

STELLUNGNAHME

**zur Standortwahl für ein Endlager
für kurzlebige radioaktive Abfälle
Januar 1994**

1. EINLEITUNG

1.1 Veranlassung

Als vorbereitende Handlungen für die Erstellung eines Endlagers für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (SMA) hat die Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) seit mehreren Jahren Sondierungen an vier Standorten durchgeführt. Diese sind:

- Bois de la Glaive, Gemeinde Ollon (VD)
- Oberbauenstock, Gemeinde Bauen (UR)
- Piz Pian Grand, Gemeinden Rossa und Mesocco (GR)
- Wellenberg, Gemeinde Wolfenschiessen (NW)

Mit den Sondierungen soll abgeklärt werden, ob der jeweilige Standort für die Erstellung eines SMA-Endlagers geeignet ist. Nach Abschluss der ersten Untersuchungsphasen hat die Nagra die vier Standorte bewertet und verglichen. Im Juni 1993 hat sie den Standort Wellenberg vorgeschlagen, an welchem die Untersuchungen im Hinblick auf die Realisierung des Endlagers fortgeführt werden sollen. Ein entsprechendes Rahmenbewilligungsgesuch soll Mitte 1994 eingereicht werden.

Zur Begründung der Standortwahl und des weiteren Vorgehens hat die Nagra folgende Berichte erstattet:

- Vorbericht zur Standortwahl [1]
- Vergleichende Beurteilung [2]
- Geologische Grundlagen am Standort Wellenberg [3]
- Langzeitsicherheit am Standort Wellenberg [4].

Die Sicherheitsbehörden, insbesondere die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), werden zur Eignung des Standortes Wellenberg für ein SMA-Endlager bei der Begutachtung des in Aussicht gestellten Rahmenbewilligungsgesuches eingehend Stellung nehmen. Die HSK wurde vom Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) beauftragt, vorgängig dazu die Standortwahl aus ihrer Sicht zu beurteilen. Es handelt sich dabei nicht um eine von der Gesetzgebung vorgesehene Begutachtung. Auch die Arbeitsgruppe des Bundes für die nukleare Entsorgung (AGNEB) wird zur Standortwahl zuhanden des Bundesrates Stellung nehmen und sich dabei in bezug auf die nukleare Sicherheit auf die Stellungnahme der HSK abstützen.

1.2 Endlager für kurzlebige Abfälle

Das Endlager, für das ein Standort ausgewählt wird, dient zur Beseitigung von kurzlebigen schwach- und mittelaktiven Abfällen (SMA). Solche Abfälle fallen aus dem Betrieb und später

aus der Stilllegung der Kernkraftwerke, sowie aus der Nutzung von radioaktiven Stoffen in Medizin, Industrie und Forschung an. Auch gewisse Abfallsorten aus der Wiederaufarbeitung gehören zur Kategorie der SMA.

Der Hauptanteil der Aktivität und Toxizität der SMA besteht aus Spaltprodukten und Aktivierungsprodukten. Massgebende Spaltprodukte sind Cs-137 und Sr-90, deren Halbwertszeiten ca. 30 Jahre betragen. Sie werden im Hinblick auf die Endlagerung als kurzlebig bezeichnet. Die SMA enthalten neben den erwähnten Leitnukliden auch Spuren von langlebigen Radionukliden mit Halbwertszeiten von mehreren tausend Jahren. Die Konzentration solcher langlebiger Nuklide ist in den SMA jedoch niedrig.

Die sichere und dauernde Beseitigung auch der SMA soll gewährleistet werden, ohne dass langfristige Massnahmen zur Überwachung bzw. Instandhaltung des Endlagers erforderlich sind. Auch für ein SMA-Endlager muss somit die Langzeitsicherheit, d.h. die Sicherheit nach Verschluss des Endlagers, erreicht werden. Dabei kann eine erste Phase von einigen hundert Jahren erkannt werden, während welcher die kurzlebigen Nuklide zerfallen. Anschliessend muss eine mehrere tausend Jahre andauernde Phase betrachtet werden, während welcher noch langlebige Nuklide vorhanden sind. Für jede Bewilligung zur Realisierung eines Endlagers muss der Projektant den Nachweis der Langzeitsicherheit erbringen.

1.3 Bemerkungen zur Stellungnahme

Mit dem vorliegenden Bericht kommt die HSK dem Auftrag des BEW nach. Es wird in erster Linie zur Standortwahl Stellung genommen. Zu diesem Zweck werden zunächst (Kapitel 2) die an jedem Standort von der Nagra durchgeführten Untersuchungen und die gewonnenen Kenntnisse dargelegt. Dabei stützt sich die HSK auf die Expertisen der Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), einer Subkommission der Eidgenössischen Geologischen Fachkommission (EGK). Die HSK äussert sich auch zur Frage, ob der erreichte Kenntnisstand an jedem Standort genügt, um eine sinnvolle Bewertung und einen Vergleich vorzunehmen.

Die Beurteilung eines künftigen Endlagerprojektes wird anhand der Bestimmungen der Richtlinie R-21 erfolgen. Die Beurteilung der Standorte hinsichtlich der Standortwahl erfolgt aber nicht aufgrund einer Sicherheitsanalyse, sondern anhand der vorgefundenen Verhältnisse. Deshalb werden im Kapitel 3 die Kriterien aufgezählt, welche die HSK zur Standortbeurteilung heranzieht. Es wird auch geprüft, inwiefern die von der HSK herangezogenen Kriterien von der Nagra berücksichtigt wurden.

Die Beurteilung der einzelnen Standorte nach den festgelegten Kriterien ist Gegenstand von Kapitel 4. Dabei wird auf allfällige noch wichtige offene Fragen hingewiesen. Im Kapitel 5 wird dann zur eigentlichen Frage, nämlich zur Wahl des Standortes Wellenberg, Stellung genommen.

Als Ergänzung der Stellungnahme zur Standortwahl äussert sich die HSK auch (Kapitel 6) zu dem von der Nagra vorgeschlagenen weiteren Vorgehen. Ohne der Begutachtung des ent-

sprechenden Gesuches vorzugreifen, wird die Frage beantwortet, ob aus Sicht der HSK die Kenntnisse über den Standort Wellenberg genügend sind, um ein Rahmenbewilligungsverfahren einzuleiten.

