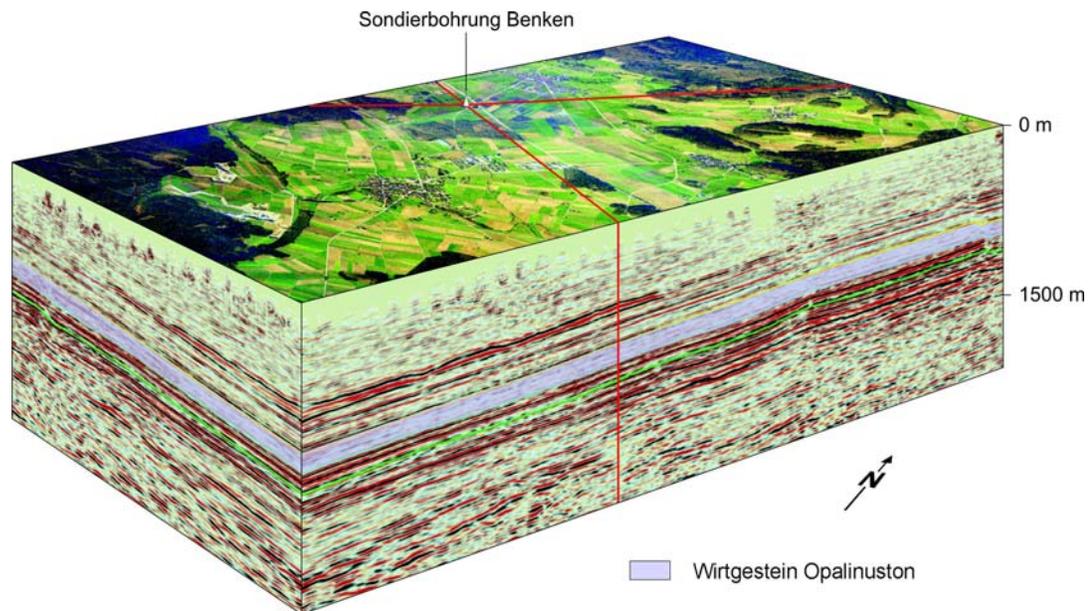


Projekt Opalinuston  
Zürcher Weinland der Nagra  
Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen  
und der bautechnischen Machbarkeit



Expertenbericht zuhanden der  
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK)

Februar 2005

# INHALT

Zusammenfassung.....	1
Executive Summary.....	2
Résumé.....	3
Schlussfolgerungen der KNE.....	4-8
Beurteilung der fachspezifischen Themen:	
A) Beurteilung der tektonischen Situation des Zürcher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes <b>Prof. Albrecht Steck</b> .....	A1-A15
B) Beurteilung der plio-/pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Zürcher Weinlandes und der Erosionsszenarien <b>Dr. Hanspeter Funk</b> .....	B1-B12
C) Beurteilung der sedimentologischen und lithofaziellen Verhältnisse des Opalinustones <b>Prof. Andreas Wetzel</b> .....	C1-C6
D) Beurteilung der hydrogeologischen-hydrochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen <b>Prof. Hans-Rudolf Pfeifer</b> .....	D1-D7
E) Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen <b>Dr. Rolf Kipfer</b> .....	E1-E15
F) Beurteilung der hydro-mechanischen Eigenschaften und Prozesse im Opalinuston <b>Prof. Simon Löw</b> .....	F1-F11
G) Review of geochemical near-field model concepts and data <b>Dr. Annette Johnson</b> .....	G1-G12
H) Beurteilung der hydraulischen und felsmechanischen Datensätze, der thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse, der bau- technischen Machbarkeit und der Umsetzung des EKRA-Konzeptes <b>Dr. Peter Hufschmied</b> .....	H1-H20

Mitgliederverzeichnis der KNE

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Bericht nimmt die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) zu den erdwissenschaftlichen und bautechnischen Aspekten des Projektes Opalinuston Stellung, mit welchem die Nagra den Nachweis der sicheren Entsorgung abgebrannter Brennelemente (BE), verglaster hochaktiver Abfälle (HAA) und langlebiger mittelaktiver Abfälle (LMA) in einem geologischen Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes aufzeigt.

Die KNE kommt nach Prüfung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen zum Schluss, dass der Standortnachweis mit dem Projekt Opalinuston erbracht ist. Die erdwissenschaftlichen Annahmen, welche die Nagra bei der Entwicklung der Szenarien für den Nachweis der Langzeitsicherheit getroffen hat, basieren auf sorgfältig zusammengetragenen und nachvollziehbaren Daten. Diese wurden entsprechend dem Stand der wissenschaftlichen Kenntnisse ausgewertet und interpretiert. Wo eine ausreichende Datenbasis heute noch fehlt, hat die Nagra konservative Annahmen getroffen. Die Dokumente der Nagra stellen eine gute Synthese von selbst erarbeiteten Erkenntnissen und Literaturdaten dar.

Die Tektonik des Zürcher Weinlandes wurde von der Nagra sorgfältig und umfassend untersucht. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes, wo der Opalinuston in einer Tiefe von 600 bis 750 m liegt, lässt sich ein rund 15 km<sup>2</sup> grosser Bereich mit ruhigen Lagerungsverhältnissen abgrenzen. Die Daten über die geologische Entwicklungsgeschichte lassen keine Vorgänge erkennen, die in der nächsten Million Jahre eine Erosion der Barrieregesteine des Tiefenlagers in diesem Gebiet bewirken könnten.

Der Opalinuston ist im Zürcher Weinland recht einheitlich ausgebildet und um 110 m mächtig. Die Gesteinseigenschaften des Opalinustons sind hinsichtlich seiner Eignung zur Lagerung radioaktiver Abfälle als günstig zu beurteilen. Die Dominanz der feinen Korngrössen und der hohe Tongehalt führen zu einer sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeit und bestimmen das hohe Einschlussvermögen des Opalinustons. Hydrochemische Untersuchungen an aus Bohrkernen extrahierten Porenwasserproben zeigen, dass es sich bei den Porenwässern im Opalinuston um schichtgebundenes, geochemisch überprägtes Formationswasser handelt, welches über Millionen von Jahren hinweg eingeschlossen blieb. Dieses Wasser ist durch diffusive Ionenwanderung überprägt und widerspiegelt in seiner chemischen Zusammensetzung noch Anteile des ursprünglichen Meerwassers, in dem die Sedimente vor rund 180 Mio Jahren abgelagert wurden.

Die KNE hat das Konzept und die bautechnische Machbarkeit des geologischen Tiefenlagers überprüft. Sie kommt zum Schluss, dass der Bau des Lagers in der vorgeschlagenen Tiefenlage von 650 m unter den felsmechanischen Gegebenheiten im Opalinuston machbar ist. Hinsichtlich Anordnung der Zugangsbauwerke, Vorgehensweise beim Schachtbau und Dimensionierung der Querschnitte der Untertagebauwerke hat die KNE einige Kritikpunkte und Anregungen, die aber die grundsätzliche Machbarkeit nicht in Frage stellen.

Die KNE hat bei der Überprüfung des Projektes Opalinuston verschiedene offene Fragen formuliert, welche im Rahmen der weiteren Untersuchungen geklärt werden müssen. Offene Fragen ergeben sich vor allem im Zusammenhang mit den Veränderungen, welche im Opalinuston durch die baulichen Eingriffe und die durch die Abfalleinlagerung induzierten chemischen und physikalischen Prozesse ausgelöst werden. Diese Fragen müssen im Rahmen eines untertägigen Felslabors geklärt werden.

## Executive Summary

In this report the Commission of Nuclear Waste Management (KNE) assesses the geological and engineering aspects of the project Opalinus Clay, in which Nagra demonstrates the post-closure safety of geological disposal of spent fuel (SF), vitrified high-level wastes (HLW) and intermediate-level wastes (ILW) in a repository in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland in northern Switzerland.

After in-depth examination of the geological database, KNE concludes that the demonstration of a suitable geological site for final disposal of SF, HLW and ILW in the Opalinus Clay of the Zürcher Weinland has been achieved. The geological assumptions Nagra uses for the assessment of long-term safety are based on data that have been carefully collected and interpreted. KNE acknowledges that Nagra interpreted the geological data correctly and adequately using state-of-the-art techniques. In case of lacking information, Nagra has used conservative or worst-case assumptions. The information documented by Nagra represents a good synthesis of field, laboratory and literature data.

The tectonic situation of the Zürcher Weinland was examined in great detail by Nagra. In the centre of the investigated region, where the Opalinus Clay occurs at 600 to 750 meters depth, the 3D-seismic data confirm its undisturbed stratification in an area of about 15 km<sup>2</sup>. Analysis and interpretation of the available information on the geological evolution provides no indication that erosion would expose the confining units above the Opalinus Clay within the next million years.

The Opalinus Clay in the Zürcher Weinland is quite homogeneous and about 110 m thick. The properties of this rock are judged to be favourable for a repository. The dominance of the fine grain size and the high clay content indicate a very low hydraulic conductivity suitable for the isolation of radioactive waste. Pore water extracted from drill-core samples is saline and has remained trapped for millions of years. Its geochemical composition has only changed as a result of ion diffusion and it still contains seawater salts that originate from its marine deposition some 180 million years ago.

KNE has examined the engineering concept the construction of the repository in the Opalinus Clay at a depth of 650 m is based on, and concludes that it is technically feasible. With regard to the layout of the access tunnel and to the construction of the shaft, KNE has pointed to some critical issues concerning the dimensions of the tunnel and has made suggestions, which however do not question the feasibility of the project.

KNE has raised a number of open questions that must be clarified within the framework of further investigations. These questions in particular relate to changes in the properties of the Opalinus Clay that may be induced by the construction process as well as by physical and chemical changes caused by the disposal of radioactive wastes. These questions must be addressed by in-situ test investigations in a future underground rock laboratory.

## Résumé

Dans le présent rapport, la Commission de Gestion des Déchets Nucléaires (KNE) se prononce sur les aspects géologiques et technique du projet Argiles à Opalinus, dans lequel la Nagra démontre la faisabilité d'un stockage sûr des assemblages combustibles radioactifs usés (AC), des déchets de haute activité vitrifiés (DHA) et des déchets de moyenne activité à vie longue (DMAL), dans un dépôt géologique profond au sein des Argiles à Opalinus du Weinland zürichoïse, au nord de la Suisse.

Après examen approfondi des données géologiques, la KNE arrive à la conclusion que l'existence d'un site géologique approprié pour un stockage final de AC, DHA et DMAL au sein des Argiles à Opalinus du Weinland zürichoïse est démontrée. Les hypothèses géologiques faites par la Nagra pour l'évaluation de la sécurité à long terme sont basées sur des données acquises et interprétées de manière soigneuse. La KNE reconnaît le fait que la Nagra interprète les données géologiques de manière correcte selon les règles de l'art en utilisant les dernières connaissances et méthodes de la science. En cas d'informations lacunaires, la Nagra applique systématiquement les hypothèses les moins favorables. La documentation de la Nagra représente une bonne synthèse des données de terrain, de laboratoire et de la littérature.

La situation tectonique du Weinland zürichoïse a été examinée de manière minutieuse par la Nagra. Au centre de la région d'étude, où les Argiles à Opalinus se trouvent à une profondeur de 600 à 750 m, les données de la sismique 3-D confirment une stratification non-perturbée dans une région dont la surface est approximativement de 15 km<sup>2</sup>. L'analyse et l'interprétation de toutes les informations disponibles sur l'évolution géologique n'ont pas mis en évidence un quelconque processus capable, durant le prochain million d'années, de mettre à nu la roche encaissante des Argiles à Opalinus.

L'argile à Opalinus du Weinland zürichoïse est assez homogène et mesure environ 110 m d'épaisseur. Les propriétés de cette roche sont jugées favorables pour un stockage final. La prépondérance des grains fins et un pourcentage élevé de minéraux argileux impliquent une très faible conductivité hydraulique et assurent un colmatage convenable pour une isolation des déchets radioactifs. Les eaux de pore extraites à partir de carottes de forage sont salines et elles sont restées piégées dans l'Argile pendant des millions d'années. La composition géochimique de ces eaux n'a été altérée que par des processus de diffusion ionique et elles contiennent encore des sels marins qui datent de la période de dépôt, voici quelque 180 millions d'années.

La KNE a examiné le concept de la construction du dépôt final au sein des Argiles à Opalinus par 650 m de profondeur. Elle arrive à la conclusion que la construction est techniquement faisable. En ce qui concerne l'agencement du tunnel d'accès et la construction du puits, la KNE a identifié quelques points critiques dans le dimensionnement des ouvrages et elle fait des suggestions de modification, qui toutefois, ne mettent pas en question la faisabilité du projet.

La KNE a soulevé un certain nombre de questions qui doivent être clarifiées dans le cadre de futurs travaux. Ces questions concernent en particulier les changements des propriétés des Argiles à Opalinus, changements qui pourraient être induits par le processus de construction des ouvrages d'une part, et par le dépôt des déchets radioactifs, d'autre part. Ces questions doivent être examinées par des expériences in situ dans un futur laboratoire souterrain.

# Schlussfolgerungen der KNE

## Einleitung

Der Entsorgungsnachweis Opalinuston Zürcher Weinland ist ein Nachweis über die grundsätzliche Machbarkeit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle in einem geologischen Tiefenlager. Er muss aufzeigen, dass das Tiefenlager die Anforderungen der Langzeitsicherheit erfüllt und bautechnisch machbar ist. Ferner muss gezeigt werden, dass ein genügend grosser Gesteinskörper mit den erforderlichen Eigenschaften existiert, so dass der Bau eines Tiefenlagers im besagten Standortgebiet mit Aussicht auf Erfolg in Angriff genommen werden könnte (Standortnachweis).

Die Kommission Nukleare Entsorgung (KNE) ist eine Subkommission der Eidgenössischen Geologischen Kommission. Sie berät die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) in wichtigen erdwissenschaftlichen Fragen der nuklearen Entsorgung. Die Kommission umfasst acht Mitglieder, vornehmlich aus dem Hochschulbereich, welche die verschiedenen in der geologischen Tiefenlagerung relevanten erdwissenschaftlichen Fachdisziplinen abdecken. Im vorliegenden Bericht nimmt die KNE zu den erdwissenschaftlichen und bautechnischen Aspekten des Entsorgungsnachweises Opalinuston Zürcher Weinland Stellung.

## Tektonik, Geodynamik und Erosionsszenarien

Die Tektonik der Nordschweiz wurde von der Nagra sorgfältig und umfassend untersucht. Das Inventar regionaler und lokaler Strukturen wurde aus Oberflächenkartierungen und der Analyse reflexionsseismischer Messungen abgeleitet. Die Reflexionsseismik erlaubt eine hochauflösende Abbildung der Lagerungsverhältnisse der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Im Zentrum des Untersuchungsgebietes der 3-dimensionalen Seismik lässt sich eine Zone von  $3 \times 5$  km mit ruhigen Lagerungsverhältnissen abgrenzen (Hochzone von Benken). Dieses Gebiet wird im Norden durch die Wildensbucher Flexur, im Nordosten durch die Neuhauserstörung und im Süden durch die Flexur von Rafz-Marthalen begrenzt.

Kontinuierliche Messungen des Schweizerischen Erdbebendienstes zeigen, dass das Zürcher Weinland ein seismisch ruhiges Gebiet ist. Die Seismizität nimmt hingegen in Richtung Bodenseeegraben und Schwäbische Alb zu. Die Analyse der Herdflächenmechanismen rezenter Erdbeben im kristallinen Sockel der Nordschweiz bestätigt ein Spannungsfeld, in welchem die kleinste horizontale Hauptspannung ENE-WSW orientiert ist, während die dazu senkrecht stehende grösste horizontale Hauptspannung NNW-SSE ausgerichtet ist. Das von der Nagra betrachtete Langzeitszenarium für die tektonische Entwicklung basiert auf der Annahme eines „anhaltenden alpinen Fernschubes“. Verschiedene Beobachtungen und Daten sprechen eher für ein Ausklingen der alpinen Kompression und deuten an, dass die Hebungen im Alpenvorland als isostatische Ausgleichprozesse zu verstehen sind. Die Nagra hat in der Sicherheitsanalyse das für Hebungs- und Erosionsvorgänge ungünstigere erste Szenarium gewählt. Bei einer Fortführung des Projektes müsste das geodynamische Konzept weiter entwickelt und durch volumetrisch-kinematische Modellansätze ergänzt werden.

Hebung und Erosion sind die wichtigsten geologischen Prozesse, welche die Langzeitsicherheit eines in 650 m Tiefe angelegten geologischen Tiefenlagers massgeblich beeinflussen können. Das Gebiet des Zürcher Weinlandes darf als neotektonisch ruhig

bezeichnet werden. Es hebt sich nach den Untersuchungen der Nagra mit rund 0.1 mm/a oder rund 100 m in 1 Million Jahre. Dieser Wert wurde in weitgehender Übereinstimmung mit drei verschiedenen Methoden und über unterschiedliche Zeiträume ermittelt.

Als Grundlage für die Abschätzung der zukünftigen Erosion hat die Nagra verschiedene Klimaszenarien evaluiert. Die Ansicht der Nagra, dass die Fortsetzung des Eishausklimas das wahrscheinlichste Szenarium für die nächsten 1 Million Jahre ist, kann unterstützt werden. Die zu erwartende flächenhafte Abtragung ist unbedeutend. Die Erosion entlang von Flussläufen kann hingegen 100m erreichen. Die vorliegenden Daten über die Klimageschichte der letzten 2 Millionen Jahren zeigen keinen Prozess, der in den nächsten Million Jahre eine Erosion bis auf die Rahmengesteine des potentiellen Tiefenlagers bewirken könnte. Das Tiefenlager im Opalinuston des Zürcher Weinlandes ist deshalb ausreichend gegen eine Freilegung durch Erosion geschützt. Für eine weitere Absicherung der in den Szenarien gemachten Aussagen wird eine Untersuchung der übertieften Täler im Alpen-Vorland empfohlen.

## **Aufbau und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons**

Der Opalinuston ist im Gebiet der Nordschweiz recht einheitlich ausgebildet und im Zürcher Weinland etwa 110 m mächtig. Er akkumulierte in einem flachen Binnenmeer vor ungefähr 180 Millionen Jahren. In die dunkelgrauen, oft monoton wirkenden Tongesteinen sind dünne Silt- und Feinsandlagen, Kalkbänkchen und Lagen mit Kalk-Konkretionen eingeschaltet, die in ihrer Abfolge eine Gliederung erlauben. Derartige Ablagerungszyklen sind im Kilometer bis 10er-Kilometer-Bereich lateral kontinuierlich verfolgbar, ohne dass sich der tonreiche Charakter des Gesteins ändert. Insgesamt sind die Gesteinseigenschaften des Opalinustons hinsichtlich seiner Eignung zur Lagerung radioaktiver Abfälle als günstig zu beurteilen. Der hohe Tongehalt und die feinen Korngrößen haben geringe hydraulische Durchlässigkeiten zur Folge und bestimmen das günstige Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustons. Wichtig in diesem Zusammenhang sind Gleitfähigkeit der plättchenförmigen Tonminerale, die Dehnbarkeit des Gefüges bei Entlastung und das Quellverhalten der Tonminerale bei Wasserzufuhr.

Nach der Ablagerung wurde der Opalinuston von jüngeren Sedimenten überlagert, vor rund 100 Millionen Jahren von etwa 1.0 km und vor 10 Millionen Jahren von etwa 1.6 km mächtigen Sedimentschichten. Dabei wurde der Opalinuston bis auf 70 bis 80 °C erwärmt, zusammengedrückt und verfestigt. Heute liegt der Opalinuston im Zürcher Weinland in einer Tiefe von 538-652 m (Bohrung Benken) und weist eine Gebirgstemperatur von 32-39 °C auf.

## **Hydrogeologie und Hydrochemie**

Die geologischen Formationen im Zürcher Weinland zeichnen sich durch eine ruhige, annähernd horizontale Lagerung aus, bestehend aus wasserdurchlässigen (Aquiferen) und sehr geringdurchlässigen Schichten (Aquitarden). Zwischen dem Aquifer des oberen Malms und des Sandsteinkeupers bilden die Schichten des unteren Malms, des Opalinustons, des Lias und des oberen Keupers zusammen ein System von vorwiegend tonig-mergeligen Aquitarden mit einer Gesamtmächtigkeit von rund 270 m, das die Nagra unter den Begriffen Wirtgestein und obere und untere Rahmengesteine zusammenfasst. Unterhalb dieser Abfolge folgen in grösserer Tiefe die Aquifere des Muschelkalkes und des Buntsandsteins.

Hydrochemische und isotopengeochemische Untersuchungen an aus Bohrkernen extrahierten Porenwasserproben zeigen, dass es sich bei den Porenwässern im Opalinuston und in den Rahmengesteinen um schichtgebundenes und geochemisch überprägtes Formationswasser handelt, welches über Millionen von Jahren hinweg eingeschlossen blieb und mit den umliegenden Schichten hauptsächlich diffusiv durch Ionenwanderung ausgetauscht hat. Die Zusammensetzung der Porenwässer zeigt, dass die charakteristische Zeit für den diffusiven Austausch zwischen den Porenwässern und den angrenzenden Aquiferen im Bereich zwischen 0.5 und 2 Millionen Jahren liegt. In den darüber und darunter liegenden regionalen Aquiferen des Malms, des Muschelkalkes und des Buntsandsteins ist hingegen ein viel schnellerer advektiver Transport von jüngeren, teils eiszeitlichen Wässern zu beobachten.

Die Wasserdurchlässigkeit des Opalinustons ist trotz der hohen Porosität von rund 12% mit K-Werten zwischen  $10^{-13}$  bis  $10^{-14}$  m/s äusserst gering. Die höheren Werte gelten für den Transport parallel, die tieferen Werte senkrecht zur Schichtung. Die hydraulischen Tests in den Bohrungen Benken, Schafisheim und Riniken sowie Messungen im Felslabor Mont Terri zeigen, dass im Opalinuston tektonische Strukturen keine signifikant höhere Durchlässigkeit aufweisen als das ungestörte Nebengestein. Aufgrund aller heute vorliegenden Kenntnisse kann davon ausgegangen werden, dass in einer Endlagertiefe von über 600 m keine oder nur eine geringe Erhöhungen der Durchlässigkeiten von tektonischen Trennflächen gegenüber dem intakten Nebengestein zu erwarten sind. Diese Aussage muss bei Fortführung des Projektes durch weitere Messungen abgesichert werden.

Für die Hauptaquifere über und unter den Rahmengesteinen sind Potenzialmessungen aus Grundwasserständen und Bohrlochtests vorhanden, aus welchen die Nagra hydraulische Druckhöhen-Karten erstellt und die Abflussrichtungen und die möglichen Exfiltrationszonen der Tiefengrundwässer ermittelte. Malm: Richtung Neuhausen-Rheinfall, Sandsteinkeuper: Richtung Klettgau-Wutach und Muschelkalk: Richtung Koblenz-Waldshut (Rhein), wobei Abflüsse in Richtung Neckar mit viel längeren unterirdischen Fließzeiten nicht auszuschliessen sind.

Aus den Resultaten der Nagra zur Hydrogeologie und Hydrochemie ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Eigenschaften des Opalinustons für den Nachweis der Langzeitsicherheit geeignet sind. Die sehr geringen Durchlässigkeiten des Opalinustons und die langen Verweilzeiten der Porenwässer weisen auf ein hohes Einschlussvermögen des Opalinustones hin.

### **Chemische und thermisch-hydraulisch-mechanische Prozesse im Tiefenlager und seiner Umgebung**

Das Konzept der geologischen Tiefenlagerung beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens, Einschliessens und Verzögerns. Die Sicherheit wird dabei durch ein gestaffeltes Mehrfachbarrierensystem technischer und geologischer Barrieren gewährleistet. Die Freisetzung von Radionukliden wird vorerst durch die innerste technische Barriere (Behälter) verhindert und danach durch Wechselwirkung mit den nächstfolgenden technischen und natürlichen Barrieren (Geosphäre) begrenzt und verzögert. Diese Verzögerung erfolgt durch chemische und physikalische Prozesse.

Die geochemischen Verhältnisse innerhalb der technischen Barrieren (Nahfeld) spielen eine wichtige Rolle bezüglich der Freisetzung von Radionukliden. Der Löslichkeit von Radionukliden im Porenwasser kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Je tiefer die

Löslichkeit, desto stärker wird die Freisetzung von Radionukliden aus der Abfallmatrix begrenzt. Ein weiterer wichtiger Prozess ist die Sorption von Radionukliden im Nahfeld an Bentonit oder Zement. Sorption bindet die Radionuklide an Feststoffe und verzögert so deren Ausbreitung im Porenwasser. Die chemischen Verhältnisse im Nahfeld der hochaktiven Abfälle müssen von jenen der langlebigen mittelaktiven Abfälle unterschieden werden:

- Im Falle der abgebrannten Brennelemente (BE) und der hochaktiven Abfälle (HAA) wird die Nahfeldchemie durch die grosse Menge an Stahlbehältern dominiert. Der in den Porenräumen des Bentonits ursprünglich vorhandene Luftsauerstoff ( $O_2$ ) ist nach kurzer Zeit verbraucht, die Korrosion der Behälter erfolgt daraufhin anaerob und produziert Fe(II) sowie Wasserstoffgas ( $H_2$ ). Das dominierende Redoxpaar ist Fe(III)/Fe(II); dessen Löslichkeit kontrolliert das Redoxpotential. Ein tiefes Redoxpotential reduziert wiederum die Löslichkeit der Radionuklide.
- Die Geochemie des Nahfeldes der langlebigen mittelradioaktiven Abfälle (LMA) wird hauptsächlich durch die grossen Mengen an Zement bestimmt. Zement bindet viele der Radionuklide (Sorption) und sorgt für ein günstiges chemisches Milieu.

Nach Ansicht der KNE sind die geochemischen Vorgänge im Nahfeld sorgfältig und nach dem Stand der Wissenschaft untersucht und mit Modellrechnungen quantifiziert worden. Dort wo thermodynamische Daten fehlten oder keine Experimente zum Sorptionsverhalten vorlagen hat die Nagra konservative Annahmen getroffen. Im Hinblick auf spätere Forschungsarbeiten empfiehlt die KNE, die Lücken in den thermodynamischen Datensätzen durch internationale Forschungsprojekte zu schliessen. Die Untersuchungen zum Sorptionsverhalten der Radionuklide sind weiterzuführen und zu vervollständigen. Bezüglich des durch Korrosion gebildeten Wasserstoffgases wird empfohlen, dessen Einfluss auf die chemischen Reaktionsvorgänge in die Betrachtungen miteinzubeziehen. Für zukünftige Modellrechnungen des LMA-Zement-Systems empfiehlt die KNE, statt mit einfachen Mischungstank-Modellen die Quellterme unter Berücksichtigung der Diffusionsprozesse zu modellieren.

Die Wärmeproduktion der BE und HAA im Tiefenlager verursacht eine Erwärmung des Wirtgesteins und seiner Umgebung. Diese thermische Phase dauert mehrere hundert bis tausend Jahre. Dabei erhöht sich die Temperatur im Opalinuston zusätzlich zum bereits herrschenden geothermischen Temperaturfeld um maximal 30 bis 50 °C. Die mit dieser Erwärmung verbundene Ausdehnung des Gesteins führt zu einer mehrere km breiten, sehr flachen Aufwölbung des Gebirges bis zur Geländeoberfläche, die in der Grössenordnung von cm (Randbereich) bis dm (Zentrum) liegt. Thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelte Berechnungen der KNE zeigen, dass sich dadurch zwar die Spannungsverhältnisse im Opalinuston verändern, jedoch nicht mit der Bildung von Rissen oder Klüften zu rechnen ist und die Barriereneigenschaften des Opalinustons nicht beeinträchtigt werden.

Im Gegensatz zu den Eigenschaften des Opalinustones im Fernfeld wurden für das Nahfeld des Tiefenlagers eine Anzahl offener Fragen bezüglich Eigenschaften und Verhalten der Bentonit-Barriere und bezüglich der Prozesse im Grenzbereich zum Gestein erkannt (hydraulisch-mechanisch-thermisch gekoppelte Prozesse, Kompaktions- und Quellverhalten, Verformungsmoduli, Durchlässigkeitsverhältnisse). Diese Fragen müssen im Rahmen eines untertägigen Felslabors geklärt und die Datenbasis vervollständigt werden.

## **Bautechnische Machbarkeit**

Das vorgeschlagene Layout der Anlage beurteilt die KNE als zweckmässig. Es enthält entsprechend dem Planungsstand einer Machbarkeitsstudie alle benötigten Bauwerksbestandteile. Die Konzeptanforderungen des neuen Kernenergiegesetzes bezüglich Vorkehrungen zur Überwachung oder Rückholung der Abfälle werden eingehalten. Das geologische Tiefenlager enthält alle Elemente (Hauptlager, Pilotlager, Testbereiche) und Funktionen (sicherer Einschluss mittels Mehrfachbarrierensystem), wie sie in der Kernenergieverordnung gefordert werden. Optimierungsansätze bestehen nach Ansicht der KNE in der Linienführung des Zugangstunnels und in einer Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht auf verschiedenen Tiefenlagen. Beim Pilotlager wird das Auffahren eines dritten Stollens empfohlen, um im Zuge der späteren Überwachung mögliche Überlagerungseffekte besser beurteilen zu können.

Die Dimensionen der von der Nagra vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte sind für die Bau- und Betriebsphase eher knapp bemessen. Diese sollten in einer nachfolgenden Planungsphase nochmals evaluiert werden. Die gewählten Bauverfahren für Ausbruch, Schutterung und Sicherung sind weitestgehend zweckmässig und machbar. Die Zweckmässigkeit der Schachterstellung mit dem Raisedrillverfahren sollte in einer späteren Planungsphase überprüft werden. Die zu Grunde gelegten Bauzeiten für das vorliegende Layout erscheinen realistisch und machbar.

Die Arbeitssicherheit ist in allen Bau- und Betriebsphasen gewährleistet. Bei der Realisierung des Lagers sind für die jeweiligen Bauetappen die Flucht- und Rettungsmöglichkeiten in den Vortrieben in den nachfolgenden Planungsphasen noch detaillierter aufzuzeigen, indem beispielsweise die Standorte der Rettungscontainer im Untertagebauwerk aufgezeigt werden.

Zusammenfassend kann die bautechnische Machbarkeit des vorgelegten Konzeptes für ein geologisches Tiefenlager im Opalinuston auf einer mittleren Tiefe von 650 m unter Geländeoberkante im Zürcher Weinland bestätigt werden. Die aufgeworfenen Fragen und Kritikpunkte können im Rahmen der nachfolgenden Bearbeitungsstufen gelöst werden. Der vorgelegte Entsorgungsnachweis enthält allerdings keine Aussagen zur Abhängigkeit der bautechnischen Machbarkeit von der Tiefe unter der Geländeoberkante. Die hier beurteilten Angaben sind deshalb nur für die spezifischen Daten des vorgeschlagenen Standortgebietes gültig.

Beurteilung der fachspezifischen Themen

# Beurteilung der tektonischen Situation des Zürcher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes

Prof. Albrecht Steck

---

## Einleitung

Bei der Beurteilung der tektonischen Situation des Zürcher Weinlandes und des geodynamischen Konzeptes stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Ist die Tektonik der Nordschweiz genügend untersucht und von der Nagra dokumentiert?
- Entsprechen das von der Nagra dargestellte geodynamische Modell der känozoischen alpinen Gebirgsbildung sowie die abgeleiteten Langzeitszenarien dem heutigen Fachwissen und sind sie nachvollziehbar?
- Basiert das geodynamische Modell auf einer ausreichenden Datenbasis und einem genügenden Verständnis der Prozesse oder sind bedeutende Lücken vorhanden, welche den Nachvollzug der Langzeitszenarien in Frage stellen?
- Sind die von der Nagra für die nächsten 1 Mio. Jahren abgeleiteten Langzeitszenarien realistisch, zu optimistisch oder zu pessimistisch?

## Die tektonische Situation des Zürcher Weinlandes

Die Tektonik und die geodynamische Entwicklung der Nordschweiz sind im NTB 99-08, MÜLLER, NAEF & GRAF 2002 (Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland) ausführlich dokumentiert und beschrieben. Das Inventar regionaler und lokaler tektonischer Strukturen wurde aus der Analyse reflexionsseismischer Messungen und oberflächengeologischer Befunde abgeleitet und ist in den beiden Nagra Technischen Berichten NTB 94-14, NAEF, BIRKHÄUSER & ROTH 1995 (Interpretation der Reflexionsseismik im Gebiet nördlich Lägern-Zürcher Weinland) und NTB 00-03, BIRKHÄUSER, ROTH, MEIER & NAEF 2001 (3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland) dokumentiert. Der vorgelegte umfangreiche reflexionsseismische Datensatz erlaubt eine hochauflösende Abbildung der Lagerungsverhältnisse der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland. Danach lässt sich im Zentrum des 3D-Untersuchungsgebietes (Hochzone von Benken) ein rund 15 bis 20 km<sup>2</sup> grosser Bereich mit praktisch ungestörten Lagerungsverhältnissen abgrenzen. Dieses Gebiet wird im Norden durch die Wildensbucher Flexur, im Nordosten durch die Neuhauserstörung (neogen aktives Strukturelement der Hegau-Bodensee-Grabenzone) und im Süden durch die Flexur von Rafz-Marthalen (Nordrand des Einflusses des alpinen Fernschubes) begrenzt.

Aufgrund der kontinuierlich durchgeführten Messungen des Schweizerischen Erdbebendienstes ist das Zürcher Weinland ein seismisch ruhiges Gebiet. Die Seismizität nimmt hingegen in Richtung Bodensee-Graben und Schwäbische Alb deutlich zu.

Mit Hilfe der Analyse von Herdflächenlösungen rezenter Erdbeben lassen sich unter Verwendung der Inversionsmethode Aussagen über die Orientierung der Hauptspannungsachsen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  ableiten (DEICHMANN et al. 2000). Das rezente Spannungsfeld zeigt dabei im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz für  $\sigma_3$  eine WSW-ENE und für  $\sigma_1$  eine NNW-SSE Richtung. Mit anderen Worten, das Grundgebirge wird in WSW-ENE-Richtung gedehnt, während  $\sigma_1$  die Richtung der alpinen Kompression widerspiegelt (Fig.3.8. in NTB 99-08, DEICHMANN et al. 2000, STANGE & STREHLAU 2002, KASTRUP et al. 2004).

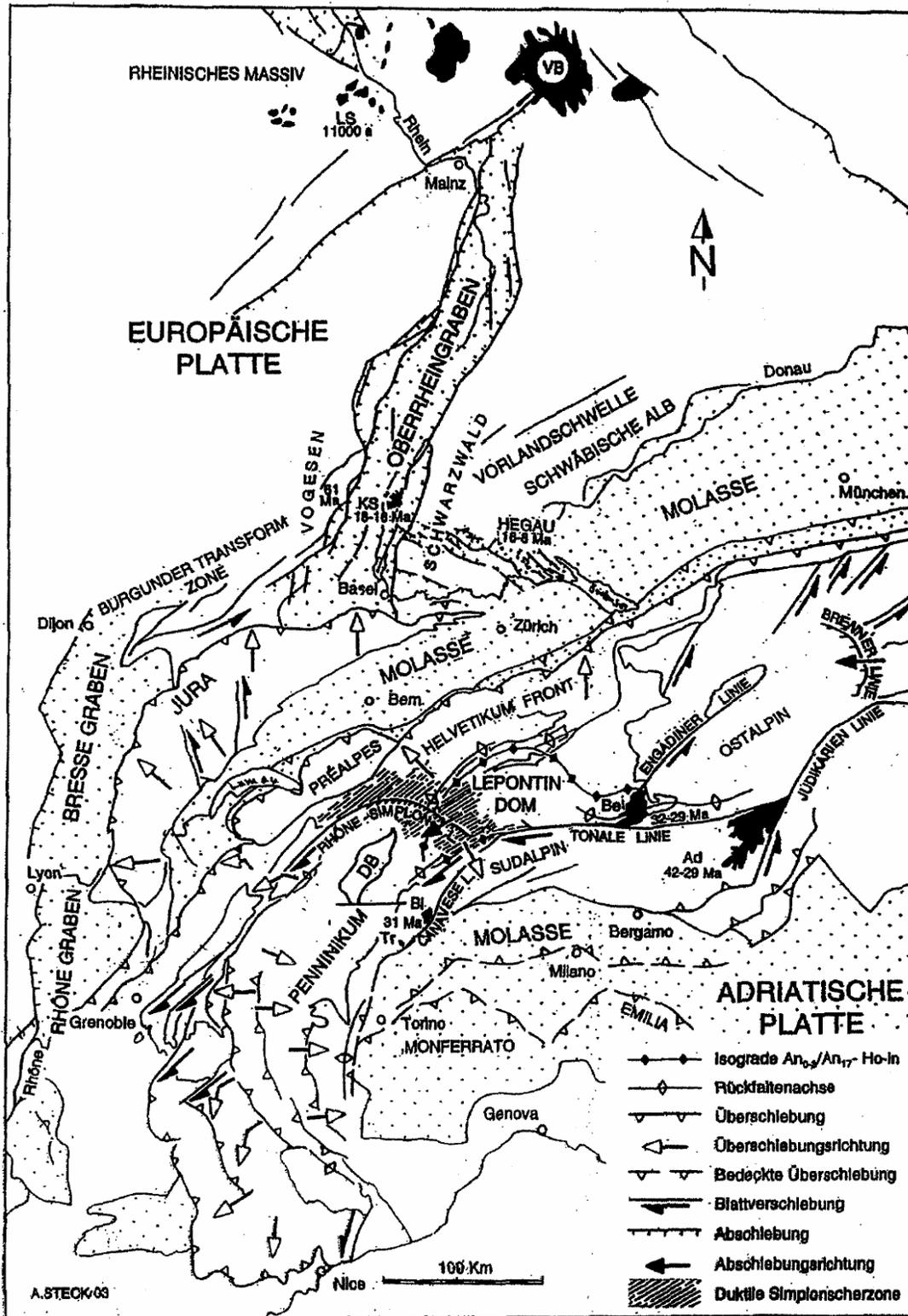
## **Das geodynamische Konzept**

Das Studium der känozoischen und rezenten tektonischen Entwicklung der Alpen und ihres Vorlandes ist der Schlüssel zur Prognose der zukünftigen tektonischen Entwicklung der Nordschweiz und des Zürcher Weinlandes. Dies hat die Nagra richtig erkannt und im Bericht NTB 99-08, MÜLLER, NAEF & GRAF 2002 (Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland) ausführlich dokumentiert und analysiert.

Einführend möchte ich für ein besseres Verständnis der Tektonik des Zürcher Weinlandes und für die Beurteilung des geodynamischen Konzeptes die Daten und Modelle der Nagra in einem grösseren 3-dimensionalen tektonischen Rahmen der Westalpen und ihrem adriatischen und europäischen Vorland zusammenfassen und beurteilen.

Die Geodynamik der Nordschweiz muss im Rahmen der spätkretazischen und känozoischen S, SE und E gerichteten Subduktion der europäischen unter die adriatische Platte betrachtet werden (Figur 1). Der Westalpenbogen wird durch duktile Abscherung der europäischen Oberkruste und ihres mesozoischen Sedimentstapels aufgefaltet. Gleichzeitig entsteht im europäischen Vorland durch sinistrale Transtension der Bressegraben, die Burgunder Transformzone und der Oberrheingraben (ILLIES & GREINER, 1979, LAUBSCHER, 1992). Die Form des Westalpenbogens und die Orientierung der Grabenstrukturen werden durch die präexistierende Geometrie der europäischen und adriatischen Plattenränder kontrolliert. Die Konvergenz zwischen dem adriatischen Sporn und der Einbuchtung im europäischen Kontinentalrand erfolgt abwechselnd in nördlicher, nordwestlicher und westlicher Richtung, wie dies LAUBSCHER (1973) postuliert und STECK (1980, 1984, 1990), STECK & HUNZIKER (1994) und SCHMID & KISSLING (2000) mit einer regionalen Strukturanalyse nachgewiesen und in tektonischen Synthesen dargestellt haben. Die Konvergenz der Kontinente erfolgt ausserdem unter Rotation im Gegenuhrzeigersinn des adriatischen Indenters.

Die Ausbildung der transpressiven dextralen Simplonscherzone seit 34 Mio. Jahren und der jüngeren diskreten Rhone-Simplon-Linie seit 18 Mio. Jahren erlaubt die gleichzeitige Überschiebung und Faltung der penninischen und helvetischen Decken nach Norden und Nordwesten und der französisch-italienischen Alpen nach Westen.



Figur 1: Oligozäne, neogene und quartäre Tektonik der Westalpen und ihres Vorlandes

Die Vorlandsschwelle im europäischen Vorland der Alpen wandert mit der Flexur der europäischen Platte in NW-Richtung (DÉZES et al. submitted, STAMPFLI et al. 1998). Sie erreicht ihre heutige Position über dem Vogesen-Kaiserstuhl-Schwarzwaldmanteldom zwischen ungefähr 25-20 Mio. Jahren, wo seit 20 Mio. Jahren die Aufwölbung stecken bleibt. Die Hebung der Vorlandsschwelle ist zeitlich durch die Schüttung der älteren und jüngeren Juranagelfluh, seit etwa 23 Mio. Jahren, aus nördlicher Richtung dokumentiert (Fig. 2.5 und 4.5 in NTB 99-08). Damit verbunden ist die beschleunigte Heraushebung von Vogesen und Schwarzwald, die Heraushebung und Erosion des Molassesedimentkeils und die Juraüberschiebung seit etwa 10 Mio. Jahren. Nach den Daten der Nagra wurden seit 10 Mio. Jahren die tertiären Molassesedimente im Zürcher-Weinland mit einer maximalen durchschnittlichen Geschwindigkeit von 0.1 mm/a gehoben und erodiert.

In den Alpen und ihrem Vorland können folgende Phasen der känozoischen Gebirgsbildung unterschieden werden ( Tabelle 1):

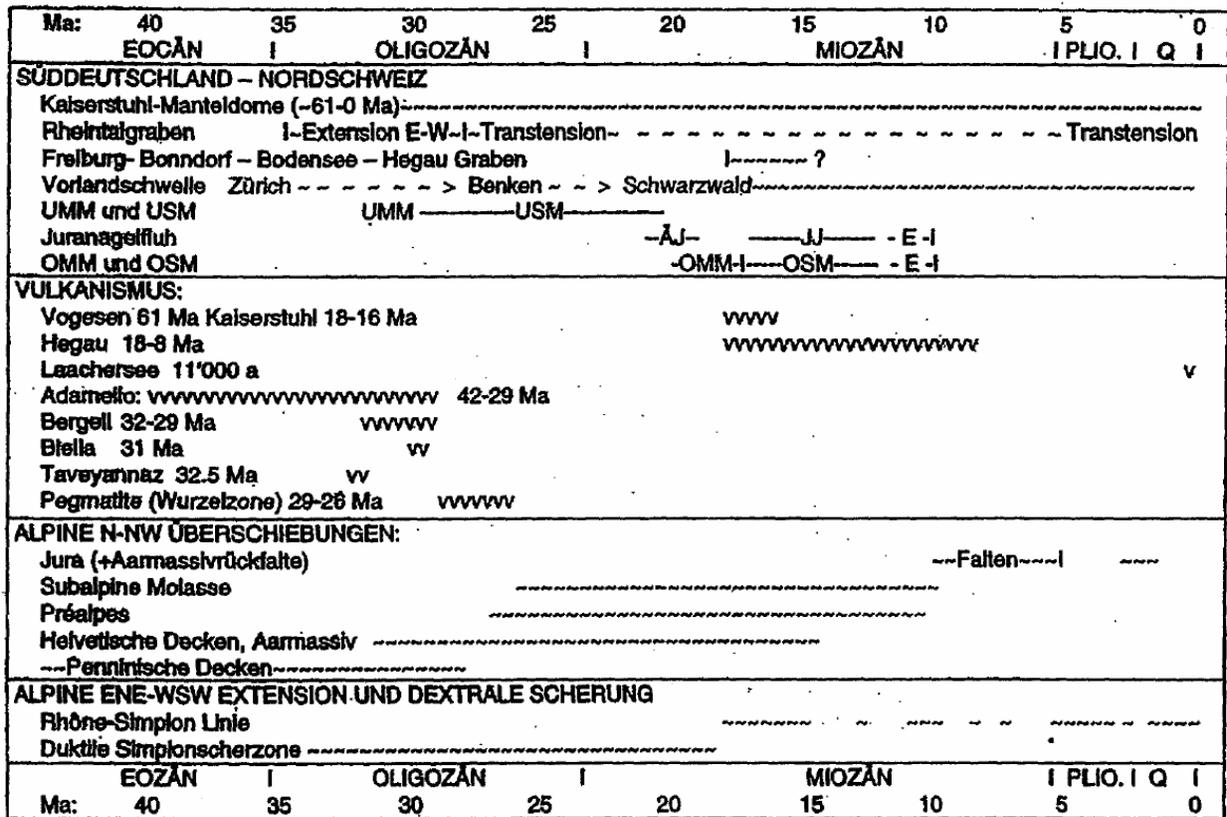


Tabelle 1: Chronologie der wichtigsten känozoischen geologischen Prozesse der West- und Zentralalpen und ihrem europäischen Vorland.

