



Projekt Opalinuston

Gutachten zur Erdbebensicherheit

verfasst von

**Martin G. Koller**

Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH

Präsident der Schweizer Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik

**RÉSONANCE Ingénieurs-Consells SA**

21 rue Jacques Grosselin  
CH - 1227 CAROUGE (Genève)

Tel. +41 22 301 02 53  
Fax +41 22 301 02 70  
E-mail [resonance@resonance.ch](mailto:resonance@resonance.ch)

Carouge, 19. August 2003

TM 253.01-1/MK

## Inhaltsverzeichnis

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Einleitung.....</b>   | <b>2</b>  |
| 1.1       | Ausgangslage .....   | 2         |
| 1.2       | Zielsetzung.....   | 2         |
| 1.3       | Grundsätzliches zur Erdbebensicherheit eines Tiefenlagers .....  | 2         |
| 1.4       | Erdbebenschäden bei unterirdischen Bauwerken .....   | 3         |
| <b>2.</b> | <b>Stellungnahme zu den bisherigen Arbeiten der NAGRA.....</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1       | Relative Erdbebengefährdung .....  | 4         |
| 2.2       | Erdbebenrisiko in der Einlagerungsphase .....  | 4         |
| 2.3       | Erdbebenrisiko im Endzustand.....  | 5         |
| <b>3.</b> | <b>Stellungnahme zu externen Gutachten .....</b>   | <b>7</b>  |
| 3.1       | Gutachten des Öko-Instituts e.V. ....  | 7         |
| 3.2       | Gutachten von Frau Dr. habil. B. Theilen-Willige .....   | 9         |
| <b>4.</b> | <b>Abschliessende Beurteilung und Empfehlungen .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>5.</b> | <b>Literatur .....</b>   | <b>12</b> |
|           | <b>Anhang A: Curriculum Vitae des Autors des vorliegenden Gutachtens .....</b>   | <b>13</b> |
|           | <b>Anhang B: Zusammenfassung des Berichts SKB (2002).....</b>  | <b>14</b> |
|           | <b>Anhang C: Karte maximaler Bodenbeschleunigung auf steifem<br/>Lockergestein mit einer Wiederkehrperiode von 1000 Jahren<br/>(Sellami et al., 2003).....</b> | <b>15</b> |

## 1. Einleitung

### 1.1 Ausgangslage

Mit dem "Projekt Opalinuston" erbringt die NAGRA, nach eigener Darstellung, den Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente (BE), verglaste hochaktive Abfälle (HAA) sowie langlebige mittelaktive Abfälle (LMA). Es handelt sich um ein konkretes Konzept einer geologischen Tiefenlagerung mit stufenweiser Umwandlung von einer überwachten Anlage zu einem verschlossenen Endlager. Die NAGRA schlägt den Behörden vor, künftige Untersuchungen in der Schweiz auf den Opalinuston und das potenzielle Standortgebiet im Zürcher Weinland zu fokussieren.

### 1.2 Zielsetzung

Das hier vorliegende Gutachten nimmt Stellung zur Erdbebensicherheit des geologischen Tiefenlagers, wie es von der NAGRA vorgeschlagen wird. Die Fokussierung auf Erdbebenfragen erlaubt dem Autor, sich auf den Bereich der eigenen Fachkompetenz zu beschränken (siehe Curriculum Vitae im Anhang A). Im übrigen ist zu erwähnen, dass der Autor an der Ausarbeitung des Projektes Opalinuston in keiner Weise, weder direkt noch indirekt, beteiligt war.

Es wird vorausgesetzt, dass der Leser zumindest die Grundzüge des Projektes Opalinuston der NAGRA kennt (NAGRA, 2002c).

### 1.3 Grundsätzliches zur Erdbebensicherheit eines Tiefenlagers

Bei der Beurteilung der Erdbebensicherheit eines Tiefenlagers sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Aspekte zu betrachten: Erstens stellt sich die Frage, ob und bis zu welcher Stärke, und allenfalls mit welcher Wahrscheinlichkeit, ein Erdbeben im Umfeld des Tiefenlagers auftreten kann. Zweitens geht es darum, die Auswirkungen des stärksten Erdbebens, dessen Auftreten noch für möglich gehalten wird, zu beurteilen. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem unverfüllten Zustand während der Einlagerung der Abfälle (während zirka 50 Jahren) und dem verfüllten "Endzustand", dessen geologische Sicherheitsbarrieren über 100'000 bis eine Million Jahre intakt bleiben sollten.

Bei der Beurteilung eines Schweizer Standortes für ein Tiefenlager sind schliesslich relative und absolute Sichtweise klar zu unterscheiden. Bei der relativen Betrachtungsweise geht es darum zu überprüfen, ob die Erdbebengefährdung am vorgesehenen Standort verhältnismässig niedrig ist im Vergleich zu anderen Orten im Land. Bei der absoluten Sichtweise stellt sich die Frage nach den Auswirkungen von Erdbeben, deren Auftreten sich nicht ausschliessen lässt. Es ist theoretisch denkbar, dass der ins Auge gefasste Standort die niedrigste Erdbebengefährdung im ganzen Land aufweist, das Erdbebenrisiko des Tiefenlagers aber trotzdem als zu hoch eingestuft wird. Dies würde bedeuten, dass in der ganzen Schweiz aus Erdbeben Gründen kein geologisch ähnlich konzipiertes Tiefenlager möglich wäre. Entweder müsste dann in der Schweiz eine grundsätzlich andere geologische Konfiguration gefunden werden, die gegenüber Erdbeben weniger verletzlich ist, so dass das Erdbebenrisiko trotz höherer Erdbebengefährdung unerheblich bleibt, oder aber es müsste ein Standort im Ausland mit geringerer Erdbebengefährdung als in der Schweiz ins Auge gefasst werden.