2. STANDORTUNTERSUCHUNGEN UND ERGEBNISSE

2.1 Standort Bois de la Glaive

In ihrem Gutachten [5] zu den Stollenanträgen der Nagra hat die HSK die geologischen Verhältnisse am Standort Bois de la Glaive als schwierig eingestuft. Ein Entscheid über den Bau eines Sondierstollens schien der HSK vor der Durchführung eines Sondierprogrammes verfrüht. Seit dieser Stellungnahme konnte die Nagra ein Sondierprogramm abwickeln. Damit liegen folgende Untersuchungen vor:

- Geologische Kartierung
- Geologische Aufnahme der Galerie de Salin
- Hydrogeologischer Kataster und Quellenmessprogramm
- 3 Sondierbohrungen mit zugehörigem Untersuchungsprogramm
- Bodengasmessungen
- Gravimetrische Aufnahmen
- Ingenieur-Geophysik: Refraktionsseismik, Geoelektrik, elektromagnetische Messungen VLF
- 2 reflexionsseismische Linien

Diese Untersuchungen lieferten eine Fülle von Resultaten, die ab Sommer 1993 als Rohdatenberichte erschienen. Eine erste Synthese der Untersuchungsergebnisse wurde der HSK Anfang Oktober 1993 vorgelegt [6]. In Ergänzung dazu hat die Nagra Anhydrit als Wirtgestein untersucht [7]. Es gilt nun den Standort Bois de la Glaive im Lichte dieser neuen Erkenntnisse zu beurteilen. Nachfolgend wird eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse gegeben.

Die Untersuchungen haben die Existenz eines bedeutenden Anhydritvorkommens im Gebiet des Bois de la Glaive bestätigt. Gravimetrie und Reflexionsseismik geben zuverlässige Hinweise, dass im Gebiet der Erhebung des Bois de la Glaive mit einem bis zu 1000 m mächtigen Anhydritkörper gerechnet werden kann. Aufgrund regionaler Literaturstudien konnte die tektonische Entwicklungsgeschichte des Deckenstapels plausibel abgeleitet werden. Die als Wirtgestein im Vordergrund stehende Zone Submédiane bildet dabei den Abscherhorizont, auf dem die Decke der Préalpes médianes die Niesen-Decke überfuhr. Die vorwiegend aus Karbonatgesteinen bestehenden Abfolgen der Préalpes médianes rigides wurden während dieser Bewegungen zerrissen und liegen heute zum Teil als isolierte Gesteinskörper tektonisch unterhalb der Zone submédiane (Einwicklung der ehemals höheren Einheit). Die Anhöhe des Plantour und der Hügel von St. Triphon sind Beispiele solcher Vorkommen.

Der Werdegang der Zone submédiane lässt auf einen komplexen inneren Aufbau des Anhydritkörpers schliessen. Das Gestein weist denn auch einen hohen Anteil an tektonisch zerrissenen Begleitgesteinen (Dolomite, Sandsteine) auf. Konkrete Hinweise auf Fremdgesteinsschollen, also tektonisch eingeschuppte Gesteinspakete anderer tektonischer Einheiten, wurden im engeren Gebiet des Bois de la Glaive nicht gefunden. Die geologische Kartierung ergab eine einzige grössere Scholle aus Flyschgestein im Gebiet westlich Verchiez.

Eine erste grobe Auswertung der Reflexionsseismik gibt ebenfalls keine Hinweise auf grössere Fremdgesteinsschollen, allerdings ist das Auflösungsvermögen der Seismik bei den komplexen geologischen Verhältnissen am Bois de la Glaive bescheiden. Die Nagra schätzt das Risiko solche Schollen anzutreffen als gering, aber nicht vernachlässigbar ein.

Die strukturgeologischen Untersuchungen ergaben Hinweise auf zwei voneinander unabhängige Kluftsysteme, die zwei Faltungs- oder Überschiebungsphasen zugeordnet werden können. Die Entwicklung des späten Kluftsystems erfolgte zumindest teilweise im Bereich der Spröddeformation. Die strukturellen Aufnahmen der Bohrkerne ergaben für die zentral gelegene Bohrung ON-9 eine deutlich grössere Klufthäufigkeit, als für die nahe dem Deckkontakt zu den Préalpes médianes liegende Bohrung AN-13. Allerdings ist die hydraulische Durchlässigkeit des Anhydritkörpers in AN-13 deutlich grösser, da hier offene Strukturen auftreten.

In den harten Gesteinen der angrenzenden Préalpes médianes rigides kann ein verhältnismässig engständiges Störungsmuster kartiert werden. Es ist unklar ob und wie sich diese vorwiegend steilen Störungen in den Anhydritkörper fortsetzen, die vorliegenden Daten geben dazu keine klaren Hinweise. Auf den seismischen Linien sind stellenweise im Anhydrit steile Störungen angedeutet; diese würden allerdings im Gebiet des Hangfusses und des Rhonetales liegen. Die Bodengasmessungen zeigen im Gebiet des Bois de la Glaive stellenweise stark erhöhte Werte; es ist aber schwierig, zwischen Störungen und reinen Karsterscheinungen zu unterscheiden. Die hohen Radonwerte im engeren Gebiet des Bois de la Glaive weisen auf Karsthohlräume, wobei diese längs grösseren Störungszonen entstanden sein können. Präzisere Hinweise könnten nur mit aufwendigen, engmaschigen Untersuchungskampagnen ermittelt werden.

Die hydrogeologische Erkundung hat gezeigt, dass am Bois de la Glaive zwei voneinander unabhängige hydraulische Systeme vorliegen. Einerseits ein oberflächennaher Gipskarst, der mit den Aquiferen des Quartärs in Verbindung steht, andererseits ein abgeschlossenes System im Anhydrit.

Die oberflächennahen Schichten des Anhydrits wurden durch meteorische Wässer vergipst. Die Dicke dieses Gipskarstes beträgt 20-40 m. In einzelnen, durch Dolinenreihen gekennzeichneten Gebieten, dürfte die Verkarstung lokal auch tiefer reichen. Es werden hier aufgrund der ingenieurgeophysikalischen Messungen Werte bis 100 m vermutet. Hinweise auf eine tiefer reichende Verkarstung wurden nicht gefunden. Da die Überdeckung des poten-

tiellen Lagerareals 300-500 m beträgt, könnte die verbleibende Anhydritmächtigkeit somit stellenweise lediglich 200 m betragen.

Während im Gipskarst eher grosse Transmissivitäten festgestellt wurden, ist der Anhydrit in weiten Bereichen sehr gering durchlässig. Gesunder Anhydrit enthält in den hier interessierenden Tiefenbereichen kein Wasser. Allfällige Wasser führende Hohlräume würden durch Vergipsung geschlossen, wie dies Gipsklüfte im Anhydrit belegen. Die Durchlässigkeit wird im wesentlichen durch die offenen Klüfte und durch Einschlüsse von Begleit- oder Fremdgestein bestimmt. In den Bohrungen wurden einige offene Klüfte angetroffen, die bedeutende Transmissivitäten ergaben (bis $10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$). Aufgrund des hydraulischen Verhaltens muss angenommen werden, dass diese Klüfte lokal begrenzten Systemen angehören, die vermutlich durch den Bohrvorgang mit Bohrspülung gefüllt wurden. In den Bohrungen wurden zahlreiche feine mit Salz gefüllten Klüfte festgestellt, dies weist ebenfalls darauf hin, dass in weiten Bereichen des Anhydritkörpers kein freies Wasser zirkuliert.