- Vor der alpinen Kontinentalkollision sind Europa, der ostalpine Mikrokontinent und die Adria durch den piemontesischen und den Canavese-Ozean getrennt.
- In der Oberkreide werden die Canavese-Ozeankruste und der ostalpine Mikrokontinent in südlicher Richtung unter die adriatische Platte unterschoben und die Hochdruckmetamorphite der Sesiazone extrudiert (HUNZIKER et al. 1992, GEBAUER, 1999).
- Im Eozän werden ihrerseits die piemontesische Ozeankruste und das südliche Penninikum in südlicher Richtung subduziert und als ophiolitische Zermatt-Saas-, Antrona- und Tsatédecken und als Monte Rosa- und Adula-Gneissdecken extrudiert. Gleichzeitig werden die Gneissdecken des Penninikums und die Sedimente des intrakontinentalen Walliserbeckens von der abtauchenden europäischen Kruste abgeschert und in nördlicher und westlicher Richtung überschoben. Die ausgedehnte Vorlandschwelle des europäischen Vorlandes erstreckt sich zu dieser Zeit vom Aarmassiv bis in den Jura, was durch die mitteleozänen Siderolithikum-Karste in den Kreidekalken dokumentiert ist (HERB in MASSON et al. 1980).
- Der Vulkanismus im Gebiet Vogesen-Kaiserstuhl-Schwarzwald beginnt im Paleozän vor  $60.9 \pm 0.6$  Mio. Jahren ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Hornblende single-crystal laser fusion age eines Olivin-Melilit-Ganges von Trois-Epis, Vogesen, KELLER et al. 2002). Dieser Vulkanismus beginnt gleichzeitig mit dem tertiären Vulkanismus im Nordatlantik (ZIEGLER, 1992). Durch die alpine Flexur und N-gerichtete Kompression und Transtension der europäischen Kruste entstehen ab dem frühen Oligozän der sinistrale Bressegraben, die Burgunder Transformzone, der Oberrheingraben und als östlicher Ausläufer der Freiburg-Bonnendorf-Hegau-Bodensegraben (BERGERAT, 1987, SCHUMACHER, 2002). Der oligozäne Oberrheingraben entsteht über einem seit dem Paleozän aktiven Manteldiapir (DÈZES et al. submitted, ILLIES & GREINER, 1978, KELLER et al. 2002). Die miozänen Vulkanite des Kaiserstuhls, welche oligozäne Sedimente des Oberrheingrabens durchschlagen, sind mit 18-16 Mio. Jahren datiert (KELLER, 1984). Zwischen 42 und 29 Mio. Jahren intrudieren entlang dem periadriatischen Lineament der Südalpen, bestehend aus den Canavese-, Tonale- und Judikarien-Linien, die Magmatite von Adamello, Bergell, Biella und extrudieren die Vulkanite (vor 32.5 Mio. Jahren) des helvetischen Taveyannaz Flysches (BECCALUVA et al. 1983, RUFFINI et al. 1997).
- Seit dem frühen Oligozän (~32 Mio. Jahren) erfolgt in der Vorlandsenke der Alpen die Ablagerung der klastischen Molassesedimente. Ebenfalls im frühen Oligozän beginnt die Abscherung der helvetischen Decken in N- und NW- Richtung und gleichzeitig der französischen Dauphiné-Decken in westlicher Richtung. Dieser radialorientierte Transport der penninischen und helvetischen Decken im Westalpenbogen wird durch die gleichzeitige Ausbildung der dextralen Simplonscherzone (seit etwa 34 Mio. Jahren) in der Front des abwechselnd nach N, NW und W konvergierenden adriatischen Sporns ermöglicht (STECK, 1984, STECK, HUNZIKER, 1994). Ebenfalls während dem Oligozän entsteht der Oberrheingraben über einem seit dem Paleozän aktiven Manteldiapir.

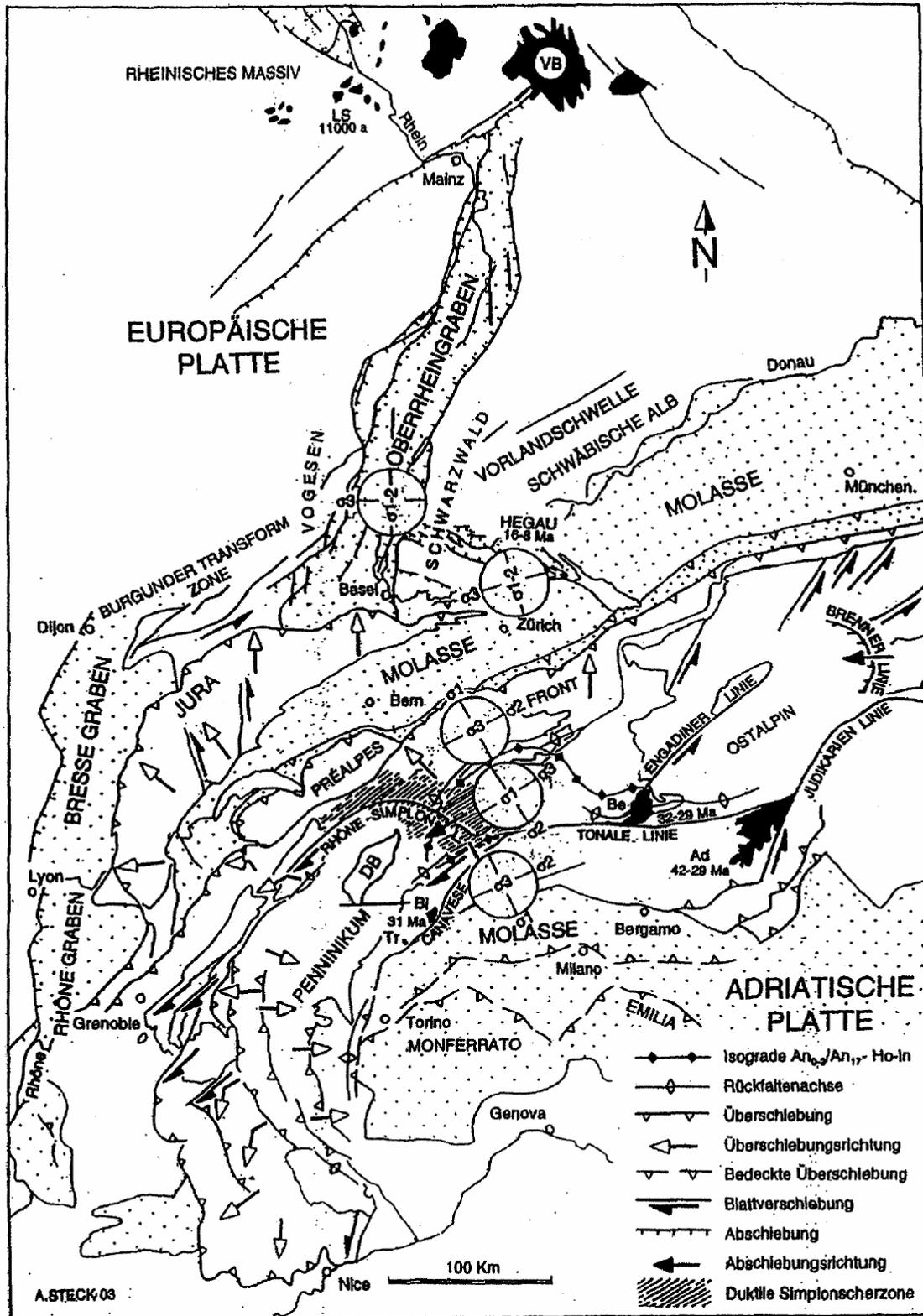
- Zu Beginn des Neogens, vor ungefähr 22 Mio. Jahren, erreicht die alpine Vorlandsschwelle die Vogesen, den Kaiserstuhl und den Schwarzwald über dem seit spätestens dem Paleozän aktiven Oberrheinmanteldom, wo das Vorrücken der Vorlandsschwelle bis heute stecken geblieben ist (NTB 99-08, STAMPFLI et al. 1998). Es ist wahrscheinlich, dass die Ausdünnung und Aufwärmung der Lithosphärenplatte über dem Oberrheinmanteldom zu einer frühzeitigen Lokalisierung der Vorlandsschwelle an dieser Schwächestelle geführt hat. Gleichzeitig mit der Öffnung des Oberrheingrabens wird die Nordschweiz (Zürcher Weinland) abwechselnd in N-S Richtung oder vertikal komprimiert und senkrecht dazu gedehnt.
- Die Schüttung der Juranagelfluh aus nördlicher Richtung seit dem frühen Miozän zeugt von der beschleunigten Heraushebung und Erosion der alpinen Vorlandsschwelle in der Region von Vogesen und Schwarzwald (Fig. 2.5 und 4.5 in NTB 99-08). Seit spätestens 18 Mio. Jahren entsteht durch Extension und dextrale Transtension und Reaktivierung von ESE-streichenden variskischen Strukturen in der europäischen Kruste der Freiburg-Bonnendorf-Hegau-Bodenseegraben und wahrscheinlich gleichzeitig auch die Neuhauserstörung. Die Hegau-Vulkanite sind mit 16-8 Mio. Jahren datiert (HOFMANN et al. 2000).
- Die Ablagerung der nordalpinen Molassesedimente ist um ca. 10 Mio. Jahren abgeschlossen. In der Juraphase erfolgt eine Abscherung der mesozoischen und tertiären Sedimente des nordalpinen Molassebeckens entlang den Evaporiten (Steinsalz und Anhydrit) der Trias. ESCHER et al. (1997) korrelieren diese basale Abscherung mit Überschiebungen an der Basis der Aiguilles-Rouges- und Gastern-Massive und noch tiefer gelegenen, aufgrund der Reflexionsseismik postulierten, Überschiebungen unter dem „Infrarouges-Massif“ (ESCHER in STECK et al. 1997). Durch diesen alpinen Fernschub wird der Jura zwischen 10 und 4.2 Mio. Jahren aufgefaltet und überschoben (BUXTORF 1907, LAUBSCHER 1992, BECKER, 2000). Nach J.-P. BERGER (persönliche Mitteilung) sind die Säugetierfossilien aus den horizontal gelagerten Karstfüllungen im vertikalen Faltschenkel der Vue des Alpes mit 4.2 Mio. Jahren datiert. Dies bedeutet, dass diese Falte nach 4.2 Ma nicht mehr gekippt wurde. Das Ende der Juraüberschiebung, welche auch ohne Faltung als blinde Überschiebung weitergehen könnte, ist damit nicht eindeutig datiert. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass um diese Zeit die Juraüberschiebung weitgehend abgeschlossen war (BECKER, 2000). Späte, vorwiegend NNW- und N-streichende sinistrale Blattverschiebungen, wie zum Beispiel die Décrochements von Morez-Givrine und Pontarlier im Jurabogen sind Zeugen einer späten tangentialen Dehnungstektonik, welche gleichzeitig mit der späten Extension und dextralen Scherung an der Rhone-Simplon-Linie in den Alpen aktiv waren.
- Vor 10 Mio. Jahren bildet der helvetisch-penninische Deckenstapel über dem heutigen Aarmassiv und der Simplonregion eine 10 - 15 km mächtige Überdeckung, welche in den letzten 10 Mio. Jahren mit einer Erosions- und tektonischen Abdeckungsgeschwindigkeit an der Rhone-Simplon-Verwerfung von durchschnittlich 1.0 – 1.5 mm/Jahr abgetragen wurde (FRANK 1983, STECK & HUNZIKER 1994). Hebungsdaten von der gleichen Größenordnung werden auch heute durch die Landesnivellementmessungen der Landestopographie für die Region von Brig nachgewiesen.

- Seit etwa 10 Mio. Jahren wird gemäss dem Modell der Nagra (Fig. 4.6, NTB 99-08) das alpine Molassevorland mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von  $\sim 0.2$  mm/a am Alpenrand und  $\sim 0.1$  mm/a im Zürcher Weinland gehoben und erodiert. Im Schwarzwald wurde nach den Apatitspaltspurdaturierungen von MICHALSKI (1987) in den letzten 60 Mio. Jahren eine Gesteinsschicht von ungefähr 3-4 km erodiert, was einer durchschnittlichen Hebungs- und Erosionsrate von 0.05 bis 0.066 mm/a entspricht. Neuere Untersuchungen von SINCLAIR et al. (2003) deuten an, dass die Hebungs- und Erosionsraten in den vergangenen 10 Mio. Jahren möglicherweise nicht gleichmässig waren und vor rund 5 Mio. Jahren eine Akzentuierung eingetreten ist. Für eine solche späte Heraushebung der Alpen sprechen auch die Beobachtungen von SOOM (1990), wonach aufgrund von Apatitspaltspuraltern eine beschleunigte Heraushebung des Aarmassivs seit 5 Mio. Jahren und aktive Vertikalbewegungen von über 1.5 mm/a im Bereich der Glishornrückfalte des westlichen Aarmassivs von den Geodäten der Landestopographie nachgewiesen wurden (STECK, HUNZIKER, 1994). Für eine starke rezente Heraushebung und Erosion der externen Mont Blanc- und Aarmassive sprechen auch die Morphologie der schroffen 4000 m-Gipfel der beiden Massive. Da die Hebungen in den Alpen wie vor 10 Mio. Jahren auch heute mit den Hebungen im europäischen Vorland durch die Flexur der europäischen Lithosphärenplatte gekoppelt sind, kann man sich vorstellen, dass das alpine Vorland ebenfalls weiterhin isostatisch gehoben wird, jedoch mit einer bedeutend kleineren Geschwindigkeit als in den Externmassiven. Nach SINCLAIR et al. (2003) dürfte die starke Erosion der Alpen unter dem Einfluss des atlantischen Klimas (verstärkter Golfstrom) mit bedeutenden Niederschlägen längs des Alpenkammes seit etwa 5 Mio. Jahren die postorogene isostatische Hebung der Alpen noch beschleunigt haben.
- Die Analyse der quartären geomorphologischen Entwicklung der Nordschweiz durch die Nagra und der durch das Landesnivellement gemessenen rezenten Vertikalbewegungen ergeben übereinstimmend Hebungsdaten in der Grössenordnung von maximal 0.1 mm/a für das Zürcher Weinland. Verschiedene oben erwähnte Beobachtungen deuten jedoch darauf hin, dass die Hebungsgeschwindigkeit in den vergangenen 10 Mio. Jahren variiert hat und von der mittleren Hebungsrate von 0.1mm/a abgewichen ist. Bei der Hebung und Erosion handelt es sich um Prozesse, welche von gekoppelten geodynamischen Mechanismen der Plattentektonik gesteuert werden, deren komplexe Zusammenhänge nicht in einfachen geodynamischen Modellen dargestellt werden können. So ist z.B. die Aussage der Nagra, wonach bei fortschreitendem alpinem Fernschub grösste zukünftige Hebungsdaten zu erwarten sind, nicht begründbar. Es ist nämlich sehr wohl möglich, dass bedeutende Hebungen und Erosion als isostatischer Ausgleich zur orogenen Lithosphären-Verdickung an postorogene Relaxationsperioden gebunden sind. Hierfür sprechen die oben zitierten Beobachtungen von SOOM (1990), wonach die Externmassive der Alpen seit 5 Mio. Jahren, d.h. seit dem Ende des Jurafernschubes, eine beschleunigte Hebung erfahren haben.
- Die Auswertung der Herdflächenmechanismen rezenter Erdbeben ergibt für die Nordschweiz ein Spannungsfeld (Figur 2), in welchem die kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  konstant ENE-WSW orientiert ist, während  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  in der dazu senkrecht stehenden SSE-streichenden Ebene permutieren, bzw. rotieren (Fig.3.8. NTB 99-08, STANGE & STREHLAU 2002, DELACOU et al. 2003, KASTRUP et al. 2004). Eine analoge Entwicklung des Stressfeldes

wird von ANGELIER & BERGERAT (1983) für die früholigozäne Öffnung des Oberrheingrabens nachgewiesen.

### **Wichtigste Schlussfolgerungen für die Tektonik des Zürcher Weinlandes**

- Langfristige Hebungen und Erosion der Sedimentschichten im Gebiet des Zürcher Weinlandes sind die wichtigsten geologischen Prozesse, welche die Sicherheit eines Tiefenlagers beeinflussen könnten. Die geodynamischen Mechanismen, welche zur Hebung der Molassesedimente seit 10 Mio. Jahren geführt haben, sind nur teilweise verstanden und machen damit eine genaue Prognose der zukünftigen Vertikalbewegungen schwierig. Es sind plattentektonische Bewegungsabläufe, die sich über geologische Zeiträume erstrecken und sehr langsam ablaufen. Die von der Nagra vorgeschlagene Extrapolation der neogenen, quartären (Quartärgeschichte der Alpentäler) und rezenten Bewegungen in die Zukunft und die Abgrenzung der Szenarien ist vernünftig und konservativ.
- Die Analyse der Herdflächenmechanismen rezenter Erdbeben im kristallinen Sockel der Nordschweiz bestätigen ein Stressfeld, in welchem die kleinste Hauptspannung  $\sigma_3$  konstant ENE-WSW orientiert ist, während  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  in der dazu senkrecht stehenden SSE-streichenden Ebene rotieren. Es ist anzunehmen, dass eine ähnliche tektonische Situation auch in naher Zukunft und während den nächsten Jahrtausenden bis Jahrmillionen andauert.
- Seit dem Paleozän (~60 Mio. Jahre) wird die europäische Kruste im Zürcher Weinland entweder in ~N-S Richtung komprimiert oder in ~W-E Richtung gedehnt, was sich in kompressiven, extensiven und transpressiven Deformationen äussert. Diese tertiären Deformationen reaktivierten im Wesentlichen die ENE streichenden Grabenränder der Permokarbontröge und die variskisch ESE streichenden Brüche des prätriadischen Grundgebirgssockels. Es sind alte Strukturen, welche im Schwarzwald gut aufgeschlossen sind. Sie stellen Schwächezonen und Sollbruchstellen dar und dienten bei der tertiären Überprägung als Leitschienen oder Ansatzstellen der Deformation. Es entspricht der geologischen Erfahrung, dass auch in Zukunft präexistierende Strukturen reaktiviert werden und dass sich keine neuen Deformationsstrukturen in bisher undeformierten Teilen des europäischen Sockels und seiner mesozoischen und tertiären Sedimentbedeckung bilden.
- Verschiedene Beobachtungen führen zur Schlussfolgerung, dass die alpine kompressive Kontinentalkollision heute im Wesentlichen abgeschlossen ist: Die N-Wanderung der alpinen Vorlandschwelle ist seit etwa 20 Mio. Jahren im Bereich von Vogesen-Schwarzwald über dem Oberrheingraben-Manteldom stecken geblieben. Der Fernschub des Faltenjuras ist vermutlich bei 4.2 Mio. Jahren abgeschlossen. Extensive Herdflächenmechanismen von rezenten Erdbeben, mit vertikal orientierter grösster Hauptspannung  $\sigma_1$ , sind sowohl in den Alpen als auch in der Nordschweiz verbreitet. Dies könnte bedeuten, dass die heutige Hebung und Erosion der Alpen und ihrem Vorland als isostatischer Ausgleich zur känozoischen kompressiven Krustenverdickung der Alpen weitergeht.



Figur 2: Ableitung des rezenten Spannungsfeldes in den Zentralalpen und ihrem europäischen Vorland mittels der Analyse von Erdbeben-Herdflächenlösungen.

## **Allgemeine Schlussfolgerungen und Beantwortung der gestellten Fragen**

*Ist die Tektonik der Nordschweiz genügend untersucht und von der Nagra dokumentiert?*

Die Tektonik der Nordschweiz ist gut und umfangreich untersucht und beschrieben. Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen im Hinblick auf die Erstellung eines geologischen Tiefenlagers ist es sinnvoll, ergänzende Untersuchungen auch in der nördlich angrenzenden Region durchzuführen. Die Beobachtungen zur aktiven Tektonik im Gebiet des Hegau-Bodensee-Grabens sind teilweise noch lückenhaft. Für das Verständnis der regionalen Tektonik sollte dieses Gebiet ebenfalls in die Untersuchung miteinbezogen werden: Abklärung der Entwicklungsgeschichte der Grabenzone, zusätzliche Nivellementmessungen, ergänzende Untersuchungen zur Quartärgeschichte, Analyse der Herdflächenmechanismen rezenter Erdbeben.

Die Abschätzung von einem Hebungs- und Erosionsbetrag von 1000 m im Zürcher Weinland während der letzten 10 Mio. Jahren beruht im Wesentlichen auf den Schlussfolgerungen der Beckenmodellierung und der Wärmegegeschichte der tertiären und mesozoischen Sedimente und des kristallinen Sockels (NIB 01-04, LEU et al. 2001). Der verwendete Datensatz erlaubt eine grobe erste Abschätzung (NTB 99-08). Für eine stichhaltige Beckenmodellierung und genauere Herleitung der Hebungs- und Erosionsraten müssen in künftig abzuteufenden Tiefbohrungen noch weitere systematische Maturitäts-, Diagenese- und Apatitspaltspuranalysen durchgeführt werden.

*Entsprechen das von der Nagra dargestellte geodynamische Modell der känozoischen alpinen Gebirgsbildung sowie die abgeleiteten Langzeitszenarien dem heutigen Fachwissen und sind sie nachvollziehbar?*

Die Dokumente der Nagra stellen eine gute Synthese von Literaturdaten und selbst erarbeiteten Erkenntnissen dar. Das von der Nagra abgeleitete geodynamische Modell wird mit vernünftigen Argumentationen begründet. Angesichts der komplexen und gekoppelten geodynamischen Prozesse, die nur teilweise verstanden sind, handelt es sich jedoch um ein empirisches Modell, das aufgrund zusätzlicher geologischer Erkenntnisse in Zukunft weiter entwickelt werden muss.

Das Langzeitszenarium der Nagra basiert auf der Annahme eines „anhaltenden alpinen Fernschubes“. Verschiedene, einfürend diskutierte Beobachtungen und Daten sprechen eher für ein Ausklingen der alpinen NNW-SSE-Kompression und einer anhaltenden WSW-ENE gerichteten Extension des alpinen Vorlandes, tangential zum Alpenbogen. Der Referenzfall der Sicherheitsanalyse sollte eigentlich von diesem realistischen Szenarium ausgehen und erst in einem zweiten Schritt mögliche Konsequenzen von extremen Szenarien wie z.B. des „anhaltenden alpinen Fernschubes“ betrachten.

*Basiert das geodynamische Modell auf einer genügenden Datenbasis und Verständnis der Prozesse oder sind bedeutende Lücken vorhanden, welche den Nachvollzug der Langzeitszenarien in Frage stellen?*

Für den Entsorgungsnachweis wird der vorgelegte Datensatz und der gegenwärtige Kenntnisstand als genügend erachtet. Eine Verbesserung der Datengrundlagen und des Verständnisses der Prozesse wird im Verlauf der nächsten Projektphasen erfolgen (ergänzende Sondierbohrungen und Erstellen eines untertägigen Felslabors an einem konkreten Standort zur Charakterisierung des Wirtgesteins und zur Bestätigung der Gesteinseigenschaften).

*Sind die von der Nagra für die nächsten 1 Mio. Jahre abgeleiteten Langzeitszenarien realistisch, zu optimistisch oder zu pessimistisch?*

Hebung und Erosion sind die wichtigsten geologischen Prozesse, welche die Sicherheit eines in 650 m Tiefe angelegten Endlagers für radioaktive Abfälle im Opalinuston der Nordschweiz langfristig beeinflussen könnten. Dies hat die Nagra richtig erkannt. Die von der Nagra abgeleitete durchschnittliche Hebungsrate von 0.1 mm/a für das Zürcher Weinland ist eine vorsichtige Schätzung und dürfte einem konservativen Wert entsprechen. Aus dieser Sicht kann der Opalinuston seine Aufgabe als geologische Barriere für den zu betrachtenden Zeitraum von 1 Mio. Jahren erfüllen.

## Literaturverzeichnis

ANGELIER, J. & BERGERAT, F. (1983): Systèmes de contrainte et extension intracontinentale. Bull. Centre Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine, 7, 137-147.

BECCALUVA, L., BIGIOGGERO, B., CHIESA, S. COLOMBO, A., GATTO, G.O., GREGNANIN, A., MONTRASIO, A., PICCIRILLO, E.M. & TUNESI, A. (1983): Post-collisional orogenic dike magmatism in the Alps. Mem. Soc. Geol. Ital. 26, 341-359.

BECKER, A. (2000): The Jura Mountains – an active foreland fold-and-thrust belt?. Tectonophysics 321, 381-406.

BERGERAT, F. (1987): Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision. Tectonics, 6, 99-132.

BIEHLER, D. (1995): Kluftgrundwässer im kristallinen Grundgebirge des Schwarzwaldes Ergebnisse von Untersuchungen in Stollen. Tübinger Geowissenschaftliche Arbeiten (TGA), C22, Tübingen, ISSN 0935-4948.

BIRKHÄUSER, Ph., ROTH, Ph., MEIER, B. & NAEF, H. (2001): 3D-Seismik: Räumliche Erkundung des Wirtgesteins Opalinuston im Zürcher Weinland. Nagra Techn. Ber. NTB 00-03. Nagra Wettingen

BUXTORF, A. (1907): Geologische Beschreibung des Weissenstein-Tunnels und seiner Umgebung. Beitr. Geol. Karte Schweiz NF 21.

DEICHMANN, N., BALLARIN DOLFIN, D. und KASTRUP, U. (2000): Seismizität der Nord- und Zentralschweiz. Nagra Technischer Bericht NTB 00-05.

DELACOU, B., SUE, C., CHAMPAGNAC, J.D., BURKHARD, M. (2003): Contrasted tectonics in the Western Alps: A seismotectonic overview. Geophysical Research Abstracts, 5, 10257.

DÈZES, P., SCHMID, S.M., ZIEGLER, P.A. (submitted): Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Pyrenean and Alpine orogens with their foreland lithosphere. Tectonophysics.

ESCHER, A., HUNZIKER, J., MARTHALER, M. MASSON, H., SARTORI, M. & STECK, A. (1997): Geologic framework and structural evolution of the western Swiss-Italian Alps. In: PFIFFNER, O.A., LEHNER, P. HEITZMANN, P., MUELLER, S. & STECK, A: (eds.): Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NFP 20 (p.205-221). – Birkhäuser Verlag, Basel.

FRANK, E. (1983): Alpine metamorphism of calcareous rocks along a cross-section in the Central Alps: occurrence and breakdown of muscovite, margarite and paragonite. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 63, 37-93.

GEBAUER, D. (1999): Alpine geochronology of the Central and Western Alps: new constraints for a complex geodynamic evolution. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 79, 191-208.

HOFMANN, F., SCHLATTER, R. & WEH, M. (2000): Erläuterungen zu Blatt 97: Beggingen (LK 1011) des Geologischen Atlas der Schweiz 1:25'000. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.

HUNZIKER, J.C., DESMONS, J. & HURFORD, A.J. (1992): Thirty-two years of geochronological work in the Central and Western Alps: a review on seven maps. *Mém. Géol. (Lausanne)* 13.

ILLIES, J.H. & GREINER, G. (1979): Holocene movements and state of stress in the Rhinegraben rift system. *Tectonophysics* 52, 349-359.

KASTRUP, U., ZOBACK, M.L., DEICHMANN, N., EVANS, K.F., GIARDINI, D. & MICHAEL, A.J. (2004): Stress field variations in the Swiss Alps and the northern Alpine foreland derived from inversion of fault plane solutions. *Journ. Geophys. Research* 109, B01402, 1-22.

KELLER, J. (1984): Der Jungtertiäre Vulkanismus Südwestdeutschlands: Exkursionen im Kaiserstuhl und Hegau. *Fortschr. Miner.* 62 (Beiheft 2), 2-35.

KELLER, J., KRAML, M. & HENJES-KUNST, F. (2002):  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  single crystal laser dating of early volcanism in the Upper Rhine Graben and tectonic implications. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 82, 121-130.

LAUBSCHER, H. (1973): Alpen und Plattentektonik. Das Problem der Bewegungsdiffusion an kompressiven Plattengrenzen. *Z. dtsh. Geol. Ges.* 124, 295-308.

LAUBSCHER, H. (1992): Jura kinematics and the Molasse basin. *Eclogae geol. Helv.* 85/3, 653-675.

LEU, W., GREBER, E., SCHEGG, R, Geoform Ltd (2001): Basin modelling NE-Switzerland: Burial, erosion and temperature history of the wells Benken, Weiach and Herdern-1. Nagra Interner Bericht 01-04.

MASSON, H., HERB, R. & STECK, A. (1980): Helvetic Alps of Western Switzerland. In *Geology of Switzerland, Part B: Geological Excursions*. Ed. Schweiz. Geol. Komm. Wepf & Co, Basel, 109-153.

MICHALSKI, I. (1987): Apatit-Spaltspuren – Datierungen des Grundgebirges von Schwarzwald und Vogesen. Die post-variskische Entwicklung. Diss. Univ. Heidelberg.

MÜLLER, W.H., NAEF, H., GRAF, H.R. (2002): Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Lagzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra Tech. Ber. NTB 99-08, Nagra, Wettingen

- RUFFINI, R., POLINO, R., CALLEGARI, E., HUNZIKER, J.C. & PFEIFER, H.R. (1997): Volcanic clast-rich turbidites of the Taveyanne sandstones from the Thônes syncline (Savoie, France): records for a Tertiary postcollisional volcanism. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 77/2, 161-174.
- SCHLUNEGGER, F. & HINDERER, M. (2001): Crustal uplift in the Alps: why the drainage pattern matters. *Terra Nova* 13, 425-432.
- SCHMID, S.M. & KISSLING, E. (2000): The arc of the western Alps in the light of geophysical data on deep crustal structure. *Tectonics*, 19, 62-85.
- SCHUHMACHER, M.E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, 21, 6-1-6-17.
- SINCLAIR, H.D. & ALLEN, P.A. (1992): Vertical versus horizontal motions in the Alpine orogenic wedge: stratigraphic response in the foreland basin. *Basin research* 2, 215-232.
- SINCLAIR, H., CEDERBOM, C., SCHLUNEGGER, F., RAHN, M. (2003): Climate-induced rebound and exhumation of the European Alps. Abstract, British Sedimentological Research Annual General Meeting, Leeds, 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> December 2003.
- SOOM, M.A. (1990): Abkühlungs- und Hebungsgeschichte der Externmassive und der penninischen Decken beidseits der Simplon-Rhone-Linie seit dem Oligozän: Spaltspurdaterungen an Apatit/Zirkon und K-Ar-Datierungen an Biotit/Muskowit (Westliche Zentrualpen). Dr. phil. II Dissertation, Universität Bern.
- STAMPFLI, G.M., MOSAR, J., MARQUER, D., MARCHANT, R., BAUDIN, T. & BOREL, G. (1998): Subduction and obduction processes in the Swiss Alps. *Tectonophysics* 296, 159-204.
- STANGE & STREHLAU (2002): Ober- und Unterkrustenbeben der Molasse nördlich der Alpen: Herdflächenlösungen und Spannungsfelder. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Freiburg i. Br. (Internetseite [www.lgrb.uni-freiburg.de](http://www.lgrb.uni-freiburg.de)).
- STECK, A., EPARD, J.-L., ESCHER, A., LEHNER, P., MARCHANT, R. & MASSON, H. (1997): Geological interpretation of the seismic profiles through Western Switzerland: Rawil (W1), Val d'Anniviers (W2), Mattertal (W3), Zmutt-Zermatt-Findelen (W4) and Val de Bagnes (W5). In: PFIFFNER, O.A., LEHNER, P., HEITZMANN, P., MUELLER, S. & STECK, A. (eds.): *Deep Structure of the Swiss Alps: Results of NFP 20* (p. 123-137). – Birkhäuser Verlag, Basel.
- STECK, A., EPARD, J.-L., ESCHER, A., GOUFFON, Y. & MASSON, H. (2001): Notice explicative, Carte tectonique des Alpes de Suisse occidentale 1:100 000. Carte géologique spéciale N°123. Office féd. Eaux Geologie (Berne). (In diesem Reviewpaper sind die Referenzen von STECK, 1980, 1984, 1990).

STECK, A. & HUNZIKER, J. (1994): The Tertiary structural and thermal evolution of the Central Alps – compressional and extensional structures in an orogenic belt. *Tectonophysics* 238, 229-254.

ZIEGLER, P.A. (1992): European Cenozoic rift system. *Tectonophysics* 208, 91-111.

# **Beurteilung der plio-/pleistozänen Entwicklungsgeschichte des Zürcher Weinlandes und der Erosionsszenarien**

Dr. Hanspeter Funk

---

## **Einleitung**

Für eine Prognose geologischer Entwicklungen über Zeiträume von bis zu einer Million Jahre ist es notwendig, die Prozesse zu verstehen, die etwa in den vergangenen 10 Millionen Jahren zur geologischen Gliederung und zur Gestaltung unserer heutigen Landschaft geführt haben. Nur mit einem langfristigen Rückblick ist es möglich, Tendenzen für die Zukunft hinreichend zuverlässig erkennen zu können. Die verschiedenen Prozesse erfolgen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (z.B. tektonische Bewegungen) und Zyklizität (z.B. klimatische Schwankungen), sie wirken aber gemeinsam und beschleunigen oder verzögern Effekte. Dieses komplexe Zusammenspiel muss verstanden oder zumindest plausibel abgeleitet sein, um mögliche Szenarien künftiger geologischer Entwicklungen über den erwähnten Zeitraum formulieren zu können. Schon in früheren Berichten hat die Nagra versucht, diesen Ansprüchen gerecht zu werden (z.B. Nagra Technische Berichte NTB 84-26 und NTB 93-34). Nun wurden für das Gebiet des Zürcher Weinlandes Daten aus verschiedensten Forschungsgebieten mit dem Ziel aufgearbeitet, die Prozesse und Effekte abzuschätzen, welche während der nächsten 1 Million Jahren im Untersuchungsgebiet wirksam sein werden. Die vorliegende Beurteilung stützt sich zur Hauptsache auf die in den Nagra Technischen Berichten NTB 99-08 und NTB 02-03 dargelegten Datensätze sowie auf ergänzende Literatur ab.

## **Fragestellung**

Bei der Beurteilung der Nagra Berichte standen folgende Aufgaben und Fragen im Vordergrund:

- Überprüfung der wissenschaftlichen Abstützung der Daten
- Nachvollzug und Vollständigkeit der Dokumentation
- Wurde heutiger Kenntnisstand berücksichtigt?
- Erosionsszenarien und mögliche Beeinträchtigung des Isolationsvermögens des Opalinuston:  
Sind die Szenarien genügend breit abgestützt und richtig bewertet? Gibt es Kenntnislücken ?

## **Annahmen**

Im Referenzfall, den die Nagra ihrer Analyse zugrunde legt, befindet sich das Lager im Opalinuston in 650-750 m Tiefe im Gebiet des Zürcher Weinlandes. Der sichere Einschluss der Abfälle soll über einen Zeitraum von 1 Million Jahren gewährleistet sein.

## Beurteilung der Nagra-Berichte

### Neotektonik

Mit verschiedenen Methoden wurde von der Nagra aufgezeigt, dass für das Gebiet des Zürcher Weinlandes mit einer Hebungsrate von ca. 0.1 mm/Jahr oder ca. 100 m/Million Jahren gerechnet werden muss. Kann die Schutzwirkung der überlagernden Schichten durch diese Hebung sowie die damit verbundene Erosion beeinträchtigt werden?

Mit *geodätischen Methoden* sind die Messungen des Landesnivellements durchgeführt worden. Dabei wurden einige Messlinien speziell im Auftrag der Nagra durch das Bundesamt für Landestopographie in den Jahren 1998/1999 nachgemessen (Schlatter 1999). Die Resultate (Beil. 3.5-1 in NTB 02-03) zeigen, dass die vertikalen Bewegungen im vorgesehenen Gebiet sehr gering und wenig nördlich (Gebiet Schaffhausen) sogar leichte Senkungstendenzen festzustellen sind. Diese Messungen haben nur einen kurzen Beobachtungszeitraum von einigen Jahrzehnten und geben Hinweise auf heute ablaufende Prozesse. Wichtig ist zu betonen, dass für die Messungen der Nagra als Referenzpunkt das Kristallin in Laufenburg gewählt wurde, das Landesnivellement dagegen beruht auf einem Referenzpunkt bei Aarburg. Die Werte wurden entsprechend umgerechnet.

Als zweites wurde eine *geomorphologische Studie* (Graf 1993) für die letzten ca. 2.6 Millionen Jahren beigezogen. Wichtig war, dass im Gebiet des Irchel die höheren Deckenschotter datiert werden konnten (Bolliger et al. 1996). Dadurch konnten Erosionsraten im alpinen Vorland präziser als bisher definiert werden. Niveaudifferenzen zwischen den heutigen Talniveaus und den Höhenlagen der verschiedenen Schotter lassen solche Abschätzungen zu, wenn davon ausgegangen wird, dass sich Hebung und Erosion in den Tälern in ungefähr die Waage halten. Die Resultate der Untersuchungen zeigen für das zu beurteilende Gebiet ebenfalls Werte zwischen 0,08 und 0,13 mm/Jahr.

Einen längerfristigen Einblick in die Hebungs- und Senkungsgeschichte erlauben *Beckenmodellierungen*, welche auf geologischen und geophysikalischen Daten beruhen (Überlagerung, Dichte, Porosität, Paläotemperatur, Datierungen). Solche Diagramme wurden für drei Bohrungen der Nordostschweiz durchgeführt (Herdern-1, Benken und Weiach, Leu et al. 2001). Die Resultate zeigen bei allen drei Diagrammen eine wichtige Gemeinsamkeit: für die letzten 10 Millionen Jahren wird jeweils Hebung angezeigt. Dies, nachdem vorher während etwa 20 Millionen Jahren Subsidenz und Sedimentation dominierten (Absenkung des Molassetroges mit Auffüllen durch Sedimente). Die Hebungsrate von 90-130 m/Million Jahren stimmt für alle drei Bohrungen überein und liegt somit nahe bei den 0.1 mm/Jahr, welche mit den beiden vorher besprochenen Methoden ermittelt wurde.

### Diskussion und Beurteilung

Diese Daten, ermittelt mit drei verschiedenen Methoden und über unterschiedliche Zeiträume, stimmen in der Grössenordnung überein und dürften als Basis für eine Prognose in die nähere Zukunft (bis 1 Million Jahren) zuverlässig sein. Die Werte sind sehr klein verglichen mit den Hebungsbeträgen in den übrigen Gebieten der Schweiz. Senkungsgebiete befinden sich nur wenig nördlich des Zürcher Weinlandes im Gebiet von Schaffhausen sowie im nordwestlichen Teil des Kantons Aargau. Dagegen hebt sich das Gebiet in Richtung Süden bedeutend stärker mit

bis über 1 mm/Jahr in den Alpen (Schlatter 1999). Das engere Untersuchungsgebiet darf folglich neotektonisch als eher ruhig bezeichnet werden.

Die *geodätischen Messungen* erfassen nur einen sehr kurzen Zeitabschnitt des heutigen geologischen Geschehens. Allerdings gibt es in gewissen Schlaufen des untersuchten Gebietes bereits mehrere Wiederholungsmessungen, so dass Resultate über einen längeren Zeitabschnitt vorliegen. In Kombination mit den laufenden GPS-Messungen (NTB 99-08, Kap. 3.4.2) liefern die geodätischen Messungen wichtige Informationen zur heutigen Geodynamik. Nach 1991 erschienen mehrere Publikationen mit Graphiken, welche ein ausgedehntes Senkungsgebiet südlich des Rheins zwischen Untersee und Schaffhausen zeigten (Kahle et al. 1997; Labhart 1998; Schlunegger & Hinderer 2001). Sie alle basieren auf den Resultaten von Gubler et al. 1991. In NTB 99-08 (Fig. 3.3) sind, basierend auf den Resultaten von Schlatter 1999, grosse Teile dieses Gebietes als Zonen mit sehr geringen Hebungsraten dargestellt (wie übrigens auch in NTB 84-17). Senkung zeigen nur die nördlichsten Teile. Eine Detailanalyse von 16 gemeinsamen Messpunkten der drei Arbeiten von NTB 84-17 (Gubler et al. 1984), (Gubler 1991) und (Schlatter 1999) im Raum Schaffhausen – Romanshorn – St.Gallen – Pfäffikon (SZ) – Zürich – Baden – Koblenz zeigt, dass 2 Standorte in allen 3 Messkampagnen Senkung anzeigen (Koblenz, Schaffhausen). 8 Stationen zeigen in allen Messkampagnen leichte Hebung an; 5 weitere Stationen ergeben sowohl in der 1. wie in der 3. Messkampagne Hebung, in der zweiten aber Senkung (Weiach, Rümlang, Emmishofen, Lütisburg, Wattwil). Eine genauere Betrachtung zeigt, dass diese 5 Stationen zumindest in den ersten beiden Messkampagnen nur sehr geringe Hebungs- oder Senkungstendenz aufweisen und dass die doppelte Standard-Abweichung jeweils viel höher ist als die gemessenen Werte. Dies bedeutet, dass der Zuverlässigkeit dieser Werte nicht die gleiche Bedeutung zukommt wie z.B. jener von Koblenz, Schaffhausen, Romanshorn, Rorschach, Pfäffikon oder Uznach. Die Interpretation durch die Nagra in Beil. 3.5-1 (NTB 99-08), welche auf den Werten von Schlatter 1999 beruht, dürfte damit die nach heutigen Erkenntnissen Beste sein. Um die Qualität dieser Werte weiter zu verbessern und die Zuverlässigkeit der Aussagen zu festigen wird empfohlen, die Messung der Schlaufen der Nordostschweiz etwa in den Jahren 2008-2010 erneut zu wiederholen.

Die *geomorphologische Studie* beruht auf einer minutiösen Analyse der Quartären Abfolgen in der Nordschweiz (Graf 1993). Sie stellt die erste Übersicht dar, welche versucht, die Sedimente in einen glazialgeschichtlichen Kontext zu stellen, welcher moderne Analysen zur Eiszeitdatierung aus den verschiedensten Gebieten einbezieht (Kleinsäugerstratigraphie, Pollenanalyse, Tiefseebohrungen, Eiskernbohrungen, Sedimentologie, Klimageschichte). Leider steht im Untersuchungsgebiet nur eine einzige zuverlässige Datierung für die Zeit zwischen 1 und 2.6 Millionen Jahren zur Verfügung (Bolliger et al. 1996). Somit sind viele Annahmen über die Dauer von Kalt- und Warmzeiten offen. Die relativen Abfolgen sind gut dokumentiert. Es wäre wünschenswert, die Abfolge durch weitere Datierungen zu bestätigen. Dies bedingt wohl ein umfangreiches Projekt (Magnetik, evt. Kleinsäuger), es ergäbe sich dann die Möglichkeit, die Wechsel der Glazial- und Interglazialzeiten feiner zu erfassen und damit die Aussagen über vertikale Bewegungsraten zu festigen.