## 1.4 Erdbebenschäden bei unterirdischen Bauwerken

In Schweden wurde eine sehr gründliche Studie zu den Erdbebenschäden an unterirdischen Bauwerken durchgeführt, bei der die weltweiten Erfahrungen zusammengetragen wurden (SKB, 2002). Es wird auf die Schlussfolgerungen dieses Berichtes verwiesen (siehe Anhang B). Diese Schlussfolgerungen und deren Begründungen wirken plausibel und enthalten keine Elemente, die den Kenntnissen und Erfahrungen des Gutachters widersprechen würden. Im übrigen sind dem Gutachter keine weiteren ähnlich umfassenden Berichte zum Thema bekannt.

Die zitierte Studie kommt zum Schluss, dass bis heute weltweit nur Schäden an unterirdischen Bauwerken aufgetreten sind, wenn die maximale Bodenbeschleunigung den Wert von  $2 \text{ m/s}^2$  überschritten hat. Und selbst bei höheren Werten sind Schäden äusserst selten. Unterirdische Bauwerke sind wenig empfindlich gegenüber Erdbeben, da in der Regel keine frei schwingenden Massen vorhanden sind.

Börgesson et al. (2003) haben den konkreten Fall untersucht, was geschieht, wenn eine neue Störung mit einer Scherung von 20 cm den Bereich der Abfallbehälter durchquert. Sie haben dabei aufgezeigt, dass der Bentonit, der die Behälter umgibt, als eine Art Puffer wirkt, so dass die plastischen Verformungen in den Behälterwänden in akzeptablen Grenzen bleiben. Hier ist zu bemerken, dass das Konzept der Nagra eine dickere Bentonitschicht vorsieht, als in den Berechnungen von Börgesson et al. (2003) angenommen wurde, was günstig wirkt, und dass eine etwaige neue Störung im Bereich des Tiefenlagers im Zürcher Weinland nach menschlichem Ermessen auf kleinere Werte als 20 cm beschränkt bliebe (vgl. Punkt 2.3).

## 2. Stellungnahme zu den bisherigen Arbeiten der NAGRA

Erdbebenaspekte werden im Sinne einer Synthese von der NAGRA in den folgenden Technischen Berichten behandelt:

- NTB 00-05 (Deichmann et al., 2000), Seismizität der Nord- und Zentralschweiz.
- NTB 99-08 (Müller et al., 2002), Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Dezember 2002: Kapitel 3.5, Erdbebenaktivität in der Nordschweiz.
- NTB 02-03 (NAGRA, 2002a), Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Kapitel 3.5, Junge Erdkrustenbewegungen, mit Unterkapitel 3.5.4, Seismologie; Kapitel 8.4, Tektonische Störungen, Erdbeben, Magmatismus, insbesondere mit dem Unterkapitel 8.4.3, Erdbeben und ihre Auswirkungen.

Im weiteren bezieht sich die NAGRA, was die Auswirkungen von Erdbeben anbelangt, auf die schwedische Publikation SKB (2002) und die darin aufgeführten Schlüsselpublikationen.

Die zitierten NAGRA-Berichte zeugen von einer äusserst sorgfältigen Aufarbeitung der Grundlagen bezüglich Neotektonik und Seismizität in der gesamten Nordschweiz wie auch im näheren Umfeld des Zürcher Weinlands. Diese Grundlagen wurden über zwei Jahrzehnte hinweg in Zusammenarbeit mit international anerkannten Seismologen des Schweizerischen Erdbebendienstes (SED) erforscht. Die oben zitierten Synthese-Berichte enthalten zahlreiche Verweise auf entsprechende detaillierte Fachberichte. Aus den Resultaten dieser Arbeiten liess sich auch ein

konsistentes geodynamisches Konzept der Nordschweiz ableiten, das es erlaubt, die zukünftige geologische Entwicklung des Umfeldes des Zürcher Weinlandes nach menschlichem Ermessen zuverlässig vorherzusagen.

## 2.1 Relative Erdbebengefährdung

Mit den erwähnten Arbeiten ist es der NAGRA gelungen aufzuzeigen, dass das Zürcher Weinland, zusammen mit Gebieten des Mittellandes und dem Südzipfel des Tessins, zu den seismisch ruhigsten Gebieten der Schweiz zählt. Dieser Befund wird auch von zwei weiteren, von der NAGRA unabhängigen Studien bestätigt. Aus der deutsch-österreichisch-schweizerischen Karte der Erdbebengefährdung, Grünthal et al. (1998), geht hervor, dass das Zürcher Weinland zu den für schweizerische Verhältnisse wenig aktiven Gebieten zählt. Dieselbe Schlussfolgerung ergibt sich aus den vom SED erst kürzlich auf Internet veröffentlichten, neuen Erdbebengefährdungskarten für die Schweiz (Sellami et al., 2003).

Dass das Zürcher Weinland zu den Gebieten der Schweiz mit der relativ niedrigsten Erdbebengefährdung gehört, ist unter Erdbeben-Fachleuten unbestritten. Dies bedeutet aber noch nicht, wie schon früher angedeutet, dass das Erdbebenrisiko für das Tiefenlager, absolut gesehen, akzeptabel ist.

## 2.2 Erdbebenrisiko in der Einlagerungsphase

Die Phase der Einlagerung radioaktiver Abfälle dauert voraussichtlich 50, vielleicht auch 100 Jahre. In dieser Zeit der offenen Stollen – die einzelnen Behälter werden nach und nach mit Bentonit verfüllt – sollten weder die Stollen einbrechen, noch die kritische, für die Einlagerung notwendige Infrastruktur signifikant beeinträchtigt werden.

Die felsmechanischen Eigenschaften des Opalinuston lassen erwarten, dass die Stollen auch bei starken Bodenbeschleunigungen infolge eines Erdbebens standfest bleiben. Schäden wären nach SKB (2002) nur in einem Fels zu erwarten, der eine ausgesprochen schlechte mechanische Qualität aufweist, oder aber in einem Fels, der unter sehr hohem Bergdruck steht. Keiner dieser Fälle trifft für den Opalinuston des Zürcher Weinlands zu.