Die Langzeitbeobachtung der Bohrungen ergab, dass im Anhydritkörper erhebliche hydraulische Unterdrucke vorliegen. Auch diese Beobachtung zeigt, dass der Anhydrit hydraulisch vom Gipskarst getrennt ist. Die Potentiale des Gipskarstes stimmen mit denen der Quartär-Aquifere überein. Eine Wasserprobe, die an der Basis des Gipskarstes entnommen wurde, ergab ein auf einer C-14 Analyse basierendes Alter von 7000 Jahren. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Gipskarst im wesentlichen bereits am Ende der letzten Eiszeit in seiner heutigen Form angelegt wurde. Die Ursache der Unterdrucke wurde nicht weiter untersucht, wird aber in der jungen Hebung des Gebietes und in der Entlastung des Gesteins nach dem Rückzug des rund 1000 m mächtigen Gletschers der letzten Eiszeit zu suchen sein.

Das Wirtgestein Anhydrit stellt in hydrogeologischer Hinsicht eine Besonderheit dar. Der Anhydrit kann bei Wasserzutritt in Gips umgewandelt werden. Durch die bei der Hydratisierung erfolgende Volumenzunahme sollten die wasserführenden Strukturen geschlossen werden. Dieser Prozess der Selbstheilung ist aber von diversen Randbedingungen abhängig (Fließgeschwindigkeit, Salzgehalt des Wassers, etc.) und deshalb nur schwer in Modellen fassbar. Insbesondere fehlen zur Modellierung genügend standortspezifische Daten. Die Beobachtung, dass am Bois de la Glaive mit Gips gefüllte Klüfte den Anhydrit durchschlagen, weist auf solche Vorgänge in der Vergangenheit hin.

2.2 Standort Oberbauenstock

In ihrem Gutachten [5] zu den Stollenanträgen der Nagra hat die HSK die Untersuchungsergebnisse am Standort Oberbauenstock kommentiert und im Hinblick auf den Bau eines Sondierstollens bewertet. Die HSK kam zum Schluss, dass ein weiterer Erkenntnisgewinn nur durch den Bau des Sondierstollens erreicht werden könne. Seit diesem Zeitpunkt sind keine weiteren Untersuchungen ausgeführt worden. Hingegen wurden die Hydromodellierung überarbeitet und die Strömungsverhältnisse neu berechnet [8]. Mit Ausnahme dieses Hydromodells ergeben sich somit keine neuen Aspekte.

Im einzelnen wurden folgende Untersuchungen ausgeführt:

- Geologische Kartierung
- Regionale Strukturstudie
- Hydrogeologischer Kataster und Quellenmessprogramm
- Geophysikalische Untersuchungen in Bauwerken des Seelisbergtunnels
- 3 Sondierbohrungen aus dem Zugangsstollen des Seelisbergtunnels mit zugehörigem
- Untersuchungsprogramm

Die Nagra hat über die Ergebnisse dieser Untersuchungen bereits 1988 Bericht erstattet [9]. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse des HSK-Gutachtens von 1988 zusammengefasst.

Die tektonische Situation des Standortes Oberbauenstock ist gekennzeichnet durch den Gegensatz zwischen dem eher einfachen Faltenbau der Drusberg-Decke und dem komplizierten Baustil der Axen-Decke, die hier extrem deformiert und in einzelne Segmente zerlegt (Axen-Nord- und Südlappen) vorliegt. Im Bereich des Urnersees beobachtet man eine Kulmination der Faltenachsen der Drusberg-Decke, die anschliessend gegen Westen bis ins Gebiet des Engelbergertales abfallen. Demgegenüber vermutet man für die Axen-Decke im Gebiet des Urnersees eine axiale Depression. Die Interferenz dieser gegensätzlichen Trends ist für die Lage der Überschiebungsfläche und damit für das verfügbare Wirtgesteinsvolumen, entscheidend. Bei der Projektion dieser Parameter ins Lagerareal bestehen grosse Unsicherheiten, diese könnten nur durch zusätzliche Sondierungen aus dem Sondierstollen abgeklärt werden. Das Wirtgesteinsvolumen ist jedoch in jedem Falle eher knapp.

Die Bohrungen aus den Annexbauwerken des Seelisbergtunnels zeigten, dass die Überschiebungszone zwischen den beiden Decken durch späte tektonische Bewegungen stark deformiert worden ist. Konkave Scherflächen zerlegen den Wirtgesteinskörper und das Nebengestein in einzelne Segmente. Längs dieser Überschiebungsbahnen wurden Schuppen aus tertiären Gesteinen der Axen-Decke in die Kreidemergel hineingepresst. Die geologische Oberflächenkartierung ergab Hinweise auf steile Störungen, die möglicherweise bis auf das Niveau des potentiellen Endlagers durchschlagen.

Das Wirtgestein (Palfris-Schiefer und Vitznau-Mergel), das an der Basis der Drusberg-decke als Abscherhorizont diente, wurde durch diese tektonischen Vorgänge intensiv zerschert. Man beobachtete eine grosse Zahl von Deformationsstrukturen, die sowohl auf duktile wie auch spröde Verformung des Mergels hinweisen. Aufgrund der grossen Heterogenität des Wirtgesteins gelang es im allgemeinen nicht, Strukturen und Lithologien der einzelnen Bohrungen miteinander zu korrelieren. Die grosse Heterogenität erschwerte auch die Interpretation der seismischen Aufnahmen aus den Tunneln. Immerhin zeigte sich, dass die Basis des Wirtgesteins stark zerbrochen und verschuppt ist. Die unruhig verlaufende Fläche zeigte keine sichtbaren Trends auf, Projektionen ins Lagerareal sind auch aus diesem Blickwinkel heikel.

Die Resultate der hydrogeologischen Untersuchungen zeigten, dass in der Palfris-Formation und den Vitznau-Mergeln äusserst heterogene hydrogeologische Verhältnisse herrschen. Der Mergel war in weiten Bereichen gering durchlässig, doch zahlreiche Strukturen wiesen eine überraschend hohe Durchlässigkeit auf. Es gelang aufgrund der heterogenen Verhältnisse selten, die gemessenen hydraulischen Werte bestimmten Strukturen zuzuweisen. Es konnten drei Typen wasserführender Systeme definiert werden: Klüfte und Kluftscharen mit porös-drusiger Kluftfüllung, Scherbrüche sowie kataklastische Störungszonen. Letztere weisen teilweise eine grössere Ausdehnung auf. Die Vernetzung dieser Sprödstrukturen bestimmt die grossräumige Transmissivität des Gesteins. Die in Tests ermittelte Durchlässigkeit des Wirtgesteins variiert in einem verhältnismässig grossen Bereich von 10^{-12} bis 10^{-7} ms^{-1} und korreliert wie erwähnt nicht mit geologischen Beobachtungen. Die Pilotstollen des Seelisbergtunnels waren seinerzeit weitgehend trocken, Bergwasserzutritte traten an Störungszonen bei geringer Überlagerung auf.