Bei der *Beckenmodellierung* (Leu et al. 2001) wurden die üblichen Datensätze verwendet, welche heute in der Oelindustrie für ähnliche Modellierungen angewendet werden. Von spezieller Wichtigkeit sind dabei die während der Versenkungsphasen erreichten Höchsttemp-

eraturen (Maturität, Schegg & Leu 1998) sowie deren Datierung (Fission Track Methode). Obschon die Daten der Vitrinit-Reflexion zwischen den verschiedenen Labors leicht variieren, liegen die Hebungsraten doch in einer ähnlichen Grössenordnung. Die angewandte Methodik ist nachvollziehbar und umfasst alle wichtigen Parameter. Eine gewisse Unsicherheit besteht in der Festlegung des Wendepunktes zwischen Absenkung und Hebung vor rund 10 Millionen Jahren. Die Einengung erfolgte einerseits durch die bekannten Alter der jüngsten Ablagerungen der Oberen Süsswassermolasse (ca. 12 Millionen Jahre, Bolliger 1998). Sichere Altersangaben (z.B. Datierung mit Kleinsäugern) für noch jüngere Ablagerungen der Oberen Süsswassermolasse fehlen.

Schwieriger zeigte sich hingegen, den Zeitpunkt des Beginns der Hebung festzulegen, aus dem sich dann die Hebungsgeschwindigkeit herleiten liess: In den 3 Bohrungen Herdern, Benken und Weiach wurde jeweils ab der heutigen Höhenlage der Molasseobergrenze und den aus Fig. 3.2 (NTB 99-08) herausgelesenen Hebungsgeschwindigkeiten der betreffenden Bohrlokalisierung mit konstanter Geschwindigkeit zurückgerechnet. Dabei ergaben sich für die verschiedenen Bohrungen ähnliche Schnittpunkte mit den Daten der Überlast gemäss Leu et al. 2001 (NTB 99-08, Fig. 4.6: bei 10.0, 9.5 und 9.8 Millionen Jahren). So ergibt sich ein Zeitraum des Beginns der Hebung zwischen 10 und 9.5 Millionen Jahren. Das nahe Beieinanderliegen der Schnittpunkte zeigt, dass die Benutzung der Hebungsdaten aus der geodätischen und geomorphologischen Analyse zur Berechnung des Ausgangspunktes der Hebung berechtigt ist.

Für die weiteren Berechnungen wurden 10 Millionen Jahre gewählt. Es handelt sich bei den Hebungsdaten von 90-130 m/Millionen Jahre um Durchschnittswerte. Zeiten mit stärkeren und solche mit geringeren Hebungsdaten können abgewechselt haben. Vorübergehende Hebungsdaten von mehr als dem doppelten der angegebenen Werte sollen dabei nicht ausgeschlossen werden. Der Einfluss der angenommenen Höhenlage der Molasseoberfläche von 400 m ü.M. bei Hebungsbeginn ist gering. Bei der eher unwahrscheinlichen Annahme einer ursprünglichen Höhe von 0 m ü.M. würde die Hebungsgeschwindigkeit um 0.04 mm/Jahr grösser, bei 800 m ü.M. würde sie entsprechend reduziert.

Gesamthaft gesehen darf die erarbeitete Hebungsgeschwindigkeit für das potenzielle Standortgebiet von 0.08 bis 0.15 mm/Jahr als realistisch betrachtet werden für den angegebenen Zeitraum. Schätzwerte über 1 Millionen Jahre hinaus würden spekulativ.

## **Glazialgeschichte**

Für die Prognose der weiteren Entwicklung der Oberflächenmorphologie in den nächsten 1 Millionen Jahren wurden von der Nagra verschiedene Klimaszenarien evaluiert. Als wahrscheinlichste Entwicklung erwies sich die Fortsetzung des in den letzten ca. 2.6 Millionen Jahren dominierenden Eishausklimas. Entscheidend ist dabei das Vorhandensein eines Kontinentes in Pollage (Antarktis, Haeberli 2004). Einen Übergang zu einem weltweiten Treibhausklima im betrachteten Zeitraum erachte ich als wenig wahrscheinlich, wenn auch die anthropogenen Einflüsse langfristig schwierig einzukalkulieren sind. Kurzfristige Klimaschwankungen sind gemäss neueren Modellrechnungen wahrscheinlich (Alley et al. 2003, Stocker et al. 2001) und führen langfristig wieder zu einer Eiszeit.

Die unter diesen Bedingungen ablaufenden Prozesse sollen daher hier analysiert werden.

Die Rekonstruktion des Ablaufs der Vereisungen der letzten 2.6 Millionen Jahre im Bericht beruht vor allem auf geomorphologischen Studien im Raum Nordschweiz-Süddeutschland (Graf 1993, Graf & Müller 1999 u.a.). Für diesen Zeitraum werden 14 Kaltzeiten aufgeführt (NTB 99-08, Fig. 2.7). Über die Dauer der jeweiligen Kalt-Warmphasen kann wenig ausgesagt werden. Der Wechsel von 41 ka zu 100 ka Zyklen vor ungefähr 800-900 ka (NTB 99-08, Fig. 5.3) brachte eine Verstärkung der Ausbreitung und Erosionsfähigkeit der Gletscher mit sich. Obschon es unsicher ist, ob diese längeren Zyklen in Zukunft weiter anhalten werden oder ob sie wieder durch kurzfristige Schwankungen abgelöst werden, wurde von der Nagra im Sinne des "worst case" davon ausgegangen, dass weiterhin 100 ka Zyklen dominierend sein würden für den Betrachtungszeitraum. Dies würde bedeuten, dass mit weiteren Eiszeiten mit ähnlicher Ausbreitung der Gletscher wie bisher gerechnet werden muss. Die Studie nimmt an, dass mindestens 1 bis 2 mal die Gletscher ihre bisherige maximale Ausdehnung erreichen werden.

### **Diskussion und Beurteilung**

Die Ansicht der Nagra, dass die Fortsetzung des Eishausklimas das wahrscheinlichste Szenarium der nächsten 1 Million Jahren ist, sowie die Einschätzung, dass dieses Klimaszenarium in Bezug auf die mögliche Langzeitentwicklung der Geosphäre am signifikantesten ist, kann ich voll unterstützen.

Wegen der mangelnden Kenntnis der exakten zeitlichen Abläufe der Klimaentwicklung in den letzten 2 Millionen Jahren gibt es Unsicherheiten in den zeitlichen Prognosen. Auch das Ausmass der künftigen Vereisungsphasen sowie das Erosionspotential während der Kalt- und Warmphasen ist schwierig abzuschätzen. Aus diesen Gründen hat die Nagra in ihrem Bericht mit sehr konservativen Annahmen versucht, für den Betrachtungszeitraum die maximal mögliche Erosionsrate im Zürcher Weinland abzuschätzen. Diese Schätzungen beruhen auf Datensätzen, welche heute anerkannt sind (Erosionsraten linear und flächenhaft, Hebungsdaten). Aus diesen Überlegungen ergeben sich folgende offene Punkte und Empfehlungen:

- Es fehlen gute Datierungen: Vor dem Zeitpunkt 1.8 Millionen Jahren liegt im Untersuchungsgebiet keine Datierung der Glazialgeschichte vor, aber aufgrund von Paläoböden und Caliche-Krusten kann von drei älteren Vereisungen ausgegangen werden. Am Irchel konnte eine Säugetierfauna mit einem Alter von 1.8 Millionen Jahren bestimmt werden in warmzeitlichen Ablagerungen. Für die darauf folgenden 1 Million Jahre sind verschiedene Eisvorstösse und auch Beweise für Warmzeiten dokumentiert, welche aber wegen ihrer Anzahl nicht mit den 41 ka Zyklen in Übereinstimmung gebracht werden können. Nur in den letzten ca. 700-800 ka kann eine gewisse Parallelität zwischen den in den Eisdecken der Antarktis und von Grönland gemessenen Isotopen-Schwankungen und der Anzahl Eisvorstösse belegt werden. Zur Präzisierung der Altersbeziehungen sollte also versucht werden, weitere gute Datierungen der verschiedenen Phasen zu erhalten. Dies ist besonders wichtig, um die Geschichte der überfluteten Täler besser zu verstehen. Haben auch die jüngsten Vorstösse bis auf den Fels erodiert oder erfolgte die stärkste Tiefenerosion in einer der früheren Eiszeiten und wenn ja in welcher? Auf dieses Ziel ist die künftige Forschung auszurichten (Magnetik, Säuger, Isotopen).

- Die Übertiefung von Tälern stellt eine potentielle Gefährdung der Einschlussbarrieren eines Tiefenlagers dar. Bisher gibt es allerdings keine übertieften Täler, welche zum Niveau des Referenzlagers hinunterreichen. Zwar liegt die Felsoberfläche lokal sowohl im Zürichseetal (Giovanoli et al. 1984) wie auch im Thurtal bei Andelfingen (Freimoser und Frank 1993) ca. 100 m ü.M. Die Basis all dieser übertieften Täler liegt jedoch in der Molasse; nirgends wurde bis auf die Kalke des Mesozoikum erodiert; diese würden der Erosion einen weit grösseren Widerstand bieten als die Sandsteine und Mergel der Molasse und damit die Erosionsgeschwindigkeit reduzieren.
- Es wird nicht klar ausgeführt, warum nicht auch eine Eiszeit mit grösserer Ausbreitung und Eismächtigkeit der Gletscher im Vorland möglich sein soll als die bisher maximale vor mind. 300'000 Jahren. Die Wahrscheinlichkeit und die möglichen Auswirkungen eines solchen Falles sollten diskutiert werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass sich zukünftige Gletscher weitgehend an die bisherigen Talungen halten und somit für das Lager keine grössere Gefahr besteht, wenn es ausserhalb solcher Talungen geplant wird. Allerdings zeigen Freimoser & Frank (1993) eine vom Thurtal nach NW abgehende untiefe Talung in Richtung Marthalen. Auch diese Talung kann im Extremfall weiter benutzt und allenfalls vertieft werden. In Beilage 5.3c Mitte (NTB 99-08) wird dieses Szenarium dargestellt und es wird dabei angenommen, dass das Tal auch in den Malmkalk eingetieft wird. Auch bei diesem extremen Szenarium (maximale Rückerosion des Rheins) bleiben aber nach 1 Million Jahren im Raum des Referenzlagers noch mindestens 350m Überdeckung, wenn das Lager z.B. genau unter einer solchen Talung in 650m Tiefe gebaut würde. Wo voraussehbar, wird einer solchen Talung ausgewichen.
- Jede übertiefte Talung wird kurz nach dem Rückzug eines Gletschers sehr schnell wieder mit Erosionsschutt gefüllt. Für grössere, alpenrandnahe Talungen dauert eine solche Füllung etwas länger (Vierwaldstättersee ca. 35'000 Jahre, NTB 93-34).

Aus den oben erwähnten Punkten geht hervor, dass der zeitliche Ablauf der Glazialgeschichte, seine Zyklizität sowie die Sedimentations- und Erosionsabläufe noch besser verstanden werden sollten. Insbesondere ist es wichtig zu wissen, ob Gletscher bei jeder Eiszeit den Untergrund bis auf den Fels erodiert haben, oder ob die grossen Übertiefungen auf einmalige Situationen zurückzuführen sind. Diese Fragen müssen im Rahmen künftiger Forschungsprogrammen geklärt werden (Bohrungen im Thurtal und vergleichbaren übertieften Tälern, Datierung und Charakterisierung der glazialen und interglazialen Sedimente sowie Rekonstruktion der Erosions- und Ablagerungsgeschichte).

## **Erosionsszenarien**

Die Abtragung erfolgt während der Kaltzeiten grösstenteils linear, während der Warmzeiten sowohl durch flächenhafte Verwitterung und Abtransport (Denudation) wie auch durch lineare fluviatile Erosion. Die massgebenden Prozesse werden insbesondere in NTB 99-08, Kap. 5.2 ausführlich diskutiert. Insbesondere wird auch auf die Bedeutung der anthropogenen Beeinflussung hingewiesen, welche Analysen der Vergangenheit und Prognosen stark erschwert.

## Kaltzeiten

Die Erosion erfolgt vor allem durch Felsabbruch in der Nähe des Akkumulationsgebietes der Gletscher (Felsstürze durch Übersteilung) sowie unter dem Gletscher in der Nähe seiner Zunge durch fliessendes Wasser sowie durch im Gletscher eingefrorene Gesteinspartikel am Gletscherboden. Uebertiefung entsteht vor allem während Ruhephasen im Zungenbereich.

Wegen der tiefen Temperatur spielt die flächenhafte Denudation in dieser Phase eine untergeordnete Rolle. Eisfreie Hochzonen (Nunataker) bleiben oft über mehrere Kaltzeiten erhalten.

## Warmzeiten

### *Flächenhaft*

Die möglichen Faktoren, welche die Denudationsrate in einem bestimmten Raum beeinflussen sind mannigfaltig, und nicht zuletzt kann der Mensch einen grossen Einfluss ausüben. Die Positionierung der NE-Schweiz auf Fig 5.6 (NTB 99-08) zwischen Abtragungsraten von 0.004 und 0.04mm/Jahr ist für Zeitspannen ohne häufige Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten gut gewählt. In den Warmzeiten spielt die chemische Verwitterung gegenüber den Kaltzeiten eine wichtige Rolle. Die Denudationsrate würde gemäss Pt.3.1 die in diesem Gebiet errechneten Hebungsraten nicht ausgleichen.

### *Linear*

Die lineare Erosion entlang von Flussläufen ist durch das Relief und die Erosionsbasis resp. den Vorfluter bestimmt. Langfristig strebt ein Flusslauf einen Gleichgewichtszustand an. Im betreffenden Fall ist der Rhein zwischen Bodensee und Basel Erosionsbasis (Fig. 5.1 NTB 99-08). Bei der Annahme einer Rückerosion ab Meeresspiegel bis in die Alpen auf einem idealen Profil (eine Annahme, die für den vorgesehenen Zeitraum unreal und daher nur als "worst case" dargestellt ist) ergäbe sich eine zusätzliche Tieferlegung von ca. 100 m in 1 Million Jahren. Dies würde entlang der Wasserläufe ungefähr der Hebungsraten entsprechen. Dies bedeutet aber gesamthaft eine Reliefverstärkung.

## **Diskussion und Beurteilung**

Die Erosionsszenarien umfassen ein grosses Spektrum von Annahmen. Die Nagra berücksichtigt jeweils die für das Lager ungünstigsten Annahmen (worst case). Nachvollziehbar ist die Annahme, dass die Fortsetzung eines Eishaus-Zeitalters die ungünstigste Variante darstellt. Entscheidend ist die Antwort auf die Frage, ob im gegebenen Zeitraum (1 Million Jahre) eine die schützenden Deck-Schichten verletzende Erosion stattfinden kann. Aufgrund der vorliegenden Daten über die Ereignisse der vergangenen rund 2 Millionen Jahren gibt es keinen Prozess, der eine Erosion bis auf die Rahmengesteine des potentiellen Tiefenlagers bewirken könnte. Lediglich in einem der "worst-case"-Szenarien (NTB 99-08, Beil. 5.3c, Mitte) wird die oberste Einheit des Mesozoikum (Kalke des Malm) anerodiert. Diesem Gestein wird aber in den Ausbreitungsrechnungen keinerlei Rückhaltefunktion zugeordnet (Verkarsteter Aquifer).

Schwierig zu beurteilen ist die Aussage, dass sich zukünftige Gletscher an ehemalige Täler halten und diesen somit bei der Positionierung des Lagers ausgewichen werden kann. Diese Aussage trifft wohl zu, solange die künftigen Gletscher sich in ihrer Ausdehnung und Mächtigkeit nicht wesentlich von jenen der bisherigen Kaltzeiten unterscheiden. Ebenso trifft sie wohl für die alpenfernen, distalen Gebiete wie das Zürcher Weinland zu. In proximalen

Regionen könnten grössere Eismassen zu neuen Transfluenzen und damit neuen Wegen der Gletscherzungen führen. Auch bei einem solchen (von der Nagra nicht erwähnten) Extremszenarium würden weder das Wirtgestein noch die hangenden Rahmengesteine von der Erosion berührt.

Wie schon oben erwähnt ist für die Absicherung der in den Szenarien gemachten Aussagen eine bessere Kenntnis der Entstehungsgeschichte und Füllung der übertieften Täler im Alpen-Vorland notwendig. Wichtig ist die Antwort auf die Frage, ob diese Täler bei jeder (insbesondere der letzten) Eiszeit bis auf den Fels erodiert wurden oder ob sie seit der grössten Eiszeit nur noch verfüllt und allenfalls glazial belastet wurden. Eine Studie der ETH Zürich (ETH Report 3465/19, 2001) zeigt, dass im Untersuchungsgebiet z.B. im Thurtal bei Thalheim grössere Mächtigkeiten von vorbelasteten Sedimenten des Quartärs in den Talfüllungen liegen, die von jüngeren glazial nicht belasteten Seeablagerungen überlagert sind. Dasselbe gilt für das Glattal bei Bülach oder für das Profil des Chachberges beim Rhein. Dies würde bedeuten, dass die letzte Eiszeit nicht mehr bis auf den Fels erodiert hat. Der Frage der Erosions- und Sedimentationsgeschichte in den einzelnen übertieften Tälern muss in den nächsten Jahren noch vertieft und standortbezogen nachgegangen werden

## **Schlussfolgerungen**

Die Schlussfolgerungen werden nach Zeitintervallen gegliedert um die Aussagekraft der Abschätzung zuverlässiger darzulegen.

### 0-1000 Jahre

In diesem Zeitraum ist der Einfluss des Menschen am grössten. Probleme könnten sich aus der erwarteten Klimaveränderung und evt. dadurch entstehender Veränderungen der Gesellschaft ergeben. Nach Stocker et al. 2001 sind kurzfristige Klimaschwankungen in Zukunft zu erwarten. Sie können in Europa zu Erwärmungen oder zu Abkühlungen führen. Die Jahres-Durchschnittstemperatur könnte um ca. +/- 5°C variieren, was zu starken Veränderungen in der landwirtschaftlichen Nutzung führt. Allerdings kommt es in diesem Zeitraum nicht zur Entwicklung grosser Gletscher.

Durch Völkerwanderungen oder Konfliktsituationen kann das Wissen über den Lagerstandort bereits in dieser kurzen Zeit verloren gehen. Durch natürliche Vorgänge (Erosion, Hebung) würde ein Tiefenlager gemäss Referenzfall in diesem Zeitraum nicht gefährdet.

### 1000-10'000 Jahre

Die durch die dannzumalige menschliche Gesellschaft verursachten möglichen Klimaänderungen sind kaum mehr prognostizierbar. Die nächste Eiszeit ist noch nicht zu erwarten. Die natürlichen Vorgänge lassen einen flächenhaften Abtrag im Zürcher Weinland von 5 bis 50 cm erwarten. Die Hebung beträgt ca. 1 m. Bei diesen Schätzungen ist der Einfluss des Menschen auf die Erosion (Übernutzung des Bodens, Stein und Kiesabbau) nicht berücksichtigt, welcher lokal heute ein mehrfaches der natürlichen Erosion ausmacht.

10'000 - 100'000 Jahre

Gemäss den meisten Klimamodellen wird in diesem Zeitraum die nächste Eiszeit erwartet. Je nach deren Dauer und Ausmass kann sich das Eis bis ins Zürcher Weinland ausbreiten. Zur Hauptsache werden sich die Gletscherarme an die vorhandenen Täler halten. Das bereits heute übertiefte Thurtal bei Andelfingen könnte nur dann eine zusätzliche Übertiefung erfahren, wenn der Gletscher mit seinem Zungenbereich wieder genau am selben Ort läge, wie zum Zeitpunkt der früheren Übertiefung, da sich solche Übertiefungen vor allem im Zungenbereich durch subglazial abfliessendes, sedimentbeladenes Schmelzwasser bilden (Häberli 2004). Die Entstehung eines neuen Tales, z.B. genau über dem Lagerareal, und die Auskolkung bis auf die Malmkalke, ist in diesem Zeitraum sehr unwahrscheinlich. Die flächenhafte Erosion ist in Kaltzeiten eher reduziert. Gegenüber heute würden bis Ende dieser Betrachtungsperiode flächenhaft nicht mehr als etwa 5 m abgetragen. In den Tälern entspräche die Erosion (Ausnahme Übertiefung durch Gletscher) in etwa der Hebung, d.h. ca. 10 m.

100'000 – 1 Million Jahre

Für diesen Zeitraum werden die Aussagen spekulativ. Die vorhandenen Klimamodelle (z.B. Loutre & Berger 2000) nehmen meist eine Fortsetzung des Eishaus-Klimas an. Ungewiss ist dabei, ob mit einer Fortsetzung der 100'000-Jahre Zyklen gerechnet werden muss oder ob sich eine andere Rhythmizität einstellt. Die Nagra rechnet zumindest mit 1-2 Eiszeiten, welche das Ausmass der bisher grössten Eiszeit erreichen könnten. Es wäre aber auch eine "Extrem-Eiszeit" denkbar mit einer Ausdehnung weit über die bisherigen Maxima hinaus und mit erhöhter Mächtigkeit des Eises. Eine solche "Extrem-Eiszeit" würde nach Häberli 2004 aber kaum ein erhöhtes Erosionspotential im Zürcher Weinland bedeuten, da dann das Gebiet nicht im Zungenbereich des Gletschers liegt und das Eis eher einen zusätzlichen Schutz bietet.

Fazit

Nach dem Studium der Unterlagen zum Entsorgungsnachweis bin ich zu folgenden Schlüssen gekommen:

- Die Annahmen, welche die Nagra bei der Erstellung der Szenarien trifft, basieren auf guten wissenschaftlichen Daten.
- Dabei wurden die neuesten Daten bis zur Erstellung des Berichtes im Jahr 2002 berücksichtigt. Die Forschung geht weiter. In diesem Sinne werden gegenwärtig auch weitere Daten, insbesondere zu den geodynamischen Bewegungen (GPS-Messnetz, Landesnivellement-Messungen, etc.), gesammelt.
- Die Erosionsszenarien beinhalten ein breites Spektrum von Fällen. Generell wurden oft pessimistische, überkonservative Annahmen getroffen.
- Mit einer Referenztiefe von 650-750 m für das Lager im Opalinuston wird ein genügender Schutz vor Glazialerosion erreicht.
- Wie schon seinerzeit der Bericht NTB 93-34 zu den Erosionsszenarien am Wellenberg darf auch der Bericht NTB 99-08 und dessen Schlussfolgerungen als umfassend und kritisch bezeichnet werden. Die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen in den Berichten NTB 02-03 und NTB 02-05 sind nachvollziehbar und begründet.
- Im Rahmen einer Standortcharakterisierung sind die Quartärforschungsarbeiten weiter zu führen und zu vervollständigen.

## Literaturverzeichnis

- Alley, R.B. und 10 weitere Autoren 2003: Abrupt Climate Change. Science 299, 2005-2010.
- Bolliger, T. 1998: Age and geographic distribution of the youngest Upper Freshwater Molasse (OSM) of eastern Switzerland. Eclogae geol. Helv. 91, 321-332.
- Bolliger, T., Fejfar, O., Graf, H. & Kälin D.W. 1996: Vorläufige Mitteilung über Funde von pliozänen Kleinsäugetern aus den höheren Deckenschottern des Irchels (Kt. Zürich). Eclogae geol. Helv. 89, 1043-1048.
- ETH-Report 3465/19 2001: Soil Profiles and Transfer Functions for a new Swiss Seismic Building Code. Part 1 Compilation of Geological and Geotechnical Data from Northern Switzerland. Version 1.1
- Freimoser, M. & Frank, S. 1993: Isohypsen der Felsoberfläche im nördlichen Teil des Kantons Zürich und angrenzenden Gebieten. Unpublished NIB, Nagra, Wettingen
- Giovanoli, F., Kelts, K., Finck, P., Hsü, K.J. 1984: Geological framework, sea survey and seismic stratigraphy. In: Quaternary geology of Lake Zürich; an interdisciplinary investigation by deep-lake drilling. Contr. To Sedimentology 13: 5-20.
- Graf, H. 1993: Die Deckenschotter der zentralen Nordschweiz. Diss ETH Zürich Nr. 10205.
- Graf, H. & Müller, B.U. 1999: Das Quartär: Die Epoche der Eiszeiten. In: Bolliger, Th. (ed.): Geologie des Kantons Zürich. Ott Verlag, Thun, 71-95.
- Gubler, E. 1991: recent crustal movements in Switzerland – Vertical movements. Chap.5: Geodynamics. In: Swiss Geodetic Commission (eds.): Report on the geodetic activities in the years 1987 to 1991.SGC Report., Zürich, presented to the XX. General Assembly of the Int. Union of Geodesy an Geophysics in Vienna, August 1991.
- Kahle, H.G., Geiger, A., Bürki, B., Gubler, E., Marti, U., Wirth, B., Rothacher, M., Gurtner, W., Beutler, G., Bauersima, I. und Pfiffner, O.A. (1997) "Recent crustal movements, geoid and density distribution: Contribution from integrated satellite and terrestrial measurements", pages 251-259 in "Results of NRP 20, Deep Structure of the Swiss Alps", Birkhäuser Verlag Basel.
- Häberli, W. 2004: Mit Butter hobeln – glaziale Erosions- und Sedimentationsprozesse. Vortrag vor der Geologischen Gesellschaft Zürich vom 4.1.2004.
- Häberli, W. 2004: Eishaus + 10<sup>6</sup> a. Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre. Expertenbericht zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). HSK 35/93.
- Labhart, T. 1998: Geologie der Schweiz. Ott Verlag, Thun.

- Leu, W., Greber, E. & Schegg, R. 2001: Basin modeling NE-Switzerland: Burial, erosion and temperature history of wells Benken, Weiach and Herdern-1. Unpublished NIB, Nagra, Wettingen
- Loutre, M.F & Berger, A. 2000: Future climatic changes: Are we entering an exceptionally long interglacial? *Clamatic Change* 46, 61-90.
- Nagra NTB 84-17: Gubler, E., Schneider, D. & Kellerhals, P. 1984: Bestimmung von rezenten Bewegungen der Erdkruste mit geodätischen Methoden. Nagra, Wettingen
- Nagra NTB 84-26: Diebold, P. & Müller, W. 1985: Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. Nagra, Wettingen.
- Nagra NTB 93-34: Klemenz, W. 1993: Erosionsszenarien Wellenberg. Nagra, Wettingen.
- Nagra NTB 99-08: Müller W.H., Naef, H. & Graf, H.R. 2002: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und langzeitszenarien Zürcher Weinland. Nagra, Wettingen.
- Nagra NTB 02-03: Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Nagra, Wettingen
- Nagra 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, Wettingen.
- Schegg, R. & Leu, W. 1998: Analysis of erosion events and paleogeothermal gradients in the North Alpine Foreland basin of Switzerland. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 141, 137-155.
- Schlatter, A. 1999: Neotektonische Untersuchungen in der Nordostschweiz: Kinematische Ausgleichung der Landesnivellementslinien und Übersicht über die Ergebnisse der geodätischen Messungen. Unpublished NIB, Nagra, Wettingen
- Schlunegger, F. & Hinderer, M. 2001: Crustal uplift in the Alps: why the drainage pattern matters. *Terra Nova* 13, 425-432.
- Stocker, T.F., Knutti, R. & Plattner, G.-K. 2001: The future of the thermohaline circulation – A perspective. In: *The Oceans and Rapid Climate Change: Past, Present, and Future*, edited by D. Seidov, M. Maslin, and B. J. Haupt, Volume 126 of *Geophysical Monograph*, , Am. Geophys. Union, Washington, D. C., 277-293.

# **Beurteilung der sedimentologischen und lithofaziellen Verhältnisse des Opalinustons im Zürcher Weinland**

Prof. Andreas Wetzel

---

## **Vorbemerkung**

In dieser Stellungnahme zum Geosynthesebericht der Nagra (NTB 02-03) wird erörtert, ob es bei dem heutigen Stand der Kenntnis hinsichtlich der Sedimentologie und Lithologie des Wirtgesteins Fakten gibt, die den Opalinuston im Zürcher Weinland als Wirtgestein für ein Lager radioaktiver Abfälle als nicht geeignet erscheinen lassen und das Projekt daher aufgegeben werden sollte, oder ob das Projekt weiterverfolgt werden kann. Der zweite Fall impliziert aber nicht, dass ein Lager für radioaktive Abfälle an diesem Standort gebaut wird, da auch zu einem späteren Zeitpunkt heute nicht bekannte Gründe eine Aufgabe des Standorts rechtfertigen könnten. Innerhalb dieses Szenarios erfolgt diese Stellungnahme und es wird auf bestimmte Punkte hingewiesen ("Empfehlungen"), die bei weiteren Untersuchungen ins Kalkül gezogen werden sollten.

Generell sind die Untersuchungen der Nagra zu den Eigenschaften des Opalinustons und seiner möglichen Eignung als Wirtgestein für ein Endlager radioaktiver Abfälle detailliert, haben einen hohen wissenschaftlichen Standard und sind dementsprechend umfangreich. Der Standort-Nachweis basiert auf sehr grossen Datensätzen, die teilweise publiziert wurden, teilweise nicht. Die Fülle der Daten erforderte, sich bei der Kompilation des Standort-Nachweises (NTB 02-03) auf Wesentliches zu beschränken. Die sich bei der Durchsicht des NTB 02-03 für mich ergebenden Fragen gehen zum Teil darauf zurück. Um die Beurteilung möglichst adäquat durchzuführen, wurden unklare Aspekte und Fragen formuliert und der Nagra vorgelegt. Die Nagra nahm dazu Stellung, verwies auf schon durchgeführte Analysen, andernorts Berichtetes oder nahm die Anregungen auf. So sind im Folgenden einige wichtige Aspekte auch unter Berücksichtigung dieser zusätzlichen Informationen beleuchtet.

## **Lithologie**

Der weitgehend pelitische, im Gebiet der Nordschweiz etwa 80 bis 120 m mächtige Opalinuston akkumulierte während des Aaleniums in einem flachmarinen, epikontinentalen Ablagerungsraum. In der zentralen Nordschweiz akkumulierte der Opalinuston innerhalb einer Ammoniten-Subzone, im südwestdeutschen Raum und angrenzenden Gebieten (dazu gehört auch Benken) war die Opalinuston-Fazies über eine etwas längere Zeitspanne entwickelt (z.B., Etter, 1990; Geyer & Gwinner, 1991). Als Liefergebiete der Sedimente kommen das sogenannte Alemannische Land im Süden und das Böhmisches Massiv in Frage (z.B., Ziegler, 1990). Da der Ablagerungsraum einerseits flach (Wassertiefe im Bereich weniger Zehner Meter) und andererseits morphologisch gegliedert war, sind die Transportwege der Sedimente nicht direkt rekonstruierbar. Eine morphologische Gliederung des Ablagerungsraums in Schwellen und Senken ergibt sich im Gebiet der Nordschweiz aus einer Reihe von Beobachtungen (siehe auch Wetzel & Allia, 2000, 2003, Wetzel et al., 2003): Die Wassertiefe bei Ablagerung lag zeitweise im Bereich der Sturmwellenbasis, worauf Sedimentstrukturen hinweisen, oder etwas darunter

und war damit deutlich geringer als die Mächtigkeit. Demzufolge muss der Akkommodationsraum synsedimentär entstanden sein. Zweitens sind die Differenzen der Mächtigkeit zwischen Gebieten hoher und geringer Mächtigkeit lokal/regional zeitweise grösser als die Wassertiefe bei Ablagerung. Daher sind relative Maxima der Mächtigkeit zumindest temporär als Depotzentren anzusehen und relative Minima wenigstens als kurzfristig existierende Schwellen. Diese Deduktion wird durch die Analyse der Paläoströmungsrichtungen unterstützt: Sie sind auf relative Isopachen-Maxima hin gerichtet. Demnach kann man von einem morphologisch gegliederten, durch synsedimentäre Subsidenz geprägten Ablagerungsraum ausgehen. Interessanterweise finden sich Depotzentren in räumlicher Nähe zu prä-existenten Strukturen im Grundgebirge.

Der Opalinuston der Nordschweiz besteht aus dunkelgrauen, oft monoton wirkenden Peliten. Eingeschaltet sind Silt- und Feinsand-Lagen, Kalkbänkchen wie auch Kalk-Konkretionen. Basierend auf Korngrösse und Sedimentstrukturen sind – nach Allia (1996) – verschiedene Lithofazies-Typen unterscheidbar. Sie umfassen *homogene Pelite* ohne primäre Sedimentstrukturen, *laminierte Pelite* mit lagiger, durch Korngrössenwechsel gebildeter Feinschichtung, *dünne, gradierte Quarz-Siltlagen*, 1-5 mm dick und lateral bis zu mehreren 10er Meter durchhaltend, *diskontinuierliche, arenitische Lagen*, bis zu 10 cm dick, hauptsächlich aus feinen bioklastischen Kalken oder Sanden bestehend (mit Übergängen zwischen beiden Endgliedern), die meist über mehrere 10er Meter durchhalten und deren Sedimentstrukturen sie als Tempestite zu bezeichnen erlauben, ebenso wie *kontinuierliche, arenitische Lagen* (maximal 15 cm dick), die sich über mehrere Meter oder Zehnermeter erstrecken und aus Kalk und oder Quarz bestehen, *Konkretionen*, die in bestimmten Profilabschnitten recht häufig sind, dann oft in Lagen angereichert und in hoher Dichte, und in *knollenführenden Bänken* sekundär angereicherte kalzitische Konkretionen, die als Anzeichen für lokale Erosion (auf temporär existierenden) Schwellen gelten können (Wetzel & Allia, 2000).

Die verschiedenen Lithofazies finden sich in mehr oder minder gut entwickelten Abfolgen, innerhalb derer der Anteil der Silt- und Arenit-Lagen jeweils tendenziell nach oben hin zunimmt und ein Trend zu dickeren Lagen und grobkörnigeren Sedimenten zu bestehen scheint; gegenläufig verringert sich der Pelit-Anteil. Idealerweise formt eine solche Abfolge einen Dachbankzyklus, allerdings ist eine vollständige Ausbildung nur selten zu beobachten. Meist fehlen die oberen Parteien, und eine Abfolge schliesst mit einer mächtigen, diskontinuierlichen, arenitischen Lage ab. Solche "oben unvollständigen" Abfolgen sind zwischen 3 und 10 m, meist 4-8 m mächtig und repräsentieren ebenfalls Dachbankzyklen.

Derartige Dachbankzyklen sind bohrlochgeophysikalisch nachweisbar und auch im Aufschluss mehr oder minder gut zu beobachten. Dachbankzyklische Lithofazies-Abfolgen wurden für den Opalinuston (vor allem für die oberen Anteile) wie auch für sein Hangendes beschrieben (z.B., Bläsi, 1987). Bei den heute gebräuchlichen chronometrischen Zeitskalen (z.B., Gradstein et al., 1995; Hardenbol et al., 1998) ergeben sich Zyklenlängen von etwa 20'000 Jahren, was Präzessionszyklen im Milankovitch-Band entsprechen könnte. Die Mächtigkeit der Zyklen sagt kaum etwas über die Geschwindigkeit der Subsidenz aus, da der Ablagerungsraum nicht stets auf gleiches Niveau mit Sediment aufgefüllt wurde. Die Zyklen lassen sich gegebenenfalls über Distanzen von mehreren Kilometern oder mehr korrelieren. Im oberen Teil des Opalinuston scheinen die Dachbankzyklen etwas ausgeprägter, und damit besser korrelierbar zu sein (z.B., Bläsi, 1987; Häring & Müller, 1994).

Eine dachbankzyklische Korrelation über die gesamte Mächtigkeit und über weite Distanzen ist wahrscheinlich kaum oder nur eingeschränkt möglich. Eine genaue Analyse von Profilen (z.B.,

Allia, 1996) zeigt nämlich, dass sich selbst in Gebieten grosser Mächtigkeit wiederholt Anzeichen für Ablagerung im Bereich der Sturmwellenbasis und damit für flacheres Wasser finden. Entsprechend treten auch Hiatus-Schichten (*sensu* Wetzel & Allia, 2000) auf. Diese Beobachtungen betonen die starke Veränderlichkeit und die Dynamik des Ablagerungsraumes und den starken Einfluss synsedimentärer Bewegungen des Untergrunds, die wiederum die Sedimentverteilung (und damit die Entwicklung von Dachbankzyklen) beeinflussen. Da aufgrund der nicht besonders guten Aufschlussverhältnisse und dem Mangel an stratigraphischen Leithorizonten einzelne Akkumulationseinheiten nicht genau differenziert werden können, kann die laterale Beständigkeit von Lithosomen mit bestimmten Eigenschaften nur abgeschätzt werden. Basierend auf den Analysen von Robin et al. (1998) liegt die laterale Kontinuität einzelner Lithosome möglicherweise im Bereich bis zu wenigen Zehner Kilometern. Trotz der Dynamik des Ablagerungsraumes ist die lithologische Variabilität des Opalinustons im Gebiet der Nordschweiz nicht so deutlich, dass das Ausscheiden weiterer Formationen gerechtfertigt wäre.

Im Standort-Nachweis (Nagra, 2002) werden die lithologischen Variationen dargestellt, aber nicht immer in den Zusammenhang gestellt (s.u.). Auch wenn die lithologischen Schwankungen makroskopisch und bohrlochgeophysikalisch ermittelt über weite Strecken gering sind (Häring & Müller, 1994), variiert der Tongehalt (geophysikalisch über etwa 30 cm gemittelt) in der Bohrung Benken doch zwischen 35% und 75% (min/max; Fig. 5.3-3). Diese Variationen beeinflussen zwar die Eigenschaften des Opalinustons, aber nie in einem Mass, dass eine neue Formation (kartierbare Einheit) auszuscheiden wäre. Trotz dieser Schwankungen entspricht der Opalinuston lithologisch (z.B., Stow, 1981) und geotechnisch (z.B., Mitchell, 1993) einem Pelit ('mudstone'). Im Standort-Nachweis sind bestimmte genetische Aspekte und Korrelationen zwischen geotechnischen Eigenschaften und Lithologie nicht umfassend erörtert, das stellt die Eignung des Gesteins nicht in Frage, aber eine Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte könnte nützlich sein.

## Empfehlungen

- Eine *genetische Interpretation* der Ursachen der lithologischen Variationen erlaubt eine Prognose hinsichtlich der Geometrie und Verbreitung von Lithosomen mit bestimmten Eigenschaften. Eine genetische, prozessorientierte Interpretation sollte feinskalige, also einzelne Sandlagen und auch gross-skalige, also in Abfolgen gruppierte lithologische Variationen (etwa 2-8 m mächtige "Dachbank"-Zyklen, wie sie aus anderen Bohrungen und aus dem Hangenden bekannt sind) umfassen und deren geometrische und räumliche Aspekte berücksichtigen. Derartige zusätzliche Untersuchungen würden bei eventuellen Baumassnahmen eine Optimierung ermöglichen.
- Analyse der Sedimentverteilung unter Berücksichtigung der während der Ablagerung des Opalinuston aktiven tektonischen Trennflächen.
- Die *Zuordnung von wichtigen geotechnischen Eigenschaften zur Lithologie* sollte noch stärker herausgearbeitet werden, um die Prognostizierbarkeit innerhalb des Opalinustons zu verbessern. Eine Korrelation lithologischer, geotechnischer und bohrlochgeophysikalischer Daten (Messungen derselben Proben mit bekannten Bezug zur Umgebung) würde auch eine Übertragbarkeit von Daten aus dem Felslabor Mont Terri verbessern. Es sollte nicht die Chance vergeben werden, durch eine differenzierte Betrachtung optimale Lösungen zu erhalten.

## Abschätzung der maximalen Temperatur

Die maximale Paläo-Temperatur repräsentiert für ein Lager radioaktiver Abfälle eine kritische Grösse, da oberhalb dieser Temperatur physiko-chemische Reaktionen im Gestein ablaufen können, die möglicherweise die Gesteinseigenschaften beeinflussen. Die Nagra ist sich der Sensitivität dieses Parameters bewusst und hat entsprechend aufwändige Untersuchungen mit verschiedenen Methoden durchgeführt. Die Ergebnisse sind in zahlreichen Nagra Internen Berichten dargestellt. Allerdings liefern die verschiedenen Methoden aufgrund ihres unterschiedlichen experimentellen Designs nicht identische Ergebnisse. Die Darstellung der Paläotemperatur-Geschichte im Standort-Nachweis gibt die angewandte methodische Vielfalt wider; die Aussagen sind aus oben genannten Gründen nicht ganz ohne Widerspruch. Nachfragen ergaben mehr Klarheit und die Nagra bestätigte, dass weitere Untersuchungen zu diesem essentiellen Parameter durchgeführt werden.

Methodisch wie analytisch als gut sind die Ergebnisse der Apatit-Spaltspur-Analyse der Kristallin-Probe aus der Bohrung Benken einzustufen, die eine Maximaltemperatur von etwa 95-105°C während des Tithonium/Berriasium ergeben. Untersuchungen am Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel (Timar-Geng et al., submitted; daher pers. comm.) zur Paläotemperatur-Geschichte der Flanken des südlichen Oberrheingrabens anhand von Zirkon-Spaltspur-Analysen liefern für die Phase der maximalen Erwärmung ähnliche Ergebnisse. Demzufolge kann der besagten Probe aus der Bohrung Benken eine hohe Zuverlässigkeit zugebilligt werden. Das gilt nicht nur den Zeitpunkt, sondern auch das Ausmass ( $T_{\max} = 95-105^{\circ}$  für das mehr als 400 m tiefer liegende Kristallin). Erneute Modellberechnungen (Mazurek, 2004, pers. comm.) bestätigen diesen Wert. Die maximale Erwärmung des Opalinustons dürfte nach Modellrechnungen und experimentellen Daten 70° bis 80° C erreicht haben. Manche Analysen ergeben Werte im unteren Teil dieses Temperatur-Bereichs, andere im oberen, manche gehen sogar darüber hinaus. Nach der augenblicklichen Datenlage (Nagra, 2002) sind 70° bis 80° C mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen.

## Empfehlungen

- *Abgleich der verschiedenen Datensätze zur Paläo-Temperaturgeschichte* und Versuch der Erklärung/Modellierung der Abweichungen voneinander, um einen *verlässlichen Maximalwert für den Opalinuston* zu erhalten. Eine breitere Variation der Prämissen hinsichtlich der geologischen Geschichte sollte bei weiteren Modellierungen in Betracht gezogen werden.
- Alternativ wäre an eine *Gebinde-Auslegung* zu denken, bei der die maximale Paläo-Temperatur nicht überschritten wird.

## Diagenese und Kluft-/Aderbildung

Der Opalinuston besitzt unbestritten ein hohes "Selbstabdichtungsvermögen" für Klüfte, also für deren Verschliessen und hydraulisches Unwirksammachen, das zeigen Modellrechnungen, Experimente und Untersuchungen in Aufschlüssen. Nichts desto trotz treten im Opalinuston, wenn auch sehr selten, mit diagenetischen Mineralen gefüllte Adern auf. Die zwei in den Kernen der Bohrung Benken im Bereich des Opalinustons angetroffenen Adern enthalten Füllungen, die sich telegenetischen Prozessen zuordnen lassen. In der Bohrung Benken lässt sich der Zeitraum der Kluftbildung und Füllung trotz aufwändiger Untersuchungen nicht genau

erfassen. Die Temperatur- und Absenkungsgeschichte anderer Bohrungen zeigt, dass sich telegenetische Kluffüllungen bei Beginn zusätzlicher Erwärmung bilden können (wie gesagt können, aber nicht müssen), allerdings ist das nur für die Rahmengesteine des Opalinustons genau nachgewiesen. Zudem fällt die Phase der Füllung der Klüfte in den anderen Bohrungen in Zeiten verstärkter tektonischer oder hydrothermaler Aktivität. Daher lassen sich Tektonik und Temperatur als Ursache für Klufformung und -füllung nicht scharf voneinander abgrenzen. Die Nagra ist sich der Problematik der Bildung von Klüften bewusst und hat entsprechend umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Trotzdem möchte ich weitere Untersuchungen empfehlen, da Baumassnahmen im Opalinuston einerseits und das Aufbringen einer zusätzlichen thermischen Last andererseits zu Spannungen im Gestein führen können. Die thermische Ausdehnung des Gesteins kann sich u.U. bis an die Oberfläche auswirken (Modellrechnung Emch+Berger, siehe Beitrag P. Hufschmied) und zu Differentialspannungen zwischen Lagerbereich und Umgebung führen. Wie die Modellierungen der Nagra zeigen, ist mit der Erwärmung auch ein Aufbau von Porenwasserüberdrücken verbunden, der sich erst nach der Abkühlung wieder abbaut.