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine neue Verwerfung entsteht, die das offene Tiefenlager während der Einlagerungszeit durchquert und diesem eine differenzielle Verschiebung aufzwingt, ist extrem gering. Dieser Fall ist jedoch in bezug auf den Endzustand zu diskutieren. Selbst wenn er auftreten sollte, sind im offenen Zustand des Tiefenlagers keine unkontrollierbaren Auswirkungen zu erwarten.

Der heutige Stand der Technik erlaubt es, die Infrastrukturanlagen so zu bemessen, dass sie auch einem sehr starken Erdbeben standhalten. Offen bleibt die Frage, welche Auftretenswahrscheinlichkeit dem Bemessungsbeben zugrunde gelegt werden soll (je stärker ein Beben, desto seltener tritt es auf, bzw. desto geringer ist seine Auftretenswahrscheinlichkeit). Diese Frage muss in Abhängigkeit des Schadenpotenzials (Austritt radioaktiver Substanzen bei schweren Erdbebenschäden möglich oder nicht?) vor der Inangriffnahme der Bautätigkeit geklärt werden.

## 2.3 Erdbebenrisiko im Endzustand

Wegen der Langlebigkeit der radioaktiven Abfälle sollten die verschiedenen Sicherheitsbarrieren möglichst lange intakt bleiben. Dies gilt insbesondere für die geologische Sicherheitsbarriere, den das Tiefenlager umgebenden Opalinuston: diese Barriere sollte für 100'000 bis eine Million Jahre halten.

Für eine derart lange Zeitspanne kann selbst in einem seismisch wenig aktiven Gebiet aus methodischen Gründen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden, dass irgendwann ein mittelstarkes Erdbeben auftritt. Das Problem ist, dass unsere Beobachtungszeit auf etwa 1000 Jahre beschränkt ist. In einem seismisch wenig aktiven Gebiet ist es durchaus möglich, dass nur alle 10'000 bis 100'000 Jahre ein mittelstarkes Erdbeben ( $M_w = \sim 6$ ) auftritt. Die Tatsache, dass es während unseres Beobachtungszeitraumes nicht aufgetreten ist, heisst nicht, dass es nicht schon früher aufgetreten ist und in Zukunft wieder auftreten kann.

Erdbeben entstehen, sobald die Spannungen im Felsuntergrund grösser werden als der vorhandene Widerstand. Es kommt dann zu einer Art Bruch mit plötzlichem Spannungsabbau im sogenannten Erdbebenherd. Die dabei freigesetzte Energie wird in Form mechanischer Wellen – Erdbebenwellen – abgestrahlt. Da der Widerstand längs einer Störungszone – einer Verwerfung – naturgemäss geringer ist als im gesunden Fels, findet der Spannungsabbau fast immer an bestehenden Verwerfungen statt. Die Neubildung von Verwerfungen ist äusserst selten und nur dort zu erwarten, wo im weiteren Umfeld nicht schon eine Verwerfung besteht. Ansonsten gibt die bestehende Verwerfung nach, bevor sich ein Spannungszustand aufbauen kann, der eine neue Verwerfung im gesunden Fels zu bewirken vermag.

Da Erdbeben auch in einem seismisch wenig aktiven Gebiet wie dem Zürcher Weinland nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können, ist zu untersuchen, ob die Auswirkungen möglicher Erdbeben gering genug bleiben. Wichtig ist deshalb in erster Linie ein robustes, bezüglich Erdbeben wenig empfindliches Tiefenlager. Der Opalinuston als Wirtgestein dürfte in dieser Beziehung eine optimale Wahl darstellen. Von zentraler Bedeutung ist hier die sogenannte Selbstabdichtung, die sich im Opalinuston ergibt. Sowohl die Tatsache, dass im Opalinuston der Nordschweiz kaum Mineraladersysteme gefunden wurden, wie auch die Experimente "Gas Frac Selfhealing" und "Selfrac", die im Felslabor Mont Terri durchgeführt wurden (NAGRA, 2002a, Kap. 5.8.6), sind konkrete Beweise dafür, dass diese Selbstabdichtung in der Natur tatsächlich spielt und nicht nur einem theoretischen Konzept entspricht.

Beim verfüllten Tiefenlager sind grundsätzlich zwei potenzielle Schadensmechanismen denkbar:

- der Erdbebenherd liegt ausserhalb des Tiefenlagers, aber die Erdbebenwellen durchqueren das Tiefenlager und beschädigen es dabei.
- der Erdbebenherd durchquert das Tiefenlager, was bedeutet, dass eine differenzielle Verschiebung sowohl einigen Behältern, dem sie umgebenden Bentonit wie auch dem Opalinuston aufgezwungen wird. Ist diese differenzielle Verschiebung und damit die Magnitude genügend gross, könnten einige Behälter (aber bei weitem nicht alle) beschädigt werden und im Opalinuston eine Klüftung entstehen, durch die Wasser zu zirkulieren beginnen könnte.

Diese Szenarien werden in den NAGRA-Berichten nach Ansicht des Autors des vorliegenden Gutachtens noch nicht explizit genug diskutiert. In der Sicherheitsanalyse (NAGRA 2002b) wurde allerdings der hypothetische Fall, dass alle Behälter aus irgendeinem Grund nach 100 Jahren beschädigt werden, und das Wirtgestein eine 100-fach erhöhte Durchlässigkeit hat, betrachtet. Selbst in diesem Fall wird das Dosis-Schutzziel um eine Grössenordnung unterschritten.

Im folgenden werden einige Ansätze zu einer Diskussion spezifischer Erdbebenszenarien vorgeschlagen, die es weiter zu entwickeln gälte:

Es dürfte ohne Probleme möglich sein aufzuzeigen, dass selbst die weltweit stärksten je beobachteten Erdbebenwellen, sollten sie das verfüllte Tiefenlager durchqueren, die Sicherheitsbarrieren nicht zu beeinträchtigen vermögen.

