um grossräumig permanent reduzierende Verhältnisse zu erzeugen, müsste anhand örtlicher Erkundungen aufgezeigt werden.

Die Rolle organischer Substanzen im Porenwasser der USM ist nicht geklärt. In den Wasserproben der Bohrung Schafisheim wurde bis zu 1.2% organischer Kohlenstoff gefunden. Während der organische Kohlenstoff im Opalinuston gemäss den Erkenntnissen aus dem Entsorgungsnachweis keinen negativen Einfluss auf die Sorption der Radionuklide ausübt, kann man diese Ergebnisse nicht unbesehen auf die USM übertragen. Die grössere hydraulische Durchlässigkeit der USM lässt auch auf eine grössere Mobilität der organischen Stoffe schliessen.

4.3.5 Abschätzung der Barrierenwirkung

Angaben der Nagra

Um eine genügende Wirksamkeit des Wirtgesteins (geologische Barriere) als Teil des Mehrfach-Barrierensystems zu gewährleisten, soll das Wirtgestein eine geringe hydraulische Durchlässigkeit haben. Es werden nur Gesteinsbereiche als geeignet betrachtet, welche eine grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von weniger als 10^{-10} m/s haben. Aufgrund der heute vorliegenden Datenbasis besteht ein erhebliches Risiko, dass sich die USM bei einer näheren

Betrachtung insgesamt als zu durchlässig erweist, und dass die Ausdehnung der geringdurchlässigen tonreichen Partien ohne Sandsteineinlagerungen für die Erstellung eines HAA-Tiefenlagers sehr knapp bis ungenügend ist. Untersuchungen zeigen, dass sandsteinfreie Bereiche von mehr als 30 bis 50 m Mächtigkeit selten sind.

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 Gesteinsformationen, die Einschaltungen von durchlässigen Sandsteinkörpern mit reduzierter Barrierenwirkung sowie die 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.

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.

Beurteilung der HSK

Eine realistische und belastbare Modellierung der Migrationspfade und der Rückhaltefähigkeit der Radionuklide in der USM setzt Kenntnisse möglicher vernetzter Fliesswege (insbesondere der Rinnensandsteingürtel) im Wirtgestein voraus, da diese erhöhte Durchlässigkeiten aufweisen und für die Wasserfliessverhältnisse bestimmend sind. Fehlende Daten können in einer Sicherheitsbeurteilung eines Tiefenlagers durch konservative Annahmen kompensiert werden. Die Folge dieses Vorgehens ist allerdings, dass im Allgemeinen die Rückhalteigenschaften des Gesteins damit unterschätzt werden. Für einen ausgewogenen Vergleich der möglichen Eignung von Wirtgesteinen ist eine realistische Einschätzung der Rückhalteigenschaften und deshalb ein belastbarer Datensatz für die Modellierung nötig. Der inhomogene Aufbau der USM macht dies sehr schwierig bis unmöglich.

Aufgrund generischer Modellrechnungen liess die HSK eine grobe Abschätzung der in der USM zu erwartenden Wasserfliessmengen durchführen, wobei die bestmögliche Situation in einem tonreichen Abschnitt der USM untersucht wurde (vgl. Kap. 4.3.3). Die Modellierung der Wasserfliessverteilung (Fidelibus und Löw 2007) lieferte für diesen Bereich der USM im Modellgebiet West, bei Annahme eines vertikal nach oben gerichteten Fliessfeldes, einen Wasserfluss, der im Vergleich zum Referenzfall im Opalinuston (NTB 02-06) um rund 3 bis 5 Grössenordnungen erhöht ist. Im Gegensatz zum Opalinuston ist der Nuklidtransport in der USM durch Advektion bestimmt. Für gut lösliche und schwach sorbierende Nuklide wie ^{129}I , ^{36}Cl und ^{79}Se ist die hydraulische Barrierenwirkung der USM entsprechend um diese Grössenordnungen reduziert. Nach Ansicht der HSK kann die im Optionenbericht vorgegebene Mindestanforderung an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit von $K < 10^{-10}$ m/s selbst im tonreichsten Bereich des Gebietes West nicht erreicht werden.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass die USM eine sehr heterogene Abfolge darstellt, in welcher je nach Fazies mit stark unterschiedlichen Durchlässigkeiten und Rückhalteigenschaften zu rechnen ist. Die generische Modellstudie von Hölker (2006) und die Untersuchung der Verteilung der Wasserflüsse im tonreichsten Abschnitt der USM (Fidelibus und

Löv 2007) zeigen, dass selbst im bestmöglichen Fall die hydraulische Barrierenwirkung der tonreichsten USM im Vergleich zum Opalinuston um viele Grössenordnungen schlechter ist.

4.3.6 Explorierbarkeit

Angaben der Nagra

In der USM stellen die Sandsteine der Rinnengürtel und Durchbruchssysteme bevorzugte Wasserfließwege höherer Durchlässigkeit dar. Ihre Erkennung bei der Exploration ist deshalb einer der kritischsten Aspekte dieser Gesteine. Das Einengungsverfahren der Sedimentoptionen in den 90er Jahren und die Zurückstellung der USM als Reserveoption basierten auf einer Beurteilung der Explorierbarkeit der USM mittels 2D-Seismik und Bohrungen. Der Nachweis des Nichtvorhandenseins von Sandsteinrinnen bzw. die Bestimmung ihrer lateralen Ausdehnung und hydraulischen Konnektivität wurde als schwierig beurteilt (NTB 91-15, NTB 94-10).