Die hydraulischen Potentiale zeigen im Bereich des Mergels abnormal tiefe Werte. Die niedrigsten Werte liegen etwa 80 m unterhalb des Niveaus des regionalen Vorfluters Vierwaldstättersee. In den Kalkformationen unterhalb des Wirtgesteins stimmt der Druck mit dem Seespiegel überein. Über die Gründe dieser Unterdrucke wurde viel spekuliert, die Ursache wurde bislang nicht abschliessend geklärt. In Frage kommen Vorgänge im Zusammenhang mit der Entgasung des Mergels beim Bau des Tunnels, oder die Entlastung des Gesteins im Zusammenhang mit jungen Hebungen oder nach dem Abschmelzen des Eises am Ende der letzten Eiszeit.

Die hydrogeologische Modellierung ergab, dass die Entwässerung ausnahmslos gegen den Urnersee erfolgt. Dabei wurde jedoch die Unterdruckzone nicht modelliert. Die Axen-Decke wirkt mit ihren durchwegs tiefen Potentialen als Vorfluter. Das Wasser aus dem Lagerareal fliesst gegen Südosten in die Kalke und ins Tertiär der Axen-Decke. Im Basisfall beträgt der Fliessweg im Wirtgestein 120 m, die Fliesszeit liegt dabei bei etwa 60 Jahren. Die Varianten ergaben einen kürzesten Fliessweg von 80 m. Der modellierte Wasserfluss durch das Endlager beträgt 0,4 bis 20 l/m^2 Jahr. Der Zugangsstollen wurde in den Abstrombereich verlegt.

Das Wirtgestein weist eine erhebliche Gasführung auf. Es handelt sich um Gas aus verschiedenen Quellen: Gas aus Fluid-Einschlüssen des Kalzits der Klüfte, Gas das im Mergel selbst generiert wurde, und Gas, das aus Reservoirs in grösserer Tiefe zuströmt. Da nach Verschluss der Bohrlöcher ein Gasdruck aufgebaut wurde, wird offensichtlich ständig Gas nachgeliefert. Dies zeigen auch Bläser im Seelisbergtunnel, die jahrelang erhebliche Mengen Erdgas förderten, was auf eine Herkunft des Gases aus einem grösseren Reservoir im Liegenden schliessen lässt.

2.3 Standort Piz Pian Grand

In ihrem Gutachten [5] zu den Stollenanträgen der Nagra hat die HSK den Standort Piz Pian Grand als problematisch eingestuft. Sie erachtete die Resultate für einen Stollenvortrieb als ungenügend. Seit diesem Zeitpunkt wurden keine weiteren Sondierungen ausgeführt.

Das Untersuchungsprogramm umfasste folgende Arbeiten:

- Geologische Kartierung
- Hydrogeologischer Kataster und Quellenmessprogramm
- Hydrogeologische Neuaufnahme des Freispiegelstollens und Beprobung der Zuflussstellen
- Geophysikalische Messungen mit schwimmenden Sonden im Freispiegelstollen
- Hammerschlagseismik im Freispiegelstollen
- 4 Kurzbohrungen aus dem Freispiegelstollen mit zugehörigem Untersuchungsprogramm

Die Nagra hat über die Ergebnisse dieser Untersuchungen bereits 1988 Bericht erstattet [10]. Nachfolgend werden die wesentlichen Erkenntnisse des HSK-Gutachtens von 1988 zusammengefasst.

Die geologische Kartierung zeigte, dass im Gebiet Gneise und Schiefer in verschiedenen Varietäten (glimmerreich, glimmerarm) auftreten. Die in früheren Berichten beschriebene Zweiteilung der Adula-Decke in einen tieferen, vorwiegend aus glimmerreichen Schiefergneisen und einen höheren, vorwiegend aus hellen Gneisen bestehenden Teil, konnte durch die Kartierung nicht bestätigt werden. Vielmehr fand man eine engräumige Wechsellagerung bzw. Stoffbänderung der verschiedenen Lithologien, die auf eine mehrphasige, intensive isoklinale Verfaltung zurückzuführen ist.

In den Gneisen und Glimmerschiefern treten verbreitet Bänder und Linsen von basischen Gesteinen (Eklogite, Amphibolite) auf. Diesen Gesteinen kommt eine wichtige strukturelle Bedeutung zu, da sie sich bei mechanischer Beanspruchung wegen ihrer grossen Dichte und Härte spröder verhalten haben, als die Gneise und Glimmerschiefer. Die Gesteine, vor allem aber die Kontakte zum Nebengestein, müssen als potentielle Wasserfliesswege betrachtet werden. Eine schwarmartige Anhäufung von Eklogit- und Amphibolitgesteinen lässt sich innerhalb einer Zone massiger, unregelmässig geschieferter Gneise auskartieren, die ihrerseits bis zu einem Kilometer grosse Schollen (Megaboudins) bilden. Diese Zone lässt sich von der Alp Trescolmen als ein sich kontinuierlich verschmälernden Zug in das Gebiet des Piz Pian Grand hinein verfolgen; sie könnte auch mit dem Lagergebiet interferieren.

Die Gneise und Glimmerschiefer enthalten auch geringmächtige Einschaltungen oder Linsen von Marmoren, Rauwacken, Gips oder Quarziten. Die detaillierte Kartierung zeigt die Vorkommen solcher Gesteine an der Erdoberfläche, hingegen fehlen diesbezügliche Angaben aus dem Bereich des Freispiegelstollens. Diese Gesteine sind karstanfällig und könnten für die Wasserwegsamkeit von grosser Bedeutung sein.

Im Untersuchungsgebiet können drei grossräumige Störungssysteme ausgeschieden werden. Die Haupttrichtungen streichen N-S, SW-NE und SE-NW. Die Störungen stehen meist steil, im Aufschluss zeichnen sie sich durch eine erhöhte Klüftung und durch ein Netz von Bruchflächen aus. Durch Auflösung des ursprünglichen Gesteinsverbandes entstanden auch

Kakirite. Ein Horizontalschnitt auf der Endlagerkote 1250 m ergibt für den Bereich der potentiellen Endlagerzone ein relativ dichtes Störungsnetz. Einzelne Störungen zeigen Indizien für neotektonische Bewegungen. Aufgrund der Geometrie und der Kluftparagenesen können in den Bohrkernen verschiedene Kluftgenerationen ausgeschieden werden. Von besonderem Interesse ist das Auftreten von Gips und Anhydrit. Nach der Charakteristik der gemessenen Schwefelisotopenverhältnisse besteht eine geochemische Interaktion zwischen den Kluftanhydriten und den sulfatreichen Stollenwässern.