### **Empfehlungen**

In derselben Modellrechnung, die in den bisherigen Untersuchungen keine gravierenden Effekte durch den Bau und den Wärmepuls eines Lagers für radioaktive Abfälle aufzeigen, sollten die Rahmenbedingungen entsprechend der möglichen Ausdehnung im und über den Lagerbereich und den daraus resultierenden Differentialspannungen schrittweise geändert werden, bis die Festigkeit des Gesteins überschritten wird, um die für die Riss- oder Klufformung kritischen Werte abschätzen zu können. Die Modelle sollten anhand von Heizexperimenten, wie sie im Opalinuston im Felslabor Mont Terri durchgeführt werden, validiert werden.

### **Zusammenfassung**

Insgesamt sind die lithologischen Eigenschaften des Opalinustons hinsichtlich seiner Eignung zur Lagerung radioaktiver Abfälle als günstig zu beurteilen; die Lithologie bedingt eine geringe hydraulische Durchlässigkeit und das "Selbstabdichtungsvermögen" bei der Klufformung. Die für die Lagerung radioaktiver Abfälle günstigen lithologischen Eigenschaften werden durch den Bau eines Tiefenlagers und das Aufbringen einer thermischen Last beeinflusst. Diese Einflüsse sind im Falle einer Weiterführung des Projektes noch vertiefter zu untersuchen und genauer zu quantifizieren, um mögliche Risiken zu minimieren.

### **Literaturverzeichnis**

- Allia, V., 1996. Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz. Dissertationen aus dem Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Basel, No. 10, 185 pp.
- Bläsi, H.-R., 1987. Lithostratigraphie und Korrelation der Dogger Sedimente in den Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 80: 415-430.
- Etter, W., 1990. Paläontologische Untersuchungen im unteren Opalinuston der Nordschweiz, Dissertation Universität Zürich, Zürich, 151 pp.

- Geyer, O.F. und Gwinner, M.P., 1991. Geologie von Baden-Württemberg. Schweizerbart, Stuttgart, 482 pp.
- Gradstein, Agterberg, F.P., Ogg, J.G., Hardenbol J., van Veen, P., Thierry, J. and Huang, Z.F.M. F.M., 1995. A Triassic, Jurassic and Cretaceous time scale. In: W. Berggren, D.V. Kent, M.-P. Aubry and J. Hardenbol (Editors), Geochronology, Time Scales and Global Stratigraphic Correlation. SEPM (Society for Sedimentary Geology), Special Publication No. 54, pp. 95-126.
- Hardenbol, J. Thierry, J., Farley, M.B., Jacquin, T., de Graciansky, P.-C. and Vail, P., 1998. Mesozoic and Cenozoic sequence chronostratigraphic framework of European basins. In: P.-C. de Graciansky, J. Hardenbol, T. Jacquin and P. Vail (Editors), Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication No. 60, pp. 3-13 (+ 8 charts).
- Häring, M.O. und Müller, D., 1994. Faziesstudie Oberer Keuper bis Malm: Petrophysikalische Auswertung und geologische Interpretation der Fremd- und Eigenbohrungen in der Nordostschweiz und dem näheren Ausland. Nagra Interner Bericht Wettingen, 22 pp.
- Mitchell, J.K., 1993. Fundamentals of Soil Behavior. Wiley & Sons, New York, 437 pp.
- Nagra, 2002. Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Nagra Technischer Bericht, 02-03. Nagra, Wettingen, 659 pp.
- Nagra, 2004. Projekt Opalinuston – Antworten der Nagra zum Fragenkatalog der KNE. Nagra Arbeitsbericht NAB 04-01. Nagra, Wettingen.
- Robin, C., Guillocheau, F. and Gaulier, J.-M., 1998. Discriminating between tectonic and eustatic controls on the stratigraphic record in the Paris basin. *Terra nova*, 10: 323-329.
- Stow, D.A.V., 1981. Fine-grained sediment: terminology. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 14: 243-244.
- Wetzel, A. und Allia, V., 2000. The significance of hiatus beds in shallow-water mudstones: an example from the Middle Jurassic of Switzerland. *Journal of Sedimentary Research*, 70: 170-180.
- Wetzel, A. und Allia, V., 2003. Der Opalinuston in der Nordschweiz: Lithologie und Ablagerungsgeschichte. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 96: 451-469.
- Wetzel, A., Allenbach, R. und 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.
- Ziegler, P.A., 1990. Geological Atlas of Western and Central Europe. Shell Internationale Petroleum Maatschappij, Den Haag, 239 pp.

# Beurteilung der hydrogeologischen-hydrochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen

Prof. Hans-Rudolf Pfeifer

---

## Fragestellung

Der vorliegende Bericht diskutiert die im Geosynthesebericht NTB 02-03 dargelegten Datengrundlagen zur Hydrogeologie und Hydrochemie und beurteilt die für das Zürcher Weinland dargelegten hydrogeologischen Verhältnisse. Folgende Fragen stehen dabei im Vordergrund :

- Ist der hydrogeologische Datensatz nachvollziehbar und vollständig?
- Ist die hydrogeologische Gliederung (Stockwerkstruktur, Durchlässigkeitsverhältnisse\*) genügend untersucht und verstanden?
- Was können die hydrochemischen und isotopengeochemische Daten über Herkunft, Alter und Fliessverhältnisse aussagen?

## Die regionalen hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland

### Herkunft der Daten

Fünf verschiedene Datenquellen standen zur Verfügung:

- Bohrdaten und hydraulische Tests von Nagra-Bohrungen, die im Rahmen des Untersuchungsprogrammes Kristallin Nordschweiz gemacht wurden
- Literaturdaten und frühere Kompilationen der Nagra über die verschiedenen Thermalwasser-Quellen und zugehörige Bohrungen westlich und südlich des Zürcher Weinlandes
- Bohrdaten und später durchgeführte hydraulische Tests der Bohrung Benken (1997-1999).
- Resultate verschiedener Bohrungen der Swiss Petrol für das nördliche Mittelland aus den Jahren 1960- 1975 (ca. 6 Bohrungen)
- Publikationen des Geologischen Dienstes von Baden-Württemberg über die hydrogeologischen Verhältnisse nördlich des Rheins und des Bodensees in Richtung der Einzugsgebiete von Donau und Neckar

### Stockwerk-Struktur der Grundwasserleiter und ihre hydraulischen Durchlässigkeiten

Auf der Grundlage zahlreicher Bohrungen und umfangreicher reflexionsseismischer Untersuchungen sind der Aufbau und die Lagerungsverhältnisse der mesozoisch-tertiären Sedimentschichten in der Nordschweiz gut bekannt. Das Zürcher Weinland zeichnet sich dabei durch eine ruhige, annähernd horizontale Lagerung der Sedimentschichten aus. Die geologischen Formationen können dabei von oben nach unten hydrogeologisch wie folgt charakterisiert werden (14 Einheiten):

\* Verwendete Begriffe: 1) **Aquifer** (Grundwasserleiter mit typischer hydraulischer Durchlässigkeit von  $10^{-2}$  bis  $10^{-9}$  m/s); gut durchlässig  $10^{-2}$  bis  $10^{-6}$ , mässig durchlässig:  $10^{-6}$  bis  $10^{-8}$ , schlecht durchlässig  $10^{-8}$  bis  $10^{-9}$ . 2) **Aquitard** (Grundwasserstauer mit weitgehend stagnierenden Porenwässern und typischen hydraulischer Durchlässigkeit von  $\ll 10^{-10}$  m/s.)

1. Fluvioglaziale und lakustrine Lockergesteinsablagerungen des Quartärs (0 – ca. 70m Tiefe, lokal auch mächtiger): meist gut durchlässiger oberflächennaher Aquifer, lokal aber auch mit Einschaltungen von geringdurchlässigen Schichten (Tone, Silte). Die grösseren Flusstäler weisen dabei die ergiebigsten Grundwasservorkommen auf und werden für Trink- und Brauchwasserzwecke genutzt. Die Piezometerbohrung beim Bohrplatz Benken zeigte eine wechselhafte Abfolge von Sanden, Kies, Ton, Silt und Seekreide.
2. Ablagerungen des Tertiärs: Bunte Mergel, schwach zementierte Sande und Sandsteine der Unteren Süsswassermolasse USM (70 – 200m Tiefe). Die heterogene sedimentologische Architektur bewirkt eine ausgeprägte hydrogeologische Anisotropie. Die Durchlässigkeit in vertikaler Richtung ist grundsätzlich gering, in horizontaler Richtung können einzelne Schichten durchlässig sein und Aquifercharakter haben (Mineralwasserfassung Bohrung Eglisau).
3. Kalkschichten des oberen Malms: sie bilden einen mässig durchlässigen regionalen Aquifer. Durch karstige Gesteinslösung ist die Verteilung der Durchlässigkeitswerte stark variabel (200-440m Tiefe).
4. Mergelschichten des unteren Malms und des oberen Doggers (obere Rahmengesteine der Wirtgesteinsformation Opalinuston): Grossräumig geschichteter Grundwasserstauer (Aquitard). Tiefe: ca. 440- 510m.
5. Kalksandsteine und Mergel der Wedelsandstein-Formation. Im süddeutschen Raum bildet der Wedelsandstein oberflächennah teilweise einen Aquifer, im Zürcher Weinland in der Bohrung Benken ist er tonig-mergeliger ausgebildet und weist deshalb eher Aquitardcharakter auf (510- 540m).
6. Tonsteine der Opalinuston-Formation (Wirtgestein, inkl. Gesteine mit Murchisonae-Alter): Weitgehend homogen geschichteter Aquitard von sehr geringer Durchlässigkeit (538- 652 m Tiefe).
7. Tone, Ton- und Kalk-Mergel sowie knollige Kalke des Lias (Jurensis-Mergel bis Obtusus-Ton): Aquitard mit ähnlichen Eigenschaften wie das Wirtgestein (652- 684m Tiefe).
8. Kalkiger Lias (Arietenkalk und Angulatenschichten): In der Bohrung Benken schlecht durchlässige Schichtabfolge mit Aquitardcharakter (684-687m Tiefe). Potentieller geringmächtiger Wasserleiter von lokaler Bedeutung.
9. Mergel-, Ton- und kalkig-dolomitische Schichten der unteren Lias- und oberen Keuperformation (Psiloceras-Schichten, Rhät und Knollenmergel), inhomogener Aquitard (692-710m).
10. Sandsteine des Keupers (Stuben- und Schilfsandstein, z.T. kalkig-dolomitisch): Mässig durchlässiger Aquifer, jedoch mit unsicherer seitlicher Ausdehnung (710- 736m Tiefe).
11. Tonsteine, Mergel, Dolomit- und Anhydrit-Gips-Schichten der Gipskeuper- und der Lettenkohle-Formation, inhomogener relativ mächtiger Aquitard (736- 811m Tiefe).
12. Dolomite und Kalke des oberen Muschelkalkes: gut durchlässiger Aquifer von regionaler Bedeutung (811- 875m).
13. Anhydrit- Ton- und Gips-Schichten des mittleren und unteren Muschelkalkes (mit 13m mächtigem Salzlager in der Bohrung Benken): inhomogene, geschichtete Abfolge mit sehr geringer Durchlässigkeit, ausgeprägter Aquitard (875-975m Tiefe)
14. Sandsteine der Buntsandstein-Formation (Trias): bilden einen gut durchlässigen Aquifer von regionaler Bedeutung (975-983m Tiefe).

In der Bohrung Benken folgen unter den mesozoischen Ablagerungen direkt Gneisse, Migmatite und Ganggesteine (Aplite, Pegmatite) des kristallinen Grundgebirges (Schwarzwald-Kristallin): diese sind geklüftet und inhomogen, und haben über die erbohrte Strecke den Charakter eines mässig bis gut durchlässigen Kluft-Aquifers.

Da Buntsandstein und kristallines Grundgebirge von den darüberliegenden Schichten hydraulisch entkoppelt sind werden sie im diskutierten Bericht sinngemäss nicht weiter berücksichtigt und hier deshalb auch nicht weiter beurteilt.

### **Chemische Zusammensetzung der Tiefengrundwässer**

Die chemischen Parameter (Proportionen der verschiedenen gelösten Ionen) geben vor allem Hinweise auf die Wasser-Gesteins-Interaktion (Ionenaustausch und eventuelle Auspressung nach oben oder unten während der Gesteinsbildung bzw. Diagenese) und/oder die Herkunft der Wässer. Die Sauerstoff-, Wasserstoff- und Kohlenstoff-Isotopen und die gelöste Edelgas-Konzentrationen erlauben vor allem die relative Stabilität, resp. das Eindringen und Wandern von meteorischen Wässern nachzuweisen und zeitlich einzugrenzen. Aufgrund der chemisch und isotopenmässig im Gebiet des Zürcher Weinlandes charakterisierten Tiefengrundwässer ist im Deckgebirge ein klarer Stockwerkbau erkennbar.

Die Wässer der Quartär Formation (Einheit no. 1) entsprechen einem sehr schwach mineralisierten Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>-(SO<sub>4</sub>)-Wasser\*\* und enthalten Tritium, sind also nach ca.1950 (Hauptinput des Bombentritiums in die Atmosphäre) eingesickert.

Die Wässer des Tertiärs (Molasse no. 2) gehen mit zunehmender Tiefe vom Erdalkali-HCO<sub>3</sub>-Typus über den Na-HCO<sub>3</sub>-Typ langsam in den stark mineralisierten Na-Cl-(SO<sub>4</sub>)-Wassertyp über, der im Malmaquifer (no. 3) dominiert. Die Mineralisierung des Malmwassers der Bohrung Benken liegt bei 10-12 g/l . Die Isotopen- und Edelgaszusammensetzung beider Formationen zeigt, dass es sich um Mischwässer von schichtgebundenen alten Formationswässer mit während der Eiszeit eingesickerten jüngerem Oberflächenwässer handelt, die mittlerweile die im frühen Tertiär durch Karstbildung (Zeit der Bohnerzformation im Eozän) mässig bis stark durchlässige Malmkalke erreicht haben.

Die Porenwässer der oberen Rahmengesteine der Opalinuston-Formation (no. 4 und 5) sind typische mehr oder weniger stagnierende Wässer vom stark mineralisierten Na-Cl-(SO<sub>4</sub>)-Typ, welche mit zunehmenden Chloridkonzentrationen in die Opalinuston-Porenwässer übergehen.

Die aus dem Opalinuston (no.6) gewonnenen Na-Cl-Porenwasserproben zeichnen sich durch eine hohe Mineralisierung (13 – 14 g/l) aus. Die Chemie- und Isotopendaten der ausgepressten Porenwässer weisen auf grosse Anteile von altem fossilen marinem Formationswasser hin, welches nach der Kompaktion und Gesteinsbildung (Diagenese) im Porenraum eingeschlossen blieb. Der Chemismus des Porenwassers dürfte sich somit über Millionen von Jahren zur heutigen Zusammensetzung entwickelt haben. Wegen der sehr geringen Durchlässigkeit (k-Werte von 10<sup>-13</sup>- 10<sup>-14</sup> m/s ) des Opalinustones lassen sich die heutigen chemischen Porenwasserzusammensetzung nur durch sehr langsame Diffusionsprozesse erklären. Auch die Porenwässer der unteren Rahmengesteinsformationen (no. 7,8 9) sind vom Na-Cl-(SO<sub>4</sub>)-Typ und zeigen gegenüber den oberen Rahmengesteinen symmetrische Diffusionsprofile. Die Isotopen- und Edelgaszusammensetzungen der Porenwässer der darunterliegenden Schichten der Obern Trias (Keuper, no. 10) ergeben hingegen wesentlich jüngere Alter zwischen 2.6 Millionen und 25'000 Jahren, d.h. bestätigen den erwähnten mässig durchlässigen Aquifercharakter dieser Formation (Sandsteinkeuper). Ueber die Porenwässer des Gipskeuper-Aquitards (no.11) ist nur wenig bekannt.

\*\* Verwendete Nomenklatur nach Jäckli (1970) : Ausgehend von der chemischen Analyse in Millival% (Milli-Aequivalent-prozente, sog. Normalität) der Kationen und Anionen, werden alle Ionen im Namen aufgeführt welche mit über 10 Millival% vertreten sind. Die Reihenfolge entspricht der abnehmenden Häufigkeit. Ionen die mit mehr als 50 Millival% werden unterstrichen, solche mit weniger als 20 Millival% in Klammern aufgeführt.

Die Wässer des Muschelkalkaquifers (no. 12) sind in der Bohrung Benken vom Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-(HCO<sub>3</sub>)-Typ. Zusammen mit den Proben der Bohrung Weiach zeichnet sich das Muschelkalk-

Tiefenwasser durch eine relativ geringe Mineralisation (2.6 g/l) wie auch durch niedrige Na- und Cl-Gehalte aus. Die Zusammensetzung der stabilen Isotopen des Wassers und der geringe Gehalt an C-14 weist auf ein Alter von ca. 12'000 - 14'000 Jahren hin.

Die darunterfolgenden Wässer der Buntsandstein-Formation sind vom Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-(SO<sub>4</sub>)-Typ. Sie sind gering mineralisiert (1.4 g/l) und dürften in Verbindung zum darunterliegenden geklüfteten kristallinen Grundgebirge sein. Ihre Isotopen- und Edelgaszusammensetzungen ergeben Einsickerungsalter von etwas über 25'000 Jahren, d.h. während der letzten Eiszeit.

Alle diese Daten zeigen, dass es sich bei den Porenwässern im Opalinuston und in den umgebenden mergelige-tonigen Rahmengesteinen um schichtgebundenes, weitgehend stagnierendes altes fossiles Meerwasser handelt, welches über Millionen von Jahren hinweg praktisch eingeschlossen blieb und mit den umliegenden Schichten hauptsächlich diffusiv ausgetauscht hat. In den darüber- und darunterliegenden regionalen Aquiferen des Malms, des Muschelkalkes und des Buntsandsteins ist hingegen ein schnellerer advektiver Transport der Tiefengrundwässer zu beobachten, deren Verweilzeiten im Untergrund im Bereich einiger 10'000 Jahre (Muschelkalk, Buntsandstein) bzw. mehrerer 100'000 Jahre (Malm) liegen dürften.

### **Verteilung der hydraulischen Potenziale und davon ableitbare Wasserflussrichtungen**

Für die meisten Aquifere sind relativ viele Potenzialmessungen aus Grundwasserständen und umfangreichen hydraulischen Bohrlochtests vorhanden, aus welchen recht zuverlässige Variationskarten der hydraulischen Druckhöhen erstellt werden können. Diese erlauben, die bestehenden und möglichen Abflussrichtungen der Tiefengrundwässer zu bestimmen, die potentiell auch von aus einem Tiefenlager austretenden Radionukliden benutzt werden könnten. Im untersuchten Gebiet können je nach Grundwasserstockwerk folgende Haupt-Abflussrichtungen beziehungsweise möglichen Austrittszonen von Tiefengrundwasser ausgeschieden werden:

- a) Grundwasserabstrom der Malmwässer in Richtung Nord-Nordwest zum Rhein (Rheinfall bei Neuhausen - Schaffhausen)
- b) Exfiltration der Wässer des Sandsteinkeupers nach Westen-Südwesten gegen das Klettgau (Wutach-Rhein).
- c) Grundwasserabstrom der Muschelkalkwässer in Richtung Süden-Südwesten zum Rhein (Zurzach-Koblenz-Waldshut). Abflüsse nach Nord-Nordosten in Richtung Neckar mit viel längeren unterirdischen Fließzeiten sind aber nicht ausgeschlossen.

Die Aequipotenziallinien des Muschelkalkes und des Sandsteinkeupers weisen auf eine Wasserscheide im Untersuchungsgebiet hin. Da der Datensatz für eine eindeutige Aussage betreffend Abflussrichtung der Tiefengrundwässer aus dem Zürcher Weinland zu klein war wurden von der Nagra für die Betrachtung der Langzeitsicherheit im Sinne eines pessimistischen Ansatzes die kürzeren Fließwege berücksichtigt.

Die im Aquitard des Wirtgesteins festgestellten hydraulischen Ueberdrücke sind nur möglich, wenn keine direkten hydraulischen Verbindungen (Störungen/Bruchzonen) zu den umgebenden Rahmengesteinen existieren.

### **Einfluss der regionalen Hydrogeologie auf mögliche Austrittspfade von Radionukliden aus dem Tiefenlager**

Wird ein geologisches Tiefenlager in der Mitte der Wirtgesteinsformationen des Opalinustons gebaut, ergibt sich nach oben und unten eine minimale Migrationsdistanz bis zum nächsten potentiellen Aquifer (oben: Wedelsandstein, unten: Sandsteinkeuper) von ca.50m, bzw. ca.60m. Wenn keine hydraulisch wirksamen Scherzonen oder Bruchzonen vorhanden sind, können sich Radionuklide im Opalinuston wegen der sehr geringen Durchlässigkeit nur über diffusive, extrem langsam ablaufende Prozesse im hydraulisch wirksamen Porenraum ausbreiten.

Trotz dieser guten Prognose sind auch wenig wahrscheinliche Fälle betrachtet worden: Falls durch tektonische Vorgänge (Hebung oder Senkung) oder durch Einwirkungen des Endlagers (Wärmeeintrag, Gasproduktion) Risse oder vertikale Bruchflächen entstehen und das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustones nur beschränkt wirken sollte, könnte die Diffusionsbarriere teilweise geschwächt werden und es ergäben sich potentielle Austrittspfade (advektiv) direkt in die begrenzenden Aquifer-Schichten. Die Distanzen, welche die Radionuklide im Advektions- und/oder Matrix-Diffusionsmechanismus in diesen Aquifer-Schichten bis zum Austritt in die Biosphäre zurücklegen müssten um an die Oberfläche zu gelangen wären dann unterschiedlich gross: Wedelsandstein 25 km (Weiach-Zurzach), Malmaquifer 2-3 km (Rhein bei Neuhausen-Schaffhausen), Sandsteinkeuper 15 km (Klettgau), Muschelkalk: 30 km (Koblenz-Waldshut). Die hydraulischen Durchlässigkeiten der direkt über oder unter dem Opalinuston liegenden potentiellen Aquifere sind wegen ihrer mergeligen Ausbildung jedoch tief ( $10^{-8}$  bis  $10^{-10}$  m/s) was den Wasserfluss begrenzt.

Bis heute liegen keine Befunde vor, die das Selbstabdichtungsvermögen des Opalinustones in Frage stellen. So zeigen die umfangreichen hydraulischen Tests im Felslabor Mont Terri, dass trotz der intensiven Tektonisierung (Faltenjura) die Durchlässigkeitswerte des Opalinustones sehr gering sind.

### **Bedeutung der regionalen Hydrogeologie für den Bau und Betrieb eines Tiefenlagers**

Da bei der Erstellung des Tiefenlagers die über dem Opalinuston liegenden Aquifere sowohl durch den schrägen Zugangsstollen wie auch durch den vertikalen Lüftungsschacht durchquert werden, ist der Wasserhaltung und der Abdichtung dieser Zonen grosse Beachtung zu schenken. Während der Bau-, Betriebs- und Beobachtungsphase des Tiefenlagers ist ein redundantes und mehrfach ausgelegtes Pumpen- und Energieversorgungssystem sicherzustellen. Die Nagra geht in ihrem Bericht zur bautechnischen Machbarkeit des Lagers (NTB 02-02) auf diese Fragen ein.

### **Bemerkungen zur Dokumentaion der Hydrogeologie in der Geosynthese**

Wie in 2.1 erwähnt, hat die Nagra seit den 80er Jahren sehr viel unternommen, um bestehende hydrogeologische Daten in ihre Erkundungstätigkeit einzubeziehen und diese dann mit gezielten zusätzlichen Bohrungen mit sorgfältigen Wasser-Probennahmen und ausführlichen hydraulischen Tests zu ergänzen, resp. in gewissen Gebieten damit erst die nötigen Datengrundlagen zu schaffen. Sie hat dabei hochqualifizierte internationale Experten zugezogen und in zahlreichen internen (NIB) und öffentlichen Berichten (NTB) wissenschaftliche Publikationen von höchstem internationalen Niveau produziert.

Die regionalen hydrogeologischen Daten des NTB 02-03 fassen diese umfangreiche Datenbasis sorgfältig und mit der nötigen kritischen wissenschaftlichen Distanz zusammen.

Allenfalls vorhandene Datenlücken, z.B. über die laterale Beschaffenheit und Homogenität des Wedelsandsteins oder des Sandsteinkeupers und über deren hydraulische Eigenschaften, werden offen dargestellt. Diesen Datenlücken wird in der Sicherheitsanalyse mit konservativen Annahmen/Parametersätzen oder mit der Nichtberücksichtigung einer Barrierenwirkung Rechnung getragen. Wir teilen die im Bericht vertretene Meinung, dass weitergehende Abklärungen mit punktuellen Bohrungen die Datenbasis nur unwesentlich verbessern würde und dass in einer nächsten Projektphase vor allem mit grossräumigen untertägigen Erkundungen (Stollen, Felslabor) in Verbindung mit Bohrungen die für die Charakterisierung des Wirtgesteins und der Rahmengesteine notwendigen Datengrundlagen erhoben werden sollen. Das untertägige Erkundungsprogramm sollte dabei in einer Vorbereitungsphase ein vorgängiges Bohrprogramm vorsehen, mit welchem dann die hydraulischen Auswirkungen des Felslaborbaus verfolgt und aufgezeigt werden (Monitoringprogramm).

Was die Verständlichkeit der hier diskutierten Kapitel betrifft, sind grosse Unterschiede vorhanden. In einzelnen Fällen wird ein, ohne detailliertes Studium der Basis-Berichte (NIB) schwierig verständlicher Fachjargon verwendet, was die Lektüre aufwendig und zeitraubend macht.

### **Schlussfolgerungen**

Die umfangreichen Daten und ihre sorgfältige Zusammenstellung und Interpretation durch die Nagra und ihren Experten ergeben ein solides und nachvollziehbares Bild der hydrogeologischen Verhältnisse im Zürcher Weinland. Obwohl nicht alle Formationen im gleichen Umfang und gleicher Breite hydrogeologisch untersucht wurden und im Detail bekannt sind, sind die daraus gezogenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar und plausibel und erlauben für die jetzige Projektstufe (Entsorgungsnachweis) die Frage der Eignung des Opalinustones im Zürcher Weinlandes positiv zu beantworten. Die vorgelegten Befunde weisen auf ein sehr hohes Einschlussvermögen des Opalinustones hin (Verweilzeiten der Porenwässer im Zeitbereich von Millionen von Jahren). Eine Erweiterung und Vervollständigung des Datensatzes wird in der nächsten Projektphase (weitere Bohrungen, untertägiges Erkundungsprogramm mit Felslabor am ausgewählten Standort, Monitoringbohrungen) erfolgen müssen, um die erforderlichen Beurteilungsgrundlagen zu den noch offenen Fragen zu liefern. Insbesondere wird die Rolle der Rahmengesteine des Opalinustones noch vertiefter zu klären sein.

## Referenzen

- Bertleff, B. und Watzel, R. (2002): Tiefe Aquifersysteme im südwestdeutschen Molassebecken. Eine umfassende hydrogeologische Analyse als Grundlage eines künftigen Quantitäts- und Qualitätsmanagement. Abh.L.-Amt Geologie, Rohstoffe und Bergbau, Baden-Württemberg 15, 75-90.
- Ehrminger, B., Johns, R.T and Voborny, O. (1995): Hydrogeology of the Lägern-Weinland Region of Northern Switzerland. Nagra Interner Bericht NIB-94-69.
- Jäckli, H. (1970): Klassifikation von Grundwasservorkommen. *Eclogae geol. Helv.* 63, 391-434.
- Klemenz, W., Blaser, P. und Küpfer, T. (2000): Hydrogeologie des Gebietes Lägern-Zürcher Weinland. Nagra Interner Bericht NIB 99-52.
- Nagra (1992): Hydrochemische Synthese Nordschweiz: Buntsandstein-, Perm- und Kristallin-Aquifere. Nagra Technischer Bericht NTB 91-30.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston – Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. Nagra Technischer Bericht NTB 02-02.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston. Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 02-03.
- Nagra (2002): 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 02-05.
- Nagra (2002): Sondierbohrung Benken – Untersuchungsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 00-01 (Textband und Beilagenband).
- Pearson, F.J. et al. (2003): Mont Terri Project- Geochemistry of water in the Opalinus Clay Formation at the Mont Terri rock laboratory. *Berichte des BWG, Serie Geologie No.5.* Bundesamt Wasser und Geologie, Bern.
- Traber, D., Waber, H.N., Eichinger, L und Heidinger, M. (2002): Hydrochemie und Isotopenhydrologie von Tiefengrundwässern der Region Lägern-Zürcher Weinland-Hegau. Nagra Interner Bericht NIB 02-50.
- Voborny, O., Adank, P., Hürlimann, W. und Thompson, B.M. (1993): Hydrogeologische Modellierung im Opalinus-Ton und in der Unteren Süßwassermolasse der Nordostschweiz. Nagra Technischer Bericht NTB- 90-14.

# Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen

*Dr. Rolf Kipfer*

---

## Auftrag und Zielsetzung

Im Auftrag der HSK wurden die isotopengeochemischen Untersuchungen und Resultate zum insitu Transportverhalten des Opalinustones unter natürlichen Bedingungen kritisch gesichtet. Der Beurteilung dienen neben der Geosynthese NTB 02-03 folgende Nagra Technischen (NTB) und Nagra Internen Berichte (NIB) als Grundlage:

- NIB 99-42: 'Sondierbohrung Benken: Profiles of pore water content, stable isotopes and dissolved noble gas content in the pore water of samples from argillaceous rocks', Rübel und Sonntag, 1999.
- NIB 99-46: 'Sondierbohrung Benken: Hydrochemical and hydroisotopic charaterisation', Waber et al., 2002.
- NTB 00-01: 'Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht & Beilagenband'.
- NIB 00-33: 'Sondierbohrung Benken: Radioelements (U, Th, K) and noble gases' (4He, 3He/4He, 40Ar, 40Ar/36Ar), Lehmann et al., 2001.
- NIB 02-04: 'Modeling of profiles of stable water isotopes, chloride, and chlorine isotopes of pore water in argillaceous rocks in the Benken borehole', Gimmi und Waber, 2003.

Der vorliegende Bericht diskutiert und beurteilt die isotopengeochemischen Untersuchungen der Geosynthese und prüft die dort entworfene Interpretation zu den insitu Transporteigenschaften des Opalinustones und der angrenzenden Rahmengesteinen. Die Review, die sich im Wesentlichen auf die Kapitel 3.6, 4.6. - 4.8. und 5.10 der Geosynthese abstützt, fokussiert auf folgende Punkte:

- Nachvollzug und Dokumentation des isotopengeochemischen Datensatzes.
- Hinterfragen der wissenschaftlichen Abstützung der Daten.
- Vollständigkeit, Konsistenz & Belastbarkeit des Datensatzes im Lichte des heutigen Standes der wissenschaftlichen Forschung.

## Einleitende Bemerkungen und Gewichtung der Relevanz der isotopengeochemischen Untersuchungen

Generell ist die zur Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen notwendige Information auf mehrere Kapitel der Geosynthese verteilt, was das Nachvollziehen der Daten und der entwickelten Ideen & Konzepte aufwändig macht. Trotz dieser Einschränkung wird der in der Geosynthese zusammengestellte Datensatz als umfassend und die daraus abgeleitenden Interpretationen als fundiert & seriös beurteilt. Jedoch ist es faktisch unmöglich, all die in der Sache notwendigen Quervernetzungen zwischen den einzelnen Kapiteln/Textbausteinen zu verfolgen. Hierzu sind die verschiedenen Kapitel der Geosynthese zu wenig aufeinander abgestimmt.

Die Geosynthese wurde zwar richtigerweise als Metaanalyse von bestehenden technisch-wissenschaftlichen Berichten konzipiert. Jede kritische Hinterfragung der in der Geosynthese gezogenen Schlüsse muss aber notwendigerweise auf die zu Grunde gelegten Basisberichte zurückgreifen.

Die Beurteilung der isotopengeochemischen Untersuchungen und Datengrundlagen der Geosynthese konzentriert sich auf die für die Sicherheit eines geologischen Tiefenlagers wesentlichsten Punkte und versucht hierzu möglichst klare Aussagen zu machen. Die Geosynthese enthält eine Fülle weiterer erdwissenschaftlicher Informationen, auf die entsprechend nicht weiter eingegangen werden kann. In diesem Sinne kann und will die vorliegende Einschätzung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Im Vergleich zu den anderen Arbeiten lassen sich aus den isotopengeochemischen Untersuchungen im Wesentlichen zwei Aussagen gewinnen:

- Charakterisierung der relevanten Transportprozesse, welche über den Raumbereich des Opalinustones und der tonig-mergeligen Rahmengesteine ('mögliches Wirtsgestein': mWG) in- situ wirken, und
- Bestimmung der typischen Zeitskalen, die notwendig sind, um die im mWG gefundenen Stoffverteilungen zu erzeugen.

Beide Aussagen können aus meiner persönlichen Sicht nur aus den isotopengeochemischen Untersuchungen gewonnen werden. Beide dieser Punkte sind offensichtlich für jede weitergehende Sicherheitsanalyse eines möglichen geologischen Tiefenlagers zentral. Jedoch hängen die gezogenen Schlüsse hinsichtlich der Eignung des Opalinustones als mWG massgebend von den zugrunde liegenden Daten und vor allem von deren Interpretation ab. Die hierzu durchgeführten Arbeiten der NAGRA sind seriös und wissenschaftlich kompetent erarbeitet - und soweit die Geosynthese zu überblicken ist - auch beschrieben worden. Doch müsste eine weitergehende Review, die auf den Daten durchgeführten Rechnungen nicht nur nachvollziehen; vielmehr müsste sie diese unabhängig und mit anderen Verfahren nachrechnen, um so die zum Transport gemachten Aussagen zu verifizieren. Dies übersteigt jedoch klar den begrenzten Zeitrahmen der vorliegenden Review, ist aber als Teil einer weitergehenden Überprüfung in der nächsten Projektstufe (Standortcharakterisierung) vorzusehen.

## **Datenlage und experimentelle Aspekte**

### **Aquifere.**

Die isotopengeochemischen Untersuchungen an Wasserproben, welche in der Bohrung Benken genommen werden konnten, sind im NIB 99-46 von Waber et al. (2002) ausführlich beschrieben. Besonders die Wasserproben aus den tiefen Aquifereen konnten / mussten z. T. unter extrem schwierigen experimentellen Bedingungen geschöpft werden. Insbesondere die Malmkalke mit ihrer 'karstigen' Ausprägung stellten wegen dem Verlust von Bohrlochspülung besondere Probleme. Der NIB (und weniger offensichtlich die Geosynthese) legt die experimentellen Einschränkungen und Probleme klar dar. Die geführte Argumentation nimmt diese möglichen Einschränkungen auf und schliesst mögliche experimentelle Artefakte in der Diskussion immer offen ein. Die an den Tiefengrundwässern durchgeführten Untersuchungen decken das gesamte 'isotopengeochemischen Spektrum' ab, sind alle samt von anerkannten Labors durchgeführt worden ('state of the art') und sind entsprechend von guter Qualität.

### **Gesteinsanalysen.**

Die Untersuchungen der natürlichen langlebigen (Haupt-) Radioisotope (U, Th, K) und der radiogenen Edelgasisotope (durch radioaktive Prozesse erzeugtes  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ) haben Lehmann et al. im NIB 00-33 beschrieben. Die ausgewählten (wenigen) Edelgasbestimmungen an Gesteinsproben wurden nach etablierten Methoden in einem anerkannten Labor durchgeführt. Diese Messungen der im Gestein effektiv (noch) enthaltenen radiogenen Edelgase lassen sich nun mit den theoretischen Edelgasgehalten vergleichen, die sich aus den Radioelementen und dem Alter der Gesteinsformationen ergeben. Diese (wertvollen und wichtigen) Resultate sind 'quasi beiläufig' in die Geosynthese eingeflossen und sind kaum mit den anderen Datensätzen verwoben.

### **Porenwasseranalysen.**

Die experimentellen Aspekte der Edelgasanalysen an den Porenwässern sind von Rübel und Sonntag (NIB 99-42) zusammengefasst worden. Das dort entwickelte Verfahren zur Analyse der Wasserisotopie ist gegenüber der 'alten' Methoden ein echter experimenteller Fortschritt - die so erhaltenen Daten sind von sehr hoher Qualität und entsprechend belastbar. Der NTB 00-01 nimmt diese Daten auf und diskutiert sie im weiteren Zusammenhang. Gimmi & Waber leiten im NIB 02-04 aus den isotopengeochemischen Daten der Porenwässern die Transporteigenschaften des mWGs und den angrenzenden Rahmengesteine ab.

*Isotopenzusammensetzung des Wassers:* Bei den Porenwasseranalysen hat die NAGRA mit der Diffusions-Austausch-Methode (DAM) zur Bestimmung der stabilen Isotopenzusammensetzung von Wasser ( $\delta^2\text{H}$  &  $\delta^{18}\text{O}$ , siehe Rübel und Sonntag, NIB 99-42) experimentelles Neuland betreten. Im Vergleich zur standardmässig angewandten und 'akzeptierten' Vakuum-Destillations-Methode (VDM) liefert die neue Methode deutlich schwere Isotopenwerte. Die Abweichungen kommen - wie in den Berichten ausgeführt - wohl dadurch zustande, dass die VDM nicht alles Wasser aus der Gesteinsprobe zu extrahieren vermag. Dadurch sind die so bestimmten Isotopenzusammensetzungen prinzipiell als fraktioniert anzusehen, da die schweren Spezies in der Tendenz im Gestein verbleiben und die leichten Isotope / Spezies im effektiv extrahierten Wasser angereichert sind. Diese experimentelle Einschränkung entfällt bei der DAM, so dass diese Technik - im Einklang mit den von der NAGRA gezogenen Schlüssen - als die wohl robustere und verlässlichere Methode zur Bestimmung der Isotopie von Porenwässern anzusehen ist. Insofern hat sich der analytische Aufwand ausbezahlt.

Verallgemeinernd ist daraus zu schliessen, dass die NAGRA intern viel unternommen hat, um eine angemessene und belastbare Datenbasis von hoher Qualität zu garantieren. Ganz generell sind experimentelle Probleme in den entsprechenden NIBs klar offen gelegt und angesprochen (siehe oben Aquifere). Die entsprechenden Daten werden kritisch und unvoreingenommen interpretiert - Einiges davon, jedoch nicht Alles - fand Eingang in die Geosynthese.

Wegen technischen / experimentellen Problemen lieferte die DAM für den zentralen OPA Bereich in Tiefen zwischen 570 und 650 m keine verwertbaren  $\delta^2\text{H}$  &  $\delta^{18}\text{O}$  Werte. In diesem für die Interpretation des Transportes sensiblen Tiefenbereich liegen lediglich die zu leichten VDM Messwerte vor. Aus dem Vergleich der Messwerte an Porenwässern, bei denen Messwerte beider Methoden verfügbar sind, hat die NAGRA die 'fehlenden DAM' Werte aus dem VDM Messungen rekonstruiert, d.h. die  $\delta^2\text{H}$  Werte wurden systematisch um + 10.7 ‰,  $\delta^{18}\text{O}$  Werte um + 2.9 ‰ erhöht. Diese Korrektur scheint zulässig, da sich die korrigierten Daten gut in den generellen Trend der isotopischen Zusammensetzung der übrigen Porenwässern aus dem mWG einfügen (siehe Figur 3 im NIB 02-04). In der Geosynthese wird diese Korrektur nicht weiter erwähnt, obwohl die entsprechenden Proben in einzelnen - aber nicht in allen Figuren - als

'anders' geplottet sind (aber nicht als solche diskutiert werden!). Wie weit die angewandte Korrektur die später gemachten Aussagen zum Transportverhalten im mWG beeinflusst, ist schwierig objektiv zu beurteilen. Die Korrekturen sind aber durchaus vertretbar und stellen deshalb die spätere Diskussion kaum grundsätzlich in Frage.

*Chlorid- (Cl) und Chlorisotopenmessungen ( $\delta^{37}\text{Cl}$ ) im Porenwasser:* Cl<sup>-</sup> & Cl-Isotopenmessungen sind im Vergleich zu den stabilen Isotopenmessung am Wassermolekül analytisch noch anspruchsvoller und unterliegen entsprechend noch stärker experimentellen Einschränkungen. Vom Prinzip her werden die Gesteinsproben bei 105 °C getrocknet. Dabei wird angenommen, dass das so freigesetzte Porenwasser das im Gestein 'frei vorhandene' Chlor (d.h. freies im Porenwasser gelöstes Chlorid) als Chloridion mit sich trägt. Besonders in feinkörnigen Gesteinen, wie dem OPA, kann jedoch nicht immer davon ausgegangen werden, dass alles extrahierte Cl<sup>-</sup> im Gestein effektiv als im Porenwasser gelöste Spezies vorlag. Gimmi & Waber diskutieren im NIB 02-04 verschiedene Aspekte, welche diese grundlegende Annahme 'Cl liegt als im Porenwasser gelöste Spezies vor' (elektrostatische Ionenrestriktion, ionenselektive Porosität, etc) einschränken können. Die im NIB angesprochen prinzipiellen experimentellen Schwierigkeiten können zwar die Cl<sup>-</sup>-Konzentration beeinflussen, diese lässt sich aber entsprechend korrigieren. Doch keine der angesprochenen Schwierigkeiten scheint die Chlorisotopenzusammensetzung zu fraktionieren vermögen.

Die im mWG gemessenen Cl<sup>-</sup>- und  $\delta^{37}\text{Cl}$ -Profile zeigen einen stetigen Verlauf, so dass die erwähnten experimentellen Einschränkungen die Proben nicht einzeln und in erratischer Weise maskieren. Dies zeigt, dass die getroffenen Annahmen 'vernünftig' sind, und die abgeleiteten Schlüsse - sofern angemessen & vorsichtig interpretiert - vertretbar sind.

## **Interpretation der Daten**

### **Aquifere.**

Wasserproben konnte aus vier tief liegenden Aquiferen (Malm: Wohlgeschichte Kalke, Keuper: Stubensandstein, Muschelkalk: Trigonodus-Dolomit, Buntsandstein) geschöpft werden. Zur Kontrolle (geochemische Abgrenzung, Kontamination mit Bohrspülung) wurden zwei Wasserproben aus dem lokal genutzten Trinkwasser und dem oberflächennahe Grundwasser der Region Benken analysiert. Dieses oberflächennahe Grundwasser wurde als Bohrspülung eingesetzt und mit Farbstoff (Uranin) markiert, um zusammen mit der Tritiumkonzentration mögliche Beimischungen der Bohrspülung in den Tiefengrundwässern nachweisen und allenfalls korrigieren zu können.

Die Tiefengrundwässer unterscheiden sich geochemisch klar von den oberflächennahen Grundwässern, die untereinander sehr ähnlich sind (gleicher Chemismus, <sup>3</sup>H aktiv). Wie erwartet, existiert weder eine 'direkte' hydraulische, noch eine 'direkte' geochemische Verbindung zwischen den oberflächennahen und den tiefen Aquiferen. Die oberflächennahen Aquifere enthalten 'rezentes' Wasser, dass während der letzten 50 neu gebildet wurde. Die tiefere der beiden oberflächennahen Grundwasserproben weist eine leicht höhere Mineralisation auf, was auf eine leichte Beimischung von Wässern aus der Unteren Süßwassermolasse hinweist.

Die tiefen Grundwässer unterscheiden sich nicht nur gegenüber den oberflächennahen / rezenten Grundwässern, sondern sie unterscheiden sich auch gegenseitig stark. Die Tiefengrundwässer sind alle <sup>3</sup>H frei und weisen keine Anzeichen einer Beimischung von rezentem Wasser auf. Einzig die Zusammensetzung des Malmwassers musste anhand des zugesetzten Farbstofftracers

für die Beimischung von Bohrspülung korrigiert werden. Die angewandte Korrektur ist vertretbar und dürfte die geochemische Interpretation nur wenig beeinflussen. Das Grundwasser im Malm bildet die obere geochemische Randbedingung, welche den Transport von Wasser und gelösten Stoffen vertikal nach oben aus dem mWG bestimmt. Entsprechend ist in Anbetracht des jetzt vorliegenden Wissens zu empfehlen, dass, sollten weitere Bohrungen abgeteuft werden, alle technisch / experimentellen Vorkehrungen getroffen werden, um die Beprobung des Malm-aquifers zu optimieren.