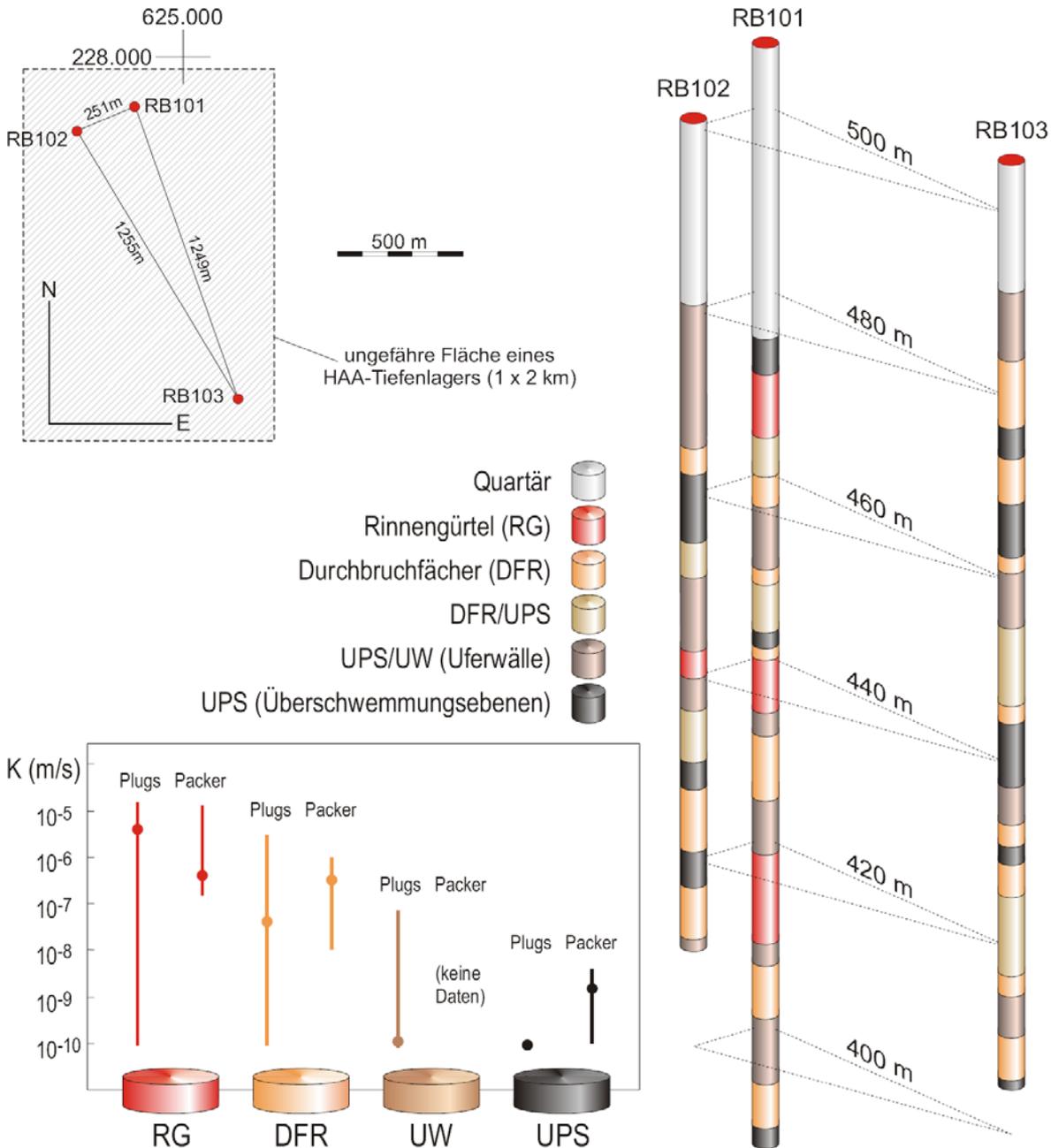
In der Erdölexploration hat sich inzwischen die 3D-Seismik zu einem erfolgreichen und routinemässig eingesetzten Verfahren entwickelt, mit welchem sich in einigen Fällen im tieferen Untergrund Rinnenfüllungen alter mäandrierender Flusssysteme abbilden liessen. Im Sinne einer Neubeurteilung führte die Nagra deshalb eine Studie durch, um die Möglichkeiten der seismischen Erkundung der USM zu prüfen (Hölker und Graf 2004). Dazu wurden zwei stochastische Faziesmodelle realisiert, die aufgrund von Bohrdaten die typischen Verhältnisse der USM der Westschweiz und der Ostschweiz simulieren. Die Simulationen zeigen, dass im Osten weniger grossräumige Differenzierungen in sandsteinarme und sandsteinreiche Bereiche möglich sind als im Westen, wo die Abfolgen des Chattian eine über grössere Distanzen korrelierbare tonreiche Abfolge beinhalten. Eine Kartierung der USM erscheint nur nach groben Faziesbereichen möglich, wo tonreichere Bereiche von sandsteindominierten Abfolgen unterschieden werden können. Die Wahrscheinlichkeit, bei späteren Bohrungen oder bei Untertageerkundungen unerwartet auf Sandsteinlagen zu stossen, ist erheblich. Auch bei positiven Explorationsbefunden kann letztlich nicht ausgeschlossen werden, dass unentdeckte Sandsteinlagen existieren, die erst beim Bau eines Tiefenlagers oder gar nicht erkannt werden. Wegen dieser verbleibenden Ungewissheiten stellt die Nagra die USM weiterhin als Reserveoption zurück.

Beurteilung der HSK

Die Erkundung eines Standortgebietes in der USM für ein geologisches Tiefenlager hat nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn es gelingt, die lithologischen Verhältnisse der USM mit geophysikalischen Methoden zu ermitteln. Andernfalls müssten so viele Bohrungen abgeteuft werden, dass dies zu einer unzulässigen Perforation des Wirtgesteins führen würde. In den Studien von Nold (1992) und Hölker und Graf (2004) wurden die geophysikalischen Erkundungsmöglichkeiten (Seismik) detailliert analysiert. Die Betrachtung der Auflösungsgenauigkeit der Reflexionsseismik zeigt, dass die unterschiedlichen Architekturelemente der USM nicht einzeln aufgelöst werden können, da sie im Vergleich zu den dominanten Wellenlängen der Seismik zu klein sind (Hölker und Graf 2004). Selbst wenn keine Sandsteine mit der Reflexionsseismik erkannt werden, kann ihre Existenz damit nicht ausgeschlossen werden.

Erfahrungen aus verschiedenen Bohrkampagnen (u.a. Pfaffnau, Eglisau, Burgdorf, Langenthal, Kölliken) zeigen, dass eine umfassende Charakterisierung der USM und eine räumliche Korrelation der Architekturelemente selbst zwischen nahe beieinander liegenden Bohrungen schwierig wenn nicht unmöglich ist. Als Beispiel seien die drei Bohrungen RB 101, RB 102 und RB 103

bei Langenthal erwähnt, die in einem Untersuchungsgebiet vergleichbar der Grösse eines geologischen Tiefenlagers abgeteuft wurden (Figur 4.3-8).



Figur 4.3-8: Beobachtete Architekturelemente in den drei Bohrungen RB 101, RB 102 und RB 103 bei Langenthal und Zusammenstellung der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeitswerte K (m/s) für die verschiedenen Architekturelemente (Kompilation HSK, Daten aus NTB 90-41). Plugs=Labormessungen an Bohrkernen; Packer= In-situ-Packertest.

Die Ergebnisse zeigen, dass in jeder der drei Bohrungen die Abfolge der verschiedenen Architekturelemente RG, UW, DFR und UPS variiert. Die Elemente sind zwischen den Bohrungen

räumlich nicht korrelierbar, weshalb eine genaue Rekonstruktion des dreidimensionalen Aufbaus der USM nicht möglich ist.