Etwas problematischer ist die Situation, wenn der Erdbebenherd das Tiefenlager durchquert. Hier lautet die zentrale Frage, was das grösste denkbare Erdbeben ist, welches das Tiefenlager durchqueren könnte. Daraus ergibt sich dann die maximale aufgezwungene differenzielle Verschiebung.

### **Erdbebenherd im Deckgebirge**

Sollten sich im Deckgebirge des Zürcher Weinlands Spannungen aufbauen, die zu einem grösseren Erdbeben führen könnten, so würden diese Spannungen den Spannungswiderstand zuerst auf vorhandenen Verwerfungen überschreiten (und so das Erdbeben auslösen) – und nicht im gesunden Fels. Die Nähe der Neuhauser Störung zum vorgesehenen Standort des Tiefenlagers, bei gleichzeitiger Beachtung eines angemessenen Sicherheitsabstandes (einige Hundert Meter), erweist sich deshalb als äusserst günstig. Es ist zu erwarten, dass die Neuhauser Störung als Sollbruchstelle wirkt und verhindert, dass sich eine Bruchfläche im Tiefenlager selbst ausbildet.

Zu beachten ist, dass ein grösseres Erdbeben im Deckgebirge aufgrund der heutigen Kenntnisse äusserst unwahrscheinlich ist. Von den wenigen schwachen Beben, die in der Umgebung des Zürcher Weinlands beobachtet wurden, hatten nur diejenigen von Eglisau ihren Herd im Deckgebirge.

Falls die Spannungen nur sehr lokal aufgebaut würden, wäre es möglich, dass die Neuhauser Störung von den grössten Spannungen nicht betroffen würde. In diesem Fall könnte der Spannungswiderstand zuerst an einer lokalen Störung oder im Extremfall sogar im gesunden Fels im Bereich des Tiefenlagers überschritten werden, was ein lokales, schwaches Beben auslösen würde. Wegen des lokalen Charakters des auslösenden Spannungsfeldes bliebe auch die Fläche des Erdbebenherdes bescheiden - auf einige  $\text{km}^2$  beschränkt. Misst der Herd  $10 \text{ km}^2$  – eine äusserst pessimistische Annahme – entspräche dies einer Magnitude von  $M_w = \sim 5$ . Die mittlere differenzielle Verschiebung beim Herd betrüge dann etwa 4 cm.

Es wird empfohlen, die Sicherheitsbarrieren explizit für den Fall zu untersuchen, dass ein Erdbebenherd mit einer maximalen differenziellen Verschiebung von 10 cm das Tiefenlager durchquert. Der alleinige Hinweis auf die zitierten schwedischen Studien genügt nur für eine vorläufige Betrachtung. Es werden eigene Untersuchungen für die konkrete schweizerische Konfiguration des Endlagers empfohlen, auch wenn wenige Lecks von Behältern im schweizerischen Tiefenlager wohl noch

keine so schwerwiegenden Konsequenzen hätten wie im Falle der schwedischen Tiefenlager-Konfiguration (NAGRA, 2002b).

### **Erdbebenherd im Sockel**

Es wäre theoretisch denkbar, dass ein starkes Erdbeben, das primär im kristallinen Sockel entsteht, bis an die Oberfläche "durchschlägt" und dabei im Deckgebirge eine neue Bruchfläche erzeugt. Es gibt dann theoretisch keinen Grund, weshalb diese Bruchfläche nicht auch durch das Tiefenlager führen könnte.

Das Phänomen des Durchschlagens lässt sich nur bei sehr starken Beben ( $M_w > \sim 6.5$ ) beobachten. Wäre ein solches Beben in der nächsten Million Jahre möglich, so wäre es mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch schon in der Vergangenheit aufgetreten. In diesem Fall müsste im Bereich des Tiefenlagers eine entsprechende grössere Störung existieren, die von der durchgeführten, hochauflösenden 3D-Seismik (Birkhäuser et al., 2001) entdeckt worden wäre. Ein so starkes Beben ( $M_w > \sim 6.5$ ) kann deshalb im Bereich des Tiefenlagers ausgeschlossen werden; diese Argumentation ist allenfalls noch genauer zu überprüfen und mit neotektonischen Argumenten zu untermauern.

Die 3D-seismische Abbildung der Oberkante des Sockels im Untersuchungsgebiet zeigt das Muster der Verwerfungen die sich über die letzten 250 Millionen Jahre gebildet haben. Die Richtung der Verwerfungen orientiert sich an der über sehr lange Zeiträume konstant bleibenden, plattentektonisch bedingten Spannungsverhältnisse im Sockel. Wie im obigen Abschnitt dargelegt, ist anzunehmen, dass sich Gebirgsspannungen vornehmlich entlang der vorhandenen Verwerfungen abbauen würden. Die Tatsache, dass der Versatz der Neuhauser Störung an der Basis Mesozoikum (Oberkante Kristallin) den grössten Wert aufweist (30 bis 50 m), ist ein starkes Indiz dafür, dass sich die Neuhauser Störung im kristallinen Grundgebirge fortsetzt. Trifft dies zu, so würde sie auch hier mit hoher Wahrscheinlichkeit als Sollbruchstelle wirken.

Für Beben im Sockel mit  $M_w < 6.5$  ist nicht zu erwarten, dass die Bruchfläche bis ins Deckgebirge durchschlägt und die Bruchfläche das Tiefenlager durchquert.