Die Tiefengrundwässer weisen alle erhöhte Mineralgehalte auf. Die das mWG begrenzenden Grundwässer des Malms (oben) und des Keupers (unten) fallen auf, beide weisen hohe den Porenwässern vergleichbare TDS Gehalte auf. Während die Grundwässer des Keupers, des Muschelkalkes und des Buntsandsteines auf die globale meteorische Wasserlinie (GMWL) fallen, weicht das Grundwasser im Malm klar davon ab und zeigt  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  Werte, die mit jenen der Porenwässern aus dem mWG zu vergleichen sind ('Gesteins-Wasser-Wechselwirkung').

Die tiefer gelegenen Grundwässer im Muschelkalk und Buntsandstein scheinen sich als ursprüngliche meteorische Wässer in den entsprechenden Aquifergesteinen (Kalke bzw. Sandstein & Grundgebirge) entwickelt zu haben. Die Isotopenmessungen ( $^{14}\text{C}$ ,  $^4\text{He}$  Gehalte,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ , glaziale Edelgastemperaturen) zeigen, dass die Wasseraufenthaltszeiten in den Aquiferen des Muschelkalks & des Buntsandsteins (deutlich) kleiner sind als die in den Malm- und Keuperaquiferen. Das Muschelkalkwasser wurde wohl gegen Ende des letzten Glazials (tiefe Edelgastemperatur,  $^{14}\text{C}$  aktiv, Alter 12 - 14 kyr) gebildet; das Buntsandsteinwasser scheint ebenfalls glazial, aber deutlich älter zu sein (tiefe Edelgastemperatur, kein  $^{14}\text{C}$ , Alter > 26 kyr). Die verfügbaren Daten zeigen, dass sich die Tiefengrundwässer unabhängig von einander entwickelt haben.

Wegen ihrer grösseren räumlichen Distanz zum mWG dürften die Aquifere im Muschelkalk und im Buntsandstein die Austauschprozesse im mWG nur wenig beeinflussen. Entsprechend werden sie für die weitere Diskussion nicht weiter berücksichtigt. Dennoch bleibt fest zu halten, dass sich zwischen den Porenwässern im unteren Gipskeuper und den benachbarten wasserführenden Schichten des Stubensandsteins (oben) und des Muschelkalkes (unten) ähnliche 'diffusionsgetriebene' Stoffprofile wie zwischen dem mWG und den angrenzenden Grundwässern ausgebildet zu haben scheinen. Dies unterstreicht erneut, dass die Tiefengrundwässer jeweils eine eigene geochemische Entwicklung in vertikal entkoppelten Stockwerken, die durch undurchlässige Schichten (mWG & Keuper) strukturiert werden, durchgemacht haben.

Die Grundwässer im Malm und im Stubensandstein weisen im Vergleich zu den tieferen Grundwässern grössere TDS Gehalte, höhere  $^4\text{He}$  Konzentrationen und gegenüber der Atmosphäre erhöhte  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  Verhältnisse auf. Zusammen mit der fehlenden  $^{14}\text{C}$  Aktivität zeigen diese Resultate, dass die beiden Grundwässer 'alt bis sehr alt' sind. So liegen die Aufenthaltszeiten im Stubensandstein zwischen 26 und 2600 kyr, die im Malm zwischen einigen 100 und einigen 1000 kyr. Vorsichtig interpretiert, wie dies die Geosynthese tut, scheint sich das Stubensandsteinwasser in einem früheren Interglazial (dem heutigen Klima vergleichbare Edelgastemperatur) gebildet zu haben, während das Malmwasser noch viel früher unter einem deutlich wärmeren Klimaregime infiltrierte. Es wird wohl richtigerweise davon ausgegangen, dass das Malmwasser in Benken auf kleinen Zeitskalen 'faktisch zu stagnieren' scheint, d.h. die Strömungsgeschwindigkeiten sind wohl sehr gering.

Wird die Isotopie der Porenwässer mit jenen der Grundwässer räumlich verglichen, fällt auf, dass die Zusammensetzung der Porenwässern sich gegen oben und unten allmählich jener der angrenzenden Grundwässer nähert. Wie unten weiter ausgeführt ist, liefert diese räumliche Stoffverteilung der Geosynthese den überzeugenden und schlüssigen Hinweis auf die 'diffusive Kopplung' zwischen dem mWG und den begrenzenden Aquiferen. Die Porenwässer des mWGs scheinen mit dem angrenzenden Aquifere im diffusiven Stoffaustausch zu stehen, der die Zusammensetzung der Aquifere und der Porenwässer nachhaltig bestimmt. Hierbei wirken die Aquifere als die geochemische Randbedingungen und das mWG als Quellterm (und Anfangsbedingung).

*Zusammenfassend:* Die von der Geosynthese (siehe auch NIB99-46) entworfene Interpretation der isotopengeochemischen Daten der Aquifere ist nachvollziehbar, logisch und in sich konsistent. Folgende Punkte sind für den Sicherheitsnachweis wesentlich:

- Die Tiefengrundwässer sind hydraulisch entkoppelt und haben sich geochemisch selbstständig innerhalb den jeweiligen Aquiferen entwickelt.
- Liegen die Aufenthaltszeiten der Grundwässer im Muschelkalk und im Bundsandstein bei einigen 10 kyr, sind Aufenthaltszeiten in den das mWG begrenzenden Aquiferen eher im Bereich mehreren 10 bis einigen 1000 kyr.
- Die chemische Zusammensetzung der das mWG begrenzenden Aquifere (insbesondere im Malm) wird durch den Stoffeintrag aus dem mWG beeinflusst, wobei Stoffe diffusiv zwischen den Porenwässern des mWGs und den Grundwässern ausgetauscht werden. Konzeptuell wirken die Aquifere des Malms und des Stubensandsteins als geochemische Randbedingungen, die den diffusiven Stoffaustausch zwischen den Grundwässer und dem mWG kontrollieren.

#### **Edelgase in Gesteinen und in Gesteinsporenwässern.**

Edelgase (He Konzentrationen,  $^3\text{He}/^4\text{He}$ - &  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -Verhältnisse) wurden an ausgewählten Gesteins- & Porenwasserproben aus dem mWG und einer Probe aus dem Keuper bestimmt. Die He- und Ar-Messungen an den Gesteinen zeigen, dass die Minerale der Aquifermatrix das seit der Ablagerung des Opalinuston erzeugte radiogene  $^{40}\text{Ar}$  noch mehrheitlich enthalten (effektiv enthält der Opalinuston mehr  $^{40}\text{Ar}$ , da die detritischen Minerale wesentlich älter als der OPA sind), jedoch mehr als 90% des erzeugten He verloren haben müssen.

Die Porenwässer weisen gegenüber der atmosphärischen Sättigung stark erhöhte  $^4\text{He}$ - (Größenordnungen) & leicht grössere  $^{40}\text{Ar}$ -Konzentrationen (wenige %) auf. Die erhöhten radiogenen Edelgaskonzentrationen der Porenwässer lassen sich zwanglos durch den Eintrag von radiogenen Edelgasen aus den Mineralen ins angrenzende Porenwasser erklären. Dabei weisen die Porenwässer ähnliche  $^4\text{He}$  Konzentrationen, aber bedeutend kleinere  $^{40}\text{Ar}$  Überschüsse als das Gestein auf. Die in den Porenwässer gemessenen  $^4\text{He}$  Konzentrationen sind über den gesamten Tiefenbereich des mWGs (gilt auch für den Keuper) konstant und sind mit den  $^4\text{He}$  Konzentrationen der begrenzenden Aquifere vergleichbar: die  $^4\text{He}$  Konzentrationen sind zwischen 400m (Malmaquifer) und 750m (Porenwasser Keuper) Tiefe konstant. Für  $^4\text{He}$  scheint sich ein dynamisches Gleichgewicht zwischen der Produktion im Gestein und dem 'diffusiven' Entweichen aus dem mWG eingestellt zu haben. Wird - wie die Geosynthese das tut - nur (!) die He-Akkumulation betrachtet, baut sich das beobachtete  $^4\text{He}$  Tiefenprofil innerhalb einer charakteristische Zeitspanne von 17000 kyr auf.

Das Porenwasser und die Grundwässer im Malm, im Stubensandstein und im Muschelkalk zeigen alle  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Verhältnisse, die rund 10 mal grösser sind als im mWG gemessenen Werte

( $7 \cdot 10^{-8}$ ), die ihrerseits klar höher sind als jene, die radioaktive Zerfallsprozesse im mWG insitu erzeugen können. Der NIB 00-33 weist explizit darauf hin, dass es keine 'nahe liegende'

Erklärung für die erhöhten  $^3\text{He}/^4\text{He}$  Verhältnisse gibt. Der Hegau Vulkanismus wird als mögliche Erklärung angeboten, der  $^3\text{He}$  reiche Fluide aus dem subkontinentalen Mantel hätte eintragen können und es wird auf analoge Beobachtungen in Süddeutschland verwiesen.

Die geäußerten Einwände zum  $^3\text{He}$  sind nicht notwendigerweise 'sicherheitsrelevant'. Jedoch ist zu wünschen, diese Punkte zu klären. Im Licht der anderen isotopengeochemischen Untersuchungen scheint es möglich, dass die Grundwässer der das mWG begrenzenden Aquifere  $^3\text{He}$  heranzuführen ('Impfung weit weg im Hegau'), und dass  $^3\text{He}$  dann aus den Aquiferen ins mWG hinein (!) diffundiert.

Ebenfalls die in den Porenwässern gemessenen  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$  Verhältnisse zeigen - wie die Geosynthese und der NTB 00-01 explizit festhalten - dass Edelgase zwischen mWGs und den begrenzenden Aquiferen 'diffusiv' ausgetauscht werden. Die gemessenen Verhältnisse sind alle höher als das atmosphärische Verhältnis. Die höchsten Werte wurden in den zentralen Bereichen des mWGs und des Keupers angetroffen, von wo aus die Verhältnisse kontinuierlich zu den begrenzenden Aquiferen hin abnehmen. Wiederum wertet dies die Geosynthese - vertretbarerweise - als Hinweis auf den diffusiven Austausch zwischen den Porenwässern des mWGs und den angrenzenden Aquiferen. Doch wird dieser Befund nicht wirklich mit den anderen Befunden in Bezug gesetzt, die ebenfalls auf die stoffspezifische Diffusion als den massgebenden Transportprozess hinweisen.

*Zusammenfassend:* Die in der Geosynthese (NTB 02-03, NIB 00-33) diskutierten Edelgasresultate sind mit Vorbehalten schlüssig und lassen den vertretbaren Schluss zu, dass Edelgase diffusiv zwischen den Porenwässern und angrenzenden Aquiferen ausgetauscht werden. Folgende Punkte sollten jedoch noch näher geklärt werden:

- $^3\text{He}$  scheint sowohl in den Porenwässern, der Gesteinsmatrix und den Aquiferen angereicht ('mehr  $^3\text{He}$  als durch insitu Produktion erklärbar'). Die von der Geosynthese vorgebrachte Erklärung ist vage und bedarf weiterer Diskussion. Lässt sich das Tiefenprofil nicht durch 'diffusive Invasion' aus den Aquiferen erklären?
- Die gefundenen Edelgasprofile ( $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) in den Porenwässern sind stoffspezifisch und liefern wiederum Hinweise, dass 'diffusive Prozesse' den Stofftransport in (!) und aus mWG bestimmen. Die Geosynthese geht darauf nicht detailliert ein.
- Allgemein sind die Edelgasresultate nicht inhaltlich mit jenen der stabilen Isotopen und des Chlorids in den Porenwässern verbunden, obwohl die Edelgase wie Wasser & Chlorid den selben Transportprozessen unterliegen. Die Edelgasresultate werden als 'Dreingabe' quasi zur Bestätigung der anderen Untersuchungen des Stofftransportes im mWG angeführt. Die Information, welche in den Edelgasen steckt, wurde nicht voll ausgeschöpft. Eine gekoppelte Analyse der Edelgase zusammen mit den Isotopenuntersuchungen des Wassers & Chlors ist anzudenken.
- Die gemessenen Edelgase im Porenwasser (und in der Gesteinsmatrix) im mWG lassen sich verstehen, wenn angenommen wird, dass im mWG erzeugte radiogene Edelgase ins umgebende Porenwasser emmanieren und von dort diffusiv in die angrenzenden Aquiferen freigesetzt werden. Die gefundenen räumlichen He-Profile müssen sich über einen Zeitraum von 17000 kyr aufgebaut haben, und es dürfte sich ein Gleichgewicht zwischen insitu-He-Produktion und 'diffusiven' Helium Verlust eingestellt haben. Die in der Geosynthese abgegebene Helium-Akkumulationszeit ist rund 10 mal grösser als die

charakteristischen Zeiten, welche den Transport von gelösten Stoffen ( $\text{Cl}^-$ ,  $\delta^{37}\text{Cl}$ ) und Wassermolekülen im Porenwasser des mWG beschreiben. Es bleibt unklar, wie sich dieser Unterschied erklärt. Denkbar ist, dass sich der Unterschied aus dem Vergleich verschiedener relevanter Zeitskalen erklärt. Wiederum dürfte eine 'gekoppelte' Modellierung, die den Transport und die allfällige Produktion von verschiedenen Stoffen gleichzeitig simuliert, zur Klärung beitragen.

### **Isotopengeochemische Untersuchungen der Porenwässer im mWG.**

$\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ : Die Untersuchungen der isotopischen Zusammensetzung von Wasser- ( $\delta^2\text{H}$ ) und Sauerstoff ( $\delta^{18}\text{O}$ ) liefern zusammen mit den isotopengeochemischen Untersuchungen am Chlor die wesentlichen Daten, um die insitu im mWG wirksamen Transportprozesse und deren typische Zeitskalen zu beschreiben. Die vorgelegten Daten (NTB 00-01) und Interpretationen (NIB 99-46) zeigen schlüssig, dass diffusive gegenüber advektiven Transportprozesse den Austausch von Wasser und Stoffen im mWG kontrollieren. Das Untersuchungsprogramm hat viel unternommen, den advektiven Transport in vertikaler Richtung zu untersuchen. Dem gegenüber erscheint - im Nachhinein betrachtet - das Programm zur Charakterisierung des diffusiven Transport zwar solide, aber klein. Im Rückblick ist das verständlich - sind doch die experimentellen Herausforderungen enorm und die Probenmengen jeder Bohrung beschränkt - doch sollte dem Aspekt des 'diffusiven Transportes' bei künftigen (Nachfolge) Untersuchungen verstärkt Rechnung getragen werden.

Die Porenwässer im zentralen Bereich des mWGs weisen eine konstante Isotopie auf und liegen klar neben der GMWL, auf welche die Grundwässer aus dem Muschelkalk, dem Buntsandstein und dem Keuper zu liegen kommen. Wie bereits angetönt, folgt das Malmgrundwasser eher dem geochemischen Trend der Porenwässern und weniger dem der GMWL. Die im Porenwasser gefundenen schweren Isotopenwerte werden schlüssig als Reste eines ursprünglich marinen Formationswasser interpretiert, dem 'früh' (>> 10000 kyr) meteorisches Wasser beigemischt wurde. Später (< 10000 kyr) wurde die Zusammensetzung der Porenwässer durch den diffusiv kontrollierten Transport in Richtung der 'abgereicherten' Aquifere verändert.

Gegen die begrenzenden Aquifere hin nähert sich die Isotopie kontinuierlich der isotopischen Zusammensetzung der Tiefengrundwässer des Malms und des Stubensandsteins an, d. h. mit zunehmender Entfernung vom zentralen Bereich des mWGs werden die Porenwässer zusehends isotopisch leichter. Es bilden sich so räumlich gekrümmte Isotopenprofile aus (besonders ausgeprägt gegen unten, weniger klar gegen oben). Solche Krümmungen lassen sich nur erklären, wenn diffusive Prozesse auch auf grossen Skalen massgebend zum wirksamen Transport beitragen. Dieses einfache und zwingende Argument wird in der Geosynthese nicht erwähnt.

Bevor die Resultate näher kommentiert werden, sind einige Punkte explizit hervor zu heben:

- Aus dem Übergangsbereich zwischen den oberen Rahmengesteinen und dem Malmaquifer liegen keine Porenwasseruntersuchungen vor. Dadurch ist der Übergang zum Malmaquifer hin experimentell kaum belegt. Der Gradient der isotopischen Zusammensetzung in Richtung Malm scheint klein zu sein, was zeigt, dass der vertikale Transport nach oben schwach ist. Dies erlaubt der Interpretation, die Datenlücke durch Variation der getroffenen isotopengeochemischen Annahmen (Aquifer als isotopengeochemischen Randbedingungen) zu überbrücken. Dies ist der einzige gangbare Weg zur Interpretation, kann jedoch nicht das Fehlen der Daten kompensieren.
- Wie oben diskutiert, liegen im unteren Bereich des mWGs nur die Isotopenresultate der VDM vor, die entsprechend der systematischen Abweichung zwischen der VDM und der

experimentell robusteren DAM korrigiert wurden. Dieses Vorgehen ist vertretbar. Es ist aber festzuhalten, dass damit gerade aus den zur Charakterisierung des Transportes wesentlichen Übergangsbereichen keine experimentellen Daten vorliegen, die jeder zweifelnden Kritik standhalten.

Die beobachteten Isotopenprofile in den Porenwässern lassen sich nur verstehen, wenn der Transport über den gesamten Raumbereich des mWGs weitgehend diffusiv erfolgt. Gimmi & Waber (NIB 99-49) haben diese wesentliche - aber wohl robuste - Annahme der Interpretation der gemessenen Isotopenzusammensetzung der Porenwässern zu Grunde gelegt. Die Daten wurden ausgehend von analytischen Lösungen, wie sie sich für den eindimensional advektiv-diffusiven Transport für einfache Geometrien ergeben, interpretiert. Es wurde angenommen, dass sich das mWG als homogene Platte mit konstanten physikalischen Transporteigenschaften beschreiben lässt, die gegen oben und unten durch die Aquifere des Malms und des Stubensandsteins begrenzt wird (analytische Lösung der 1-dimensionalen Advektions-Diffusions-Gleichung für den beiseitigen konservativen Stofftransport einer Platte für am Rand vorgegebene Randbedingungen). Es war innerhalb dieser begrenzten Review nicht möglich, die abgeleiteten analytischen Lösungen im Einzelnen formal nach zu rechnen, wie dies die HSK für den Nachvollzug der Ausbreitungsrechnungen vorsieht.

Da die Aufenthaltszeiten in den Aquifern kleiner sind als die der Porenwässer und sich die isotopische Zusammensetzung des Wassers in den Aquiferen von jenen der Porenwässer unterscheidet, wirken die begrenzenden Grundwässer als isotopengeochemische Randbedingungen, die über den Aufbau von Stoffgradienten den diffusiven Wasser- und Stofftransport erzwingen. Die freien Parameter der analytischen Lösung - im Wesentlichen die effektiven stoffspezifische Diffusionslängen  $L_i$  - wurden für verschiedene Anfangs- und Randbedingungen bestimmt, indem die Lösung durch least-square Verfahren ( $\chi^2$ -Minimierung) an die Messdaten angepasst wurde.  $L_i$  entspricht der Längenskala, über die der Transport typischerweise wirkt, und entspricht formal der Wurzel aus dem Produkt aus effektiven Diffusionskoeffizienten  $D_{\text{eff}}$  und der wirksamen Diffusionszeit  $t$ :  $L_i = (D_{\text{eff}} t)^{0.5} = (D_i/\sigma_i t)^{0.5}$ . Wird realistischerweise angenommen, dass die Diffusionszeit für alle Stoffe gleich ist, ergeben sich für verschiedene Stoffe unterschiedliche charakteristische Längen  $L_i$ , welche durch die stoffspezifischen Eigenschaften des mWGs ( $D_i$  und  $\sigma_i$ ) bestimmt werden.

Um  $L_i$  zu bestimmen, müssen über die betrachtete Zeitspanne die Stoffkonzentrationen in den begrenzenden Aquiferen als zeitlich variable Randbedingungen und die initialen Konzentrationen im Porenwasser des mWGs bekannt sein. Da diese Information prinzipiell nicht bekannt ist, beschränkt sich die Geosynthese richtigerweise auf realistische Referenzszenarien, welche die isotopengeochemischen Verhältnisse im mWG und in den Aquiferen 'so gut wie möglich' zu approximieren versuchen. Im Einzelnen bedeutet dies, dass jeweils für jeden Stoff einzeln und eine bestimmte Wahl von Anfangs- und Randbedingungen die Advektions-Diffusions-Gleichung gelöst und so  $L_i$  bestimmt wurde. Qualitativ - aber durchaus nachvollziehbar - wurden die berechneten Konzentrationsprofile mit den effektiv gemessenen verglichen, umso die Güte der jeweiligen speziellen Lösung zu beurteilen.

Qualitativ ergeben sich für sowohl für  $\delta^2\text{H}$ - und als auch für  $\delta^{18}\text{O}$ -Modellierung die beste Übereinstimmung mit den Messdaten, wenn dem einfachsten aller denkbaren Szenarien

- rein diffusiv kontrollierter Transport (verschwindende Advektion),
- zeitlich konstante Konzentrationen in den Aquiferen, die den effektiv gemessenen entsprechen,

- und initiale Isotopie der Porenwässer war über den gesamten Bereich des mWGs konstant und entspricht dem heutigen geochemischen Trend der Porenwässer

eine typische Diffusionszeit zwischen 200 - 1500 kyr zu Grunde gelegt wird. Die Spanne des angegebenen Zeitbereiches erklärt sich aus den experimentellen Unsicherheiten bei der Bestimmung der effektiven Diffusionskoeffizienten.

Der NIB 02-04 weist nach, dass die Peclet-Zahl ( $Pe = \text{Geschwindigkeit (Advektion)} / \text{Geschwindigkeit (Diffusion)} = v_{ad}/(D_{eff}/L_i)$ ) deutlich kleiner als 1 sein muss, damit eine hinreichende Übereinstimmung zwischen der Lösung und den Messdaten erreicht wird. Werden die heutigen Werte als repräsentativ für den Transport angesehen (Advektion: hydraulische Leitfähigkeit:  $2 \cdot 10^{-14}$  m/s, hydraulischer Gradient 0.5 m/m, Porosität:  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ; Diffusion: typische Längenskala: 300 m,  $D_{eff}$ :  $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ) ergibt sich eine Pe-Zahl von  $\sim 0.3$  und eine Advektionsgeschwindigkeit von  $1 \cdot 10^{-13}$  m/s. Dies zeigt klar, dass sollten die heutigen Verhältnisse repräsentativ für das Transportverhalten des mWGs über längere Zeiträume sein, Diffusion der kontrollierende Transportprozess ist. Da der NIB 02-04 erst nach dem Erscheinen der Geosynthese fertig gestellt wurde, fand dieses 'systemanalytische' und überzeugende Argument keinen Eingang in die Geosynthese.

*Zusammenfassend:* Die Geosynthese - und noch viel schlüssiger der NIB 02-04 - leitet aus den gemessenen Isotopenzusammensetzungen der Porenwässer ab, dass die Diffusion den Transport von Wasser und Stoffen in und aus dem mWG bestimmt. Im Einzelnen ist festzuhalten:

- Die Porenwässer lassen sich als Überbleibsel eines ehemaligen marinen Formationswassers interpretieren, dem 'früh' ( $\gg 10000$  kyr) meteorisches Wasser beigemischt wurde. Dieses Mischwasser wurde 'spät' (200 - 1500 kyr) durch den diffusiven Austausch mit den angrenzenden Aquiferen überprägt.
- Der Stoffaustausch zwischen dem mWG und den begrenzenden Aquiferen wurde während der letzten 200 - 1500 kyr durch stoffspezifische diffusive Prozesse gesteuert. Advektive Prozesse waren / sind - finden sie denn überhaupt statt - von untergeordneter Bedeutung (Zeit  $< 2000$  kyr). Die verfügbaren Daten liefern Hinweise, dass sich in den Formationen des Keupers ein weiteres 'Diffusionskompartiment' ausgebildet hat. Dies zeigt erneut, dass die Gesteinsformationen geochemisch durch die Tiefengrundwässer getrennt werden.
- Die gemessenen - also heutigen - geochemischen Gradienten verlaufen so, dass die untersuchten Stoffe (Wasser und Chlorid) hauptsächlich vertikal nach unten in Richtung des Stubensandsteins diffundieren. Auf diesen bemerkenswerten Punkt weist die Geosynthese kaum hin. Die Edelgasuntersuchungen ( $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ) deuten eher auf verstärkten diffusiven Transport nach oben in Richtung Malm hin. Ob dem wirklich so ist, und ob hier ein effektiver Widerspruch vorliegt, kann nur durch eine gekoppelte Modellierung, die den Transport aller Isotope gleichzeitig simuliert, gezeigt werden.
- Die Geosynthese erklärt die gemessenen Konzentrationsprofile für jedes Isotop einzeln an Hand von analytischen Lösungen, die für plausible Anfangs- und Randbedingungen gelöst wurden. Dieser Ansatz sollte a) formal nachvollzogen und b) durch einen anderen Modellansatz (z. B. gekoppelte Vorwärtsmodellierung) auf Konsistenz und Sensitivität hin überprüft werden.
- Die Geosynthese und der NIB 02-04 haben wegen der inhärenten Unkenntnis der isotopengeochemischen Anfangs- und Randbedingungen darauf verzichtet, eine vertiefte Sensitivitätsanalyse der gefundenen Resultate durchzuführen. Dies obwohl die freien

Parameter der Lösungen durch  $\chi^2$ -Anpassung bestimmt wurden. Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse - sollte sie denn möglich sein - würde es erlauben, die gezogenen Schlüsse 'objektiv' zu validieren. Es ist zu empfehlen, sollte der Datensatz erneut und unabhängig modellmässig analysiert werden, eine vertiefte und dem Problem angepasste Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

- Die  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  wurden einzeln analysiert. Erwartungsgemäss liefern beide Isotopensysteme vergleichbare Zeitkonstanten, da sich beide Elemente im wesentlichen als Wassermoleküle bewegen. Die Abweichungen liegen im Bereich der experimentellen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Diffusionskoeffizienten.
- Um die beobachteten  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  Profile aufzubauen, müssen Stoffe mindestens während 200 und 1500 kyr zwischen den Aquiferen und mWG diffusiv ausgetauscht werden (im Vergleich zur Selbstdiffusion von Wassermolekülen in Wasser diffundieren die meisten Stoffe langsamer, da diese durch Wechselwirkung mit der Gesteinsmatrix zusätzlich retardiert werden, mögliche Ausnahme He).

*Cl*,  $\delta^{37}\text{Cl}$ : Ganz allgemein ordnen sich die  $\text{Cl}^-$  und  $\delta^{37}\text{Cl}$  Resultate und die daraus gezogenen Schlüsse gut in das aus der Isotopenzusammensetzung der Porenwässern entwickelte Konzept der wirksamen Transportprozesse im mWG ein. Die in den Porenwässern gemessene  $\text{Cl}^-$ -Konzentrationen liegen im Bereich von 12 g/l. Dies deckt sich mit der Vorstellung, dass sich die Porenwässer konzeptuell als Mischung eines marinen Formationswassers und meteorischem Wasser (im Verhältnis 1: 2) auffassen lassen. Dieses Mischwasser wurde später als Folge isotopengeochemischer Verschiebungen in den angrenzenden Aquiferen diffusiv verändert. Erneut lassen sich die gemessenen  $\text{Cl}^-$ - und Isotopenkonzentrationen am Einfachsten verstehen, wenn angenommen wird, dass Chloridionen den geochemischen Gradienten folgend diffusiv aus dem mWG in die Aquifere des Malms und des Stubensandssteins entweichen. Die abgeleiteten charakteristischen Transportzeiten stimmen qualitativ gut mit den  $\delta^2\text{H}$  &  $\delta^{18}\text{O}$  Resultaten überein. Die durchaus vorhandenen Abweichungen dürften - wie in der Geosynthese getan - wenigstens zum Teil auf experimentelle Schwierigkeiten zurückzuführen sein (d. h. Probleme bei der Bestimmung der  $\text{Cl}^-$ -Konzentration im Porenwasser, der Bestimmung der stoffspezifischen Porositäten & damit dem Übergang von stoffspezifischer zu effektiver Diffusivität, mögliche Retardierung durch elektrostatische Restriktion).

Die Isotopenmessungen des Chlors sind verwirrend - zwar richtig - aber nur für Spezialisten nachvollziehbar dargestellt. Dem (unnötig komplizierten) isotopengeochemischen Usus folgend, werden die gemessenen  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  Verhältnisse als  $\delta^{37}\text{Cl}$  ausgedrückt und werden als solche auch modelliert. Da beide Chlorisotope ähnliche Häufigkeiten zeigen, kann der Transport im Gegensatz zur Isotopenverteilung im Wasser nicht als Selbstdiffusion der einen Spezies im 'inerten Hintergrund' der anderen beschrieben werden. Vielmehr muss - konzeptuell richtig - der Transport sowohl für  $^{35}\text{Cl}$  als auch für  $^{37}\text{Cl}$  berechnet werden. Werden nun die erhaltenen Resultate wiederum als  $\delta^{37}\text{Cl}$  Werte ausgedrückt, zeigt sich, dass die  $\delta$ -Normierung im Fall vergleichbarer isotopischen Abundanz der beteiligten Isotope eine nichtlineare Funktion der beiden Konzentrationen ist. Konkret bedeutet dies, dass sich zwar für beide Isotope im Raum glatte zu den Aquifern hin diffusiv gekrümmte Stoffprofile ausbilden. Die  $\delta$ -Normierung führt jedoch dazu, dass sich im Bereich der grössten Stoffgradienten 'Peak-artige' Strukturen ausbilden, wo die  $\delta^{37}\text{Cl}$  Werte über einen engen Raumbereich zuerst scharf anzeigen um gleich wieder abzufallen. In diesen kritischen Bereichen gegen die Aquifere hin treten z. T. signifikante Abweichungen zwischen den Messdaten und den simulierten Werten auf. Die Interpretation wäre einfacher zu verstehen, wenn die Chlorisotopen Daten nicht als  $\delta^{37}\text{Cl}$  Werte, sondern als  $^{35}\text{Cl}$  und  $^{37}\text{Cl}$  Konzentrationen diskutiert worden wären. Die gewählte  $\delta$ -Normierung mag zwar geochemisch angebracht sein, jedoch wäre gerade von der Geosynthese die physikalisch einsichtiger

Darstellung als Isotopenkonzentrationen zu fordern. Es ist schwierig zu beurteilen, ob die simulierten Werte effektiv von Messdaten abweichen oder ob die Abweichungen wegen der Normierung 'störend' hervortreten.

*Zusammenfassend:* Die Untersuchungen der Chloridkonzentrationen und der  $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$  Verhältnisse in den Porenwässern des möglichen mWGs decken sich qualitativ mit den  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  Resultaten. Die gefundenen Konzentrationsverteilungen im Raum lassen sich verstehen, wenn wiederum angenommen wird, dass der Stoffaustausch zwischen mWG und den begrenzenden Aquiferen hauptsächlich diffusiv erfolgt. Die vorhandenen Unterschiede zwischen Chlorid und  $\delta^2\text{H}$  und  $\delta^{18}\text{O}$  lassen sich zumindest teilweise auf experimentelle Unsicherheiten der physikalischen Parameter des mWGs zurückführen. Aus den Chlordaten können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die gemessenen Cl-Konzentrationen der Porenwässer zeigen, dass das mWG noch einen beachtlichen Anteil an marinem Formationswasser enthält, welches heute langsam als Folge des diffusiven Transportes in Richtung der Aquifere entweicht.
- Das Chlor aus den Porenwässern entweicht wiederum hauptsächlich gegen unten in Richtung des Stubensandsteins. Entsprechend sensitiv reagiert die Modellierung auf die Wahl der unteren Randbedingung, d. h. auf die konkrete Wahl, welche isotopengeochemische Entwicklung dem Stubensandstein zugewiesen wird.
- Das Grundwasser im Malm ist isotopengeochemisch den Porenwässern im mWG sehr ähnlich. Die Geosynthese wertet dies als Hinweis, dass sich vor der Aktivierung des Stubensandsteins über einen räumlichen Bereich, der deutlich mächtiger ist als mWG, ähnliche isotopengeochemische Verhältnisse vorgelegen haben mussten wie im OPA. Da gegen den Malm hin nur kleine Gradienten auftreten, reagiert die Modellierung relativ robust auf die geochemischen Vorgaben im Malm als obere Randbedingung. Es sei erneut darauf hingewiesen, dass gegen den Malm hin keine Porenwasseranalysen vorliegen. Deshalb ist es schwierig zu beurteilen, ob die von der Geosynthese getroffenen isotopengeochemischen Annahmen den effektiven Verhältnissen auch wirklich entsprechen.
- Es ist anzuregen, dass, sollte der vorliegenden Datensatz erneut modellmässig bearbeitet werden, die Chlorisotope  $^{35,37}\text{Cl}$  einzeln und nicht  $\delta^{37}\text{Cl}$  als Zielgrößen zu modellieren, wie dies wohl auch im NIB 02-04 getan worden ist.

### **Schlussfolgerungen.**

Die isotopengeochemischen Untersuchung an den Aquiferen, den Porenwässern im mWG, sowie die Edelgasuntersuchungen am mWG und dessen Porenwässern liefern der Geosynthese die wesentliche Datenbasis und die geochemischen Argumente, um den insitu Stoffaustausch unter 'natürlichen' Bedingungen zwischen dem mWG und der angrenzenden Aquifern physikalisch zu beschreiben und dessen charakteristischen Zeitskalen zu definieren. Die aufgenommenen Daten und die daraus abgeleitete Interpretation sind sauber dokumentiert und nachvollziehbar entwickelt (doch es fällt oft schwer, die einzelnen Argumente mit einander zu verbinden). Die Kap. 4.6. - 4.8. und 5.10. erfüllen ihre Aufgabe in der Geosynthese, in dem sie den Insitu-Transport und seine typischen Zeitskalen erfassen; die gezogenen Schlüsse scheinen robust und belastbar zu sein und sind kaum grundsätzlich in Frage zustellen.

*Daten:* Die zu Grunde gelegten isotopengeochemischen Daten sind von hoher Qualität und setzen damit der Interpretation relativ harte Grenzen. Unglücklicherweise liegen gerade aus den Übergangszonen zu den Aquiferen hin entweder keine (obere Rahmengesteine gegen Malm hin) oder nur 'korrigierte' (gegen Keuper hin) Daten vor. Trotz dieser Einschränkungen, welche ver-

schiedene Einzelheiten nicht endgültig beurteilen lassen, ist davon auszugehen, dass sich aus den 'fehlenden Daten' keine grundsätzlichen Einschränkungen ergeben dürften.

Prinzipielle Schwierigkeiten ergeben sich aus der Tatsache, dass den Porenwasseruntersuchungen nur die effektiven Transporteigenschaften des mWGs zugänglich sind; Laborexperimente aber auch stoffspezifische Grössen bestimmen. Die beiden Parametersätze lassen sich über die wirksame stoffspezifische Porosität zwar formal in einander überführen. Jedoch ist dieser zentrale Parameter experimentell kaum verlässlich zu bestimmen (obwohl Analogieschlüsse im Vergleich zu den Experimenten am Mont Terri durchaus weiterhelfen können). Die Geosynthese (und weniger ausgeprägt die NIBs) bleibt in diesem Punkt etwas vage – zum Teil ist nicht klar, mit 'welchen Grössen' - den effektiven oder spezifischen - gerade argumentiert wird.

*Transportprozesse:* Überzeugend identifiziert die Geosynthese die Diffusion als den dominieren Transportprozess, der den 'natürlichen' Stoffaustausch zwischen dem mWG und den Aquifern treibt. Advektive Prozesse sind - wenn Advektion innerhalb des mWGs überhaupt stattfindet - von untergeordneter oder gar vernachlässigbarer Bedeutung. Hinweise, dass advektive Prozesse kleinskalig ('entlang von Scherflächen und Bruchzonen') stattfinden und so gross-skalig zum effektiven Transport beitragen, hat die Geosynthese keine gefunden.

Die Argumentation, dass der diffusive Transport dominiert, wird aus Modellen und Simulationen abgeleitet ( im Wesentlichen NIB 02-04) - systemanalytische Betrachtung werden hingegen kaum angestellt. Dies führt dazu, dass andere Erklärungsansätze als Alternativen nicht in Betracht gezogen und dann in der Diskussion nicht explizit verworfen werden (jedoch darf argumentiert werden, dass dies auch nicht die eigentliche Aufgabe der Geosynthese ist und die Sicherheitsanalyse sich dieser Aufgabe wohl annimmt). Da die Geosynthese keine anderen Alternativen andiskutiert, finden sich auch kaum Argumente, die eben solche Alternativen explizit ausschliessen. Hier würden systemanalytische Überlegungen weiterhelfen. So zeigen verschiedene Stoffe stoffspezifische & unterschiedliche Konzentrationsprofile im Raum. Weiter scheinen einige der gemessenen Isotopenprofile im Porenwasser des mWGs gekrümmt zu sein. Solche stoffspezifischen Strukturen können sich nur ausbilden, wenn diffusive Prozesse massgebend zum effektiv wirksamen Transport beitragen.

Die Daten belegen klar, dass der Transport von Wasser und Chlorid überraschenderweise zur Hauptsache nach unten in Richtung des Stubensandsteinaquifers erfolgt. Darauf geht die Geosynthese weiter nicht ein und diskutiert auch nicht, wie weit das Fehlen der Porenwasseranalysen im Übergangsbereich gegen den Malmaquifer diese zentrale Aussage beeinflussen könnte. Die Edelgasdaten hingegen deuten eher verstärkten Transport in Richtung Malmaquifer an. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede dürfte darin liegen, dass die Geosynthese den Insitu-Transport immer an Hand eines einzelnen Stoffes beschreibt und diskutiert. 'Andere Resultate' werden nur 'gebraucht', um die Resultate des 'einen Stoffes' qualitativ zu bestätigen. Obwohl die aus den einzelnen Datensätze gezogenen Schlüsse einander qualitativ entsprechen, 'verschleiert' die in der Geosynthese gewählte Form der Interpretation / Diskussion, dass sich die Isotopendaten in Einzelheiten durchaus unterscheiden und die für den Transport gemachten Aussagen von einander abweichen ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O} \leftrightarrow \text{Cl}$  und ausgeprägter  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ). Wie anfangs erwähnt, hängt dies auch damit zusammen, dass die einzelnen Datensätze und Kapitel nicht wirklich mit einander verbunden sind.

*Zeitskalen:* Der für den Wasser- und Stoffaustausch zwischen dem mWG und den angrenzenden Aquifern entwickelte analytische Modellansatz weist dem Transport für die untersuchten 'konservativen nicht-sorbierenden' Isotope (H, O, Cl) übereinstimmend eine typische Zeitskala

von mehreren 100 bis wenigen 1000 kyr (200 - 1500 kyr) zu - die Interpretation der  $^4\text{He}$  Gehalte liefert noch längere Zeiten. Für sorbierende Stoffe dürften die charakteristischen Zeiten noch deutlich höher liegen. Mit den Kap. 4.6. - 4.8. und 5.10. hat die Geosynthese wohl den Nachweis erbracht, dass unter ungestörten Bedingungen der Insitu-Transport im mWG auf Zeitskalen erfolgt, die vergleichbar sind mit jenen, die sich aus den Halbwertszeiten der einzulagernden Isotope ergeben.

## Ausblick und Empfehlungen

*Transportmodellierung:* Die Kapitel 4.6 – 4.8 und 5.10 der Geosynthese liefern für die Sicherheitsanalyse direkt relevante und sensible Informationen. Die Kapitel definieren die für das mWG relevanten Transportprozesse und die charakteristischen Zeitkonstanten. Die quantitativen Schlüsse werden aus analytischen Lösungen für die 1-dimensionale Advektions-Diffusions-Gleichung für Einzelstoffe (!) abgeleitet. Hierbei wirkt das mWG als Quellterm und die angrenzenden Aquifer definieren als Randbedingungen die hydraulisch / geochemischen Gradienten, die den Transport von Wasser und Stoffen erzwingen. Im Gegensatz zu dem in der Geosynthese verfolgten Ansatz würde ein gekoppeltes Modell, das gleichzeitig die Transportgleichungen (und die mögliche insitu Produktion) aller betrachteten Isotope löst, die Möglichkeit bieten, eine ausgedehnte und angepasste Sensitivitätsanalyse durchzuführen und die Unsicherheit der abgeleiteten Transportparameter zu quantifizieren. Eine solche ergänzende Modellierung der bestehenden Datensätze würde es auch erlauben, die Resultate der Geosynthese durch einen komplementären (Modell) Ansatz nachzuvollziehen oder gar zu validieren. Wegen der für die Sicherheitsanalyse zentralen Aussagen der gereviewten Kapitel und dem von Geosynthese angewandten - einwandfreien, aber speziellen – Modellansatz, ist der HSK zu empfehlen, weitere unabhängige Modellierungen der relevanten Transportprozesse im Porenwasser des mWGs durchzuführen. Die erneute Analyse sollte auf einem explizit anderen Simulationsansatz beruhen (z. B. gekoppeltes numerisches 1-dimensionales Advektions-Diffusions-Modell basierend auf einem bestehenden 'universellen' Simulationswerkzeug). Speziell sollte jede neue Aufarbeitung des Datensatzes auch die Edelgase, insbesondere das  $^4\text{He}$ , in die Modellierungen mit einbeziehen. Die Geosynthese gibt für die konservativen nicht-sorbierenden Stoffe ( $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{35,37}\text{Cl}$ ) charakteristische Zeitskalen für den diffusiven Transport, für  $^4\text{He}$  jedoch eine Akkumulationszeit an - die beiden Skalen entsprechen sich weder qualitativ, noch quantitativ. Dieser Einwand ist kaum sicherheitsrelevant, da die (reine)  $^4\text{He}$ -Akkumulationszeit grösser als die Diffusionszeiten ist. Jedoch muss sich formal - sofern alle systemrelevante Information vorliegt - für jeden konservativen nicht-sorbierenden Stoff vergleichbare Transportcharakteristiken (Transportzeiten & Diffusionslängen) ergeben. Ein gekoppelter Modellansatz könnte diesen Aspekt vertieft beleuchten.

*Horizontaler Transport:* Die Geosynthese konzentriert sich - richtigerweise - bei ihrer Analyse der isotopengeochemischen Daten und des diffusiven Transportes auf die vertikale Richtung. Prinzipiell ist jedoch jede Richtung - auch die horizontale - für den Transport relevant. Selbstredend lässt sich aus einer Bohrung (und der auf den relevanten Längen vermuteten fehlenden horizontalen Konzentrationsgradienten) keine Aussagen über die grossräumigen horizontalen Transporteigenschaften des mWGs in der Region Benken gewinnen (für den Mont Terri liegen hingegen solche Daten vor). Es ist zu empfehlen, dass neue Nachfolgeuntersuchungen und -projekte sich dem horizontalen Transport verstärkt widmen.

*Veröffentlichung der Basisberichte:* Es ist anzuregen, dass die den isotopengeochemischen Untersuchungen der Geosynthese zu Grunde gelegten Basisberichte, welche die eigentliche Datenanalyse enthalten, allgemein zugänglich gemacht werden. Denkbar wäre, die entsprechen-

den Berichte wenigstens als NTBs oder als Publikation in einer wissenschaftlichen Zeitschrift aufzubereiten (was wohl auch geplant oder bereits getan wurde) - hierzu wäre eine unabhängige Review sehr wünschenswert. Ein solches Vorgehen würde sicher zur - auch öffentlichen - Transparenz der Geosynthese und zu deren Akzeptanz als (erdwissen-) wissenschaftliche Einschätzung des OPAs als möglichem Wirtgestein beitragen. Bei künftigen Syntheseberichten ist zu empfehlen, dass die NAGRA die einzelnen Kapitel klarer zueinander in Bezug setzt und sie stärker untereinander vernetzt. Dazu gehört eine ausführliche und vollständige Indexierung und ein 'Executive Summary' zu Beginn von jedem Kapitel.