Die Sandsteine der Rinnengürtel (RG) und Durchbruchssysteme (DFR) zeigten in diesen drei Bohrungen erwartungsgemäss die höchsten Durchlässigkeitswerte. Die Sandsteinkörper der Rinnengürtel sind in ihrer stofflichen und strukturellen Beschaffenheit sehr heterogen, was sich in den stark unterschiedlichen Durchlässigkeitswerten der Bohrkernproben (Plugs) bemerkbar macht.

Zusammenfassend kommt die HSK zum Schluss, dass die Heterogenität und die begrenzte Explorierbarkeit der USM die von der Nagra vorgenommene Zurückstellung dieser Wirtgesteinsoption rechtfertigen.

4.3.7 Rohstoffkonflikte

Angaben der Nagra

Im Optionenbericht werden mögliche Konflikte wegen einer allfälligen Nutzung von Rohstoffen im Verbreitungsraum der mittelländischen Molasse kurz angesprochen. Aufgeführt werden Erdöl/Erdgas, Kohle, Mineral- und Thermalwasser sowie die Erdwärme. Nach Ansicht der Nagra sind Rohstoffvorkommen von beschränkter Bedeutung und führen für die im Optionenbericht vorgenommene Beurteilung der geologischen Möglichkeiten zu keiner Einschränkung. Die Frage der Rohstoffkonflikte ist aber bei der Diskussion möglicher Standorte zu beachten.

Beurteilung der HSK

Nach Ansicht der HSK sind die von der Nagra aufgeführten möglichen Nutzungskonflikte, wenn auch knapp, korrekt dargelegt. Es fehlt aber die Erwähnung der möglichen Nutzung des Untergrundes für die Speicherung von Erdgas, wie sie seinerzeit in der Schweiz vom Konsortium Untertagespeicher untersucht wurde. Aktuelle Entwicklungen folgend müsste auch die Speicherung von CO₂ im Untergrund erwähnt werden.

Die Nagra hat in der Sedimentstudie (NTB 88-25) das Problem der möglichen Rohstoffkonflikte eingehender diskutiert. Eine detailliertere Studie widmete sich der Frage möglicher Kohlenwasserstoffvorkommen im Gebiet des zentralen und östlichen Mittellandes (Häring 1993). Aus den vorgelegten Daten ergibt sich, dass bei der Molasse ein gewisses Konfliktpotenzial vorhanden ist, da die Molassegesteine Kohlenwasserstoffe (Erdöl- oder Erdgas) enthalten könnten und da unterhalb der Molasse (Mesozoikum, Permokarbontröge) ein Potenzial an Erdgas- bzw. Kohlevorkommen besteht. Im Vergleich zu anderen Becken (z.B. Bayrisches Molassebecken, Wiener Becken) ist das schweizerische Molassebecken weniger intensiv exploriert worden. Die Frage bleibt damit offen, ob die Explorationstätigkeiten in Zukunft bei einer Verknappung der Kohlenwasserstoffe wieder verstärkt würden.

Die Speicherung von Erdgas in geeigneten geologischen Strukturen wird weltweit an zahlreichen Orten praktiziert. In der Schweiz wurden vom Konsortium Untertagespeicher entsprechende Möglichkeiten in der Molasse abgeklärt. Die aufwendigen Studien, die Bohrungen beinhalteten, führten zum Schluss, dass die USM wegen ihrer Heterogenität als Speichergestein für Erdgas ungeeignet ist.

Die Nutzung von Erdwärme ist ein aktuelles Thema. Es werden heute zahlreiche kleine, oberflächennahe Anlagen erstellt. In der Regel handelt es sich um untiefe Wärmesonden oder

Wärmepumpen, die den Bereich eines geologischen Tiefenlagers nicht betreffen. Grössere Wärmeversorgungen haben aber auch schon die geothermische Nutzung in grösserer Tiefe verwirklicht (z.B. Bassersdorf, Riehen). Im Bereich des Mittellandes steht dabei die Obere Mee-resmolasse (OMM) im Vordergrund, nur sie weist eine ausreichend hohe Durchlässigkeit auf. Die Ausbeutung der Erdwärme konzentriert sich einerseits auf Gebiete mit hohem Wärmefluss, andererseits ist auch die Nähe zu den Verbrauchern eine wichtige Randbedingung. Im schweizerischen Mittelland werden keine Wärmeanomalien beobachtet, so dass die Möglichkeiten zur Nutzung der geothermischen Energie hier eher eingeschränkt sind. Die Nagra hat diesbezüglich mit einer Studie von Schärli und Rybach (2002) die bestehenden Wärmedaten aus der Nord-schweiz (59 Bohrungen) zusammengetragen und in einer Wärmeflusskarte dargestellt.

Im Untergrund des Mittellandes sind verschiedene Tiefenaquifere für die Gewinnung von Mineral- oder Thermalwasser von Bedeutung: OMM, Malmkalke, Muschelkalk, Buntsandstein und Kristallin. Als Lieferanten von Mineralwasser werden heute die OMM (Aqui Zürich), die USM bzw. der Malm (Eglisau) und das Kristallin (Bad Zurzach) genutzt. Diese Mineralwässer wurden mittels Bohrungen erschlossen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei einer künftigen Ausscheidung möglicher Standorte für geologische Tiefenlager in der USM die Frage der Rohstoffverhältnisse und der möglichen Interessenskonflikte eingehender zu klären ist. Das Auswahlverfahren, welches der Sachplan Geologische Tiefenlager vorsieht, trägt diesem Aspekt Rechnung.

4.3.8 Bautechnische Machbarkeit

Angaben der Nagra

Die Nagra schätzt die bautechnischen Bedingungen in der USM, gestützt auf Erfahrungen aus dem Tunnelbau, als günstiger als im Opalinuston ein, erwartet aber in tonreichen Abfolgen dem Opalinuston vergleichbare Verhältnisse. Als Hauptproblem sieht die Nagra eine eventuelle lokale Gasführung, wie sie in der Bohrung Pfaffnau beobachtet wurde.