## **3. Stellungnahme zu externen Gutachten**

### **3.1 Gutachten des Öko-Instituts e.V.**

Liest man das Gutachten des Öko-Instituts e.V. (2003), so kann man sich des Eindrucks nicht erwehren, dass der Autor, Herr G. Schmidt, die Arbeiten der NAGRA zur Erdbebenfrage nie zur Kenntnis genommen hat. Im zweitletzten Abschnitt des Kapitels "Seismische Aktivität" fordert er: "Wir halten eine wissenschaftlich fundierte Untersuchung der seismischen Aktivität in der Region Benken im Hinblick auf die mögliche Einrichtung eines Endlagers und Prognosen hierzu für dringend erforderlich, bevor die Standorteignung bewertet werden kann." Wie hier bereits unter Punkt 2 dargelegt, sind die geforderten Untersuchungen seit zwei Jahrzehnten im Gang und im wesentlichen abgeschlossen. Sie wurden in Zusammenarbeit mit international anerkannten Seismologen durchgeführt.

Die Studie Grünthal et al. (1998) (im Gutachten des Öko-Instituts e.V. mit <GRÜNTHAL 1998> bezeichnet) wird falsch zitiert, indem ausgesagt wird, gemäss

dieser Studie seien "in der Region Benken Erdbebenintensitäten der Stärke VII vorgekommen". Die Gefährdungskarte von Grünthal et al. (1998) weist eine Intensität von VI bis VII (eine halbe Stufe weniger als VII) mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren aus. Das in diesem Zusammenhang ebenfalls angeführte Zitat <AHORNER 1970> ist veraltet. Aber selbst wenn schon eine Intensität VII beobachtet worden wäre, wäre das entsprechende Gebiet auf einer absoluten Skala immer noch als seismisch wenig aktives Gebiet zu bezeichnen.

Die Aussage, dass "in der Nordschweiz generell alle 1'000 Jahre mit einem Erdbeben gerechnet werden muss, das Beschleunigungswerte von 0.2 g ... erreicht" ist nicht zutreffend. Dies gilt nur für den Raum Basel. Gemäss neuesten Gefährdungskarten (Sellami et al., 2003, vgl. Anhang C) ist im Zürcher Weinland auf steifem Lockergestein alle 1'000 Jahre mit einem Wert von 0.1 g zu rechnen (auf Fels und in der Tiefe deutlich weniger).

Herr Schmidt weist darauf hin, dass eine Prognose der seismischen Gefährdung über einen Zeitraum von einer Million Jahre, "basierend allein auf den Erdbebenbeobachtungen ab dem Jahr 800 bzw. 1300", nicht möglich sei. Mit dieser Aussage ist die NAGRA offensichtlich einverstanden, hat sie doch sehr umfangreiche neotektonische Untersuchungen angestellt und dabei ein geologisch gut abgestütztes, konsistentes geodynamisches Modell der Nordschweiz entwickelt. Von diesen Arbeiten, die seit über zwei Jahrzehnten laufen, scheint Herr Schmidt wiederum keine Kenntnis genommen zu haben.

Das Gutachten des Öko-Instituts e.V. führt drei mögliche Schadensszenarien an, auf die kurz eingetreten werden soll:

- "Während des Betriebs kann ein schweres Erdbeben Schäden an den Schächten und Strecken verursachen, die sowohl den Weiterbetrieb als auch den dichten Verschluss in Frage stellen könnte." Es handelt sich hier um eine nicht weiter begründete Behauptung, die im Widerspruch zu den weltweiten Erfahrungen mit Erdbebenschäden an unterirdischen Bauwerken in Festgesteinen steht (SKB, 2002; vgl. auch Anhang B und Kapitel 1.4 des vorliegenden Gutachtens).
- "In der Nähe eines bereits verschlossenen Endlagers können Erdbeben zur Schaffung neuer Wegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich infolge Rissbildung führen." Hier wird auf die Ausführungen in Kap. 2.3 des vorliegenden Gutachtens verwiesen. Zu beachten ist hier auch der "Selbstheilungseffekt" des Opalinustons.
- Durch Erdbeben entstandene Risse können durch den Einlagerungsbereich für radioaktive Abfälle des Endlagers führen und unter Umständen sogar einzelne Behälter zerstören." Dies ist rein theoretisch denkbar. In Kapitel 2.3 des vorliegenden Gutachtens wird aber ausgeführt, weshalb die differenziellen Verschiebungen bei solchen Rissen bescheiden bleiben, so dass aus den schwedischen Untersuchungen (SKB, 2002; Börgesson et al., 2003) vorläufig geschlossen werden darf, dass keine Behälter zerstört werden. Diese Studien sind aber von der NAGRA in einem weiteren Untersuchungsschritt zweifellos noch zu vertiefen.

Herr Schmidt schliesst bezüglich Erdbeben mit folgender Forderung: "Ausserdem ist noch zu klären, inwieweit unterirdische Fliesswege bzw. ein Endlager in tiefen geologischen Formationen infolge Erdbebeneinwirkung beeinflusst werden können". Dieser Forderung schliesst sich der Autor des vorliegenden Gutachtens bis zu einem gewissen Grad an (vgl. Kapitel 4), auch wenn sich das System des Tiefen-

lagers in der Sicherheitsanalyse als sehr robust gegen Störeinflüsse erwiesen hat (NAGRA, 2002b).

### 3.2 Gutachten von Frau Dr. habil. B. Theilen-Willige

Frau B. Theilen-Willige widmet drei Kapitel ihres Gutachtens (Theilen-Willige, 2003), Kapitel 4, 5 und 6, der Erdbebenfrage. Sie eröffnet Kapitel 4 mit der Feststellung, dass "eine Erdbeben­­tätigkeit in der Umgebung des Untersuchungsgebiets sowohl historisch als auch gegenwärtig belegt" sei. Und diese Tatsache wird im selben Kapitel in ähnlichen Worten noch zweimal wiederholt, als werde sie von der NAGRA unterschlagen. Die Erdbeben­­tätigkeit aber wird von der NAGRA keineswegs bestritten, sonst hätte sie diese nicht während zweier Jahrzehnte im Detail untersucht.