Der umfangreiche Quellenkataster gibt eine gute Datenbasis für die Beurteilung der hydrogeologischen Situation. Die Oberflächenaufnahmen wurden durch Beobachtungen im Freispiegelstollen ergänzt. Aus diesen Beobachtungen können aber nur beschränkt Rückschlüsse gezogen werden, da der Stollen auf der gesamten Länge mit ca. 50 cm Beton ausgekleidet wurde. Aufgrund der Hydrochemie der Wässer können für die oberirdischen Quellen generell zwei Wassertypen ausgeschieden werden (Ca-SO₄ und Ca-HCO₃ - Wässer). Die im Freispiegelstollen angetroffenen Felswässer sind stärker mineralisiert und weisen teilweise sehr hohe Sulfatgehalte auf.

Die geoelektrischen Messungen lassen Zonen unterschiedlicher elektrischer Gebirgswiderstände erkennen. Für den Stollenabschnitt von km 1.7 bis km 2.8 ergeben sich hohe Widerstände, wie sie für geringdurchlässiges Gestein charakteristisch sind. Deutlich geringere Gebirgswiderstände wurden hingegen im östlichen Stollenabschnitt gemessen, wo auch höhere Wasserzuflüsse durch die Stollenverkleidung hindurch festgestellt wurden.

Die seismischen Geschwindigkeitsprofile zeigen verschiedene Anomalien niedriger Geschwindigkeit. Diese werden mit Störungszonen in Verbindung gebracht. Eine eindeutige Korrelation mit der Lithologie des Gesteins erwies sich aber als schwierig, da die während des Stollenbaus aufgenommenen geologischen Profile zu wenig präzise sind. Der Stollenabschnitt von km 3.5 bis km 4.5 zeichnet sich durch hohe Geschwindigkeiten der Kompressionswellen aus. Es dürfte sich am ehesten um Eklogit- oder Amphibolitgesteine handeln.

In den Kurzbohrungen wurden eintönige Biotitschiefer und Schiefergneise angetroffen. Da alle Bohrungen parallel zur Hauptklüftung laufen, ist eine repräsentative Erfassung der Trennflächensysteme nicht möglich. Die Messung der hydraulischen Kennwerte in den Bohrungen zeigen mit einer Ausnahme durchwegs geringe Transmissivitätswerte. Wegen der geringen Durchlässigkeit erfassen aber die Tests nur ein sehr kleines Gesteinsvolumen um das Bohrloch. In Anbetracht der Ausrichtung der Bohrungen sind deshalb die Messungen nicht repräsentativ für grössere Gesteinsvolumen. Die gemessenen Druckhöhen ergeben ein Druckgefälle zum Freispiegelstollen hin, der Stollen wirkt somit drainierend.

Erste hydrogeologische Modellrechnungen zur Abschätzung der regionalen Grundwasserströmungsverhältnisse (stark vereinfachendes, zweidimensionales Fliessmodell) zeigen, dass der Freispiegelstollen als starke Senke wirkt, die den Gebirgswasserfluss weitgehend drainiert. Für den potentiellen Endlagerbereich bedeutet dies, dass die Freisetzungspfade direkt in den Freispiegelstollen münden, dieser wirkt somit als Kurzschluss zur Biosphäre.

2.4 Standort Wellenberg

Der Standort Wellenberg wurde im Jahre 1987 als vierte Option im Untersuchungsprogramm für ein Endlager für kurzlebige radioaktive Abfälle vorgeschlagen. Die Nagra beantragte ein umfangreiches Untersuchungsprogramm, dessen 1.Phase erfolgreich abgewickelt werden konnte. Es umfasste folgende Arbeiten:

- Geologische Detailkartierung
- Regionale Strukturstudie zusammen mit Oberbauenstock
- Hydrogeologischer Kataster und Quellenmessungen
- Piezometerbohrungen im Engelbergertal
- Bodengasmessungen
- Geodätische Vermessung der Rutschmasse Altzellen
- Reflexionsseismische- und refraktionsseismische Aufnahmen
- 5 Sondierbohrungen mit zugehörigem Untersuchungsprogramm

Da am Standort Wellenberg Untertagebauten fehlen, wurde das Untersuchungsprogramm von der Erdoberfläche aus entsprechend breit konzipiert. Die Feldarbeiten konnten im wesentlichen im Sommer 1993 abgeschlossen werden, die Auswertungen dauern voraussichtlich bis Frühjahr 1994. Eine erste Zusammenstellung der geologischen Grundlagen wurde kürzlich von der Nagra vorgelegt [3]. Nachfolgend wird eine Übersicht über die Untersuchungsergebnisse gegeben.

Die geologische Situation am Standort Wellenberg ist ähnlich den Verhältnissen am Standort Oberbauenstock. Die Drusberg-Decke bildet im Gebiet grosse liegende Falten, die verhältnismässig einfach gebaut sind. Das potentielle Endlager kommt in die Kreidemergel an der Basis der Drusberg-Decke zu liegen. Palfris-Formation und Vitznau-Mergel als Wirtgestein ("Valanginienmergel") bilden dabei den Abscherhorizont der Decke.

Im Süden grenzt die Drusberg-Decke an die Axen-Decke, die im Gebiet des Wellenbergs einen gänzlich anderen Aufbau als am Oberbauenstock zeigt. Man beobachtet enggedrängte, liegende Falten, die zusätzlich durch flach einfallende Überschiebungen zerschert wurden. Diese Überschiebungen setzen sich ins Wirtgestein fort, die Nagra nimmt an, dass sie die Überschiebungsfläche zerschneiden und somit jünger als diese sind. Die liegenden Falten der Axen-Decke im Gebiet der Walenstöcke werden mit dem Axen-Südlappen parallelisiert, der Axen-Nordlappen keilt bei der Sinzgäuer-Schonegg aus.

Der Wirtgesteinskörper der Palfris-Formation und der Vitznau-Mergel ist im Gebiet des Wellenbergs ausserordentlich mächtig entwickelt (etwa 1000 m). Die ursprüngliche Ablagemächtigkeit dieser Formationen wird auf lediglich knapp 300 m geschätzt, das grosse Mergelvorkommen wurde somit durch tektonische Vorgänge angehäuft. Tektonische Modelle, die den inneren Aufbau des Mergelvorkommens interpretieren, sind gegenwärtig noch in Diskussion. Die Grenzen des Wirtgesteinskörpers sind im Standortgebiet schlecht abgeschlossen. Seismische Aufnahmen und Bohrdaten erlauben es jedoch, den Spielraum der möglichen Varianten auf ein für das Projekt erforderliches Mass einzuengen.