Beurteilung der HSK

Die Angaben der Nagra zur bautechnischen Machbarkeit sind eher knapp gehalten und wenig spezifisch. Die HSK hat daher eigene Abklärungen veranlasst (Emch & Berger 2007). Die Datenlage zu den felsmechanischen Parametern der USM ist insofern interpretationsbedürftig, als vor allem Daten aus relativ oberflächennahen Untertagebauwerken vorliegen. Ob und welche Änderungen der Eigenschaften mit zunehmender Überdeckung zu erwarten sind, ist unklar. Gestützt auf die verfügbaren Grundlagen wurden Sensitivitätsanalysen für typische Tunnelquerschnitte eines geologischen Tiefenlagers vorgenommen. Die Materialeigenschaften der USM (Tonsteine, Siltsteine, Sandsteine) wurden innerhalb einer wahrscheinlichen Bandbreite variiert und ihr Einfluss auf die zu erwartenden Konvergenzen und den erforderlichen Ausbauwiderstand analysiert. Es wurden verschiedene Konfigurationen von Schichtabfolgen berechnet. Dabei zeigt sich, dass die Querschnitte der Lagerstollen in den meisten Fällen ohne oder mit nur geringen Stützmassnahmen zu realisieren wären. Einzig in jenen Fällen, wo ein Tunnel ganz oder teilweise in schlecht zementierten Sandsteinen liegt, sind die bautechnischen Verhältnisse ungünstiger. Solche Bereiche wären für ein Tiefenlager aber ohnehin ungeeignet.

Bezüglich der baulichen Realisierung stellen die ton- und siltsteinreichen Lagen der USM unter den hier angenommenen Verhältnissen keine im Tunnelbau ungewöhnlichen Herausforderungen dar und der Tunnelvortrieb kann weitgehend mit klassischen Techniken erfolgen. Im

Rahmen einer Standorterkundung in der USM wären zur besseren Einschätzung der bautechnischen Machbarkeit frühzeitig felsmechanische Gesteinsparameter aus der anvisierten Tiefenlage zu gewinnen, um die bestehende Ungewissheit hinsichtlich der felsmechanischen Kenngrößen zu verringern.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Mit dem Optionenbericht legt die Nagra die aus ihrer Sicht bestehenden Möglichkeiten für die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz dar. Die Abgrenzung bevorzugter geologisch-tektonischer Grossräume und die Identifikation möglicher Wirtgesteine erfolgten aufgrund einer umfassenden Datenbasis und einer nachvollziehbaren Argumentation.

Bevorzugter geologisch-tektonischer Grossraum

Die Abgrenzung des für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraumes Mittelländische Molasse und nordöstlicher Tafeljura ist nachvollziehbar und plausibel. In diesem Gebiet sind die Sedimentschichten mehrheitlich ruhig gelagert und über lange geologische Zeiträume ungestört geblieben. Die tektonischen Verhältnisse ändern sich hingegen in den Randgebieten dieses Grossraumes (Fallenjura, Alpen), wo die tektonische Überprägung und räumliche Zergliederung stark ausgeprägt und die Langzeitstabilität (Hebung/Erosion) nicht mehr gewährleistet ist.

Mögliche Wirtgesteine

Aufgrund der erforderlichen Barriereneigenschaften und der Gewährleistung der bautechnischen Machbarkeit bieten sich in geeigneter Tiefenlage im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum das kristalline Grundgebirge, der Opalinuston und die tonreichen Abschnitte der Unteren Süsswassermolasse als mögliche Wirtgesteine an. Es gibt keine weiteren Gesteinsformationen mit genügender Mächtigkeit, die für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle als Wirtgesteine in Betracht kämen.

Kristallin

Die sicherheitstechnische Beurteilung der Option Kristallin stützt sich auf eine breite Datengrundlage jahrzehntelanger Untersuchungsprogramme und auf Arbeiten im Felslabor Grimsel ab. Die räumliche Verbreitung des kristallinen Grundgebirges in geeigneter Tiefe beschränkt sich wegen des Nordschweizer Permokarbondrogens auf zwei kleine Gebiete direkt an der Grenze zu Deutschland. Im Gebiet Ost ist das Kristallin aufgrund der Befunde der Bohrung Siblingen relativ stark wasserführend und wird deshalb als weniger geeignet beurteilt. Zur Diskussion bleibt somit nur das Kristallin im Gebiet West (Laufenburg – Bad Zurzach).

Das kristalline Grundgebirge der Nordschweiz ist stofflich sehr heterogen und wegen der Lage am Nordrand des Permokarbondrogens tektonisch stark zergliedert. Intensiv zerrüttete Gesteinsabschnitte wechseln mit kompakteren Gesteinsbereichen. Die durch Bohrungen punktuell gewonnenen Daten sind nur begrenzt extrapolierbar, so dass die Charakterisierung und Abgrenzung eines für die geologische Tiefenlagerung geeigneten intakten Gesteinsbereichs selbst mit zusätzlichen Bohrungen als schwierig beurteilt wird.

Die von der Nagra angenommene Aufteilung des kristallinen Grundgebirges in einen oberen, durchlässigeren und einen unteren geringdurchlässigen Bereich kann die HSK in dieser einfachen Form nicht nachvollziehen. Die in den Bohrungen gemessenen hydraulischen Durchlässigkeiten variieren über viele Grössenordnungen (10^{-13} bis 10^{-4} m/s) und sind Ausdruck einer komplexen und selbst mit vielen Erkundungen vor Ort schlecht erfassbaren heterogenen Verteilung der wasserführenden Fliesssysteme. Nach Ansicht der HSK ist es fraglich, ob das Kristallin des Gebietes West die im Optionenbericht vorgegebene Anforderung

an die grossräumige Gesteinsdurchlässigkeit von kleiner als 10^{-10} m/s erfüllen kann. Bereiche mit einer derart geringen Durchlässigkeit haben sich als selten und als kaum über beschränkte Gesteinsvolumina hinaus nachweisbar erwiesen.

Vertonungen entlang der wasserführenden Kluftsysteme, die die Durchlässigkeiten reduzieren und das Sorptionspotential für Radionuklide erhöhen, sind aus Sicht der HSK nicht ausgeprägt vorhanden, da die Wasserwegsamkeit bevorzugt in quarzreichen Gesteinsbereichen zu beobachten ist, wo ein geringes oder gar kein Vertonungspotenzial vorliegt. Das Rückhaltevermögen von Radionukliden ist in diesen Bereichen stark reduziert.

Der dominierende Transportprozess im Kristallin ist Advektion entlang von Klüften. Die Barrierenwirkung des Kristallins ist daher naturgemäss geringer als in Gesteinen mit vorwiegend diffusivem Transport. Aus sicherheitstechnischer Sicht beurteilt die HSK das kristalline Grundgebirge wegen der strukturellen und stofflichen Heterogenität und der an Klüfte gebundenen Wasserführung als ein schwierig zu charakterisierendes Wirtgestein.