Frau Theilen-Willige schreibt, dass "für die Sicherheitsaspekte bezüglich eines atomaren Endlagers und der damit verbundenen Infrastruktur auch die Schütterwirkungen von entfernter gelegenen Erdbeben zu berücksichtigen" sei. Als Beispiele führt sie das Basler Beben von 1356 und das Beben von Augusta Raurica um das Jahr 250 an. Damit legt sie offen, dass sie bezüglich der Auswirkung von Erdbeben nicht kompetent ist. Weder das eine noch das andere der zitierten Beben hätte Schäden im Tiefenlager zur Folge, sei dieses noch unverfüllt oder bereits verfüllt. Und auch die Infrastruktur wiese schon bei einer gängigen Bemessung nach den Schweizer Baunormen nur bescheidene Schäden auf – zu erwarten aber ist, dass die Infrastruktur des Tiefenlagers nach deutlich strengeren Erdbeben-Vorgaben gebaut werden wird, als sie für gewöhnliche Bauten gelten. Dass Frau Theilen-Willige als mögliche Gefährdung eines Tiefenlages sogar noch das Vogeser Beben vom 22.02.2003 anführt, das zwar bis in die Schweiz spürbar war, aber selbst im Epizentralbereich kaum nennenswerte Schäden verursacht hat, unterstreicht nur ihre Unkenntnis bezüglich der Schadenwirkung von Erdbeben.

Weiter führt Frau Theilen-Willige aus, "dass im Mittel die Schweiz in 100 Jahren mit einem Erdbeben in der Grössenordnung der stärksten Erdstösse von 1997 in Umbrien rechnen muss. Letztere haben Tote und Verletzte gefordert, viele Häuser unbewohnbar gemacht und nichtreparierbare Schäden an historischen Bauten verursacht – von den wirtschaftlichen Folgekosten ganz zu schweigen." Diese Aussage ist völlig korrekt, hat aber mit der Sache nichts zu tun. Weder die Toten und Verletzten, die in älteren, nicht auf Erdbeben bemessenen Bauten zu beklagen waren, noch die Schäden an historischen Bauten, noch die wirtschaftlichen Folgekosten haben mit möglichen Schäden an einem Tiefenlager etwas zu tun. Auch wird verschwiegen, dass die ungefähr alle 100 Jahre aufgetretenen und auch in Zukunft zu erwartenden Erdbeben weitab vom Zürcher Weinland zu lokalisieren sind (in erster Linie im Wallis und im Raum Basel). Diese Ausführungen sind deshalb dämagogisch und eines wissenschaftlichen Gutachtens unwürdig.

Eine weitere Passage in Kapitel 4 lautet: "Im Untersuchungsgebiet könnten durch ein weiter entfernt stattfindendes, grösseres Erdbeben als Folge von Spannungsumlagerungen entlang labiler, potenzieller Herdflächen ('im Buchstapelmechanismus') weitere Erdbeben hervorgerufen werden, die als Kettenwirkung wiederum zur Destabilisierung weiterer Störungszonen führen könnten. Dabei ist durchaus die Entstehung neuer Verwerfungen möglich." Tatsächlich können Spannungsumlagerungen infolge grösserer Erdbeben weitere Erdbeben auslösen. Manchmal treten Erdbeben in sogenannten Schwärmen auf, so etwa im oben zitierten Fall von

Umbrien. Diese Tatsache aber stellt für das Endlager kein Problem dar, sofern dabei keine neue Verwerfung durch das Endlager selbst entsteht. Unter Seismologen ist man sich einig, dass Erdbeben nur in äusserst seltenen Fällen neue Verwerfungen erzeugen, und dies geschieht aus mechanischen Gründen nur dort, wo sich in der Umgebung keine bestehende Verwerfung anbietet, die bereits aktiv ist oder reaktiviert werden könnte (vgl. Kapitel 2.3 des vorliegenden Gutachtens).

Kapitel 5 des Gutachtens von Frau Theilen-Willige ist den untergrundbedingten Effekten bei grösseren Erdbeben gewidmet. Sie führt aus, dass Störungszonen je nach deren räumlicher Orientierung die Ausbreitung seismischer Wellen begünstigen oder aber als Reflektoren wirken, was zu konstruktiver Interferenz und damit lokal zu verstärkten Erschütterungen und sogar zu "Mikrobrüchen im Gestein" führen kann. Zur Untermauerung dieser Aussage weist sie auf Ausbuchtungen der Isoseisten bei makroseismischen Karten hin (die zeigen, dass die Abnahme der Intensität mit der Distanz zum Epizentrum je nach Richtung unterschiedlich ist).

Hierzu ist folgendes zu bemerken: Die von Frau Theilen-Willige erwähnten Wellen-Phänomene sind unbestritten; ihre quantitativen Auswirkungen auf die Stärke der Bodenbewegungen aber bleiben bescheiden, und dass sie sogar Mikrorisse in der Tiefe erzeugen sollen, ist geradezu absurd – die mechanischen Spannungen sind viel zu gering. Störungszonen sind in der Regel schwache Reflektoren, wie all diejenigen, die mit seismischer Exploration zu tun haben, bestätigen können. Die oberflächennahe Geologie – quartäre Lockergesteinsablagerungen – haben einen viel stärkeren Einfluss auf den Verlauf der Isoseisten. Die oberflächennahe Geologie spielt allerdings für das Tiefenlager als solches keine Rolle, und für die Infrastruktur an der Oberfläche lässt sie sich explizit berücksichtigen. Die Bodenbewegungen bei Erdbeben werden von den Seismologen mit Hilfe sogenannter Abminderungsbeziehungen berechnet. Die von Frau Theilen-Willige erwähnten Welleneffekte werden dabei automatisch als Streuung der Abminderungsbeziehungen berücksichtigt.