Östlich und westlich des Standortgebietes beobachtet man grosse Schollen aus stark deformierten Gesteinen des Malms, die in die Kreidemergel eingebettet sind. Die Herkunft und tektonische Entwicklung dieser Malm-Schuppen ist unsicher, sie stammen entweder vom Dach der Axen-Decke oder von der Basis der Drusberg-Decke. Die Sondierungen haben bislang am Wellenberg keine Hinweise auf solche Schollen geliefert, gemäss den tektonischen Modellen sind sie aber möglich. Die diesbezüglichen Arbeiten der Nagra dauern noch an.

Im Nebengestein des Mergels beobachtet man zahlreiche Störungszonen. Einerseits grosse Überschiebungen, die das Mergelvorkommen flach gegen SSE einfallend durchschneiden, andererseits zahlreiche steile Störungszonen unterschiedlicher Richtung, die offenbar auch den Mergel durchsetzen. Die steilen Störungen können mit vertikalen Bohrungen nur selten erfasst werden und auch die Reflexionsseismik kann sie bei den komplexen Verhältnissen am Wellenberg kaum abbilden. Im Nebengestein beobachtet man Abstände dieser Störungen von einigen hundert Metern. Für die Sicherheitsbetrachtung sind Ausbildung und Hydraulik dieser steilen Störungen aber von grosser Bedeutung, da sie wichtige potentielle Wasserfliesswege darstellen. Eine präzise Charakterisierung dieser Störungen wird späteren Sondierungen vorbehalten sein (Schrägbohrungen, Stollen). Einige Überschiebungen konnten im Kernmaterial der Bohrungen studiert werden; sie sind hydraulisch kaum wirksam.

Die hydrogeologischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Mergel sehr gering durchlässig sind. Unterhalb der oberflächennahen, aufgelockerten Schichten wurden Durchlässigkeiten von 10^{-9} bis 10^{-12} ms^{-1} gemessen. Es wurden 3 Typen wasserführender Systeme erkannt: Kataklastische Störungszonen, diskrete Scherzonen und geklüftete Kalkbänke. Die Wasserzuflüsse erfolgten bevorzugt längs kataklastischer Zonen. In den Bohrungen wurde ein mittlerer Abstand der Zuflüsspunkte von rund 40m ermittelt, wobei die Zuflüsse in oberflächennahen Bereichen grösser sind. Im zentralen Bereich des Mergelvorkommens sind Zuflüsse selten und gering.

Die Messungen der hydraulischen Potentiale ergaben für den geringdurchlässigen, zentralen Teil des Mergels extrem tiefe Werte. In den Kalken und Kalkmergeln im Liegenden steigen die Potentiale an und erreichen artesische Werte. Noch tiefer im Subhelvetikum nehmen die Potentiale wiederum ab.

Die hydrochemischen Untersuchungen der Grundwässer weisen auf ein Grundwasser-Fliesssystem mit verschiedenen Stockwerken hin. Unter einer geringmächtigen Zone mit oberflächennahen Ca-HCO₃-Wässern liegt eine mächtige Zone mit Na-HCO₃-Wässern, deren Alter im unteren Bereich der Zone auf 35-400 Jahre geschätzt wird. Dieses Stockwerk steht vermutlich teilweise mit den oberflächennahen Grundwässern in Verbindung. Die untere Grenze der Zone kann mit Bohrungen nicht genau festgelegt werden. Es ist möglich, dass sie entlang durchlässiger Strukturen tiefer in den Mergel eindringt. Das potentielle Lagerareal kommt an die untere Grenze dieses Grundwasser-Stockwerks zu liegen. Unter dieser Zone beobachtete man hoch mineralisierte NaCl-Wässer. Isotopen-Analysen dieser Wässer ergeben Hinweise auf sehr hohe Alter, respektive auf lange Verweilzeiten im Gestein. Die Zone

der NaCl-Wässer fällt mit der oben erwähnten Potentialsenke zusammen. In den durchlässigen Kalken im Liegenden des Wirtgesteins (Öhrli- und Troskalk) wurden wiederum NaHCO₃-Wässer ermittelt. Diese unter artesischem Druck stehenden Wässer sind vermutlich durch gut durchlässige Schichten mit einem höher liegenden Infiltrationsgebiet verbunden. Das Alter dieser tiefen Na-HCO₃-Wässer wird auf einige tausend Jahre geschätzt.

In zwei mächtigen Sandstein-Komplexen im liegenden Tertiär (Flysch-Mélange und Parautochthon) wurde Erdgas angetroffen. Es wurden zwei Fördertests durchgeführt, die untere Sandsteinlage lieferte dabei etwa 19'500 m³ Erdgas, das abgefackelt wurde.

Die Rutschmasse Altzellen am westlichen Abhang konnte mit den Bohrungen genauer abgeklärt werden. Die Basis der Rutschmasse wurde in der Bohrung SB6 bei 260 m Tiefe angetroffen. Die geodätische Vermessung des Gebietes zeigte, dass zur Zeit nur unbedeutende Bewegungen stattfinden. Stabilitätsberechnung des Rutschkörpers ergaben, dass die Rutschmasse nur durch Erosion des Hangfusses, d.h.durch Ausräumung der Talfüllung instabil werden könnte. Aus quartärgeologischen Studien an Kernen der Bohrung SB6 konnte geschlossen werden, dass die Rutschung vom Gletscher der Würm-Eiszeit überfahren und vorbelastet wurde. Die Hauptmasse der Rutschung ist also bereits vor der letzten Eiszeit entstanden.

2.5 Bewertung des Kenntnisstandes

Wie aus den vorangehenden Beschreibungen hervorgeht, haben die von der Nagra durchgeführten Untersuchungen die Kenntnisse über die vier Standorte erheblich verbessert. Obwohl an jedem Standort noch verschiedene Fragen offen sind, sind die Kenntnisse nun genügend, um eine erste Beurteilung und einen fundierten Vergleich der Standorte vorzunehmen. Es ist sinnvoll, auf dieser Basis jenen Standort auszuwählen, an welchem vertiefte Erkundungen im Hinblick auf die Realisierung des SMA-Endlagers vorgenommen werden sollen. Diese weiteren Arbeiten sollen dann zur Klärung der noch offenen Fragen zum gewählten Standort dienen.