Das Auffinden eines genügend grossen geeigneten Kristallinkörpers zur Aufnahme eines Tiefenlagers ist selbst mit den modernsten Methoden der Exploration ein schwieriges Unterfangen. Wegen der Sedimentbedeckung ist eine zuverlässige Erkundung der tektonischen Verhältnisse im Kristallin von der Erdoberfläche aus kaum möglich. Mangels seismischer Kontraste können Störungszonen oder Änderungen in der Gesteinsbeschaffenheit in der Regel mit reflexionsseismischen Methoden nicht erkannt werden. Die HSK beurteilt deshalb die Explorierbarkeit des kristallinen Grundgebirges als problematisch. Dies entspricht der Einschätzung der HSK, die sie bereits im Gutachten zum Projekt Gewähr (HSK 23/28) und in der Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I (HSK 23/73) geäussert hat, wo sie das Auffinden bzw. Abgrenzen eines für ein Tiefenlager geeigneten Blockes als schwierig beurteilte.

Eine mögliche Standortevaluation im Gebiet West erachtet die HSK aufgrund der Thermalwasservorkommen und des erhöhten Wärmeflusses in diesem Gebiet (Bad Zurzach-Leuggern-Böttstein) als problematisch. Das in Bad Zurzach genutzte Thermalwasser deutet auf eine Herkunft aus grosser Tiefe und auf Transportwege hin, die schnelles Fliessen des Wassers erlauben.

Der Bau und die Erschliessung eines Tiefenlagers ist im Kristallin grundsätzlich machbar, wenn auch in grösserer Tiefe anspruchsvoll (Bergschlag, Wasserhaltung).

Opalinuston

Für den Opalinuston liegt eine solide Datengrundlage vor, die im Rahmen des Sedimentprogramms sowie des Projektes Entsorgungsnachweis Opalinuston über zwei Jahrzehnte hinweg erarbeitet wurde und eine Beurteilung der räumlichen Verbreitung und der hydrogeologischen und stofflichen Eigenschaften dieses Gesteins ermöglicht.

Als marine Ablagerung ist der Opalinuston in der Nordschweiz mit einer Schichtmächtigkeit von ca. 100 m grossräumig einheitlich und homogen ausgebildet. Die Charakterisierbarkeit der Gesteinseigenschaften ist deshalb gut. Auf der Grundlage detaillierter Strukturkarten lassen sich im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum in geeigneter Tiefenlage verschiedene Opalinustongebiete abgrenzen. Die Gebiete unterscheiden sich bezüglich räumlicher Ausdehnung, tektonischer Lage sowie Beschaffenheit der Rahmengesteine.

In den Nordschweizer Bohrungen sowie im Felslabor Mont Terri wurden im Opalinuston durchwegs sehr niedrige hydraulische Durchlässigkeiten von 10^{-14} bis 10^{-12} m/s gemessen. Isotopenprofile natürlicher Tracer zeigen, dass die Bewegung gelöster Stoffe im Opalinuston diffusionsdominiert ist und somit nur sehr langsam erfolgt. Störungen und Klüfte weisen wegen des hohen Tongehaltes und des plastischen Verhaltens des Gesteins keine erhöhten Durchlässigkeiten auf (Selbstabdichtungsvermögen). Aus der Gesamtschau aller vorhandenen Daten sind die hydrogeologischen Eigenschaften des Opalinustons für die geologische Tiefenlagerung als günstig zu bezeichnen. Sie erfüllen die von der Nagra im Optionenbericht vorgegebene Anforderung an die grossräumige hydraulische Durchlässigkeit.

Die geochemischen Verhältnisse im Opalinuston sind wegen der äusserst geringen Durchlässigkeit des Gesteins über lange Zeit stabil geblieben. Wegen des hohen Tongehaltes, der Feinkörnigkeit des Gesteins und den reduzierenden geochemischen Porenwasserbedingungen weist der Opalinuston sehr gute Sorptionseigenschaften auf. Der grösste Teil der Radionuklide wird im Opalinuston zurückgehalten bzw. zerfällt bei der Diffusion durch diese Barriere. Nur einige langlebige und schwach bzw. nicht sorbierende Radionuklide vermögen den Opalinuston mit grosser zeitlicher Verzögerung zu durchqueren.

Infolge der sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit ist auch die Gasdurchlässigkeit des Opalinustons gering. In ihren Berichten zum Entsorgungsnachweis diskutierte die Nagra deshalb die Frage, ob der durch Korrosionsprozesse im Tiefenlager entstehende Gasdruck durch Rissbildung die Barriereeigenschaften des Opalinustons beeinträchtigen könnte. Die HSK kam in ihrer Beurteilung des Entsorgungsnachweises zum Schluss, dass irreversible Schäden im Wirtgestein durch den auftretenden Gasdruck nicht zu erwarten sind. Die Vorgänge, die zur Produktion von Gas im Tiefenlager und zum Transport des Gases durch den Opalinuston führen, müssten aber bei einem allfälligen Tiefenlagerprojekt eingehender untersucht werden.

Für den Transport der Radionuklide stellen die tonigen Rahmengesteine ober- und unterhalb des Opalinustons eine zusätzliche Barriere dar. Die Beschaffenheit und die Eigenschaften dieser Rahmengesteine ändern sich aber lateral. So nimmt die Barrierenwirkung der oberen Rahmengesteine gegen Westen ab, da diese westlich der Linie Waldshut-Brugg eine karbonatische Ausbildung haben und einen wichtigen Aquifer enthalten.

Aufgrund der konstanten Mächtigkeit, der lateral gut verfolgbarer tonigen Ausbildung und der horizontalen Lagerungsverhältnisse lässt sich der Opalinuston mit seismischen Erkundungsmethoden (2D- und 3D-Seismik) zuverlässig explorieren.

Der Opalinuston enthält keine aussergewöhnlichen Rohstoffe. Bezüglich möglicher Interessenskonflikte lässt sich festhalten, dass im Verbreitungsgebiet mit Opalinuston in bevorzugter Tiefe vor allem diejenigen Gebiete über dem Nordschweizer Permokarbondrog (Potenzial für Kohle/Gas) und die Randpartien des Troges (erhöhter Wärmefluss) gewisse Konflikte auslösen könnten. Bei der Diskussion möglicher Standorte sind diese Aspekte zu beachten.

Die grundsätzliche Machbarkeit von Bau und Erschliessung eines geologischen Tiefenlagers im Opalinuston ist aufgrund der vorliegenden Erfahrung (Eisenbahn- und Strassentunnel) gegeben, wenn auch in diesem Gestein eine Reihe von baulichen Massnahmen zur Ausbruchssicherung vorzusehen sind.