# Beurteilung der hydro-mechanischen Eigenschaften und Prozesse im Opalinuston

Prof. Simon Löw

---

## Ziele und Vorgehen

Dieser Bericht diskutiert und bewertet die Arbeiten der Nagra zum hydromechanischen Verhalten des Opalinustons im potentiellen Standortgebiet Zürcher Weinland und die Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Sicherheitsanalyse. Diese Arbeiten der Nagra sind insbesondere in NTB 02-03 Kapitel 5, 6 und 7 sowie in NTB 02-05 Kapitel 7 und NTB 02-06 Kapitel 3 zusammengefasst.

Im Gegensatz zum entsprechenden Fragenkatalog der ETH ist dieser Bericht nicht nach den einzelnen hydro-mechanischen Prozessen und Parametern aufgebaut, sondern fokussiert auf die wichtigsten hydro-mechanischen Grundlagen der Sicherheitsanalyse, insbesondere den Grundwasserdurchfluss durch das Endlagersystem und die hydraulischen Eigenschaften der Barrieren im Nah- und Fernfeld. Die im nachfolgenden diskutierten Barrieren umfassen insbesondere das Wirtgestein mit seinen Klüften und Störzonen im Nah- und Fernfeld, sowie die Bentonitbarriere und Absperrbauwerke im Nahfeld. Der vorliegende Bericht steht auch in einer direkten Beziehung zu eigenen Berechnungen der ETH zu hydro-mechanischen Prozessen im Nahfeld eines möglichen Endlagers im Zürcher Weinland, welche insbesondere im ETH-Bericht 3465/36 (Fidelibus and Löw 2004) dokumentiert sind.

Der Grundwasserdurchfluss durch das Endlagersystem nach einem Verschluss des Endlagers und dem Versagen der Abfallbehälter wird durch

- die Potentialgradienten zwischen dem Endlager und den angrenzenden Aquiferen (Wedelsandstein und Sandsteinkeuper),
- die vertikale Durchlässigkeit des Opalinustons im Fernfeld,
- die durchflusswirksamen Querschnittsflächen der Untertagebauwerke,
- die (gemittelte) Durchlässigkeit der Bentonitbarriere,
- die (gemittelte) Durchlässigkeit und Ausdehnung der Auflockerungszone,
- sowie die (gemittelte) Durchlässigkeit und Ausdehnung der hydraulischen Absperrbauwerke („seals“)

kontrolliert. In Kapitel 2 werden die natürlichen Eigenschaften des Opalinustons (im Fernfeld), in Kapitel 3 die durch den Bau den Untertagebauwerke veränderten Eigenschaften des Opalinustons im Nahfeld, und in Kapitel 4 die daraus resultierenden Grundwasserflüsse durch das Endlagersystem diskutiert.

## Hydro-mechanische Eigenschaften des Opalinustons im Fernfeld

### *Hydraulische Durchlässigkeiten der Opalinuston-Matrix*

Ungestörte Gebirgsbereiche des Opalinustons der Bohrung Benken weisen sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten auf: in-situ bestimmte horizontale Durchlässigkeiten,  $K_h$ , haben „best guess“-Werte von 1 bis 6 E-14 m/s mit einem Unsicherheitsbereich von 1E-15 bis 1E-13 m/s, Permeameterwert an Bohrkernproben ergeben einen  $K_h$ -Wert von 3 bis 6 E-14 m/s. Im Mont Terri liegt der Durchlässigkeitsbereich aller Hydrotests im Opalinuston höher ( $K_h$  best guess 2E-14 bis 2E-12 m/s, Unsicherheitsbereich nicht systematisch ermittelt). Diese Unterschiede werden durch die Nagra mit grossräumigen Heterogenitäten in der Porosität und Mineralogie des Opalinustons erklärt (Nagra 2004a).

Die vertikalen Durchlässigkeiten des Opalinustons in Benken sind aufgrund einer ausgeprägten sedimentologisch-diagenetisch angelegten Anisotropie noch geringer als die obigen horizontalen Durchlässigkeiten (nach Labortests ist  $K_v$  um 2-6 mal geringer als die horizontalen Durchlässigkeiten). Die von der Nagra als Referenz-Wert (und indirekt im Referenz-Konzept der Sicherheitsanalyse) angenommene vertikale Durchlässigkeit des Opalinustons von 2E-14 m/s ist darum nachvollziehbar. Der Wert ist aufgrund der geringen Datenbasis aber nicht vollständig sicher oder konservativ und wird darum bei Nagra in Parametervarianten (z.B. Fall 1.1.f der Sicherheitsanalyse) durch einen alternativen Wert von 1E-13 m/s ersetzt. Der Referenz-Wert wird indirekt auch durch die in Benken gemessenen (unsicheren) Überdrucke gestützt. Die „standortspezifische Datenbasis“ ist zwangsläufig noch relativ gering und wird durch zukünftige Untersuchungen verstärkt werden.

### *Transmissivitäten von tektonischen Trennflächen*

In der Bohrung Benken wurden im Opalinuston 8 makroskopisch erkennbare Klüfte angetroffen, die als Begleitgefüge von Störungen und Verschiebungsflächen (Scherklüften) interpretiert wurden. Das Einfallen dieser Strukturen liegt relativ flach (<20 Grad zur Schichtung). Zudem wurde im Opalinuston in 602 m Tiefe eine mit ca. 40 Grad einfallende Störung mit einer Mächtigkeit von ca. 10 cm sowie drei mit Calcit gefüllte Adern angetroffen (NTB 00-01, Kap. 5.3.10). Allerdings ist bekannt, dass in tonigen Gesteinen wie dem Opalinuston, kleine Klüfte im unverwitterten Kern nur schlecht erkennbar sind (z.B. Horseman et al. 1996).

Die hydraulischen Tests O4, O5 und O7 der Bohrung Benken weisen darauf hin, dass diese tektonischen Strukturen keine signifikant höhere Durchlässigkeit aufweisen, als das ungestörte Nebengestein. Die Tests O5 und O7 sind mit Unsicherheiten bezüglich der hydraulischen Druckhöhe behaftet, was sich aber geringfügig auf die ermittelten Durchlässigkeiten auswirken sollte. Der positive Befund wird durch die hydraulischen Tests im Mont Terri gestützt. Auf der anderen Seite vermögen die von Nagra kompilierten Beobachtungen aus Untertagebauwerken diese Aussage nicht zu bestätigen, da diese Beobachtungen nur Rückschlüsse auf um mehrere Grössenordnungen höhere Durchlässigkeiten (ca. 1E-9 bis 1E-10 m/s) erlauben und somit eine Erhöhung der Durchlässigkeiten von Klüften oder Störzonen um 2 bis 3 Grössenordnungen aus visuellen und historischen Beobachtungen nicht erkennbar wäre. Dieser Unsicherheit wird in der Sicherheitsanalyse durch den „What-If“ Fall 4.2 Rechnung getragen.

Es ist zu erwarten, dass die Transmissivitäten (und hydraulischen Durchlässigkeiten) von tektonischen Trennflächen im Opalinuston generell mit abnehmender Tiefe und abnehmender Normalspannung zunehmen. Dies wird durch Laborversuche (Gutierrez et al. 2000), in-situ Versuche im Felslabor Mont Terri (Plate Loading Test), sowie durch Beobachtungen in Untertagebauten belegt. Ab welcher Tiefe welche tektonischen Strukturen keine hydraulische Bedeutung mehr haben, kann heute nicht zuverlässig vorhergesagt werden. Beobachtungen zeigen, dass es keine einfache generelle Tiefen-Transmissivitäts-Beziehung für tektonische Trennflächen gibt und es klar ist, dass auch andere Faktoren neben der Normalspannung die Transmissivitäten dieser Strukturen signifikant beeinflussen. So zeigt z.B. das Tongestein in Tournemire, welches eine höhere Belastungsvorgeschichte als der Opalinuston aufweist, Störungen mit Mineraladersystemen und drusigen Bildungen, welche in einer Tiefe von 250 m noch eine Transmissivität von  $1E-10 \text{ m}^2/\text{s}$  aufweisen.

Die heute vorliegende Datenbasis über Transmissivitäten von tektonischen Trennflächen im Opalinuston ist gering. Aufgrund aller heute vorliegenden Kenntnisse (insbesondere auch der Testdaten von Riniken und Schafisheim) kann davon ausgegangen werden, dass heute in einer Endlagertiefe von 600-800 m keine oder nur geringe Erhöhungen der Durchlässigkeiten von tektonischen Trennflächen gegenüber dem intakten Nebengestein zu erwarten sind (wenige Grössenordnungen). Diese Annahme muss aber durch weitere Messungen und prozessorientierte Studien belegt werden. Nicht untersucht wurde in diesem Bericht eine allfällige kurzfristige Erhöhung der Transmissivitäten von reaktivierten Klüften und Störzonen durch zukünftige rasche geologische Prozesse (insb. Erdbeben).

## **Hydro-mechanische Eigenschaften des Opalinustons im Nahfeld**

### ***Initiale Eigenschaften der Auflockerungszone***

In einem möglichen Endlager in 600-750 m Tiefe im Zürcher Weinland entwickelt sich um die ausgebrochenen Untertagebauwerke eine spannungsbedingte Auflockerungszone mit zum Teil Meter-grossen Entlastungsklüften. Die Ausdehnung dieser Auflockerungszone kann heute nur grob geschätzt werden. Sie beträgt in einem anisotropen homogenen Gebirge um einen BE/HAA Stollen in horizontaler Richtung in etwa einen Meter und ist in vertikaler Richtung vermutlich noch ausgedehnter (2-3 m). Diese Ausdehnung ist an die Grösse der Deviatorspannungen gekoppelt und ergibt sich aus umfangreichen numerischen 2D und 3D Modellrechnungen der Nagra. Einfache eigene analytische Lösungsansätze (Fidelibus and Löw 2004) bestätigen diese Grössenordnungen. Die Auflockerungszonen um grössere Untertagebauwerke (Lagertunnel LMA, Betriebs- und Zugangstunnel, etc.) sind noch entsprechend grösser.

Die bisher vorliegenden Modellrechnungen zur Ausdehnung einer Auflockerungszone gehen von anisotropen Festigkeiten, isotropen elastischen Eigenschaften und homogenen Verhältnissen aus. Neben diesen Vereinfachungen gegenüber der Realität muss weiter berücksichtigt werden, dass prä-existierende tektonische Trennflächen die Ausbildung von Instabilitäten in einem ausgebrochenen Hohlraum stark beeinflussen können. So sind vermutlich die Niederbrüche im EZ-A-Stollen des Felslabors Mont Terri auf prä-existierende Trennflächen und Störzonen zurückzuführen. Auch im Zürcher Weinland muss - in deutlich geringerer Häufigkeit als im Mont Terri - mit solchen Trennflächen gerechnet werden. Zudem kann der gegenseitige Einflussbereich von Untertage-

bauwerken in geklüfteten Gesteinen sehr gross sein und die aus einfachen elastischen Ansätzen berechneten Distanzen übersteigen (vergleiche dazu die vermutete Interaktion zwischen dem ED-B-Tunnel und dem Sicherheitsstollen im Mont Terri mit einer Distanz von 25 m). Die Planung der notwendigen Stützmittel sollte allen diesen Unsicherheiten Rechnung tragen.

Die Geometrie der Trennflächensysteme in der Auflockerungszone wurde im Felslabor Mont Terri in 2-dimensionalen Anschnitten und mit (1-dimensionalen) Bohrungen untersucht. Die heute vorliegenden Kenntnisse lassen keine belastbaren Aussagen zur Grösse, zur 3-dimensionalen Geometrie und hydraulischen Vernetzung dieser Trennflächen parallel zu den Endlagerbauwerken und über relevante Distanzen zu.<sup>1</sup> Die anfänglichen Öffnungsweiten der Trennflächen sind vermutlich noch in grösserer Distanz vom Parament relativ gross (Ablösung grösserer „Schalen“ in ca. 1 m Tiefe).

Die initialen Transmissivitäten von einzelnen Klüften in der Auflockerungszone wurden bisher mit Ausnahme einer künstlich generierten Kluft (Enachesu et al. 2001) nicht gemessen sondern nur abgeschätzt. So kann im Mont Terri gezeigt werden, dass die (mit pneumatischen Packertest ermittelten) Durchlässigkeiten der Auflockerungszonen in den Paramenten gegenüber dem Ausgangsgestein sehr stark erhöht sind (über 1 m gemittelte K-Werte von bis zu  $5E-7$  m/s) und sich von jenen in der Firste stark unterscheiden (gemittelte K-Werte von etwa  $1E-10$  m/s). Schätzt man die Transmissivitäten einzelner Klüfte aus solchen Durchlässigkeiten und der geschätzten Kluffrequenz ab, so ergeben sich Werte für Einzelklüfte im Grössenbereich von  $1E-7$  bis  $1E-5$   $m^2/s$ . Diese Werte korrespondieren mit theoretisch ermittelten initialen Kluft-Transmissivitäten (Fidelibus und Löw 2004). Die Stollen-parallelen effektiven Durchlässigkeiten sind heute nicht bekannt aber vermutlich geringer als diese lokalen Werte.

Die Entstehung der Risse in der Auflockerungszone wird durch elastische und duktile Verformung der Matrix im Tunnelnahfeld begleitet. Die elastische, duktile und zeitabhängige Verformung des Opalinustons ist noch nicht vollständig verstanden. Demzufolge führen Modellberechnungen je nach angenommenen Modellparametern zu stark unterschiedlichen Verformungsbeiträgen. Die initialen Tunnelkonvergenzen liegen in der Grössenordnung von mehreren Zentimetern.

### ***Transiente hydro-mechanisch gekoppelte Prozesse im Nahfeld***

Die oben beschriebenen Eigenschaften des Opalinustons im Nahfeld, d.h. insbesondere der Auflockerungszone, verändern sich nach dem Verschluss des Endlagers stark. Schon nach relativ kurzer Zeit (wenigen Jahrzehnten) versagen die temporären Stützmassnahmen. Der Tunnelhohlraum wird nun ausschliesslich durch die Verfüllung mit Bentonit-Granulat oder dem vorgesehenen Bentonit-Sand-Gemisch gestützt und dadurch weiter in den Hohlraum hinein konvergieren. Zudem werden sich einzelne Blöcke in das Verfüllmaterial einsenken und dadurch einen heterogenen Ausbruchquerschnitt erzeugen. Parallel dazu wird das Nahfeld durch die Wärmeproduktion der Abfälle in den ersten Jahrzehnten bis Jahrhunderten nach Endlagerverschluss stark aufgeheizt. Je nach Entwicklung der Durchlässigkeit der Auflockerungszonen und der Bentonitbarrieren sättigt sich - vermutlich mit einer zeitlichen Verzögerung gegenüber der Erwärmung - im Zeitraum von Jahrhunderten bis wenigen Jahrtausenden das Endlager langsam auf. Der Zufluss

---

<sup>1</sup> Die neu gestarteten Projekte der Nagra (ICONNECT) und der HSK-ETH (EZ-B Experiment Mont Terri) zu diesem Thema sind erfolgsversprechend.

von Grundwasser zu den Untertagebauwerken erfolgt dabei entweder über die Opalinuston-Barriere oder über die Zugangsbauwerke. Falls der Zufluss über die Zugangsbauwerke (Schacht und Rampe) erfolgt, wird sich vermutlich eine sehr heterogene Aufsättigung des Endlagers entwickeln. Im Fall von dichten Absperrbauwerken sättigt sich das Endlager vermutlich relativ homogen, aber sehr langsam über die Opalinustonbarriere auf.

Mit der Aufsättigung des Endlagers beginnt sich der Opalinuston vermutlich stark zu verformen, der Bentonit zu quellen, und die Endlagerbehälter unter Gasproduktion zu korrodieren. Der Ablauf dieser gekoppelten Prozesse während der Jahrhunderte bis Jahrtausende nach Endlagerverschluss kann heute nicht genau vorhergesagt werden. Er folgt mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht idealen homogenen Modellansätzen.

Es ist plausibel anzunehmen, dass sich durch das Quellen des Bentonits und die Konvergenz des Gebirges nach/während der Aufsättigung neue Druckspannungen auf die Auflockerungszone aufbauen werden. Diese werden auch stark durch die vermutlich veränderten Festigkeiten und Verformungsmoduli des Opalinustons nach der Wiederaufsättigung sowie die Kompaktionseigenschaften des Bentonits beeinflusst. Aufgesättigter Bentonit (Rudquist et al. 2001, Daeman and Raan 1996) oder Bentonit/Sand-Gemische (Daeman and Raan 1996) zeigen relativ geringe Verformungsmoduli mit starker Abnahme des Young Moduls mit zunehmendem Druck. Die Gleichgewichtsdrucke in dieser Übergangszone sind heute aufgrund der Unsicherheiten in den Materialgesetzen und Parameter nur grob eingrenzbar und liegen vermutlich deutlich unter den Fernfeldspannungen von 15-20 MPa. Mit einfachen Überschlagsrechnungen (Fidelibus & Löw 2004) können die besten Schätzwerte der Nagra für die effektiven Spannungen bestätigt werden (Nagra 2004b). Diese wirken normal auf die steilstehenden EDZ-Klüfte und liegen in der Grössenordnung von 5 MPa.

Effektive Normalspannungen dieser Grössenordnung führen aber schon zu einer deutlichen Reduktion der Transmissivität von Klüften in der Auflockerungszone. Nach Versuchen im Mont Terri ergeben sich je nach Versuchsbedingungen bei einer effektiven Spannungsänderung von 5MPa Reduktionen von 1.5-2.5 Grössenordnungen (NTB 02-03 Fig. 7.4-7 und 5.8-7). Nach Laborversuchen von Gutierrez et al. (2000) ergeben sich bei 5MPa Reduktionen der effektiven Durchlässigkeit von nur 0.5 Grössenordnungen. Ein Vergleich dieser Versuchsergebnisse muss der Tatsache Rechnung tragen, dass sich oft rein mechanische kontrollierte Transmissivitäts-Veränderungen mit anderen Prozessen überlagern und diese insbesondere in den bisherigen Feldversuchen nur schlecht getrennt werden konnten. Bekannt ist, dass die Spannungs-Transmissivitäts-Beziehungen hoch nicht-linear sind und bei anfänglich nur gering belasteten Klüften (wie jener der Auflockerungszone) zu relativ starken Transmissivitäts-Reduktionen führen.

Es ist zudem zu erwarten, dass die Trennflächen der Auflockerungszonen nach dem Verschluss des Endlagers eine Selbstabdichtung erfahren. Diese Selbstabdichtung wird durch Prozesse wie Wasseraufnahme und Desintegration, Quellen und/oder Kriechen sowie chemische Reaktionen (Ausfällungen) beeinflusst. Ein wirkungsvolles „Selbstabdichtungsvermögen“ kann aus kurzzeitigen Beobachtungen im Felslabor Mont Terri (z.B. Lastplatten-Versuch) sowie aus geologischen Analogstudien (siehe Kapitel 1) abgeleitet werden. Es ist aber heute nicht möglich, diesen Prozess zu modellieren oder zuverlässig zu quantifizieren. Die Überschlagsrechnungen der Nagra (NTB 02-03, S. 474) gehen zwar von konservativen Annahmen über die Konvergenz des Opalinustons aus, beruhen aber auf Permeabilitäts-Porositäts-Beziehungen die für granulares poröses

Material hergeleitet wurden und grosse Unsicherheiten (mindestens eine Grössenordnung) haben (siehe auch NTB 02-03 S. 314). Die Auswirkung dieser Selbstabdichtungsprozesse auf die Struktur der Fliess- und Transportwege im Nahfeld ist unsicher. Vermutlich findet eine „Homogenisierung“ statt; diese kann aber heute nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Die Auflockerungszonen werden bei den Absperrbauwerken soweit möglich ausgeräumt. Nach empirischen Befunden in vielen Untertagebauwerken (URL, Tunnels der Alpen) sowie theoretischen Überlegungen ist es oft möglich, durch die Exkavation von grossen Teilen der Auflockerungszonen einen relativ stabilen Zustand mit einer nur geringmächtigen plastifizierten Zone zu erreichen. Der Fliess-Querschnitt und möglicherweise auch die effektive Durchlässigkeit des gestörten Gebirges kann somit an den Stellen der Absperrbauwerke reduziert werden.

## **Grundwasserfluss durch das Endlager**

Aufgrund aller vorliegenden Datensätze kann belegt werden, dass der Stofftransport im Wirtgestein heute primär diffusiv erfolgt. Ohne einen Eingriff des Menschen oder unter der Annahme, dass diese Eingriffe in relevanten Zeiträumen (d.h. bis zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfallbehältern) quasi reversibel sind, kann auch davon ausgegangen werden, dass ein Austrag von Radionukliden in die Biosphäre primär diffusiv erfolgt. Diese plausible Annahme bildet die Grundlage des Referenz-Szenariums und des Referenz-Konzepts 1.0 (Tabelle 7.10-1 NTB 02-05) der Nagra.

Neben diesem Referenz-Konzept 1.0 sind bei folgenden Szenarien der Nagra die hydromechanischen Eigenschaften des Nah- und Fernfeldes von zentraler Bedeutung:

- Das „Alternative Konzept 1.6 des Referenz-Szenariums“ (advektiver Grundwasserfluss durch das Endlager und entlang der Rampe und des Schachtes)
- Das „Alternative Konzept 1.7 des Referenz-Szenariums“ (Langzeitkonvergenz durch lange andauernde Kompaktion des Bentonits)
- Der „What-if“ Fall 4.2 (Transport durch das Wirtgestein entlang einer permeablen Störzone)

Das „Alternative Konzept 1.6“ ist nach unserer Einschätzung von grosser Relevanz. Darum wird dieser Fall in Fidelibus & Löw (2004) mit eigenen Modellrechnungen im Detail überprüft und hier speziell diskutiert und bewertet. Auch Gas-induzierte Freisetzungsmechanismen sind hydraulisch und mechanisch von Relevanz. Diese Prozesse sind aber nicht Teil des vorliegenden Reviews und sollten in einer separaten Studie von Experten diskutiert werden.

Unter der Annahme der Gültigkeit des Gesetzes von Darcy wird der volumetrische Grundwasserfluss im Wesentlichen durch die um und innerhalb des Wirtgesteins wirkenden hydraulischen Gradienten, durch die hydraulischen Durchlässigkeiten des Opalinustons im Fernfeld und Nahfeld, die wirksamen Fliessquerschnitte sowie durch die hydraulischen Eigenschaften der Bentonitbarrieren bestimmt. Mit Ausnahme der hydraulischen Gradienten wurden alle diese Grössen in den bisherigen Kapiteln diskutiert.

### ***Hydraulische Gradienten***

In den meisten Berechnungen zur Sicherheitsanalyse der Nagra wird der heute vermutlich vorhandene Überdruck im Bereich der Endlagerformation sowie die Barrierewirkung der Rahmengesteine nicht berücksichtigt. Demzufolge wird der für die Durchflussberechnungen anzusetzende hydraulische Gradient aus den heute geschätzten hydraulischen Potentialen des Sandsteinkeupers (465 m) und des Wedelsandsteins (342 m) abgeleitet. Es ergibt sich dadurch ein nach oben gerichteter hydraulischer Gradient von etwa 0.7. In der nachfolgend diskutierten Netzwerkmodellierung wird am Ausgang des Schachtes und der Rampe ein Potential von 342 m angesetzt.

Für das „Alternative Konzept 1.7 des Referenz-Szenariums“ ergeben sich durch eine sehr lange andauernde Kompaktion des (gesättigten) Bentonits Überdrucke im Endlagerbereich, die nach Nagra zu einer Erhöhung der hydraulischen Gradienten um etwa einen Faktor  $1.5 \text{ mm}^{-1}$  führen. Der totale hydraulische Gradient zwischen Endlager und dem Wedelsandstein (ohne Überdrucke) würde in diesem Fall rund  $2.2 \text{ mm}^{-1}$  betragen. Aufgrund hydrodynamischer Berechnungen für Fälle mit einem Porenwasserüberdruck im Wirtgestein wird im Geodatensatz zudem eine Variante mit erhöhtem hydraulischen Vertikalgradienten ( $i_v=5$ ) ausgewiesen.

### ***Durchlässigkeiten und Fliessquerschnitte***

Die Nagra geht im „Alternativen Konzept 1.6 des Referenz-Szenariums“ von folgenden Parameterwerten aus (NTB 02-06, Kapitel 3.6):

- Vertikale Durchlässigkeit des Wirtgesteins  $K_{HR,v}$ :  $2E-14 \text{ m/s}$
- Hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone  $K_{EDZ}$ :  $1E-12 \text{ m/s}$
- Hydraulische Durchlässigkeit Bentonit  $K_B$ :  $1E-13 \text{ m/s}$
- Hydraulische Durchlässigkeit der Absperrbauwerke  $K_S$ :  $1E-13 \text{ m/s}$
- Hydraulische Durchlässigkeit der verfüllten Tunnelstrecken  $K_{BF}$ :  $5E-11 \text{ m/s}$
- Verhältnis Radius EDZ/HLW-Stollen  $\gamma_{HLW}$ : 1.61
- Verhältnis Radius EDZ/ILW-Tunnel  $\gamma_{ILW}$ : 1.22
- Verhältnis Radius EDZ/Rampe  $\gamma_R$ : 1.42
- Verhältnis EDZ/Schacht  $\gamma_S$ : 1.50
- Verhältnis Radius EDZ/Andere Bauwerke  $\gamma_A$ : 1.44

Nach Kapitel 2.1 ist die vertikale Durchlässigkeit des Wirtgesteins im Referenzfall nachvollziehbar. Die hydraulische Durchlässigkeit der Auflockerungszone  $K_{EDZ}$  zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung ist gemäss den Ausführungen in Kapitel 3.2 nicht exakt bestimmbar. Der im Referenzfall angenommene Wert von  $1E-12 \text{ m/s}$  ist plausibel. Ein alternativer (konservativer) Wert wird im Geodatensatz für die Sicherheitsanalyse (Tabelle 9.4-5 von NTB 02-03) nicht gegeben, aber in verschiedenen hydrodynamischen Modellrechnungen studiert (NIB 02-36). Die angenommene hydraulische Durchlässigkeit des aufgesättigten Bentonits  $K_B$  kann hier nicht bewertet werden. Die Auflockerungszone um die Absperrbauwerke wird in den Modellrechnungen zur Sicherheitsanalyse der Nagra (gemäss NTB 02-06 p.53) belassen, obwohl sie zum Teil ausgeräumt werden kann (siehe Kapitel 3.2). Die Grössen der Auflockerungszone liegen in den wahrscheinlichsten Bandbreiten.

Im „What-if-Case“ 4.2 (Transport von Radionukliden durch das Wirtgestein entlang einer permeablen Trennfläche) werden Fälle untersucht, bei denen eine kleine Störzone mit einer markant

gegenüber dem intakten Nebengestein erhöhten Transmissivität das Endlager und das gesamte Wirtgestein durchschlägt. In der Sicherheitsanalyse der Nagra werden Rechnungen mit Transmissivitäten bis in den Grenzbereich der im Untertagebau visuell erkennbaren Zuflüsse durchgeführt ( $1\text{E}-10$  bis  $1\text{E}-9$   $\text{m}^2/\text{s}$ ).

### ***Berechnungsergebnisse***

Unter der Annahme einer effektiven vertikalen Durchlässigkeit des Opalinustons von  $2\text{E}-14$   $\text{m/s}$  ergeben sich spezifische Durchflüsse durch das Wirtgestein (ohne Endlagerbauwerke) von gleicher Grössenordnung (bei einem Gradienten von 1) oder von maximal  $1\text{E}-13$   $\text{m/s}$  (unter Berücksichtigung der Überdruckzone). Unter Berücksichtigung der Endlagerbauwerke ergibt sich nach Nagra (NTB 02-06, S. 58) im Referenz-Konzept ein volumetrischer Gesamt-Durchfluss durch die Endlagerebene von  $0.1$   $\text{m}^3/\text{a}$  (NTB 02-06), nach eigenen Berechnungen (Fidelibus & Löw 2004) liegt dieser Wert fast 5 mal höher, bei  $0.46$   $\text{m}^3/\text{a}$ . Diese Unterschiede sind in den verschiedenen Ansätzen begründet, die zur analytischen Abschätzung der vertikalen Durchströmung durch den Opalinuston verwendet wurden (pessimistisch bei ETH, optimistisch bei Nagra).<sup>2</sup> Die dabei errechneten Peclet-Zahlen bestätigen jedoch die Dominanz des diffusiven Stofftransportes. Für den alternativen Wert von  $K_{\text{HR},\text{V}}$  von  $1\text{E}-13$   $\text{m/s}$  erhöhen sich die vertikalen Durchflüsse vermutlich nahezu proportional um eine Grössenordnung. Für die entsprechende Parametervariation 1.1f des Referenz-Konzeptes ergeben sich aber dadurch keine erhöhten Dosen (der Transport ist immer noch Diffusions-kontrolliert). Bei einer weiteren Erhöhung der effektiven Durchlässigkeiten des Wirtgesteins um eine Grössenordnung verliert das System seine Stabilität (starke Erhöhung der Radionuklidfreisetzung). Dieser berechtigterweise als „*What-if-Case*“ 4.1 bezeichnete Rechenfall ist aber nicht mehr im Bereich der realistischerweise anzunehmenden grossräumigen Durchlässigkeiten.

Diese Gesamtdurchflüsse sind deutlich grösser als die mit Netzwerk-Modellen, aufgebaut aus 1D-Widerständen, abgeleiteten Flüsse durch die einzelnen Endlagerbauwerke, insbesondere die Endlagerstollen, die Rampe und den Schacht. Nach Berechnung von Nagra ergeben sich für das Alternative Konzept 1.6 des Referenz-Szenariums nach oben gerichtete Flüsse durch den Schacht von  $3.4\text{E}-4$   $\text{m}^3/\text{a}$  und durch die Rampe von  $6.5\text{E}-4$   $\text{m}^3/\text{a}$ . Nach Nagra (NTB 02-06, Kapitel 3.6) werden diese Werte durch das lokale hydrodynamische Grundwassermodell bestätigt. Eigene Berechnungen mit einem vergleichbaren Netzwerk-Modell (Fidelibus und Löw 2004) führen bei gleicher Parametrisierung zu höheren Durchflüssen durch den Schacht ( $5.7\text{E}-4$   $\text{m}^3/\text{a}$ ) und die Rampe ( $1.0\text{E}-3$   $\text{m}^3/\text{a}$ ). Diese Differenzen sind wiederum auf unterschiedliche Ansätze in der Behandlung der vertikalen Opalinuston-Durchströmung zurückzuführen. Die Durchflüsse durch die Endlagerbauwerke sind klein im Vergleich zur Gesamtdurchströmung des Endlagers.

In NTB 02-06 wird eine alternative Parametrisierung der EDZ analysiert ( $K_{\text{EDZ}}$  von  $1\text{E}-11$  bis  $1\text{E}-9$   $\text{m/s}$ ). Nach NTB 02-06 konvergieren bei einer Durchlässigkeit der EDZ von etwa  $1\text{E}-10$   $\text{m/s}$  die Durchflüsse durch das Endlager gegen stabile Werte, die auch beim Schacht und der Rampe  $1\text{E}-2$   $\text{m}^3/\text{a}$  kaum übersteigen. Die eigenen Berechnungen (Fidelibus und Löw 2004) zeigen kein solches Verhalten. Mit zunehmender Durchlässigkeit der Auflockerungszone ergeben sich anfänglich nahezu linear zunehmende Durchflüsse durch den Schacht bis zu einer Durchlässigkeit der EDZ von etwa  $1\text{E}-8$   $\text{m/s}$ . Diese Unterschiede im Modellverhalten sind auf einen Fehler im Netzwerk-Modell der Nagra zurückzuführen. In der Aktennotiz 04-174 der Nagra werden die Ursachen im Detail erklärt und die neuen Werte, welche mit den vorliegenden Resultaten

<sup>2</sup> Eine detaillierte Diskussion dieser Ansätze findet sich in der Aktennotiz der Nagra AN 04-174 (2004).

übereinstimmen, dargelegt. Es wäre sinnvoll, im Rahmen der Sicherheitsanalyse zukünftig weitere Rechenfälle mit alternativen Parametrisierungen (z.B. für die effektiven Durchlässigkeiten des Bentonits und der Absperrbauwerke) durchzuführen.

Eine Erhöhung der hydraulischen Gradienten im „Alternativen Konzept 1.7 des Referenz-Szenariums“ ausgelöst durch eine sehr lange andauernde Kompaktion des (gesättigten) Bentonits, ergibt entsprechend höhere Durchflüsse durch das Wirtgestein. Diese Erhöhung ist aber gegenüber den anderen Unsicherheiten vernachlässigbar und sicherheitsmässig nicht relevant (vergleiche Referenzfall 1.1f).

Die Auswirkungen von erhöhten Gebirgs-Durchlässigkeiten entlang von tektonischen Trennflächen im Fernfeld werden in der hydrodynamischen Modellierung (NTB 02-03, Kap. 6) und der Sicherheitsanalyse der Nagra (NTB 02-05, Kap. 7.7.3) untersucht. Der betrachtete *What-if*-Fall 4.2 mit einer Störungs-Transmissivität von  $1\text{E-}10$  und  $1\text{E-}9$   $\text{m}^2/\text{s}$  deckt die Unsicherheiten in den Transmissivitäten von kleinen Störzonen, die das Endlager durchschlagen könnten, ab. Bei einer Transmissivität von  $1\text{E-}9$   $\text{m}^2/\text{s}$  resultiert für das gesamte ILW Endlager unter der Annahme der von Nagra errechneten Stollendurchflüsse eine relativ hohe Dosis von  $1.1\text{E-}2$   $\text{mSv}\text{a}^{-1}$  (Schutzziel  $1\text{E-}1$   $\text{mSv}\text{a}^{-1}$ ).

## Schlussfolgerungen

Dieser Bericht überprüft und bewertet die Aussagen der Nagra zu den hydro-mechanischen Eigenschaften des Opalinustons im Rahmen des Entsorgungsnachweises. In diesem Bericht nicht behandelt werden die Auswirkungen von Endlagergasen auf den Transport von Radionukliden und auf die mechanische Integrität der natürlichen und technischen Barrieren.

Die Arbeiten der Nagra zu den hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Wirtgesteins und der technischen Barrieren im Nahfeld sind von sehr hoher wissenschaftlicher Qualität. Die sehr komplexen hydro-mechanischen Prozesse im Opalinuston wurden von der Nagra, basierend auf umfassenden Untersuchungen im verschiedenen Labors der Welt, im Felslabor Mont Terri und in der Bohrung Benken, detailliert untersucht und in einer grossen Anzahl von Berichten genau beschrieben. Die durchgeführten Untersuchungen sind zweckmässig, zielgerichtet und in den meisten Fällen auch zielführend.

Aus der Gesamtschau aller von der Nagra dargelegten Resultate zur Hydromechanik des Opalinustons und der technischen Barrieren im Nahfeld ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Eigenschaften des Opalinustons im Fernfeld für den Nachweis der Langzeitsicherheit sehr geeignet sind. Die sehr geringen Durchlässigkeiten des intakten (tektonisch nicht gestörten) Opalinustons wurden überzeugend nachgewiesen. Auch die Aussage der Nagra, dass im Bereich eines potentiellen Endlagers keine wirklich permeablen Störzonen (mit einer höheren Transmissivität als  $1\text{E-}9$   $\text{m}^2/\text{s}$ ) zu erwarten sind, kann mitgetragen werden. Da dieser Fall aber bezüglich der berechneten Dosen einer der kritischsten „*What-if*“-Fälle der Nagra darstellt, sind die Transmissivitäten von Störzonen in Endlagertiefe zukünftig durch weitere Messungen und Prozessstudien zu belegen. In diesem Bericht nicht untersucht und bewertet wurde zudem eine allfällige kurzfristige Erhöhung der Transmissivitäten von reaktivierten Störzonen im Fernfeld durch zukünftige geologische Prozesse (insb. Erdbeben). Zur Diskussion solcher Prozesse wären hydro-mechanisch

gekoppelte Modellrechnungen (z.B. Fitzenz 2002), aber auch zusätzliche Labordaten über das Scherverhalten natürlicher Trennflächen notwendig.

Im Gegensatz zu den Eigenschaften der natürlichen geologischen Barriere im Fernfeld sind für das Nahfeld eine grössere Anzahl offener Fragen zu formulieren. Diese offenen Fragen betreffen insbesondere hydro-mechanisch und hydro-thermo-mechanisch gekoppelte Prozesse und Parameter im Grenzbereich zwischen der geologischen Barriere und der Bentonit-Barriere. Die zum Teil irreversiblen und bruchhaften Verformungen des Opalinustons im Nahfeld sind – wie in den Nagra-Berichten im Detail ausgeführt - von der Temperatur- und Spannungs-Entwicklung, der Zeit, dem Sättigungsgrad und der Hydrochemie im Nahfeld abhängig und werden heute nur punktuell verstanden. Die vermutlich stark heterogenen Verformungen des Opalinustons im Nahfeld sind mit dem Quell- und Kompaktionsverhalten des Bentonits gekoppelt. Die Verformungsmoduli des vorgesehenen Bentonit-Granulats und des Bentonit-Sand-Gemisches sind unsicher.

All diese Unsicherheiten führen unter anderem dazu, dass die Fließ- und Transport-Eigenschaften der um die Untertagebauwerke entstandenen Auflockerungszonen - zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung aus den Abfallbehältern – heute nicht mit Sicherheit vorhergesagt werden können. Eine Selbstabdichtung der Auflockerungszone mit einer substantiellen Reduktion ihrer Durchlässigkeiten gegenüber dem initialen Zustand um mehrere Grössenordnungen ist unbestritten. Da die Selbstabdichtungsprozesse heute aber noch wenig verstanden sind, bedarf der von der Nagra als Basisfall angenommene Durchlässigkeits-Wert von  $1E-12$  m/s weiterer Belege. Ebenso ist heute die Ausbildung der Transportwege im Nahfeld (porös, geklüftet) zum Zeitpunkt der Radionuklidfreisetzung nur mit Plausibilitätsbetrachtungen beschreibbar. Es ist darum sinnvoll, neue „*What-if*-Rechenfälle für diskrete nicht-poröse Wasserfließwege im Nahfeld durchzuführen.

Die Unterschiede in den Berechnungen der Nagra und jener von Fidelibus und Löw (2004) zum Grundwasser-Durchfluss durch das Endlagersystem können auf unterschiedliche Annahmen zur vertikalen Durchströmung der Endlagerbauwerke durch den Opalinuston sowie auf einen Fehler in den Grundgleichungen des Netzwerk-Modells der Nagra zurückgeführt werden (AN 04-174 der Nagra). Die Durchflüsse entlang der Endlagerbauwerke (Endlagerstollen, Rampe, Schacht) sind im Basisfall deutlich kleiner als die vertikale Gesamtdurchströmung des Endlagers. Die dabei errechneten Peclet-Zahlen bestätigen die Dominanz des diffusiven Stofftransportes. Bei einer massiven Erhöhung der Durchlässigkeit der EDZ (etwa ab  $1E-8$  m/s) konvergieren die Flüsse entlang der Endlagerbauwerke zu ähnlichen Werten wie die vertikale Durchströmung. Die Auswirkungen dieser neuen Befunde auf den Radionuklidtransport werden in einem separaten Bericht der Nagra erläutert werden. In diesem Zusammenhang wäre es auch sinnvoll, weitere Sensitivitätsstudien zum Radionuklidtransport bei Variationen der Durchlässigkeiten der Bentonitbarriere und der Absperrbauwerke auszuführen.

## Referenzen

- Daeman J, and Raan Ch. (1996): Bentonite as a Waste Isolation Pilot Plant Shaft Sealing Material. Sandia Contractor Report SAND96-1968. UC-721.
- Enachescu C., Jäggi, K, Schmid A, Steffen P. (2001): GP-A and GS experiments: report on hydraulic long term testing (water and gas) in boreholes BGS-2 (active) and BGS-1 (observation). Tech. Report 2000-8. Mont Terri Project.
- Fidelibus C. and Löw, S. (2004): Re-evaluation of selected hydro-mechanical processes in the near-field of a potential nuclear waste repository at Benken, Switzerland, ETH Report 3465/36, Version 2, June 30, 2004.
- Fitzenz D. (2002): Generalization of a 3-dimensional fault interaction model including tectonics, fluids, and stress transfer. Dissertation ETH Nr. 14609.
- Gutierrez M., Oino L.E., Nygard R., Stress-dependent permeability of a de-mineralised fracture in shale, *Marine and Petroleum Geology* 17 (2000), 895-907.
- Nagra (2004a): Antworten der Nagra zum Fragenkatalog der KNE betreffend Geosynthese (NTB 02-03), geologische Langzeitszenarien (NTB 99-08) und Anlagen- und Betriebskonzept (NTB 02-02). Nagra Arbeitsbericht NAB 04-01, Wettingen, Dezember 2004.
- Nagra (2004b): Nagra Comments on the ETH Report "Re-evaluation of selected hydro-mechanical processes in the near-field of a potential nuclear waste repository at Benken, Switzerland, May 16 2004".
- Nagra (2004) : Sitzung vom 29.06.04 mit C. Fidelibus zum Thema „Resistor network modelling to calculate water flow rates in the repository considered in Project Entsorgungsnachweis“: Tischvorlage und Kurzprotokoll, AN 04-174.
- Rutqvist J., Börgesson L., Chijimatsu M., Nguyen T.S., Jing L., Noorishad J. and Tsang, C.F. (2001): Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine - comparison of field results to predictions of four finite element codes. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 38, 129-142.

# Review of geochemical near-field model concepts and data

Dr. Annette Johnson

---

## Scope of the review

The reports listed below contain basic geochemical data for safety assessment calculations. They pertain to the near-field and deal mainly with the cementitious matrix. They provide data for the calculation of chemical retention. Scenarios are not explicitly discussed. To obtain background information of how this data is used and what scenarios underlie the assumptions made in these reports, I spoke directly with the authors at PSI and Nagra.

The work has been carried out seriously and is state-of-the-art. Obviously much thought has gone into it and they have done a very good job. They have cleverly bridged gaps in knowledge. Where there is little information they have made conservative parameter choices, most of which I agree with. The main questions that arise are related to the lack of information and the choice of scenario. The reports are discussed separately.

Nagra Technical Report 02-13	Redox conditions in the near field of a repository for SF/HLW and ILW in Opalinus Clay. <i>P. Wersin, L.H. Johnson, B. Schwyn, U. Berner and E. Curti.</i>
Nagra Technical Report 02-22	Radionuclide concentration limits in the cementitious near-field of an ILW repository. <i>U. Berner</i>
Nagra Technical Report 02-20	Cementitious Near-field sorption data base for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay. <i>E. Wieland and L.R. Van Loon</i>
HSK 35/80	Review Projekt Entsorgungsnachweis Opalinuston: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld BE/HAA. <i>Hans Wanner</i>

## **Redox conditions in the near field of a repository for SF/HLW and ILW in Opalinus Clay** (Nagra Technical Report NTB 02-13)

The aim of this report is to assess redox conditions in the near-field of SF/HLW and ILW repositories. It brings together information from many different sources in order to make this assessment. In both cases the long term situation, i.e. that after 10'000, is of interest. The authors have an in-depth understanding of the subject matter and developments and are to be

complimented. The reader who is not acquainted with this subject matter has difficulty in following all the assumptions and many of the questions that arise may be due to this fact. In this review, I will summarize the information given and then pose questions and highlight gaps in information that should be the subject of further research.

### SF/HLW repository

A length (8 m) of repository is taken, with the canister, the surrounding bentonite and a 0.5 m excavation disturbed zone (EDZ), and the possible redox reactions considered. Summing the species that may partake in redox reactions (Table 1) it is clear that Fe species dominate the overall redox chemistry. We are looking at a time period after 10'000 when O<sub>2</sub> is depleted, when the bentonite is saturated and temperatures no longer elevated. Plausible estimates are made to show that such processes are likely to be complete after a few hundred years. At this hypothetical time of interest, the canister is corroded and leaking, porewater from the Opalinus Clay (OPC) will have diffused into the bentonite and since the bentonite and the OPC are similar it can be assumed that Fe(II) concentrations in the OPC, as in the bentonite are controlled by the solubility of siderite (FeCO<sub>3</sub>). The scenario assumes that the radionuclides do not encounter an Fe(0) surface.

At the interface to the corroded canister anaerobic corrosion producing Fe(II) and H<sub>2</sub> gas has taken place. The Fe(II/III)-(hydr)oxides coat the steel. The authors assume, that based on laboratory experiments, the dominant redox couple is likely to be Fe(III)/Fe(II) with the dominant Fe(III)-containing mineral being magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). There is sufficient information in the literature to support this claim.