3. BEURTEILUNGSKRITERIEN

3.1 Grundlagen

Auch kurzlebige radioaktive Abfälle sollen in der Schweiz mittels geologischer Endlagerung beseitigt werden. Dabei soll die sichere und dauernde Beseitigung der radioaktiven Abfälle gewährleistet werden, ohne dass langfristige Massnahmen zur Überwachung bzw. Instandhaltung des Endlagers erforderlich sind.

Die Kriterien, nach welchen die HSK die Langzeitsicherheit eines Endlagers beurteilt, sind in der Richtlinie R-21 [11] festgehalten. Die HSK wird diese Kriterien bei der Begutachtung der Bewilligungsgesuche (Rahmen-, Bau-, Betriebs- und Verschlussbewilligung) von Endlagerprojekten anwenden. Die in Frage stehende Standortwahl erfolgt zu einem Zeitpunkt, zu welchem die Kenntnisse über die Standorte noch unvollständig sind und kaum eine fundierte Sicherheitsanalyse erlauben. Die Beurteilung der Standorte im Hinblick auf die Standortwahl erfolgt deshalb aufgrund der vorgefundenen Verhältnisse. Als Beurteilungskriterien werden Eigenschaften herangezogen, die gute Voraussetzungen für den späteren Nachweis der Endlagersicherheit bilden.

Ein Endlagersystem besteht im wesentlichen aus den technischen (Abfallmatrix, Behälter, Kavernenverfüllung und Auskleidung) und aus den natürlichen Barrieren (Wirtgestein, umliegende geologische Schichten). Bei der Standortwahl werden die natürlichen Barrieren angesprochen. Hinsichtlich der Langzeitsicherheit soll das geologische Umfeld das Endlager vor äusseren Einwirkungen schützen, günstige Bedingungen für die technischen Barrieren bieten und eine genügende Migrationsbarriere gegen freigesetzte Radionuklide darstellen. Das geologische Umfeld soll ferner die Realisierung des Endlagers mit vernünftigem Aufwand und guter Sicherheit erlauben.

Die Kriterien, welche die HSK zu qualitativen Beurteilung der Standorte hinsichtlich Langzeitsicherheit bzw. Sicherheit von Bau und Betrieb heranzieht, sind in den folgenden Abschnitten 3.2 und 3.3 erläutert. Zusätzlich zu diesen Kriterien, welche sich auf die nukleare Sicherheit beziehen, gelten für die Standortwahl weitere Kriterien (z.B. hinsichtlich Umweltverträglichkeit und Raumplanung), welche die HSK nicht zu berücksichtigen hat.

3.2 Kriterien zur Langzeitsicherheit

Hinsichtlich der im Vordergrund stehenden Langzeitsicherheit sind folgende Standorteigenschaften von Vorteil:

- Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins: Das Wirtgestein soll ein möglichst grosses Volumen aufweisen, damit die Lagerkavernen optimal angelegt werden können. Ein ausgedehntes Lagerareal erlaubt es, allfälligen Störzonen auszuweichen. Der Migrationspfad von Radionukliden, welche im Laufe der Zeit aus dem Endlager freigesetzt werden, soll

genügend lange im Wirtgestein verlaufen. Das Wirtgestein soll entweder kein Wasser führen, oder Sorptionseigenschaften aufweisen, die eine wirksame Rückhaltung von freigesetzten Radionukliden bewirken.

- Hydrogeologische Verhältnisse: Der Wasserfluss durch den potentiellen Endlagerbereich soll gering sein. Kleine Gradienten und geringe Durchlässigkeiten sind diesbezüglich von Vorteil. Die Tiefenwasserströmung ab dem potentiellen Endlagerbereich soll langsam erfolgen. Eine Verdünnung des Wasserpfades vor dem Eintritt in die Biosphäre ist günstig.
- Neotektonische Situationen und Langzeitentwicklung: Voraussagen zur Langzeitentwicklung werden leichter, wenn das Standortgebiet tektonisch ruhig ist. Die Gefahr, dass bei seismischen Ereignissen Störungszonen reaktiviert oder neu gebildet werden, soll gering sein. Die Überdeckung des Endlagers soll genügend gross sein, damit keine Freilegung während der zu betrachtenden Endlagerdauer erfolgen kann.
- Konflikte mit anderen Nutzungen: Potentielle Rohstoffgebiete sollen nach Möglichkeit gemieden werden. Dadurch soll einerseits das Risiko für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den potentiellen Endlagerbereich minimiert werden, andererseits soll die zukünftige Nutzung von Bodenschätzen nicht unnötig eingeschränkt werden.
- Explorier- und Prognostizierbarkeit: Der strukturelle Aufbau und die Eigenschaften des Wirtgesteins und der umliegenden Formationen sollen ermittelt werden können, ohne dass der Sicherheit abträgliche Perforationen erforderlich sind. Standorte mit einfachem strukturellen Aufbau sind von Vorteil, da die Zuverlässigkeit von Prognosen besser ist und somit das Ausmass der notwendigen Sondierungen klein gehalten werden kann. Die Topographie des Standortgebietes soll die Durchführung der erforderlichen Sondierungen ermöglichen.

3.3 Kriterien zur Sicherheit von Bau und Betrieb

Hinsichtlich der bautechnischen Machbarkeit und der betrieblichen Sicherheit des Endlagers sind folgende Standorteigenschaften von Vorteil:

- Bautechnische Eignung des Gesteins: Für den Vortrieb des Zugangsstollens und das Ausbrechen der Endlagerkavernen sind standfeste Gesteine vorteilhaft. Technische Massnahmen zur Gewährleistung der erforderlichen Standfestigkeit sind jedoch möglich, dürfen aber die Langzeitsicherheit nicht gefährden. Die Auflockerungszonen um die Hohlräume sollen begrenzt bleiben. Das Risiko von massiven Wassereintritten oder Gasaustritten soll gering sein.
- Versiegelungsfähigkeit: Es soll möglich sein, die Endlagerkavernen, den Zugangsstollen und Erkundungsbohrungen so zu verfüllen und versiegeln, dass langfristig kein Kurzschluss zwischen dem Endlager und der Biosphäre entsteht.

- Erschliessung für Schwertransporte: Kurze und risikoarme Transportwege von radioaktiven Abfällen zum Endlager sind von Vorteil.
- Gefährdung der Portalzone: Die Portalzone soll derart angelegt werden können, dass das Endlager nicht durch äussere Ereignisse (z.B. Überschwemmung, Hangrutsch, Erdbeben etc.) gefährdet wird.

3.4 Vergleich mit den Kriterien der Nagra

Die Kriterien, welche die Nagra zur Beurteilung der Standorte anwendet, sind im Kapitel 7 des Vorberichtes zur Standortwahl [1], bzw. im Kapitel 9 der vergleichenden Beurteilung [2] aufgeführt. Wie aus der untenstehenden Gegenüberstellung hervorgeht (Tab. 3-1), erfolgt die Standortbeurteilung durch die Nagra hinsichtlich Langzeitsicherheit und bautechnischer Realisierbarkeit weitgehend anhand derselben Kriterien wie die HSK.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der von der HSK bzw. Nagra herangezogenen Kriterien zur Standortbeurteilung hinsichtlich Langzeitsicherheit und baulicher Realisierbarkeit.