Untere Süsswassermolasse

Im Molassebecken der Schweiz wurden in den vergangenen Jahrzehnten verschiedene Untersuchungskampagnen zur Exploration von Kohlenwasserstoffen durchgeführt. Die Nagra selbst hat ein umfangreiches Studienprogramm zur USM durchgeführt. Zur Beurteilung der USM als mögliches Wirtgestein liegt eine genügende Datenbasis vor.

Die USM in geeigneter Tiefenlage bildet einen Gürtel, der sich vom Bodensee bis zum Genfer See erstreckt. Da die USM eine komplexe und heterogene lithofazielle Gliederung in lateraler wie vertikaler Richtung aufweist, und tonreiche Abfolgen, die als Wirtgestein in Frage kommen, nur begrenzt auftreten, sind die Möglichkeiten zur geologischen Tiefenlagerung beschränkt. Die vorgelegten Daten zeigen, dass der untere Teil der USM im Westen tendenziell mehr Tonanteile als im Osten enthält. Eine umgekehrte, aber weniger deutliche Tendenz ist im oberen Teil der USM im Osten erkennbar.

Bei der USM handelt es sich um Fluss- und Überschwemmungsablagerungen, die als Erosionsprodukt der sich heraushebenden Alpen ins Vorlandbecken der Alpen geschüttet wurden. Die Ablagerungen der USM werden im alpenfernen Bereich zunehmend feinkörniger, wo Sand-, Silt- und Tonsteine dominieren. Der heterogene Aufbau der USM mit Wechsellagerung mergelig-toniger und sandiger Abschnitte kann modellhaft mit fünf unterschiedlichen Architekturelementen beschrieben werden. Aufgrund der heterogenen Beschaffenheit wird die USM als schwierig zu charakterisierendes Wirtgestein beurteilt.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten in der USM schwanken aufgrund grosser lithologischer Unterschiede je nach Architekturelement stark (K-Werte von 10^{-11} m/s bei Tonsteinen bis 10^{-4} m/s bei schlecht zementierten Sandsteinen). Die grossen Durchlässigkeitskontraste zwischen ton- und sandsteinreichen Gesteinsbereichen führen zu einem entlang der Sandsteine kanalisierten Porenwasserfluss. Für den Skalenbereich eines geologischen Tiefenlagers (2 km²) ist eine Abschätzung der grossräumigen hydraulischen Durchlässigkeit wegen des heterogenen Aufbaus der USM schwierig. Berechnungen der HSK zeigen für ein hypothetisches Tiefenlager im tonreichsten Abschnitt der USM im Gebiet West vertikale Fliessmengen, die um 3 bis 5 Grössenordnungen über denjenigen eines vergleichbaren Lagers im Opalinuston liegen. Die Fliesswege orientieren sich dabei an den schwer prognostizierbaren Sandsteinrinnen.

Die geochemischen Verhältnisse und Sorptionseigenschaften der USM zeigen grosse Unterschiede zwischen sandigen und tonigen Abfolgen. Die Retardierung von Radionukliden ist in den sandsteinreichen Partien der USM deutlich kleiner als in den tonreichen Zonen. Als Barriere stellt die USM somit eine heterogene Abfolge dar, in der die entscheidenden Parameter räumlich stark variieren. Die Radionuklidenausbreitung dürfte bevorzugt entlang der Sandsteine erfolgen, so dass das gute Sorptionsvermögen der tonigen Partien nur von untergeordneter Bedeutung ist. Der heterogene Aufbau macht eine umfassende und belastbare Modellierung und Quantifizierung der Barrierenwirkung der USM schwierig.

Die Erkundung eines Standortgebietes in der USM ist nur möglich, wenn es mittels Seismik und Bohrungen gelingt, die lithofaziellen Verhältnisse der USM und insbesondere die Verbreitung der Sandsteinabfolgen grossräumig zu erfassen. Die heute vorliegenden Explorationsmethoden sind dazu nicht in der Lage. Wie Beispiele zeigen, ist eine räumliche Korrelation der Sandsteinrinnen auch mittels mehrerer Bohrungen auf engem Raum nicht möglich. Die Explorierbarkeit der USM wird deshalb als problematisch beurteilt.

Obwohl das Molassebecken wiederholt auf mögliche Kohlenwasserstoffe (Erdöl/Erdgas) oder Mineralwasservorkommen hin untersucht wurde, sind grössere Funde selten und Einzelfälle geblieben. Bei der Ausscheidung potenzieller USM Gebiete müssten mögliche Interessenskonflikte frühzeitig geklärt werden.

Der Bau und die Erschliessung eines geologischen Tiefenlagers in der USM stellen technisch keine ungewöhnliche Herausforderungen dar und sind daher machbar. Erfahrungen aus dem angesprochenen Tiefenbereich liegen aber kaum vor.

Schlussfolgerungen

Die von der Nagra vorgenommene Beurteilung der im bevorzugten geologisch-tektonischen Grossraum vorkommenden drei Wirtgesteinsoptionen Kristallin, Opalinuston und Untere Süsswassermolasse ist nach Ansicht der HSK nachvollziehbar und steht im Einklang mit den über rund 30 Jahre hinweg schrittweise erarbeiteten geologischen Erkenntnissen. Die für die Evaluation möglicher Gebiete und Wirtgesteine herangezogenen sicherheitstechnischen Kriterien sind korrekt gewählt und tragen den Vorgaben der Behörden Rechnung.