The redox potential is controlled by the solubility of the Fe(II)/(III) phases. The redox potential depends on the relative dissolved concentrations of the Fe species and thus on the solubility of the Fe(II)/Fe(III) phases. There is particular uncertainty with regard to the Fe(II) mineral involved. Various scenarios are calculated.

Table 1: Inventory of potential redox-active components

Canister	bentonite	EDZ	Air
400 kmol Fe(0)	3 kmol Fe(II) 2 kmol S(-II)	11 kmol Fe(II) 4 kmol S(-II)	0.15 kmol O <sub>2</sub>
	13 kmol Fe(III) in montmorillonite		

### Discussion and Comments

- It would be more appropriate to model a source term scenario where canister corrosion, diffusion of Fe(II), carbonate and radionuclides is specifically take account of, rather than a mix-tank reactor. However, given the lack of quantitative data, the approach used is sensible.

- The critical choices of scenario appear to be the appropriate choice of Fe redox species. It is possible that the Fe(0)/Fe(II) couple influences the mobility of radionuclides and that the redox conditions at the (ex-)canister walls control the redox chemistry of the radionuclides. However, Nagra point out that the couple is only effective during the lifetime of the canister. In addition, magnetite can form a protective film on the uncorroded Fe(0) surface (NTB 00-04). Given the fact that most species would actually have a lower solubility at low Eh values, a conservative assumption that the Fe(0)/Fe(II) couple is neglected in favor of the Fe(II)/Fe(III) couple, which has a more positive Eh value, is acceptable.
- The solubility of the Fe(II) and the Fe(III) containing phases affects Eh. Unfortunately there appears to be little supporting experimental evidence to show what proportion of the steel will be oxidized to magnetite and how much Fe(II) be released. Close to the remains of the steel canisters is it possible that very high dissolved Fe(II) concentrations may result in Fe(II) uptake into clays? This could affect Eh. However, the low solubility of Fe(II) ( $< 10^{-5}$  M) in equilibrium with magnetite could reduce the significance of this process.
- The data on the redox-active species in bentonite is a little poor, given its importance. Nagra has thought of adding pyrite to the bentonite to increase the redox buffer capacity and keep the Eh as low as possible for as long as possible. The magnetite would also be a source of reduced Fe over a long time period.
- Would there be expansion as a result of Fe(0) oxidation? Would Fe(0) oxidation be inhibited? How would the system cope with this? Would the pores be sealed by Fe precipitation products? In answer to these questions, Nagra answered as follows: The volume increase of solids by Fe(0) corrosion will probably further compact the system (in addition to the swelling of the benonite) but due to the slow corrosion rate this effect will be restricted to a region closest to the canister (see “Canister options for the disposal of spent fuel”, NTB 02-11). We consider it rather unlikely that corrosion will fully cease (experimental evidence). Even more unlikely is that the redox potential is not buffered due to slow diffusion / chemical reactions while the radionuclides still migrate unhindered.

Open questions and additional research required:

- i. The radionuclides are likely to sorb to magnetite or be incorporated into siderite. Unfortunately there is no quantitative information at present.
- ii. The corrosion process should be re-evaluated and the role of H<sub>2</sub> gas should be assessed

### **ILW repository**

There are two kinds of ILW repositories, the major part of the waste being disposed of in ILW-1 repositories and the other (ILW-2) containing wastes with a high amount of NO<sub>3</sub>. The scenario considered here is a 1 m slice in a tunnel containing ILW wastes. It is fully mixed. Wastes are put

into stainless steel containers, which are placed in concrete containers and filled with mortar. The concrete containers are then placed in position and the whole tunnel filled with mortar. The chemistry here is dominated by the cementitious matrix. Diffusion from the OPC is not considered.

The role of sulphate reduction was discussed but not included in thermodynamic calculations. It is assumed that microbial reactivity is not favoured because of the high pH conditions but SO<sub>4</sub> reduction is included. They assumed control by Fe(III)/Fe(II) and assessed the possibility of control of Fe(II) by FeS and FeS<sub>2</sub> solubility.

The redox inventory is compiled in Table 2. The amount of SO<sub>4</sub> in the cement matrix and the possible amount of elemental Al in the wastes or, depending on the kind of cement, in the cementitious matrix has not been quantified. It is also possible that materials such as blast furnace slag (containing reduced Fe and S) may be employed in the production of the cement. Nevertheless even with these unknowns, Fe dominates the redox chemistry of the ILW-1 scenario. The redox potential depends on the mineral phases that are chosen to control the solubility of Fe(II) and Fe(III). A very wide range of Eh values is estimated. The choice of -230 mV is reasonable, given the uncertainties. The conservative choice of the N(V)/N(0) couple for the scenario ILW-2 is plausible.

Table 2: Redox inventory (kmol)

Scenario		Fe(0)	cement	organics	NaNO <sub>3</sub>	CoS	Air
ILW-1	reductant	90 ? Al		0.6			
	oxidant		6 Fe(III) ? SO <sub>4</sub>				0.15 O <sub>2</sub>
ILW-2	reductant	8 ? Al		30		0.4	
	oxidant		1 Fe(III) ? SO <sub>4</sub>		2		0.06 O <sub>2</sub>

### Discussion and Comments

- It is unclear from the report what kind of concrete will be used, how much water comes in with the mortar and whether or not the conditions are really unsaturated. Nagra have informed me that the shotcrete liner and construction concrete may be water saturated but that they plan to use a mortar with macro pores (Monokorn) is planned to be used for the backfill. The choice of cement, Nagra assume, will affect porosity but only have slight effects on porewater composition and its chemical evolution. The macro pores will not be saturated. Therefore, the ILW tunnels will only be partially saturated at the time of closure. Their assumptions of the time taken for saturation thus appear to be sensible.
- Hydrogen gas will be formed by the oxidation of the small amounts of Al(0) and Zn(0) in the waste. Nagra point out that they will avoid the use of "gas" cement (with Al(0)) in order to avoid tunnel convergence due to the loss of porosity by the lithostatic stress. The

desired high porosity (buffer space for gas) will be reached by the use of “Monokorn” mortar which has an incompressible porosity. Nagra further point out that H<sub>2</sub> is commonly assumed to be unreactive in near field environments, although this assumption is questionable. At the moment there are, to their knowledge, no conclusive experimental data that would apply to the canister-bentonite or cement environment. On the other hand, experimental data with spent fuel performed as part of SKB’s R&D program indicate that UO<sub>2</sub> acts as catalyst for H<sub>2</sub> reactions.

- In answer to the question “If the pores in the porous cementitious matrix around the concrete containers fill with water, where does the H<sub>2</sub> go?” Nagra reply that when the H<sub>2</sub> exceeds the solubility in water (which is expected to occur in spite of the diffusion into the host rock) a gas phase will form displacing water into the host rock. Gas will move into the host rock by the formation of microscopic pathways (see Section 5.5.2.2 in the safety report, NTB 02-05)
- The cementitious matrix is likely to play an important role in determining Eh. Iron will most probably be incorporated into cement minerals, thus affecting its solubility and, as a consequence, redox potential. Fe(II) is likely to be sorbed in Ca silicate hydrate and Fe(III) may substitute for Al(III) in AFm and AFt phases or form Ca ferrites. Nagra point out that very little is known about Fe-bearing minerals in cement. Experimental data with cement pastes performed at PSI (Sarott et al. 1995, internal PSI report) under oxic conditions indicated that Fe concentrations were at maximum 10<sup>-7</sup> M. This served as basis for their redox potential estimation, conservatively assuming all Fe equal to Fe(III). Thus, they did account in a preliminary fashion for Fe solubility in cement.
- In answer to the question “how about doctoring ILW-2 so that the redox potential remains negative?” Nagra replied that a separate disposal of that waste sort (WA-COG-2, reprocessing waste conditioned in bitumen) is preferred to a “dilution” within the other waste since the latter strategy would substantially increase the uncertainty on the retention properties of the whole repository. An additional treatment of the WA-COG-2 waste, which is already produced or will be produced using a licensed procedure, is not feasible.
- A source term scenario would shed better light onto radionuclide retention (sorption-surface precipitation-incorporation-precipitation processes) than a mixed-tank reactor. However Nagra maintain that the mixed-tank assumption may not be too far away from reality with regard to redox conditions since diffusion is faster within the cementitious near field than at the interface to the host rock because of the macro porosity of the backfill mortar.

Research needs:

It would be important to assess the role of cement minerals in the speciation/stabilisation of Fe(II) and Fe(III).

## **Radionuclide concentration limits in the cementitious near-field of an ILW repository** (Nagra Technical Report 02-22 by U. Berner)

In this report the solubility of radionuclides is investigated as a function of Eh for a cementitious system. The choice of Eh as the main variable is a wise choice given the uncertainty in the assessment of the redox potential. The porewater-pH, on the other hand, is well buffered in the cementitious matrix. The choice of the Davies equation for the calculation of activity coefficients at ionic strengths above 0.15 M is not really state of the art. Pitzer is usually chosen for high ionic strengths. However, given the uncertainty in much of the thermodynamic data, also with regard to temperature, a degree of uncertainty in the calculation of ionic activities can be accepted. The author has done a very good job despite the limited database. The estimates of uncertainty seem reasonable. The order of the elements is a little puzzling but not a problem.

The first thing that strikes a relative “outsider” is the lack of basic thermodynamic data. So much money is spent on planning a nuclear repository by so many countries that it is incomprehensible, that not more effort is made to fill these gaps. It would be sensible for the research responsible research communities make a concerted (EU or world-wide) effort to plug these knowledge gaps. The selection of radionuclides to be studied would have to be based firstly on their abundance and longevity (primarily the actinides?) and secondly on their mobility (C, I, Cs, Se and possibly Tc(IV,VII), Be(II), Nb(V)) under neutral and alkaline conditions. The elements about which little is known are Tc(IV,VII), Be(II), Nb(V), Cm(III), Pa(IV,V), Ac(III), Am(III), Sb(III,V), Be(II), Po(II,IV), Hf(IV), Pm(III), Ho(III). Presumably some are too unimportant to be given a high priority. However, elements that are thought to be mobile should be further investigated.

In addition, species that are used as analogues for other ions such as Eu(III) or Th(IV) (this also applies to NTB 02-20) should also be well understood. Apparently there is a discussion as to whether or not these species form oxyanions at high pH, ie.  $\text{Eu}(\text{OH})_4^-$  and  $\text{Th}(\text{OH})_5^-$ . It is also questioned as to whether or not the species that are supposed to have analogous do actually form oxyanions themselves. The formation of oxyanions leads to enhanced solubility at high pH and is therefore critical. Urs Berner points out in NTB 02-22 that this may be a difficulty. Given the uncertainty it is probably better to assume higher solubility. There may be a case for assuming a higher solubility for Cm, which is at present thought to be analogous to Am that has a low solubility at high pH.

The elements of particular interest to HSK are those for which very high  $K_d$  values were chosen; Sm, Eu, Ac, Th, Np, Pu, Am and Cm. Their geochemical properties, together with those of Pa and U, are summarized in Table 3. It should be noted that neither report NTB 02-10 or NTB 02-22 mention Sm. The reason for this omission has been explained in the geochemical databases report (NTB 03-06). The radionuclide  $^{151}\text{Sm}$  appeared to be relevant only as a result of later extensive screening analysis. The data set is consistent, though it is not clear why for Ac, Am is used as an analogue for neutral pH conditions and Eu at high pH.

Table 3: Summary of information on elements from NTB 02-10 and NTB 02-22

Element	Bentonite porewater		Cement porewater		Analogue
	redox state	log $K_s^*$	redox state	log $K_s^*$	
<b>Sm**</b>	III	?	III	?	Eu
<b>Eu</b>	III	-6.3	III	-5.7	
<b>Ac</b>	III	?	III	?	Am, Eu
<b>Th</b>	IV	-6.2	IV	-8.5	
<b>Pa</b>	V (IV)	? (-8)	V (IV)	?(-8)	Very little known, probably V
<b>U</b>	IV VI	-8.6 unlimited	IV VI(>-360mV)	-8.6 unlimited	worst case assumed
<b>Np</b>	IV V(>150mV) VI(oxidizing)	-8.3 -6 unlimited	IV V(>150mV) VI (oxidizing)	-8.3 -6 unlimited	Oxidation state also dependent on pH
<b>Pu</b>	III IV (V,VI)**	-7.3	III IV (V,VI)**	-10.4	Oxidation state also dependent on pH
<b>Am</b>	III	-5.9	III	-8.7	
<b>Cm</b>	III(V, VI)**	?	III (V, VI)**	?	Am

\*solubility product, hydroxide of the dominant species

\*\*not mentioned

The solid phases that have been chosen to control solubility are based on an in-depth knowledge of the literature and cannot be faulted. However, there are probably a number of minerals that have yet to be determined. The formation of Ca metallates, for example Ca zincate, Ca molybdate, Ca stannate, or possibly Ca uranate, is quite common and can be solubility-limiting. Moroni and Glasser investigated the solubility of U(VI) in the cementitious system. Theirs is the only available published data at present. Using this data, a solubility of  $10^{-8}$  M is estimated. New data from PSI indicate that the solubility of an unknown Ca uranate species may be as high as  $5 \times 10^{-6}$  M. This situation is presently being clarified.

The formation of silicates is also a strong possibility, though these are more difficult to detect and characterize as they remain amorphous over long time periods. Given that these unknown phases are likely to lower solubility to below concentration limits suggested in this report, the choice of limits is conservative and acceptable. In addition, the formation of solid solutions is highly likely. Such considerations have only been made for Ra, where the database is sufficiently good.

The argumentation for the selection of Fe solubility limits ( $10^{-7}$  M) is influenced by reasons of "consistency" and is not so clear to follow. Fe(II) is likely to be present in relatively large amounts, precipitated as siderite. The concentrations may thus be quite high, particularly under alkaline conditions where dissolved  $\text{CO}_3(\text{-II})$  concentrations are low.

## **Cementitious near-field sorption data base for performance assessment of an ILW repository in Opalinus Clay (Nagra Technical Report NTB 02-20)**

This report describes the cement sorption database for safety-relevant radionuclides to be disposed of in the planned Swiss repository for long-lived intermediate-level radioactive wastes. The report reviews older sorption databases and presents new information. Recommended sorption values ( $K_d$ ) are listed.

The scope of the study is very broad, mainly because of the differing geochemical properties of the different radionuclides. The assumptions that have had to be made are well argued. Older studies focused more on the direct measurement of  $K_d$  values. Nowadays we know that the binding mechanisms are primarily dependent on solubility. An element that is highly insoluble will probably precipitate as a pure phase (usually a simple or mixed (hydr)oxide). Elements that are soluble in alkaline conditions may be incorporated into cement minerals. It is not clear from these reports whether any of the radionuclides are likely to be present in sufficient quantities to be solubility-limited. If a source-term scenario were to be chosen the situation could change.

Cationic species appear to readily sorb to/in Ca silicate hydrate (C-S-H). They may also incorporate into other minerals, but there is little evidence to support this. Anionic species may precipitate as Ca metallates or other metallate minerals or they may exchange for sulphate in cement minerals. Though in broad terms the possible binding mechanisms are known, there is not yet a way of quantifying or predicting solubility in most cases. It is therefore still necessary to rely on  $K_d$  measurements in most cases. Given the probable concentrations, this is a sensible choice for most cases.

Again, we know very little about the behaviour of Fe(II) (and Fe(III)) in cementitious systems. For several radionuclides, sorption data is patchy or non-existent and analogues have to be selected. Some radionuclides exist in different redox states and given the uncertainty of the redox potential, it is necessary to have an understanding of the sorption properties of all redox species. The high  $K_d$  values for Sm, Eu, Ac, Th, Np, Pu, Am, Cm have received particular attention in this review.

### **Discussion and Comments**

- Despite the great gaps in knowledge, the procedure selected by Wieland and Van Loon in NTB 02-20 is sensible and should be supported.
- The trivalent species of the lanthanides and the actinides have very similar properties. They hydrolyze at low pH values, precipitate as  $M(OH)_3$ . The experimental evidence shows that trivalent ions of Eu and Cm sorb strongly to Ca silicate hydrate (C-S-H) and hydrated cement pastes. This is an acceptable assumption.
- The use of Eu as an analogue for Sm, Ac, Am and Cm is acceptable for this estimate. The choice is well supported by common knowledge of the properties of the lanthanides and actinides.

- The IV hydroxides are sparingly soluble. The maximum solubility of ThO<sub>2</sub> is estimated to be  $3.2 \times 10^{-9}$  M. The solubility of Pu is also extremely low. These species are possibly solubility-limited but may also sorb to C-S-H. Pu(III) appears to complex with silicate, so binding to C-S-H is probably strong.
- The analogy of U(IV), Np(IV) and Pu(IV) to Th(IV) is probably acceptable. However, with such low solubilities, it is possible that these species precipitate as solids. In such a case the use of a K<sub>d</sub> value, where dissolved concentrations are independent of the solid phase would be the wrong concept.
- The species of oxidation state V are present as MO<sub>2</sub><sup>+</sup> (Np, Pu, Am). Not much seems to be known about these species.
- The species of oxidation state VI are present as MO<sub>2</sub><sup>2+</sup> (U, Np, Pu, Am). Not much seems to be known about these species.

### Choice of K<sub>d</sub> values

Table 4 summarizes the availability of K<sub>d</sub> information with regard to the cementitious matrix. Europium has been studied thoroughly and the data is trustworthy. The PSI data in general can be regarded as being state-of-the-art. The lower values determined by previous researchers were encountered as a result of working at high S:L ratios such that it was hard to detect the appropriate species in solution (thus underestimating K<sub>d</sub> values).

Table 4: Summary of K<sub>d</sub> assignation (NTB 02-20)

Element	K <sub>d</sub> (m <sup>3</sup> /kg)	Analogue	Unknowns
<b>Sm</b>	-	Eu(III)	
<b>Eu</b>	>100 (PSI) >100 (C-S-H, PSI)		
<b>Ac</b>	<i>no data</i>	Eu(III)	
<b>Th</b>	>100 (PSI) >100 (C-S-H, PSI) conflict with Allard and Höglund		
<b>U</b>	U(?) 5-40	U(IV)-Th(IV)	U(VI)
<b>Np</b>	Np(IV) 3-200	Np(IV)-Th(IV)	Np(V)
<b>Pu</b>	Pu(?) 1-70	Pu(IV)-Th(IV)	Pu(V)
<b>Am</b>	1-100 Allard and Höglund	Eu(III)	
<b>Cm</b>	<i>no data</i>	Eu(III)	

Choice of  $K_d$  values for ILW-1:      Ref. Value:    80  
   Lower limit:    20  
   Upper limit:    300

After discussion with PSI, I conclude that the selection of the reference and the lower values are sensible. The choice of the upper limit is too high, given all the analogies that have been drawn and general gaps in knowledge. A more conservative value of 100 is recommended.

The  $K_d$  values chosen for Sn appear to be quite low in view of the fact that it is known that Ca stannate limits the solubility of Sn(IV).

Further research requirements:

- i.      the sorption of Fe (II)
- ii.     the sorption of Np(V) and Pu(V)
- iii.    the sorption of U(VI)

## Background information for sorption in cementitious matrices

In general terms, the binding of heavy metals and metalloid ions in the cement matrix is quite well understood. There appear to be three basic types of binding mechanism. A metal ion may be

- (i) precipitated in the alkaline cement matrix as an oxide, mixed oxide or other solid phase,
- (ii) sorbed or precipitated onto the surfaces of cement minerals or
- (iii) incorporated into hydrated cement minerals.

The solubility of heavy-metal containing solid phases (i) does seem to be a limiting factor with regard to the second and third mechanisms so only ions that are sufficiently soluble in basic media will be incorporated in or sorbed to hydrated cement minerals to a significant degree.

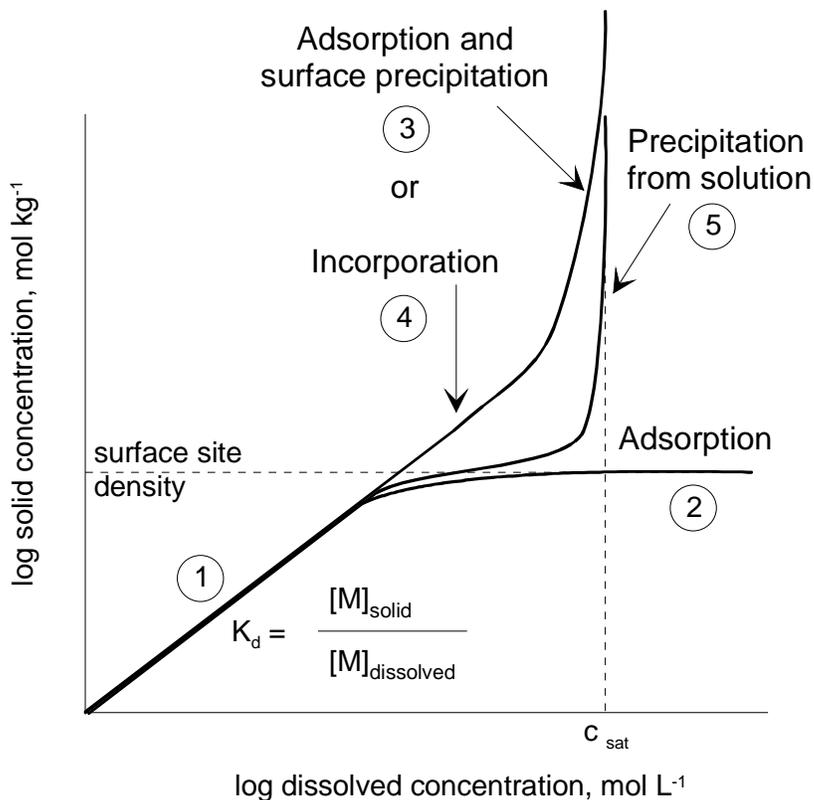


Figure 1: Schematic adsorption isotherms. The dissolved concentration at saturation is represented by  $c_{\text{sat}}$ .

Figure 1 illustrates the effect of different binding mechanisms on the porewater concentrations of metals and metalloid species in relation to the solid-phase concentrations. As soon as sorption takes place, by mechanisms ii) or iii) a relationship between the aqueous and the solid phase is established. This relationship may be described by the distribution ratio (①). The distribution ratio is dependent on time, pH, porewater and cement composition.

If a species is sorbing to a crystalline mineral surface, when all the available surface sites are occupied, no more sorption occurs and concentrations in the solid phase remain constant no matter how much more is added to the system (②). In reality surface precipitation may occur, resulting in a sorption isotherm schematically shown in Fig. 1 (③). However there is evidence to show that sorption of anions such as  $\text{SeO}_4^{2-}$  and  $\text{AsO}_4^{3-}$  do reach this saturation level in sorption experiments with ettringite.

Incorporation in cement minerals will lead to a similar relationship which may be described by a distribution ratio with the exception that uptake may be much greater than that of surface sorption (④). Such mechanisms may apply to C-S-H, AFt and AFm phases. The mechanism of incorporation may be by isomorphic substitution of a particular component within a crystal lattice. A good example here is the exchange of  $\text{SO}_4^{2-}$  in ettringite for another anion. Another possibility is the adsorption to sites within a crystal structure, as may occur at silicate sites within C-S-H.

Finally, if a solid phase is precipitated in a given porewater composition, the concentration of the component will remain constant in the aqueous phase irrespective of the concentration in the solid phase (⑤). This limiting case is easy to interpret and model. From Fig. 1 it can be seen that should precipitation occur at low dissolved concentrations, and the vertical line shifts to the left, other mechanisms of binding will be less significant with respect to controlling the porewater concentration of a given ion. It is therefore very helpful to examine the solubility of the components under consideration.

### **HSK 35/80 Review Projekt Entsorgungsnachweis Opalinuston: Maximale Löslichkeiten im Nahfeld BE/HAA (by H. Wanner)**

This review deals with the solubility reports 02-10 and 02-22. I have read these documents extensively and find them very thorough and limited only by the lack of thermodynamic data. I also support Hans Wanners review. I only have a few comments to make. These are:

- Calcium uranate should be considered to be an important species. It has apparently been detected by researchers at PSI. The formation of such a solid would definitely affect the chosen maximum solubility under oxidizing conditions (see comments above).
- Very little is known of Proactinium. I agree with Hans Wanner's statements and think that further research is definitely required on this element.
- Thermodynamic equilibrium between the redox states for Se is assumed. To my knowledge, redox reactions (as for sulphur) apparently need to be microbially mediated. This should be carefully considered.

# **Beurteilung der hydraulischen und felsmechanischen Datensätze, der thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse, der bautechnischen Machbarkeit und der Umsetzung des EKRA-Konzeptes**

Dr. Peter Hufschmied

---

## **Einleitung**

Als Grundlage für die Beurteilung des Entsorgungsnachweises werden im vorliegenden Bericht die hydraulischen und felsmechanischen Messungen diskutiert und beurteilt, aus denen die Datensätze für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit sowie der Langzeitsicherheit des Lagers hergeleitet werden. Eine spezielle Betrachtung wird den thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen gewidmet. Anschliessend wird die bautechnische Machbarkeit einer geologischen Langzeitlagerung nach dem EKRA-Konzept im Opalinuston des Zürcher Weinlandes beurteilt. Schlussendlich wird diskutiert, ob die aus dem EKRA-Konzept resultierenden Anforderungen umgesetzt wurden.

Der Bericht befasst sich nicht mit der Frage, ob sich die weiteren Untersuchungen zur Festlegung eines Standortes für ein Rahmenbewilligungsgesuch auf das Zürcher Weinland konzentrieren sollen.

## **Beurteilung der hydraulischen und felsmechanischen Messungen und der daraus abgeleiteten Datensätze**

### **Hydraulische Eigenschaften des Opalinuston**

**Wasserdurchlässigkeit:** Die Wasserdurchlässigkeit des Opalinuston ist trotz seiner hohen Porosität von rund 12 % äusserst gering. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Wasser infolge der filigranen Struktur des Porenraumes praktisch immobil ist. Experimente im Labor, in Tiefbohrungen und im Felslabor Mont Terri deuten darauf hin, dass die Durchlässigkeiten des ungestörten Opalinuston in der Grössenordnung von  $10^{-13}$  bis  $10^{-14}$  m/s liegen. Die höheren Werte gelten für den Wasserfluss parallel, die tieferen Werte senkrecht zur Schichtung. Diese Anisotropie der Durchlässigkeit erklärt sich aus der horizontalen Wechsellagerung von Tonen mit eingeschalteten Silt- und Feinsand-Lagen, Kalkbänken und Kalk-Konkretionen.

Die vier im OPA der Bohrung Benken erfolgreich durchgeführten Packertests O4 bis O7 ergaben Werte von 1 bis  $6 \times 10^{-14}$  m/s. Die Länge der Testintervalle lag zwischen 3.4 und 32.0 m. Weitere Durchlässigkeitswerte stammen aus dem OPA vom Mont Terri mit Werten zwischen  $2 \times 10^{-14}$  und  $2 \times 10^{-12}$  m/s sowie aus den Bohrungen Weiach, Riniken und Schafisheim mit Werten  $5 \times 10^{-14}$  und  $4 \times 10^{-13}$  m/s.

Die messtechnische Ermittlung derart geringer Durchlässigkeitswerte ist mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Einerseits sind die von den Tests erfassten Gesteinsvolumen sehr klein (einige cm bis dm um das Bohrloch). Die Messung derart geringer Durchlässigkeitswerte, wie oben aufgeführt, erfolgt mit Packertests und erfordert hochspezialisierte Testgeräte. In einer Tiefbohrung wird die sogenannte Transmissivität über einen Testabschnitt von einigen Metern bis einigen zehn Metern senkrecht zur Bohrachse gemessen. Bei der Bewertung der Messdaten ist zu beachten, dass infolge der geringen Durchlässigkeit das getestete Gesteinsvolumen sehr gering ist und lediglich einige cm um das Bohrloch erfasst. Einerseits ist dieses Gesteinsvolumen häufig durch den Bohrvorgang gestört und teilweise aufgelockert, andererseits können zahlreiche Einflussfaktoren wie die Bohrloch-Druckgeschichte, Bohrlochkonvergenzen und Temperatureffekte die Messdaten und damit die Ergebnisse der Testauswertung beeinflussen. Die Ergebnisse der Auswertung sind deshalb als Grössenordnung zu verstehen.

Die Bedeutung einer Durchlässigkeit von  $10^{-14}$  m/s kann man sich schwer praktisch vorstellen. Es seien deshalb einige Vergleiche angeführt. Der Wert  $10^{-14}$  m/s entspricht einem Wasserfluss von  $0.3 \text{ cm}^3$  oder rund zehn grossen Regentropfen pro Jahr durch einen Gesteinskörper mit einem Volumen von einem Kubikmeter bei einem hydraulischen Gradienten von eins (ein Meter Potentialabbau pro ein Meter Fließdistanz).

Als Fließgeschwindigkeit ausgedrückt bedeutet diese Durchlässigkeit, dass das Wasser bei einer Porosität von 12% und einem hydraulischen Gradienten von eins in einem Jahr eine durchschnittliche Distanz von 2.6 Tausendstel mm zurücklegt. Um 50 m Opalinuston zu durchfliessen benötigt das Wasser dementsprechend eine Zeit von rund 19 Mio. Jahren. Die Fließgeschwindigkeit des Wassers darf allerdings nicht mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Druckänderung verwechselt werden, wie sie bei einem Packertest verwendet wird. Letztere ist deutlich höher.

Der sogenannte advective Transport von Radionukliden (mit dem fließenden Wasser) durch den Opalinuston ist damit äusserst langsam. Bei solch langsamen Fließgeschwindigkeiten überwiegt der diffusive Transport von Wasserinhaltsstoffen und die Wasserdurchlässigkeit verliert ihre Bedeutung als ein Schlüsselparameter für den Transport von Radionukliden aus dem Endlager.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wasserdurchlässigkeit des OPA mit Packertests in der Bohrung Benken sowie mit Laborversuchen an Gesteinsproben nach dem heutigen Stand der Technik gemessen wurde, dass die ermittelten Wasserdurchlässigkeiten des OPA in der Grössenordnung richtig sein dürften und dass eine für den Entsorgungsnachweis ausreichende Datenbasis vorliegt.

**Hydraulisches Potential:** Im Rahmen der vier Packertests O4 bis O7 im OPA der Bohrung Benken wurde versucht, die hydraulischen Potentiale im OPA abzuschätzen. Mittels Extrapolation der Druckaufbaukurven wurden statische Süßwasserdruckhöhen abgeschätzt, die bis zu 300 m über der heutigen Geländeoberfläche liegen. Die Unsicherheiten in der Testinterpretation sind jedoch mit rund 100 m Druckhöhe erheblich. Mit dem Langzeitbeobachtungssystem wurde zudem ab Sommer 1999 versucht, den Druckverlauf über mehrere Jahre zu beobachten. Das Ergebnis war nicht ermutigend, zeigte sich doch zuerst eine Abnahme der Druckhöhen zu subartesischen Drucken, gefolgt von einem Druckanstieg zu hydrostatischen Werten. Möglicherweise sind nicht ausreichend dichte Zementa-

tionen der Verrohrung die Ursache für Kurzschlüsse zwischen den Testintervallen, eine Erklärung die auch von der Nagra in Betracht gezogen wird. Das Beispiel zeigt, dass die Langzeitbeobachtung von Druckhöhen im OPA sehr schwierig ist.

Wesentlich genauer konnten die Potenziale der höher durchlässigen Aquifere im oberen Malm, Wedelsandstein, Stubensandstein, Muschelkalk und Buntsandstein bestimmt werden. Hier besteht weitgehende Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der Packer-tests und den Langzeitbeobachtungen.

Wir erachten die Frage der Porenwasserspannungen bzw. der Süswasserdruckhöhen im OPA und den Rahmengesteinen zum heutigen Zeitpunkt als weitgehend ungelöst. Angesichts der geringen Bedeutung des advektiven Flusses für die Langzeitsicherheit kann diese Unsicherheit zum heutigen Zeitpunkt toleriert werden. Im Hinblick auf das Systemverständnis besteht jedoch ein zukünftiger Bedarf nach weiteren Abklärungen durch in situ Beobachtungen.

### **Gebirgsspannungen und ihre Bedeutung für den Lagerbau**

In Gebieten mit einem flachen Relief werden die Gebirgsspannungen im wesentlichen durch die Lagertiefe, die tektonischen Verhältnisse und Gesteinseigenschaften wie die Querdehnungszahl bestimmt. Die Lagertiefe gibt das Gewicht der Auflast und damit die vertikalen Spannungen vor. Für das Zürcher Weinland und eine mittlere Lagertiefe von 650 m errechnet sich somit die Vertikalspannung im Bereich der Lagerebene in einer Grössenordnung von  $\sigma_v = 16.0$  MPa. Die zugehörigen horizontalen Hauptspannungen können für den homogenen und isotropen Halbraum und für ideal elastisches Gebirge über die Poissonzahl abgeschätzt werden. Mit der für den OPA ermittelten Poissonzahl von 0.27 (NIB 00-51) wird die Seitendruckziffer mit 0.37 berechnet und somit die theoretischen Horizontalspannungen ( $\sigma_H = \sigma_h$ ) zu 5.96 MPa.

Aufgrund tektonischer Vorgänge entsprechen diese theoretischen Horizontalspannungen in den seltensten Fällen den tatsächlich vorhandenen Horizontalspannungen. Dies trifft auch für den untersuchten Standort Benken zu.

Für das geologische Tiefenlager auf einer mittleren Teufe von 650 m unter der Geländeoberfläche wurden von der Nagra über Bohrlochversuche (Hydraulic Fracturing) und Auswertungen von Bohrlochrandausbrüchen folgende Rechenwerte für den Primärspannungszustand ermittelt (NTB 02-03):

Vertikalspannung infolge Auflast $\sigma_v$	15.9 MPa $\pm$ 5 %
Maximale horizontale Hauptspannung $\sigma_H$	22.6 MPa $\pm$ 10 %
Minimale horizontale Hauptspannung $\sigma_h$	15.1 MPa $\pm$ 5 %
Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung	$170^\circ \pm 10^\circ$

Die Ausrichtung der Lagerstollenachsen BE/HAA wurde parallel zur grösseren horizontalen Hauptspannung gewählt. Somit kann ihre Standfestigkeit am Hohlraumrand mit einem Seitendruckverhältnis von nahezu 1 ermittelt und angesetzt werden und somit eine maximal mögliche Ausnutzung der Materialfestigkeit des anstehenden OPA erreicht werden. Die Lagerstollen BE/HAA sollen als einzige Teilbauwerke der Gesamtanlage keine Innenverkleidung erhalten, sondern lediglich einen Kopfschutz.

## **Felsmechanische Eigenschaften des Opalinuston**

**Porosität und Trockendichte:** Für den Bau des Tiefenlagers sind die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinuston von grosser Bedeutung. Zahlreiche dieser Eigenschaften hängen von der Porosität ab. Die Porosität entspricht dem Anteil des Probenvolumens, der nicht aus Feststoffen besteht, sondern mit Wasser und/oder Gas erfüllt ist. Die Porosität des Opalinustons in der Bohrung Benken beträgt durchschnittlich rund 12 %. Die Schwankungsbreite der Pyknometerporosität von über 280 Proben aus der Bohrung Benken liegt zwischen rund 4 % und 17 %. Tiefe Porositäten werden in kalk-/sandreicheren, höhere Werte in den tonreicheren Proben gemessen. In Benken nimmt die Porosität gegen unten zu - eine Folge des zunehmenden Tongehaltes mit der Tiefe.

Vergleicht man die durchschnittlichen Porositätswerte im Opalinuston so fällt auf, dass die Werte aus sechs Tiefbohrungen vom Bodenseegebiet im Osten mit rund 4 % über das Zürcher Weinland mit rund 12 % bis zum Felslabor Mont Terri im Westen mit rund 16 % zunehmen. Diese Differenzen werden auf die unterschiedliche Versenkungsgeschichte zurückgeführt. Die Maximalversenkung wird mit rund 3'000 m im Bodenseegebiet, rund 1'700 m im Zürcher Weinland und rund 1'400 m am Mont Terri abgeschätzt. Dies ist rund 1'100 m mehr als die heutige Versenkung.

Umgekehrt zur Porosität nimmt erwartungsgemäss die durchschnittliche Trockendichte der Gesteinsproben mit 2.7 bis 2.75 g/cm<sup>3</sup> in den Bohrungen Berlingen, Kreuzlingen und Herdern im Bodenseegebiet über Schafisheim mit 2.55 g/cm<sup>3</sup>, Weiach, Benken mit 2.42 g/cm<sup>3</sup>, Riniken bis zum Mont Terri mit rund 2.35 g/cm<sup>3</sup> ab.

**Deformations- und Bruchverhalten:** Aufgrund seiner Versenkungsgeschichte ist der Opalinuston ein überkonsolidiertes Tongestein. Sein mechanisches Verhalten wird vor allem durch die Struktur der Tonpartikel und -mineralien, den Quarzkorngehalt, die Zementation und den Wassergehalt bzw. die Porosität bestimmt.

Für bautechnische Berechnungen und Belange sind vor allem folgende Parameter und Prozesse bei der Bemessung und Dimensionierung des geologischen Tiefenlagers von Bedeutung:

- E-Modul (Be- und Entlastungsmodul bzw. Wiederbelastungsmodul): Verformungsverhalten, Stabilität des Hohlraums
- Spitzen- und Restscherfestigkeiten: Festigkeitsverhalten des Gebirges und des Gesteins auf Trennflächen und der Schichtung
- Druck- und Zugfestigkeit (ein- und triaxial): Materialverhalten am Hohlraumrand liefert Anhaltswerte für einzubauende Sicherungsmittel
- Quellparameter: Materialverhalten des Wirtgesteins bei Wasserzutritt, Quelldruck und -verformung
- Zeitabhängiges Deformationsverhalten
- Porenwasserdruck, Wassergehalt

Die Quellfähigkeit beruht auf der Einlagerung von Wasser zwischen den Tonblättchen sowie der mineralogischen Zusammensetzung der unterschiedlichen Bestandteile. Die prognostizierten Quelldrücke im OPA können hier bis zu 2 MPa betragen, wobei die Quelldrücke sich nur bei behinderter Ausdehnung aufbauen können. Sobald der Quellvor-

gang unbehindert statt finden kann, geht eine starke Entfestigung des Gesteins damit einher.

Die einaxiale Druckfestigkeit des Wirtgesteins ist stark vom Wassergehalt, der Probengrösse und auch der Belastungsrichtung (senkrecht, parallel, schräg zu Schichtung) abhängig. Der Einfluss des Wassergehaltes wurde auch in Relation zu anderen Erkundungsbohrungen und den Werten aus dem Mont-Terri-Projekt eingeordnet und erscheint angemessen berücksichtigt. Die ausgeprägte Anisotropie im Wirtgestein infolge der Schichtung, der mikroskopischen Ausrichtung der Tonminerale sowie der makroskopischen Wechsellagerung von toniger und sandiger Fazies wirkt sich auf annähernd alle massgebenden Festigkeitsparameter aus.

Die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons sind durch zahlreiche Laborversuche an Gesteinsproben und die Versuche im Felslabor Mont Terri gut bekannt. Das mechanische Verhalten des OPA ist infolge der inneren Struktur des Tones komplex. Die Tonminerale bilden blättchenförmige Aggregate, welche mit anderen Mineralien wie z.B. Karbonat, Quarz und Feldspat vermischt sind. Im Porenraum zwischen den Mineralplättchen befindet sich das Porenwasser. Es ist durch elektromagnetische Kräfte unterschiedlich stark an die Tonplättchen gebunden.

Die felsmechanischen Parameter können unter Berücksichtigung der vorliegenden Projektphase als gut abgesichert betrachtet werden. Sie bilden eine verlässliche Grundlage für die Modellierung des felsmechanischen Verhaltens beim Bau des geologischen Tiefenlagers. Eine weitere Zuschärfung der festigkeitsmechanischen Parameter für den OPA, aber auch für die umgebenden Stratigrafien ist im Zuge der nachfolgenden Planungs- und Erkundungsschritte zu erwarten.

Für die felsmechanischen Berechnungen im OPA werden von der Nagra verschiedene Materialgesetze verwendet in Abhängigkeit von der Zielsetzung der Berechnung. Neben einem linearen Mohr-Coulomb-Ansatz wird auch ein bi-lineares Materialgesetz von Mohr-Coulomb jeweils mit Zugspannungsbegrenzung für Festigkeitsbetrachtungen empfohlen. Diese beiden Ansätze sind in Anbetracht des komplexen und stark anisotropen Festigkeitsverhaltens des Wirtgesteins sinnvoll ausgewählt zur Anwendung für weitere Berechnungen und Untersuchungen.

### **Selbstabdichtungsvermögen des Opalinuston**

Eine ganz wichtige Eigenschaft des Opalinuston ist sein sogenanntes Selbstabdichtungsvermögen. Damit wird das Phänomen bezeichnet, wodurch sich Störungen und Klüfte im Gestein bei Anwesenheit von Porenwasser wieder selbst verschliessen. Das Selbstabdichtungsvermögen des OPA konnte durch Experimente im Mont-Terri-Projekt sowie durch weitere zahlreiche Beobachtungen bei anderen Tunnelbauwerken im OPA belegt werden. Selbst im Bereich grösserer Störungen wurden keine Wasserzuflüsse registriert.

Der Mechanismus basiert auf drei Ursachen:

- infolge des vergleichsweise relativ geringen Elastizitätsmoduls des OPA schliessen sich Bruchstrukturen schon bei niedrigen Normalspannungsänderungen

- die vergleichsweise geringe zu erwartende Festigkeit des Tonsteins begünstigt den Prozess der Scherverfestigung bei Scherdeformationen
- steht Porenwasser zur Verfügung, so können sich die Bruchstrukturen durch Quellen abdichten, sofern das Porenwasser freigesetzt wird.

Allerdings ist anzumerken, dass das Selbstabdichtungsvermögen des Tonsteins nur dann angenommen werden kann, wenn die o.g. Randbedingungen gegeben sind. Inwieweit hierbei allerdings die Austrocknung des Tonsteins im Nahfeld der Lagerstollen infolge der Temperaturerhöhung das Selbstabdichtungsvermögen reduziert, ist durch entsprechende Untersuchungen noch genauer abzuklären.

## **Beurteilung thermisch-hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse und deren Modellierung**

### **Parameter**

Bei der Modellierung der in einem Tiefenlager stattfindenden Vorgänge werden die thermischen, hydraulischen und mechanischen Prozesse normalerweise getrennt betrachtet. In geringdurchlässigen Gesteinen können sich jedoch massgebliche Koppelungseffekte zwischen diesen Prozessen einstellen. Das folgende Beispiel beschreibt einen mechanisch – hydraulisch gekoppelten Prozess, der beim Auffahren der Tunnel und Stollen stattfindet: Eine Erhöhung des mechanischen Druckes auf eine wassergesättigte Gesteinsprobe führt zu einer Erhöhung des Porenwasserdruckes. Die zusätzliche Belastung des Gesteins wird sowohl von den Feststoffen als auch vom Wasser getragen. Kann sich das Gestein entwässern, so fließt das Porenwasser infolge des höheren Wasserdruckes aus der Gesteinsprobe ab und der Porenwasserdruck vermindert sich. Die Kräfte aus der äusseren Belastung verlagern sich dabei zunehmen auf das Feststoffgerüst und es erfolgt eine Konsolidation (Zusammendrückung) der Gesteinsprobe. Die Geschwindigkeit der Konsolidation hängt von der Durchlässigkeit des Gesteins ab, sie bestimmt, wie rasch das Porenwasser abfließt.

Thermisch-hydraulisch und/oder thermisch-mechanisch gekoppelte Prozesse entstehen, wenn das Gestein und das darin enthaltene Porenwasser erwärmt oder abgekühlt wird. Ursache für die Erwärmung sind die wärmeproduzierenden Abfälle. Eine Abkühlung des Gesteins kann z.B. als Folge der Lüftung auftreten. Bei einer Erwärmung dehnen sich sowohl die Feststoffe als auch das im Gestein enthaltene Porenwasser aus. Durch die unterschiedliche Ausdehnung von Feststoffen und Wasser verändern sich die reibungswirksamen Spannungen. Kann sich das Gestein nicht oder nur teilweise ausdehnen, so entstehen mechanische Spannungen.