In Kapitel 6 ihres Gutachtens entwickelt Frau Theilen-Willige Gedanken zum möglichen Einfluss von Oberflächenwasser auf die Erdbebentätigkeit. Sie führt aus: "Ob allerdings der Scherwiderstand entlang der Verwerfungen durch einsickerndes Oberflächenwasser in diese zahlreichen, steil tief reichenden Bruchzonen so weit herabgesetzt werden könnte, dass dadurch eine Erdbeben-Triggerwirkung initiiert wird, müsste erst durch weitere Untersuchungen (z.B. Bohrkernanalysen) geklärt werden. ... Derartige Zusammenhänge sind im Untersuchungsgebiet bislang nur wenig untersucht worden. Im Rahmen einer Sicherheitsanalyse für ein Endlager sollte aber auch ein derartiger Aspekt 'im Auge behalten' werden."

Es bleibt unklar, was Frau Theilen-Willige mit diesen Ausführungen bezweckt, wie auch, was hier die Bohrkernanalysen genau liefern sollten. Am vorgesehenen Standort sind, wie die hochauflösende 3D-Seismik gezeigt hat, keine solche steil tief reichende Bruchzonen vorhanden. Vor allem aber wäre die postulierte Erdbeben-Triggerung geradezu ein Schutzmechanismus, der sicherstellt, dass Erdbeben mit verhältnismässig geringem Spannungsabfall – und damit geringeren Bodenbewegungen – ausgelöst werden, bevor sich zu hohe Spannungen akkumulieren, die zu höheren Spannungsabfällen führen könnten.

## 4. Abschliessende Beurteilung und Empfehlungen

Der geographische Standort für ein Endlager radioaktiver Abfälle könnte in der Schweiz in bezug auf Erdbeben kaum günstiger gewählt werden. Die von der NAGRA durchgeführten Untersuchungen bezüglich Seismik und Neotektonik sind von vorbildlicher wissenschaftlicher Qualität. Ein gewisser Nachholbedarf besteht hingegen bei der expliziten – ingenieurmässigen – Diskussion der möglichen Auswirkungen von Erdbeben, die sich trotz verhältnismässig niedriger Seismizität nicht ausschliessen lassen.

Es wird empfohlen, folgende Fragen genauer abzuklären oder zumindest explizit zu diskutieren:

- Welches ist die in vernünftiger Weise zu erwartende maximale Magnitude eines Erdbebens, dessen Herd durch das Tiefenlager führen könnte (und das somit eine neue Verwerfung erzeugen würde, oder eine unentdeckte, kleine Störung vergrössern würde)? Und welches sind dabei die Auswirkungen auf die Behälter? Welche Wasserwegsamkeiten in welchem Ausmass – räumlich und, in Anbetracht der erwarteten Selbstabdichtung, zeitlich – könnten dabei entstehen?
- Für das stärkste in vernünftiger Weise anzunehmende Erdbeben ("Maximum Credible Earthquake") mit dem Herd ausserhalb des Tiefenlagers: Welches sind die Auswirkungen der Erdbebenwellen auf die Sicherheitsbarrieren des Tiefenlagers?

Aufgrund der hier in Kapitel 2 dargelegten Überlegungen und der bereits zitierten schwedischen Studien ist zu erwarten, dass keine unüberwindbaren Probleme auftreten. Dies gilt es aber für die konkrete schweizerische Konfiguration zu überprüfen. Es ist jedoch vertretbar, die empfohlenen Ergänzungen erst durchzuführen, nachdem der Bundesrat entschieden hat, die weiteren Untersuchungen auf das Zürcher Weinland zu fokussieren.

Die Kritik von Herrn Schmidt (Öko-Instituts e.V., 2003) basiert auf mangelnder Kenntnis der von der NAGRA durchgeführten seismischen und neotektonischen Studien und weist darüber hinaus einige fachliche Fehler auf. Als prinzipiell berechtigt kann Herrn Schmidt's Forderung nach einer expliziten Darstellung der Auswirkungen von Erdbeben auf das Endlager eingestuft werden.

Die Kritik von Frau Theilen-Willige (2003) ist in keiner Weise stichhaltig; sie erweckt den Eindruck oberflächlicher Kenntnisse in Seismologie und gänzlich fehlender Kompetenz bezüglich der Schadenwirkung von Erdbeben.

Carouge, 19. August 2003



Martin G. Koller

## 5. Literatur

- Birkhäuser Ph., Ph. Roth, B. Meier und H. Naef (2001), Nagra Technischer Bericht 00-03, 3D-Seismik: Räumliche Erkundung der mesozoischen Sedimentschichten im Zürcher Weinland
- Börgesson L., L.-E. Johannesson und J. Hernelind (2003), Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and buffer. Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXVII, Kalmar, Sweden, 15-18 June 2003
- Deichmann N., D. Ballarin Dolfin und U. Kastrop (2000), Nagra Technischer Bericht NTB 00-05, Seismizität der Nord- und Zentralschweiz
- Grünthal G., D. Mayer-Rosa und W. Lenhardt (1998), Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten Deutschland, Österreich, Schweiz, Bau-technik Vol. 75, Heft 10, Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- Müller W.H., H. Naef und H.R. Graf (2002), Nagra Technischer Bericht 99-08, Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland
- NAGRA (2002a), Nagra Technischer Bericht NTB 02-03, Projekt Opalinuston – Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse
- NAGRA (2002b), Nagra Technischer Bericht NTB 02-05, Project Opalinus Clay – Safety Report
- NAGRA (2002c), Projekt Opalinuston – Zusammenfassender Überblick
- Öko-Institut e.V. (2003), Gutachten: Kritische Erstbewertung des Kenntnisstandes über die Eignung eines Endlagerstandortes und Beschreibung der Auswirkungen eines Endlagers in der Region Benken (Schweiz)
- Sellami S., N. Deichmann, D. Fäh, D. Giardini und S. Wiemer (2003), Hazard Maps for Switzerland, <http://histserver.ethz.ch/hazard/>
- SKB (2002), Technical Report TR-02-24, Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results
- Theilen-Willige B. (2003), Gutachten: Geologische und Geotechnische Situation im Gebiet des geplanten Endlagers bei Benken in der Schweiz