Gesamthaft gesehen bietet der Opalinuston bezüglich hydraulischer und geochemischer Barrierenwirkung, Explorierbarkeit und Charakterisierbarkeit sehr günstige Voraussetzungen für die geologische Tiefenlagerung hochaktiver Abfälle. Demgegenüber weisen die beiden anderen Wirtgesteinsoptionen Kristallin und Untere Süsswassermolasse wegen ihrer inhärenten Heterogenität und der damit verbundenen schwierigen Charakterisier- und Explorierbarkeit wesentlich ungünstigere Bedingungen auf. Die Barrierenwirkung dieser beiden Gesteine ist deutlich geringer.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Deutschland.
- Allia V. (1996): Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Dissertation an der Universität Basel.
- Andra (2005): Dossier 2005 Argile – Synthèse: Évaluation de la faisabilité du stockage géologique en formation argileuse. Rapport de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Châtenay-Malabry, France.
- Appel D., Habler W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung, Phase 1 : Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit. AkEnd-Bericht, BfS-Bestellnummer 8377-9-6.
- 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. SKB TR-02-24, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Schweden.
- Basler & Hofmann (1992): Geothermische Daten der Nordschweiz, HSK-Expertenbericht.
- Becker A. (2000): The Jura Mountains —an active foreland fold-and-thrust belt? *Tectonophysics* 321, 381–406.
- Berger J.P. (1985): La transgression de la molasse marine supérieure (OMM) en Suisse occidentale. *Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen* A5, 1–208.
- Berger J.P. (1992). Correlative chart of the European Oligocene and Miocene: applications to the Swiss Molasse Basin. *Eclogae geologicae Helvetiae* 85, 573– 609.
- Berger J.P. (1996): Cartes paléogéographiques-palinspastiques du bassin molassique suisse (Oligocène inférieur–Miocène moyen). *Neues Jahrbuch Geologischer und Paläontologischer Abhandlungen* 202, 1– 44.
- Berger J.P., Reichenbacher B., Becker D., Grimm M., Grimm K., Picot L., Storni A., Pirken-seer C., Derer C., Schaefer A. (2005): Paleogeography of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB) from Eocene to Pliocene. *International Journal of Earth Sciences* 94, 697-710.
- BFE (2007): Sachplan Geologische Tiefenlager – Entwurf Konzeptteil. Version 11. Januar 2007.
- Bitterli-Dreher P. (2007): Untere Süsswassermolasse: Geologische Grundlagen und Untersuchungsergebnisse, HSK-Expertenbericht, März 2007.
- Bridge J.S. (2003): *Rivers and Floodplains*, Blackwell Publishing, Malden, Massachusetts, USA.
- BWG (2005): Tektonische Karte der Schweiz 1 :500'000. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, ISBN 3-906723-39-9.

-
- Cederbom C.E., Sinclair H.D., Schlunegger F., Rahn M.K. (2004): Climate-induced rebound and exhumation of the European Alps. *Geology* 32, 709-712.
- Diebold P. (1987): Geologische Resultate der reflexionsseismischen Untersuchungen der Nagra in der Nordschweiz. *Nagra informiert* 9, 23-33.
- Diem B. (1986): Die Untere Meeresmolasse zwischen der Saane (Westschweiz) und der Ammer (Oberbayern). *Eclogae geologicae Helvetiae* 79, 493-559.
- Emch & Berger (2007): Review Optionenbericht NTB 05-02: bautechnische Machbarkeit der USM. HSK-Expertenbericht, Februar 2007.
- Fidelibus C., Löw S. (2007): Groundwater flux through radioactive waste repository in the USM West. ETH Report 3465/54 bzw. HSK-Expertenbericht, Januar 2007.
- Füchtbauer H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine* (4. Auflage) - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Giamboni M., Wetzel A., Nivière B., Schumacher M. (2004): Plio-Pleistocene folding in the southern Rhinegraben recorded by the evolution of the drainage network (Sundgau area, northwestern Switzerland and France). *Eclogae geologicae Helvetiae* 97, 17-31.
- Häring M.O. (1993): Rohstoffverhältnisse. Mögliche Kohlenwasserstoff- und Kohlevorkommen im Untersuchungsgebiet Nördlich Lägern – Zürcher Weinland. Nagra interner Bericht.
- Hölker A. (2006): Lower Freshwater Molasse - Stochastic Modelling of Hydraulic Conductivity. HSK-Expertenbericht, Juli 2006.
- Hölker A., Graf R. (2004): Explorierbarkeit der USM mit 3D-Seismik. Nagra Arbeitsbericht.
- Homewood P., Allen P.A., Williams G.D. (1986): Dynamics of the Swiss Molasse Basin. In: Allen P.A., Homewood P. (eds.): *Foreland Basins. Special Publications of the international Association of Sedimentologists* 8, 199-217.
- HSK-AN-5262: Entsorgungsnachweis: Etappe auf einem langen Weg. Historischer Abriss der bisherigen Entscheidungen und Tätigkeiten im Hinblick auf die geologische Tiefenlagerung der hochaktiven Abfälle in der Schweiz. HSK-Aktennotiz, August 2005.
- HSK-AN-6252: Neubestimmung der Erdbebengefährdung an den Kernkraftwerkstandorten in der Schweiz (Projekt PEGASOS). HSK-Aktennotiz, Juni 2007.
- HSK 23/28: Gutachten zum Projekt Gewähr 1985 der Nationalen Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, September 1986.
- HSK 23/29: Technischer Bericht zum Gutachten über das Projekt Gewähr 1985, September 1986.
- HSK 23/34: Stellungnahme zur Sedimentstudie der Nagra (NTB 88-25), April 1990.
- HSK 23/57: Entsorgungsnachweis für HAA/LMA – Option Endlager im Opalinuston, Beurteilungskonzept für den Standortnachweis, Januar 1999.

- HSK 23/62: Kurzer Überblick über das Auswahlverfahren eines Sedimentstandortes für die Endlagerung hochaktiver Abfälle, April 2001.
- HSK 23/73: Stellungnahme zur Sicherheitsanalyse Kristallin-I der NAGRA, Juli 2004.
- HSK 33/001: Sachplan geologische Tiefenlager - Beschreibung und Anwendung der sicherheitstechnischen Kriterien für die Standortevaluation, Entwurf Juni 2006.
- HSK 35/99: Gutachten zum Entsorgungsnachweis der Nagra für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle (Projekt Opalinuston), August 2005.
- HSK-R-21: Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle. HSK-Richtlinie, November 1993.
- Keller B. (1989): Fazies und Stratigraphie der Oberen Meeresmolasse (Unteres Miozän) zwischen Napf und Bodensee. Dissertation, Universität Bern.
- Keller B. (1992): Hydrogeologie des schweizerischen Molasse-Beckens: Aktueller Wissensstand und weiterführende Betrachtungen. *Eclogae geologicae Helveticae* 85, 611-651.
- Küpfer T. (2005): Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse. Nagra Arbeitsbericht.
- Mazurek M., Hurford A.J.H, Leu W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analyses. *Basin Research* 18, 27-50.
- Meier B. (1994a): Untere Süsswassermolasse des zentralen und östlichen Mittellandes: Regionale Interpretation bestehender Seismik und petrophysikalische Analyse von Fremd- und Eigenbohrungen. Nagra Interner Bericht.
- Meier B. (1994b): Untere Süsswassermolasse des westlichen Mittellandes: Regionale Interpretation bestehender Seismik und petrophysikalische Analyse von Fremdbohrungen. Nagra Interner Bericht.
- Miall A.D. (1985): Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Science Reviews* 22, 261-308.
- Monnier F. (1982): Thermal diagenesis in the Swiss molasse basin: implications for oil generation. *Canadian Journal of Earth Sciences* 19, 328-342.
- Mosar J. (1999): Present-day and future tectonic underplating in the western Swiss Alps: reconciliation of basement/wrench-faulting and décollement folding of the Jura and Molasse basin in the Alpine foreland. *Earth and Planetary Science Letters* 173, 143-155.
- Naef H. (1995): Kristallin Nordschweiz: kritische Beurteilung der geologischen Datengrundlagen im Gebiet zwischen Vorwald- und Eggberg-Störung, Nagra Interner Bericht, Dezember 1995.
- Nagra (2004): Probabilistic Seismic Hazard Analysis for Swiss Nuclear Power Plant Sites (PEGASOS Project), Final Report, July 2004.