**Wärmeleitfähigkeit:** Die Wärmeleitfähigkeit des OPA ist als Folge des unterschiedlichen Sandanteils und der horizontalen Schichtung tiefenabhängig und anisotrop. Folgende Werte können als repräsentativ betrachtet werden:

Tiefenbereich 589 – 675 m: 3.2 W/m K (horizontal) und 1.8 W/m K (vertikal)

Tiefenbereich 675 – 759 m: 2.0 W/m K (horizontal) und 1.3 W/m K (vertikal)

**Wärmekapazität:** Die Wärmekapazität des OPA spielt eine Rolle im Zusammenhang mit der instationären Ausbreitung von Temperaturanomalien, wie sie z.B. als Folge der Einla-

gerung wärmeproduzierender Abfälle oder der Abkühlung des Gesteins durch die Lüftung der Stollen auftreten. Im Mittel beträgt die Wärmekapazität des OPA 920 J/kg K.

**Thermischer Ausdehnungskoeffizient:** Der thermische Ausdehnungskoeffizient spielt eine Rolle bei der Koppelung zwischen thermischen und mechanischen Effekten. Für wassergesättigten OPA wird ein Wert von  $3.5 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  als repräsentativ betrachtet.

**Temperaturgradient und geothermischer Wärmefluss:** Aus den verschiedenen Temperaturmessungen in der Sondierbohrung Benken wurde ein Temperaturprofil im Tiefenbereich zwischen 100 m und 1'000 m unter Gelände erstellt (NTB 00-01). Aus diesem Profil wurden durchschnittliche vertikale Temperaturgradienten für verschiedene Tiefenbereiche abgeleitet. Der durchschnittliche Temperaturgradient über den Tiefenbereich von 900 m beträgt rund  $41^\circ \text{ C/km}$ . Im Tertiär, Malm und Muschelkalk liegt der Gradient bei rund  $30^\circ \text{ C/km}$ . Dazwischen steigt der Gradient kontinuierlich an. Sein Maximum liegt mit rund  $70$  bis  $80^\circ \text{ C/km}$  im unteren Opalinuston. Generell zeigen die tonreichen Formationen hohe Werte, während die Aquifere des Malms und Muschelkalks die tiefsten Werte aufweisen.

### Wärmeproduktion der Abfälle

**Ausgangslage:** Die Wärmeproduktion der Abfälle verursacht eine Erwärmung des Wirtgesteins. Diese Erwärmung breitet sich sowohl in die Schichten des Liegenden als auch horizontal im Wirtgestein und insbesondere im Hangenden aus. Für die überschlägige Abschätzung der Wärmeausbreitung und der daraus resultierenden Auswirkungen im Nah- und im Fernfeld wurden von Emch+Berger zweidimensionale Modellrechnungen mit dem Programm Z-Soil durchgeführt.

Es wurden zwei Querschnitte gewählt, wovon der erste senkrecht zur Achse der Lagerstollen und der zweite Schnitt senkrecht zur Achse der Dienststollen (Bau- bzw. Betriebstunnel) angeordnet ist. Der erste Modellschnitt beschreibt hierbei das Nahfeld im Bereich der Lagerstollen und des Bau- bzw. Lüftungstunnels mit einer Höhe etwa der Wirtgesteinschicht. Der zweite Modellschnitt erfasst im Fernfeld des Lagers einen Tiefenbereich von der Geländeoberfläche bis zum Muschelkalk unterhalb des Wirtgesteins. Beide Modellschnitte wurden achssymmetrisch angesetzt, ihre horizontale Ausdehnung wurde so gross gewählt, dass Überlagerungseffekte im Bereich der Modellränder und –auflager weitgehend eliminiert werden konnten.

Im Bereich des Malms oberhalb des Lagerbereiches sowie im Muschelkalk unterhalb des Lagers wurden die aus der Erkundung bekannten Hauptaquifere in das zweite Modell integriert. In einer späteren Modellphase wurden zudem noch vertikale Störungen in den steiferen Schichten des Oberen Malms eingebaut. Die Berechnungen erfolgten unter Anwendung eines Mohr-Coulomb'schen Festigkeitsansatzes.

Basierend auf den Angaben aus dem NTB 01-04 wurde für die Berechnung eines „worst-case-Szenarios“ davon ausgegangen, dass als Wärmequellen ausschliesslich MOX/UO<sub>2</sub> Kanister gegeben sind, denen eine maximale Temperaturentwicklung prognostiziert wird. Weiterhin wurde für diese Abschätzungen allen Schichten der thermische Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  des OPA zugewiesen.

**Ergebnisse der Berechnungen:** Durch die Wärmeabstrahlung der Abfälle wird das Wirt- und Rahmengestein unter und über dem Lagerbereich im Laufe der Zeit aufgewärmt. Diese Aufwärmung führt zu Spannungsänderungen im Gebirge, zu Änderungen in den Porenwasserspannungen und zu einer Volumenausdehnung des Gesteins. Die wesentlichsten Ergebnisse der Berechnungen (Emch und Berger 2005) können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die thermische Phase dauert mehrere hundert bis tausend Jahre. Dabei erhöht sich die Temperatur im Opalinuston zusätzlich zum bereits herrschenden geothermischen Temperaturfeld um maximal 30 bis 50 °C. Die mit der Erwärmung verbundene Ausdehnung des Gesteins führt zu einer mehrere km breiten, sehr flachen Aufwölbung des Gebirges bis zur Geländeoberfläche, die in der Grössenordnung von cm (Randbereich) bis dm (Zentrum) liegt.
- Die thermischen Deformationen führen nicht zu Zugspannungen im OPA. Damit ist auch nicht mit der Bildung von thermisch induzierten Wasserwegsamkeiten durch den OPA zu rechnen.
- Im Deckgebirge oberhalb des Wirtgesteins sind Rissöffnungen und Schubversätze grundsätzlich möglich. Sie können dort neue Wasserwegsamkeiten schaffen. Unter ungünstigen Randbedingungen kann langfristig auch eine Beschädigung der Verkleidung und insbesondere der Abdichtungs- und Entwässerungseinbauten des darüber liegenden Zugangstunnels und des Schachtes nicht ausgeschlossen werden. Wir rechnen diesem Sachverhalt jedoch keine Relevanz für die Langzeitsicherheit zu.
- Die thermisch induzierten Zusatzspannungen und Deformationen können schon in relativ kurzen Zeiträumen zu Schäden an den Innenschalen der Betriebs- und Bautunnel führen. Diese Schäden müssen bei einem langen Offenhalten des Lagers repariert werden.
- Die prognostizierten Auflockerungen im Nahfeld der Lagerstollen BE/HAA konnten bestätigt werden.
- Weiterhin konnte rechnerisch nachgewiesen werden, dass den beiden Hauptaquifereen über und unter dem Lagerbereich praktisch keine Kühlwirkung für die Betrachtung der Temperatursausbreitung infolge Einlagerungsbetriebs zugeschrieben werden kann. Die entsprechende Grundwasserströmung ist zu gering für einen lateralen Abtransport der Wärmeenergie.
- Für die Phase des Parallelbetriebs von Bau der Lagerstollen einerseits und Einlagerungsbetrieb andererseits (Bauetappe 3) sind erhöhte Anforderungen an das Lüftungssystem zu erwarten hinsichtlich der Abführung der thermischen Last.
- Die rechnerische Auswirkung der Kühlung des Lagerbereiches durch die Lüftung der Bau- und Lagerstollen auf die prognostizierten Verformungen sowohl im Nah- als auch im Fernfeld ist nur von sehr geringem Ausmass und kann daher vernachlässigt werden.

- Die Dimensionierung der verschiedenen Innenschalen nach NIB 00-51 Rev.1 sollte aufgrund der dargestellten Elementgrössen einer eingehenden Überprüfung in der nächsten Planungsphase unterzogen werden.

## **Die Beurteilung der bautechnischen Aspekte**

### **Leitfragen**

Die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit wurde anhand von folgenden Leitfragestellungen vorgenommen:

1. Ist das vorgeschlagene Layout der Anlage zweckmässig und entspricht es den Anforderungen der EKRA?
2. Sind die vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte für alle vorgesehenen Bau- und Betriebsphasen ausreichend dimensioniert?
3. Sind die gewählten Bauverfahren für Ausbruch, Schutterung und Sicherung zweckmässig und machbar?
4. Ist der vorgeschlagene dauerhafte Innenausbau zweckmässig?
5. Ist die Arbeitssicherheit in allen Bau- und Betriebsphasen gewährleistet?
6. Ist der Einlagerungsbetrieb sicher durchführbar?
7. Ist mit Lüftungstechnischen Problemen zu rechnen?
8. Gibt es hinsichtlich des Layouts der Gesamtanlage Optimierungsansätze auch im Hinblick auf den Vergleich mit ausländischen Anlagen oder Projekten?

### **Konzept und Layout des Tiefenlagers**

Das Endlager ist als geologisches Tiefenlager gemäss den Anforderungen der EKRA bzw. des Kernenergiegesetzes (KEG) konzipiert. Die Realisierung ist in drei Bauetappen über einen Zeitraum von insgesamt etwa 30 Jahren angesetzt worden (exkl. Felslaborbetrieb). Die Planung sieht vor, dass der Einlagerungsbetrieb etwa 12 Jahre nach Baubeginn aufgenommen werden soll.

Die erste Bauetappe umfasst die Erstellung des etwa 5 km langen Zugangstunnels sowie die Einrichtung eines Felslabors. In der zweiten Bauetappe ist die Auffahrung der Lageranlage vorgesehen, welche auch das Abteufen eines Entlüftungsschachtes beinhaltet. In der dritten Bauetappe ist ein Parallelbetrieb von baulicher Erweiterung des Lagerbereiches einerseits sowie Einlagerung von Abfallstoffen und Verfüllung der Lagerstollen andererseits geplant.

Anschliessend an die drei Bauetappen sind die Überwachung und der Verschluss des Hauptlagers, die Überwachung des Pilotlagers sowie der Verschluss der Gesamtanlage

vorgesehen. Nach dem Konzept der EKRA ist mit einer langen Dauer des Offenhaltens des Zugangsbereiches zu rechnen. Die Entscheidung über die Dauer des Offenhaltens bzw. über den Verschluss des Lagers soll zukünftigen Generationen überlassen werden. Andererseits soll aus dem Offenhalten keine Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit erwachsen.

### **Elemente des Lagers**

**Zugangstunnel:** Der in Bauetappe 1 zu erstellende Zugangstunnel verbindet die oberirdischen Anlagen mit dem Zentralen Bereich in der Lagerzone in einer Tiefe von ca. 620 m unter GOK. Das Gefälle beträgt über eine Länge von 5'033 m gleichmässige 12.5 %. Die Linienführung des Zugangstunnels, bestehend aus drei Geraden mit Längen von je 1'000 m und drei Kurvenbereichen mit Radien von 350 m bzw. 250 m überquert den Lagerbereich mit zwei Schleifen. Eine Verbindung zwischen dem Zugangstunnel und dem später zu errichtenden Lüftungsschacht ist nicht vorgesehen.

Der Vortrieb ist mittels Sprengvortrieb und/oder einer Teilschnittmaschine vorgesehen. Diese Vorgehensarten sind sehr flexibel und eignen sich für alle anzutreffenden Gesteinsschichten. Vortriebstechnisch dürften neben den oberflächennahen Lockergesteinen sowie schlecht zementierten Sandsteinhorizonten in der USM die wasserführenden Kalke des Oberen Malms gewisse Herausforderungen bieten. Im Oberen Malm ist mit lokalen Karsterscheinungen, wie beispielsweise wassergefüllten Hohlräumen und hohen Wasserdrücken, zu rechnen. Zur Minimierung des Risikos von Wassereintritten sind Vorauserkundungsbohrungen und wenn nötig Gebirgsinjektionen vorgesehen.

Die in NTB 02-02 vorgeschlagenen Ausbruchquerschnitte des Zugangstunnels mit rund 43.0 m<sup>2</sup> im Deckgebirge und 36.3 m<sup>2</sup> im Opalinuston erscheinen uns sowohl aus Sicht des Baus als auch des späteren Betriebes als zu klein. Die Begründung für grössere Querschnitte liegt vor allem in dem zu erwartenden Begegnungsverkehr. Dieser Punkt wurde mit der Nagra besprochen, welche darauf hin in NIB 04-06 grössere Ausbruchquerschnitte von bis zu 54.5 m<sup>2</sup> vorgeschlagen hat. Die neu vorgeschlagenen grösseren Querschnitte erachten wir als vernünftige Mindestwerte. Im Rahmen der späteren Detailplanung sind diese Querschnitte jedoch auf der Grundlage der Linienführung, der Bauverfahren, der zu erwartenden Konvergenzen und des Innenausbaus weiter zu optimieren. Der vorgesehene zweischalige Ausbau der Innenschale im wasserführenden Deckgebirge bzw. der einschalige Ausbau im Opalinuston erscheint zweckmässig. Mit dem zweischaligen Ausbau ist es jedoch bei den hohen zu erwartenden Wasserdrücken nicht möglich, den Wasserzufluss zum Zugangstunnel zu unterbinden. Es ist deshalb im Deckgebirge mit einem Wasserzufluss aus dem Gebirge zum Zugangstunnel zu rechnen. Es ist von grosser Bedeutung, dass dieses Wasser noch im Bereich des Deckgebirges aufgefangen und abgepumpt und so vom Opalinuston ferngehalten wird.

**Testlager (Felslabor):** Im Testlagerbereich sind repräsentative Untersuchungen für das Tiefenlager vorgesehen. Das Testlager besteht aus einer Anordnung von verschiedenen Nischen und Kurzstollen. Die Geometrien dieser Stollen und Nischen, ihre Positionen sowie die benötigten Sicherungsmassnahmen werden erst im Rahmen der Detailplanung für das Testprogramm festgelegt. Erfahrungen und Hinweise ergeben sich aus dem Felslabor Mont Terri. Für die bautechnische Machbarkeit des Testlagers werden keine Probleme gesehen.

**Anlagen auf Lagerebene:** Die Bauetappe 2 umfasst die Auffahrung des Zentralen Bereichs, aller Bau- und Betriebstunnel, Lagerbereich LMA inkl. Lüftungstunnel und Pilotlager mit einer Gesamten Tunnellänge von etwa 7'500 m. Ebenfalls erstellt wird in dieser Phase der vertikale Lüftungs-/ Bauschacht mit einer Länge von annähernd 680 m. Auch die Herstellung der Ansatzpunkte für die TBM zur späteren Auffahrung der Lagerstollen BE/HAA ist für die Bauetappe 2 vorgesehen. Diese Bauwerke befinden sich alle im Opalinuston auf Tiefen zwischen 620 m und 670 m unter der Geländeoberfläche.

**Pilotlager:** Die Forderung, ein Pilotlager im Bereich der Gesamtanlage vorzusehen, ist im internationalen Vergleich bislang einzigartig. Das Pilotlager besteht aus zwei verkürzten Lagerstollen mit einer Länge von jeweils 300 m und ist zwischen Kontrollstollen BE/HAA und Lagerstollen BE/HAA angeordnet. Die Herstellung und der Zugang des Pilotlagers ist ausschliesslich vom Betriebstunnel aus vorgesehen. Die exakten Detailanforderungen an das Pilotlager hinsichtlich der vorzusehenden Ausstattung sind in den weiteren Projektphasen noch entsprechend zu definieren durch die Nagra.

**Lüftungs- und Bauschacht:** Der etwa 680 m lange vertikale Lüftungs- und Bauschacht verbindet das Ende des Lüftungs- und Bautunnels mit der Geländeoberfläche. Der in NTB 02-02 vorgeschlagene Ausbruchdurchmesser von 4.0 m und ein Innendurchmesser des ausgebauten Schachtes von 3.0 m erscheinen uns zu gering. Das vorgeschlagene Raisingdrillverfahren ist zudem nicht für die gesamte Schachtlänge geeignet. Diese Punkte wurden mit der Nagra besprochen, welche anschliessend in NIB 04-06 neue Lösungen für den Schachtquerschnitt und die Bauverfahren vorgelegt hat.

Für die Herstellung wird der Schacht nun in drei Zonen aufgeteilt. Die ersten rund 70 m der Zone 1 sollen im Schutz einer überschnittenen Bohrpfahlwand aufgefahren werden. Der Bau einer überschnittenen Bohrpfahlwand mit einer Tiefe von 70 m ist technisch sehr anspruchsvoll. Die Pfahlfüsse können herstellungsbedingt seitlich nach aussen weglaufen und somit kann Wasser in den Schacht zulaufen. Diese vermutlich eher geringen Wasserzuflüsse müssen mit Injektionen reduziert werden.

In der Zone 2 von ca. 70 m bis ca. 330 m unter Gelände ist ein konventionelles Abteufen des Schachtes im Sprengvortrieb vorgesehen. Über voreilende Zementinjektionen sollen Wasserzuflüsse und Sickerwasser reduziert werden. Alle 15 bis 25 m sollen Vorerkundungs- bzw. Injektionssohlen eingerichtet werden, mit einer Überlappungslänge von ca. 8 bis 10 m. Dies bedeutet für die Ausführung, dass bis zu 35 m lange Injektionsbohrungen zu erstellen und zu verpressen sind. Es ist zu beachten, dass mit dem Schacht im Oberen Malm möglicherweise verkarstete, wasserführende Zonen mit hohem Wasserdruck zu durchfahren sind. Die Erkundungs- und Injektionsbohrungen müssen deshalb möglicherweise im Schutze von Standrohren und Preventern durchgeführt werden.

Ab der Zone 3, von ca. 330 m bis 670 m Teufe soll vom Sprengvortrieb auf das gebirgschonendere Raisingbohrverfahren umgestellt werden. Das Vorbohrloch wird vom Schachtkopf aus gebohrt. Als Führung wird auf der betonierten Schachtsohle ein Mittelrohr (Verrohrung) gesetzt. Nach dem Erreichen der Endteufe wird der Raisingbohrkopf montiert und der Schacht von unten nach oben aufgeweitet. Die Schachtauskleidung wird nach Abschluss der Raisingbohrung ebenfalls von unten nach oben eingebracht. Zusickerndes Wasser wird gefasst und aus dem Schacht weggepumpt.

Wir beurteilen das in NIB 04-06 vorgeschlagene Verfahren als machbar. Als Alternative könnte überlegt werden, den Schacht ein bis zweimal, vor allem an der Basis von wasserführenden Horizonten, mit dem Zugangstunnel zu verbinden. Dadurch könnte der Wasserdruck im Schachtbereich durch Bohrungen aus dem Zugangstunnel abgemindert und die Wasserhaltung erleichtert werden.

**Lagerstollen des Hauptlagers:** In der Bauetappe 3 werden auf einer mittleren Tiefe von ca. 650 m unter Gelände die 27 Lagerstollen des Hauptlagers BE/HAA aufgeföhren. Die Bauarbeiten erfolgen parallel zum Einlagerungsbetrieb. Der Bauzugang erfolgt über den Lüftungs- und Bauschacht. Die Lagerstollen weisen eine Länge von 800 m und einen Durchmesser von 2.50 m auf. Die Lagerstollen werden entsprechend den betrieblichen Bedürfnissen gebaut. Pro Jahr sollen etwa zwei Lagerstollen erstellt werden. Bau, Beschickung und Verfüllung der Lagerstollen erfolgt über einen Zeitraum von 15 Jahren. Die Einlagerung der BE/HAA erfolgt kontinuierlich und soll nach wenigen Monaten bis gegen ein Jahr nach dem Aufföhren des Lagerstollens abgeschlossen sein.

Die Aufföhruug der Lagerstollen ist mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) aus dem Bautunnel heraus steigend vorgesehen. Mit einem freien Durchmesser von 2.50 m sind die Lagerstollen begehbar, werden aber in der Einlagerungsphase nicht mehr betreten, d.h. der Querschnitt muss über die jeweilige Einlagerungszeit standfest sein.

Gemäss NTB 02-02 ist der Ausbruchsquerschnitt mit einer Sicherung aus Felsankern und Drahtnetzen zu stabilisieren. Sie dienen als Kopfschutz und wirken den im NIB 00-51 prognostizierten Verformungen von wenigen cm entgegen. Auf den Einsatz von Spritzbeton soll wegen seiner ungünstigen Auswirkungen von Beton auf die Porenwasserchemie bzw. die Langzeitsicherheit so weit als möglich verzichtet werden. Zur Stabilisierung kleinerer Störungszonen sind längere und dichter gesetzte Anker, feinmaschigere Netze, Verfestigungsinjektionen und als letzte Rückfallebene Spritzbeton mit speziellen, nicht auf Zement basierenden Bindemitteln vorgesehen.

Vom Standpunkt der bautechnischen Machbarkeit ist die Erstellung der Lagerstollen ein kritisches Element. Während bei den übrigen Bauwerksbestandteilen wie dem Zugangstunnel und den Haupttunneln alle Arten von Stützmitteln nach Bedarf eingesetzt werden können, ist der Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement beim Bau der Lagerstollen nur sehr begrenzt möglich. Wir sind der Auffassung, dass auch der Einbau von Stahlbögen zur Stabilisierung von Störungszonen zusätzlich in Erwägung gezogen werden muss.

### **Lüftungskonzept**

**Bauphase:** Der Bauablauf sieht vor, dass ausgehend vom Zugangstunnel alle weiteren Tunnel (Bauzugang, Zentraler Bereich, Bautunnel, Betriebstunnel und Lüftungstunnel u.a.) aufgeföhren werden. Das bedeutet Aufföhruug- und somit Lüftungslängen von bis zu 8'220 m, die über eine blasende Bewetterung zu versorgen sind.

Die Versorgung der fallenden Vortriebe hat mit dieselbetriebenen Fahrzeugen zu erfolgen. Die Luftversorgung mit Frischluft ist unter Berücksichtigung der geringen Ausbruchsquerschnitte und der erforderlichen Grösse der Luttentour mit 2 x 1'500 mm Durchmesser im Grenzbereich. Erst nach Erstellung des Schachtes kann von einer besseren Luftversor-

gung der Anlage ausgegangen werden und die Erweiterung der Tunnelstrecken und Lager in Angriff genommen werden.

Bei der vorgesehenen blasenden Bewetterung ist aufgrund der grossen Vortriebslänge mit der Verschleppung von Sprenggasen zu rechnen. Zudem ist bei der Frischluftzufuhr über die Lutte in staubanfallenden Vortrieben (TSM, TBM, Ladebereichen) eine Entstaubung der Abluft zwingend erforderlich.

Die klimatischen Verhältnisse während der Bauarbeiten sind noch detaillierter zu beschreiben. Ein möglicher Bedarf an Kühleinrichtungen im laufenden Betrieb unter Berücksichtigung der Wärmequellen (Gestein, Motoren, Abgase u.a.) ist ebenfalls zu prüfen.

**Betriebsphase:** In der Betriebsphase erfolgt die Bewetterung des Grubengebäudes über den Zugangstunnel (einziehende Wetter) sowie über den Lüftungsschacht (ausziehende Wetter). Die Steuerung der Luft in der gesamten Anlage hat so zu erfolgen, dass alle Querschnitte jederzeit ausreichend mit Frischluft versorgt werden. Daher sind an den durchgängigen Lagerstollen, Lüftungstunnel und Bautunnel entsprechende Wettertüren und Luftmengenbegrenzer vorzusehen, die einen Wetterkurzschluss verhindern.

Zusätzlich ist für einen Ereignisfall vorgesehen, die Luft aus den LMA-Lagern mit Blechlutten abzusaugen, durch eine Nuklid-Filteranlage zu leiten und dann über den Lüftungsschacht über Tage zu transportieren. Dieser zweite Lüftungskreislauf hat keine Verbindung zum normalen, offenen Wetterkreislauf. Er entnimmt nur zusätzlich nachströmende Frischluft aus dem Lagerbereich.

Über die Dimensionierung der Lüfter liegen bislang keine genauen Aussagen vor. Nach der SUVA-Richtlinie ist eine Luftbewegung von mindestens 0.3 m/s zu gewährleisten. Hierbei ist der grösste Querschnitt massgebend.

Im Falle eines Brandereignisses sollte die Luftbewegung und Zugrichtung beibehalten werden. Das Umstellen der Lüftung benötigt zu viel Zeit, bis sich die Luftsäule gegenläufig bewegt. Es ist davon auszugehen, dass der Schacht verraucht und nach kurzer Zeit als Fluchtweg nicht mehr zur Verfügung steht. Vorsorglich sind autarke Rettungscontainer an den Arbeits- und Einsatzstellen vorzuhalten.

Über zusätzliche Vorkehrungen bei der Dimensionierung der Lüftung hinsichtlich eines Kühlungsbedarfes auf Lagerebene insbesondere für die Bauetappe 3 während des 15-jährigen Parallelbetriebs von Bau und Einlagerung liegen bislang noch keine Angaben der Nagra vor. Dieser Punkt ist in Anbetracht einer geothermisch bedingten Anfangstemperatur auf Lagerniveau von etwa 38 °C noch im Zuge der weiteren Bearbeitungsstufen entsprechend detaillierter zu untersuchen.

### **Sicherheitsaspekte**

Für die gesamte Anlage des geologischen Tiefenlagers gelten in der Bau- und Betriebsphase die Sicherheitsvorschriften der SUVA für Untertage und Tunnelbau. Zusätzlich sind baubedingte Besonderheiten zu beachten, die sich auch auf die Sicherheit auswirken können.

Aufgrund der beengten Querschnittsverhältnisse im Zugangstunnel besteht dort ein erhöhtes Gefahrenpotenzial bzgl. Kollisionen im Begegnungsverkehr. Im Brandfall müssen alle Personen umgehend den Tunnel verlassen. In den Bereichen, wo dieses aus räumlichen Gegebenheiten (Entfernung zum Portal zu gross) nicht möglich ist, sind Rettungscontainer vorzusehen. Diese Rettungscontainer sind mit einer separaten Luftversorgung für 24 h auszustatten und in der Nähe der Arbeitsbereiche aufzustellen.

Weiter ist zu prüfen, ob die blasende Bewetterung bei einem Brand im Zugangsstollen nicht abzustellen ist, damit nicht zusätzlich Sauerstoff dem Brandherd zugeführt wird. Gleichzeitig wird so eine Verwirbelung der Rauchgase über den ganzen Querschnitt verringert. Grundsätzlich sind alle Personen mit Selbstrettern auszurüsten und in den Gebrauch dieser Geräte zu unterweisen.

Der Fluchtweg über einem zweiten Zugang (Schacht) sollte so früh wie möglich hergestellt werden. Erst nachdem auf die luttelose Bewetterung umgestellt worden ist, können mit reversiblen Lüftern die Rauchgase kontrollierter abgesaugt werden. Dadurch bleibt ein Fluchtweg weiterhin begehbar. Aus Sicherheitsgründen sollte daher der Lüftungsschacht so früh wie möglich erstellt werden, gegebenenfalls gemeinsam mit dem Zugangstunnel.

### **Zusammenfassende Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit**

Zusammenfassend kann die Frage der bautechnischen Machbarkeit wie folgt beurteilt werden:

- Das vorgeschlagene Layout der Anlage ist zweckmässig. Es enthält entsprechend dem Planungsstand einer Machbarkeitsstudie alle benötigten Bauwerksbestandteile. Die grundsätzliche Anordnung der verschiedenen Bauwerksbestandteile untereinander ist auch im internationalen Vergleich belegt. Die Konzeptanforderungen der EKRA bzw. die Anforderungen des neuen Kernenergiegesetzes werden grundsätzlich eingehalten. Optimierungsansätze sehen wir in der Linienführung des Zugangstunnels. Wir sehen zudem wesentliche Vorteile in einer Verknüpfung des Zugangstunnels mit dem Lüftungs- und Bauschacht auf verschiedenen Tiefenlagen. Beim Pilotlager empfehlen wir das Auffahren eines dritten Stollens, um im Zuge der späteren Überwachung mögliche Überlagerungseffekte besser beurteilen zu können.
- Die Dimensionen der in NTB 02-02 vorgeschlagenen Tunnel-, Stollen- und Schachtquerschnitte sind für den Bau und Betrieb teilweise eher knapp. Mit dem ergänzenden Bericht NIB 04-06 hat die Nagra neue Vorschläge mit grösseren Querschnitten für den Zugangstunnel sowie den Lüftungs- und Bauschacht vorgelegt. Wir erachten diese neuen Querschnitte für alle vorgesehenen Bauetappen und Betriebsphasen als ausreichend im Sinne von minimal erforderlich. Die vorgeschlagenen Querschnittsabmessungen werden bei allen Bauwerksbestandteilen als eine untere Grenze der wirtschaftlichen und baubetrieblichen Machbarkeit betrachtet. Auch der neu vorgeschlagene Schachtquerschnitt in Kombination mit der Skipförderung erlaubt nur bedingt Transporte von Baumaterial durch den Schacht. Die postulierte Trennung zwischen Baubetrieb durch den Schacht und Einlagerungsbetrieb durch den Zugangstunnel ist deshalb nicht vollständig möglich.

Wir empfehlen, die Tunnel- und Schachtquerschnitte in einer nachfolgenden Planungsphase nochmals zu überprüfen.

- Die gewählten Bauverfahren für Ausbruch, Schutterung und Sicherung sind weitestgehend zweckmässig und grundsätzlich machbar. Die Zweckmässigkeit der Schachterstellung in der Zone 3 mit dem Raisedrillverfahren sollte in einer späteren Planungsphase nochmals überprüft werden. Weiterhin sollte das Wasserhaltungskonzept dahingehend überprüft werden, dass zumindest streckenweise geschlossene Sammelleitungen einzuplanen sind. Zum Layout der Wasserhaltung sind wir der Auffassung, dass Wasser aus den Deckschichten nicht bis in den OPA geführt werden darf. Der Einsatz einer TBM zur Auffahrung der Lagerstollen aus dem engen Bautunnel heraus bedarf in einigen Details (beispielsweise Freiflächen für Auf- und Abbau inkl. Nachläufer) noch weiterer Klärung. Im Zusammenhang mit der Ausbruchsicherung der Lagerstollen ohne Einsatz von Spritzbeton bzw. Zement sehen wir weiteren Forschungsbedarf.
- Der vorgeschlagene dauerhafte Innenausbau ist im Sinne der bautechnischen Machbarkeit zweckmässig und realisierbar. Die Ausrüstung des Schachtes bedarf hinsichtlich des Schachtspiegels, d.h. hinsichtlich der technischen Ausrüstung des Schachtes und der jeweiligen Anordnung untereinander, einer Überprüfung.
- Die zu Grunde gelegten Bauzeiten für das vorliegende Layout erscheinen realistisch und machbar.
- Die Arbeitssicherheit ist grundsätzlich in allen Bau- und Betriebsphasen gewährleistet. Für die jeweiligen Bauphasen sind allerdings Flucht- und Rettungsmöglichkeiten in den Vortrieben in den nachfolgenden Planungsphasen noch detaillierter aufzuzeigen, indem beispielsweise die Standorte der Rettungscontainer im Grubengebäude aufgezeigt werden.
- Der Einlagerungsbetrieb ist sicher durchführbar. Im Zuge der nachfolgenden Detailplanung wird vorgeschlagen, eine detaillierte Ermittlung der Brandlasten durchzuführen. Hieraus resultiert die Festlegung eines Sicherheitskonzeptes für den Einlagerungsbetrieb ab der Bauetappe 3.
- Lüftungstechnische Probleme werden für die Bauetappe 1 und 2 nicht gesehen, so lange die vorgegebenen Richtwerte jederzeit gewährleistet werden können. Für die Bauetappe 3 hingegen ist eine Erhöhung der Luftmengen unumgänglich. Weiterhin sind bzgl. der zusätzlichen Erwärmung des Gebirges infolge Einlagerungsbetrieb ggf. zusätzliche Kühlmöglichkeiten in Erwägung zu ziehen. Eine unabhängige und rauchfreie Luftversorgung für Rettungsbombe und Zugangsbereich ist zusätzlich zu prüfen.
- Aus dem Vergleich mit ausländischen Endlagerprojekten sind hinsichtlich des Layouts der Gesamtanlage Optimierungsansätze erkennbar. Hier ist beispielsweise anzuführen, dass alternativ zum Zugangstunnel ein zweiter Schacht in Frage kommen könnte. Ein weiterer Ansatz besteht in der Überlegung, Schacht und Zugangstunnel auf verschiedenen Tiefenkoten miteinander zu verbinden. Weiterhin könnte eine Neuordnung des Testlagers in einen separaten Bereich (beispiels-

weise in Form eines zusätzlichen Stollens) insofern von Vorteil sein, um mögliche Beeinträchtigungen des wissenschaftlichen Messprogramms infolge Bauaktivitäten auszuschliessen.

- Der vorgelegte Entsorgungsnachweis enthält keine Aussagen zur Abhängigkeit der bautechnischen Machbarkeit von der Tiefe unter der GOK. Die hier beurteilten Angaben sind nur für die spezifischen Daten des vorgeschlagenen Standortes gültig.

Zusammenfassend kann die bautechnische Machbarkeit des von der Nagra vorgelegten Konzeptes für ein geologisches Tiefenlager im OPA auf einer mittleren Tiefe von 650 m unter GOK im Zürcher Weinland bestätigt werden. Die aufgeworfenen Fragen und Kritikpunkte können im Rahmen der nachfolgenden Bearbeitungsstufen gelöst werden.

### **Beurteilung der aus EKRA resultierenden Konzeptanforderungen**

Das Konzept der EKRA hat zum Ziel, die Vorteile einer sicheren Endlagerung mit den Bedürfnissen der Kontrollierbarkeit und der erleichterten Rückholbarkeit zu verbinden. Daraus ergeben sich folgende spezifische Anforderungen an ein Tiefenlager:

1. die Einrichtung eines Pilotlagers
2. die erleichterte Rückholbarkeit
3. die Möglichkeit für eine Langzeitüberwachung (Beobachtungsphase)
4. die Einrichtung von Selbstverschlussbauwerken

### **Pilotlager**

Das Pilotlager bezweckt die Durchführung von Langzeitbeobachtungen während und nach der Betriebsphase des Hauptlagers. Diese Anforderung ist durch das Layout der Anlage grundsätzlich erfüllt. Das Hauptlager inklusive der zugehörigen Bereiche des Bau- und Betriebstunnels können verfüllt und versiegelt werden, während das Pilotlager weiter überwacht werden kann. Die im Pilotlager durchzuführenden Langzeituntersuchungen sind jedoch noch nicht bekannt. Zur endgültigen Beurteilung des Layouts des Pilotlagers und der Kontrollstollen sind somit weitere Angaben notwendig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

### **Erleichterte Rückholbarkeit**

Die erleichterte Rückholbarkeit ist ein weiteres Element im Konzept der geologischen Langzeitlagerung, das den Handlungsspielraum zukünftiger Generationen erweitern soll. Die Rückholung kann aus verschiedenen Gründen notwendig sein:

1. Die bereits eingelagerten Abfälle sollen einer Wiederverwertung zugeführt werden.
2. Es gibt neue Erkenntnisse aus Forschungsprojekten, von ausländischen Anlagen oder beispielsweise aus den Messungen am Pilotlager, dass die Langzeitsicherheit der Anlage nicht gewährleistet werden kann.

Im Projekt Opalinuston der Nagra wird die erleichterte Rückholbarkeit dahingehend sicher gestellt, dass der Verschluss der Gesamtanlage einschliesslich Zugangsbauwerken in verschiedenen Stufen über einen längeren Zeitraum von mehreren Jahrzehnten/Jahrhunderten vorgesehen ist. Bis zur letzten „Verschlussstufe“, der Verfüllung und Versiegelung des Zugangs, ist zumindest die Erreichbarkeit der eingelagerten Abfallstoffe im Wirtgestein gewährleistet. Da letztendlich als bekannt vorauszusetzen ist, wo die exakten Positionen der verschiedenen Abfallgebinde im Lagerbereich angeordnet sind, ist das Erstellen eines entsprechenden „Rückgewinnungstunnels“ aus heutiger Sicht nicht mit grösseren Problemen behaftet.

### **Langzeitüberwachung**

Die Langzeitüberwachung ist durch den stufenweise ausgeführten Verschluss der Anlage so lang gewährleistet, bis das Pilotlager und das weiterhin betriebene Testlager nicht mehr zugänglich sind. Auch hier gilt wiederum die Argumentation wie schon beim Pilotlager, dass zunächst noch festzulegen ist, welche Langzeitüberwachungen durchgeführt werden sollen bzw. müssen. Daher ist die Anforderung der Langzeitüberwachung gemeinsam mit der Anforderung des Pilotlagers weiter zu diskutieren.

### **Selbstverschlussbauwerke**

Die Anforderung von Selbstverschlussbauwerken betrifft die Gewährleistung der Sicherheit eines geologischen Langzeitlagers vor dem Verschluss der Gesamtanlage. Die Kehrseite der erleichterten Rückholbarkeit und Kontrollierbarkeit ist die lange Offenhaltung der Zugänge zum Lagerbereich bzw. zum Pilotlager. Dieses Offenhalten beinhaltet auch Gefahren. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die menschliche Gesellschaft während der möglicherweise langen Phase der Offenhaltung ernsthafte Krisen durchleben wird. Solche Krisen können rasch (Seuchen, Terroranschläge, Kriege usw.) oder schleichend (gesellschaftlicher und/oder wirtschaftlicher Zerfall) eintreten. Der Blick zurück in die Geschichte lehrt uns, dass über Zeiträume von Hunderten von Jahren solche Krisensituationen immer wieder vorkommen können.

Es ist nicht auszuschliessen, dass in einer Krisensituation die Überwachung, der Betrieb und Unterhalt des Lagers plötzlich eingestellt und das Lager verlassen wird. Nach dem Ausfallen der Energieversorgung und der Pumpen wird der unverschlossene Bereiche des Lagers sukzessive von Wasser überflutet. Während der Phase der erleichterten Rückholbarkeit kann das eindringende Wasser zu erheblichen Schäden am dem offenen Umfahrungstunnel führen. Die verfüllten Lagerstollen sind durch ein solches Ereignis jedoch kaum betroffen.

Zu den Selbstverschlussbauwerken werden von der Nagra im Rahmen des Entsorgungs- und des Standortnachweises keine weiteren Detailangaben vorgelegt. Zu dieser Anforderung

rung wird noch ein erheblicher Forschungsbedarf im Rahmen der weiteren Realisierungsschritte für ein geologisches Endlager gesehen.

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen der Beurteilung des Entsorgungsnachweises der Nagra für das Projekt Opalinuston durch die HSK wurden die verschiedenen Daten und Angaben der Nagra einer Überprüfung unterzogen sowie die bautechnische Machbarkeit untersucht.

Die vorliegenden Unterlagen und Daten aus dem Entsorgungsnachweis stellen eine Zusammenfassung jahrzehntelanger Forschungen und Untersuchungen der Nagra und weiterer Institutionen dar. Für die vorliegende Projektstufe einer Machbarkeitsstudie liegt daher in vielen Bereichen bereits eine sehr grosse und teilweise bereits für weiterführende Betrachtungen ausreichende Detailtiefe vor.

Die im Zuge des vorliegenden Berichtes geprüften Daten, Parameter und Verfahren lassen das Gesamturteil zu, dass die Machbarkeit des vorgeschlagenen geologischen Tiefenlagers im Zürcher Weinland nicht in Frage gestellt werden muss. Die Unterlagen des Entsorgungsnachweises lassen keine schwerwiegenden Mängel oder Versäumnisse seitens des Erstellers erkennen.

Die aufgeworfenen Fragen und Kritikpunkte hinsichtlich einer genaueren Eingrenzung der Parameter und Optimierung von Tunnel- und Schachtquerschnitten sowie weiterer Layoutdetails sind ausnahmslos alle im Zuge der nachfolgenden Planungs- und Realisierungsschritte bearbeitbar und bedeuten zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine grundsätzliche Einschränkung der Machbarkeit. Die hieraus resultierenden Kostenfolgen sind dabei allerdings nicht ausser Acht zu lassen.

## Literaturverzeichnis

### *Nagra Technische Berichte (NTB):*

- NTB 00-01: Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht, Textband, August 2001
- NTB 00-01: Sondierbohrung Benken, Untersuchungsbericht, Beilagenband, August 2001
- NTB 01-04: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vittrified High-Level Waste in Opalinus Clay, October 2002.
- NTB 02-02: Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Dezember 2002.
- NTB 02-03: Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, Dezember 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), December 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), December 2002

### *Nagra Interne Berichte (NIB):*

- NIB 00-21: Endlager HAA/LMA – Opalinuston, Konzeptstudie Anlagen und Betrieb: Lüftungskonzept für die Betriebsphase, Juni 2000 (inkl. Nachträge 2000 – 2002).
- NIB 00-51 Rev. 1: Endlager BE/HAA/LMA – Opalinuston, Konzeptstudie Anlagen und Betrieb: Felsmechanische Berechnungen und Dimensionierung der Ausbruchssicherung zum Nachweis der baulichen Machbarkeit, März 2003.
- NIB 02-34: OPA/Hydrogeology: Scoping calculations on gas transport processes in the vicinity of a HLW/SF/ILW repository in Opalinus Clay, December 2002
- NIB 02-36: Hydrodynamische Modellierung der Grundwasserzirkulation im Untersuchungsgebiet Zürcher Weinland: Hydraulische Verhältnisse im Umfeld eines potenziellen geologischen Tiefenlagers, December 2002
- NIB 03-08: Opalinuston, Felsmechanische Untersuchungen, März 2003
- NIB 04-06: Projekt Opalinuston, Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers, Ergänzungen zum NTB 02-02, 23. April 2004

***Nagra Arbeitsberichte (NAB):***

- NAB 04-01: Projekt Opalinuston, Antworten der Nagra zum Fragenkatalog der KNE betreffend Geosynthese (NTB 02-03), Geologische Langzeitszenarien (NTB 99-08) und Anlagen- und Betriebskonzept (NTB 02-02), Dezember 2004.

***Weitere verwendete Empfehlungen und Normen***

- Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle; Schlussbericht. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 31. Januar 2000
- Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (EKRA): Beitrag zur Entsorgungsstrategie für die radioaktiven Abfälle in der Schweiz. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Oktober 2003
- Kommission für nukleare Entsorgung (KNE), Fragenkatalog der KNE zur Geosynthese (NTB 02-03), zur geologischen Entwicklung & Langzeitszenarien (NTB 99-08) und zum bautechnischen Konzeptbericht (NTB 02-02), Antworten der Nagra, Entwurf, Stand 02.12.03.
- SIA – Norm 196: Baulüftung im Untertagbau, Ausgabe 1998
- SIA – Norm 198: Untertagbau, Ausgabe 1993
- SUVA: Checkliste Lüftung im Untertagebau

***Weitere verwendete Berichte***

- Emch und Berger (2005): Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA im Opalinuston des Zürcher Weinlandes und der durch das Lager induzierten Prozesse. Expertenbericht zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Februar 2005.
- Emch und Berger (2004): Comparison of International Final Radioactive Waste Repository Concepts. Expertenbericht zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Dezember 2004.

## Mitgliederverzeichnis der KNE

# Kommission Nukleare Entsorgung (KNE)

## Subkommission der Eidg. Geologischen Fachkommission (EGK)

---

<b>Name</b>	<b>Institution</b>	<b>Fachgebiet</b>
Dr. P. Hufschmied (Vorsitz)	Emch+Berger	Hydrogeologie, Untertagebau Bautechnik
Dr. H.P. Funk	ETH Zürich	Geologie
Dr. A. Johnson	EAWAG	Aquatische Chemie
Dr. R. Kipfer	EAWAG	Umweltphysik Isotopenhydrogeologie
Prof. S. Löw	ETH Zürich	Ingenieurgeologie Felsmechanik
Prof. H.R. Pfeifer	Uni Lausanne	Geochemie, Umweltwissenschaften
Prof A. Steck*	Uni Lausanne	Petrographie, Strukturgeologie
Prof. A. Wetzler	Uni Basel	Sedimentologie, Stratigraphie
Prof. M. Burkhard**	Uni Neuchatel	Strukturgeologie, Tektonik
<b><u>Sekretariat:</u></b>		
Dr. E. Frank	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen	
Dr. P. Bitterli	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen	

---

\* Vorsitzender und Mitglied der KNE bis Ende 2003.

\*\* Neues Mitglied der KNE ab Sommer 2004