## Anhang A: Curriculum Vitae des Autors des vorliegenden Gutachtens

### AUSBILDUNG

|                |   |
|----------------|---|
| September 1973 | Matura Typus B, Gymnasium Freudenberg, Zürich   |
| April 1978     | Bauingenieurdiplom der ETH Zürich, Vertiefungsrichtungen Konstruktion, Baustoffe und Mechanik                 |
| Juli 1983      | Doktorat am Institut für Mechanik der ETH Zürich, Thema der Dissertation: Wellenausbreitung in dicken Platten |

### BERUFSTÄTIGKEIT

|   |   |
|---|---|
| November 1978 - März 1983                     | Assistent II am Institut für Mechanik der ETH Zürich  |
| April 1983 - Juli 1985                        | Assistent I am Institut für Mechanik der ETH Zürich, Lehraufträge in den Gebieten "Stabilität einfacher Tragwerke" und "Wellenausbreitung in festen Körpern"  |
| September 1985 - Juli 1986 und Juni/Juli 1988 | "Foreign Expert" am Forschungsinstitut für Angewandte Mechanik der Technischen Hochschule Taiyuan, VR China, Initiierung eines experimentellen Forschungsprojektes in Dynamischer Strukturplastizität       |
| Januar 1987 - September 1989 ab Januar 1988   | Ingenieur bei GSS Ingenieure AG, Zürich<br>Fachverantwortlicher für den Bereich Angewandte Mechanik (vier Ingenieure)   |
| Oktober 1989 - Juni 1991                      | Forschungsaufenthalt am Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de l'Observatoire de Grenoble (groupe "Risque Sismique"), Numerische Studie (BEM) über die Rissausbreitung bei einem Erdbeben |
| September/Oktober 1991                        | Ingenieur bei GSS Ingenieure AG, Zürich   |
| November 1991                                 | Gründung des Büros RÉSONANCE Ingénieurs-Conseils SA, spezialisiert in Ingenieurseismologie, Erdbebeningenieurwesen sowie Bau- und Bodendynamik (zur Zeit eine Seismologin und zwei Erdbebeningenieure)      |
| Seit März 1997                                | Präsident der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  |
| Seit September 2002                           | 2. Vizepräsident der "European Association of Earthquake Engineering"   |

### FACHREFERENZEN

siehe [www.resonance.ch](http://www.resonance.ch)

## Anhang B: Zusammenfassung des Berichts SKB (2002)

The main goal of this project was to evaluate the impact of earthquakes on the repository for spent nuclear fuel. An extensive literature survey, a study-tour with site visits and a substantial amount of interviews lead to the following conclusions:

### **Earthquake impact during the *pre-closure* phase:**

- Damage due to shaking in an underground facility may occur if the peak ground acceleration exceeds  $2 \text{ m/s}^2$ . Sweden is located in the Baltic Shield that is seismically rather silent and will remain so in the foreseeable future. Seismic hazard has been calculated for Sweden and it is concluded that PGA greater than  $2 \text{ m/s}^2$  is very unlikely the next coming 50-year period, in which the repository is planned to be constructed and operated.
- Damage due to shaking is very rare in underground facilities. Where such damage has occurred, the rock is either very poor or subject to very high stresses. None of these conditions will prevail in the Swedish repository. Most damage is also correlated to the presence of faults and the spent fuel will not be deposited in or close to important faults.
- Mining-induced earthquakes are known to cause damages in the mines. At the repository site it might be possible to experience local rock burst problems due to the heterogeneous rock strength and the varying rock stresses. It is expected that these events, in case they appear, will take place when the tunnels are excavated rather when the spent fuel is deposited.

### **Earthquake impact during the *post-closure* phase:**

- The present seismic activity in Sweden is expected to increase considerably in connection to the retreat of ice sheets in future glaciations. Peak ground accelerations may exceed  $2 \text{ m/s}^2$  in association with large earthquakes. However, the effects of shaking, such as fallouts, cracking of lining are reduced or eliminated since all tunnels will be backfilled by crushed rock and bentonite.
- The presence of the repository will not trigger earthquakes as the extraction ratio of the openings is very low compared to open stopes in a mine. There are also evidences for mines at great depth, that backfilling considerably lower the mining-induced seismic activity compared to the situation when tunnels are not backfilled.
- The buffer and canister shake as a solid body without producing excess shear stresses or liquefaction of the buffer. Water-level changes will occur due to earthquakes but most of the changes are temporary and water-levels will return to their original values within a few months. The density of the buffer around the canister is high enough to prevent liquefaction due to shaking.
- Brittle deformation of a rock mass will predominantly be located along reactivation of pre-existing fractures. The data emanating from faults intersecting tunnels show that creation of new fractures is confined to the immediate vicinity of the reactivated faults and that deformation in host rock is rapidly decreasing with the distance from the fault. By selection of appropriate respect distances the probability of canister damage due to faulting is further lowered.

- Data from deep South African mines show that rocks in a environment with non-existing faults and with low fracture densities and high stresses might generate faults in a previously unfractured rock mass. The Swedish repository will be located at intermediate depth, 400–700 m, where stresses are moderate and rock is moderately fractured. The conditions to create these peculiar mining-induced features will not prevail in the repository environment. Should these faults anyhow be created, the canister is designed to withstand a shear deformation of at least 0.1 m. This corresponds to a magnitude 6 earthquake along the fault with a length of at least 1 km which is highly unlikely.
- Respect distance has to be site and fault specific. Field evidence gathered in this study indicates that respect distances may be considerably smaller (tens to hundres of m) than predicted by numerical modelling (thousands of m). However, the accumulated deformation during repeated, future seismic event has to be accounted for.

Anhang C: Karte maximaler Bodenbeschleunigung auf steifem Lockergestein mit einer Wiederkehrperiode von 1000 Jahren (Sellami et al., 2003)