-
- Nold M. (1992): Pilotstudie USM – Möglichkeiten und Grenzen der Seismik bei der Abgrenzung von faziellen Architektur-Elementen in der Unteren Süsswassermolasse. Nagra Interner Bericht.
- NTB 84-34: Die Kernbohrung Beznau. Nagra Technischer Bericht, 1991.
- NTB 85-53: The eastern Jura: Relations between thin skinned and basement tectonics, local and regional. Nagra Technischer Bericht, 1985.
- NTB 88-01: Applied isotope hydrogeology – A case study in Northern Switzerland. Nagra Technischer Bericht, 1991.
- NTB 88-07: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Tertiär- und Malm-Aquifere. Nagra Technischer Bericht, 1990.
- NTB 88-25: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung langlebiger radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz, Text- und Beilagenband, Nagra Technischer Bericht, 1988.
- NTB 89-02: Geochemical database for the sediment study – Intermediate report 1988. Nagra Technischer Bericht, 1990.
- NTB 90-04: Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz – Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen. Nagra Technischer Bericht, 1991.
- NTB 90-41: Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse und ihre Beziehung zur Diagenese und den petrophysikalischen Eigenschaften am Beispiel der Bohrung Langenthal. Nagra Technischer Bericht, 1990.
- NTB 91-15: Evaluation of exploration strategies for hydrogeologic characterization of a repository area in the Opalinus clay and lower Freshwater Molasse. Nagra Technischer Bericht, 1992.
- NTB 91-19: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1990: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1988 bis 1990 und Konzept für das weitere Vorgehen. Nagra Technischer Bericht, 1991.
- NTB 91-30: Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. Nagra Technischer Bericht, 1992.
- NTB 93-01: Geology and Hydrogeology of the Crystalline basement of Northern Switzerland, Synthesis of Regional Investigations 1981-1993 within the Nagra Radioactive Waste Disposal Programme. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 93-09: Kristallin-I: Gesamtsynthese der regionalen Untersuchungen zur Endlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 93-12: Geology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland and Derivation of Geological Input Data for Safety Assessment Models, Nagra Technischer Bericht, 1998.

- NTB 93-22: Kristallin-I: Safety Assessment Report. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 94-10: Sedimentstudie – Zwischenbericht 1993: Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. Nagra Technischer Bericht, 1994.
- NTB 01-04: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive Abfälle sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-05: Project Opalinus Clay – Safety Report, Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht, 2002.
- NTB 02-06: Project Opalinus Clay: Models, Codes and Data for Safety Assessment - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 02-19: Far-Field Sorption Data Bases for Performance Assessment of a High-Level Radioactive Waste Repository in an Undisturbed Opalinus Clay Host Rock. Nagra Technischer Bericht, 2003.
- NTB 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. Nagra Technischer Bericht, 2005.
- Nussbaum C., Bossart P. (2004): Compilation of K-values from packer tests in the Mont Terri rock laboratory. Technical Note 2005-10.
- Picot L., Becker D., Lapaire F., Ustaszewski K., Hug W.A., Berger J.-P. (2005): Sédimentologie, paléontologie et paléoenvironnements côtiers de la région de Porrentruy (Sud-Rhénan, Paléogène, Jura, Suisse): Implications géodynamiques. *Eclogae geologicae Helvetiae* 98, 281-296.
- Polley M. (1997): 2D-Seismische Messungen 1996 Nord Aargau: Datenverarbeitung. Nagra Interner Bericht, Juni 1997.
- Schärli U., Rybach L. (2002): Erstellung einer aktuellen Karte der Temperaturgradienten und des Wärmeflusses der Nordschweiz. Nagra Interner Bericht.
- Schegg R. (1992): Thermal maturity of the Swiss Molasse Basin: Indications for paleogeothermal anomalies? *Eclogae geologicae Helvetiae* 85, 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. Geological Society of London Special Publication 141, 137-155.
- Schlatter A. (1999): Neotektonische Untersuchungen in der Nordostschweiz: Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementlinien und Übersicht über die Ergebnisse der geodätischen Messungen. Nagra Interner Bericht.
- Schlunegger F., Matter A., Burbank D.W., Klaper E.M. (1997): Magnetostratigraphic constraints on relationships between evolution of the central Swiss Molasse basin and Alpine orogenic events. Geological Society of America Bulletin 109, 225-241.
- Strunck P., Matter A. (2002): Depositional evolution of the western Swiss Molasse. *Eclogae geologicae Helveticae* 95, 197-222.
- Timar-Geng Z., Fügenschuh B., Wetzel A., Dresmann H. (2006): The low-temperature thermal history of northern Switzerland as revealed by fission track analysis and inverse thermal modelling. *Eclogae geologicae Helveticae* 99, 255-270.
- Trümpy, R. (1980): Geology of Switzerland – a guide book. Part A: An outline of the geology of Switzerland. Wepf & Co, Basel, Switzerland.
- Weber H.P., Albert W. (1997): 2D-Seismik Kristallin 1996 Nord Aargau: Geologische Interpretation. Nagra Interner Bericht, September 1997.
- Wetzel A., Allia V. (2003): Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. *Eclogae geologicae Helveticae* 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.
- Wetzel A. (2005): Beurteilung der sedimentologischen und lithofaziellen Verhältnisse des Opalinustons im Zürcher Weinland. In HSK 35/98: Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra: Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit. Expertenbericht zuhanden der HSK, C1-C6.
- Wildi W. (1984): Isohypsenkarte der quartären Felstäler in der Nord- und Ostschweiz mit kurzen Erläuterungen. *Eclogae geologicae Helveticae* 77, 541-551.
- Willett S.D., Schlunegger F., Picotti V. (2006): Messinian climate change and erosional destruction of the central European Alps. *Geology* 34, 613-616.
- 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.

HSK 35/108

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), CH-5232 Villigen-HSK
Telefon +41(0)56 310 38 11, Fax +41(0)56 310 39 95 und +41(0)56 310 39 07, www.hsk.ch