Kriterien HSK	Kriterien Nagra
Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins	Geometrie des Wirtgesteins
Hydrogeologische Verhältnisse	Hydrogeologische Situation
Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung	Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit
Konflikte mit anderen Nutzungen	Menschliches Eindringen / Kollision mit anderen Nutzungen
Explorier- und Prognostizierbarkeit	Explorierbarkeit, Kenntnisstand
--	Spezielle Aspekte der Langzeitsicherheit
Bautechnische Eignung des Gesteins	Bautechnische Aspekte
Versiegelungsfähigkeit	Versiegelung der Zugänge
Erschliessung für Schwertransporte	Verkehrerschliessung, Transportaspekte
Gefährdung der Portalzone	Standort bezogene technische Aspekte, Erdbebenrisiko, Klima bedingte Behinderungen
--	Referenzprojekte im Ausland

Die Nagra zieht die Prognostizierbarkeit nicht explizit als Kriterium heran. Wegen der voralpinen bzw. alpinen Lage der vier Standorte ist die Prognostizierbarkeit an jedem Standort eher schlecht, was aber für das vorgesehene SMA-Endlager kein Ausschlussgrund bedeutet.

In den eingehenden Standortbeurteilungen bewertet die Nagra die Prognostizierbarkeit der verschiedenen Eigenschaften.

Die Nagra zieht indessen spezielle Aspekte der Langzeitsicherheit in Betracht. Solche Betrachtungen stellen einen ersten qualitativen Schritt in Richtung der späteren quantitativen Sicherheitsanalyse dar und sind somit für die Standortbeurteilung geeignet.

Zur Beurteilung der bautechnischen Realisierbarkeit zieht die Nagra allfällige ausländische Referenzprojekte in Betracht. Da im Falle bestehender Referenzprojekte davon profitiert werden kann, ist es sinnvoll, diesen Aspekt zu berücksichtigen.

Darüber hinaus verwendet die Nagra eine Reihe von Beurteilungskriterien, welche sich auf die Umweltverträglichkeit und auf die Raumplanung beziehen. Die HSK anerkennt die Notwendigkeit, die Standorte auch hinsichtlich solcher Aspekte zu beurteilen; sie ist aber für deren Beurteilung nicht zuständig.

Die nachfolgende Beurteilung der Standorte erfolgt anhand der in Tabelle 3-1 aufgelisteten Kriterien mit Ausnahme der Versiegelungsfähigkeit und der Gefährdung der Portalzone. Mit dem heutigen Kenntnisstand erwartet die HSK keinen entscheidenden Ausscheidungsgrund aus diesen beiden Kriterien. Die Versiegelung der Zugänge zum künftigen Endlager ist in der weiteren Projektabwicklung standortspezifisch zu untersuchen. Ebenfalls sind dabei standortspezifische Massnahmen gegen eine allfällige Gefährdung der Portalzone zu treffen.

4. BEURTEILUNG DER STANDORTE

4.1 Standort Bois de la Glaive

Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse ist das Wirtgesteinsvolumen ausreichend. Allerdings beobachtet man im Nebengestein zahlreiche Störungen, deren Fortsetzung ins Wirtgestein unklar ist. Wenn solchen Störungen ausgewichen werden müsste, würde das Raumangebot eingeschränkt und entsprechend knapp.

Der Anhydrit wird stellenweise von zum Teil offenen Klüften durchsetzt. Die hydrogeologische Erkundung hat aber gezeigt, dass diese Kluftsysteme in sich abgeschlossen und auf den Anhydritkörper beschränkt sind. Der Anhydrit enthält einen erheblichen Anteil an Begleitgesteinen (Sandsteine, Dolomite etc.), doch wurden nie grössere Kompartimente beobachtet. Tektonisch eingeschuppte grössere Fremdgesteinslinsen scheinen im Untersuchungsgebiet nur selten aufzutreten.

Die Sorption des Anhydrits beschränkt sich weitgehend auf den Tonmineralgehalt der Begleitgesteine, der reine Anhydrit sorbiert schlecht. Dies ist jedoch von untergeordneter Bedeutung, da ein Anhydritvorkommen trocken sein soll, damit es für ein Endlager geeignet ist.

Hydrogeologische Verhältnisse

Die hydrogeologische Erkundung hat gezeigt, dass der Anhydritkörper zumindest im Gebiet der Bohrungen, heute ein abgeschlossenes hydraulisches System bildet. Das Gestein enthält offene Klüfte, deren Reichweite wird aber aufgrund der hydraulischen Tests auf wenige Dekameter geschätzt. Die Tests deuten darauf hin, dass mit der Bohrung AN-13 solche Systeme geöffnet und Bohrspülung in die offenen Klüfte verpresst wurde. Die hydraulischen Potentiale mit Werten weit unterhalb des regionalen Vorfluters (Lac Léman) bestätigen ebenfalls das Modell abgeschlossener Systeme. Im topographisch hoch liegenden Gebiet des Bois de la Glaive ist allerdings mit grossen Gradienten zu rechnen. Schlüssige Aussagen zur Hydrogeologie des über der Talsohle liegenden Anhydritkörpers könnten nur mit entsprechenden Bohrungen gewonnen werden.

Die oberflächennahe Verkarstung greift lokal maximal 100 m tief in den Anhydritkörper. Dies ist angesichts der 300-500 m mächtigen Überdeckung verhältnismässig viel. Die Problematik der Selbstheilung offener Strukturen ist komplex, das Modellieren solcher Prozesse für die Langzeitanalyse heikel. Die nötigen standortbezogenen Daten fehlen noch weitgehend.

Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung

Das Gebiet des Standortes Bois de la Glaive liegt in einer Zone erhöhter Seismizität. Im Zeitraum von 100 Jahren ist mit einem Erdbeben der Intensität 6,6 (MKS-1964) zu rechnen, im Zeitraum 10'000 Jahre entsprechend Intensität 8,7. Erdbeben dieser Intensität richten an der Erdoberfläche Schäden an und können beispielweise Erdrutsche verursachen. Die Wirkung in Untertagebauten ist in der Regel gering, hängt aber vom Typ der Bebenwellen ab. Die zu erwartenden Belastungen der Stollen- und Kavernen des Endlagers sollten aber bautechnisch beherrschbar sein.

Auf die Frage, ob Erdbeben eine Reaktivierung und Öffnung von Klüften oder Störungen bewirken können, gibt die Nagra keine Hinweise. Dieser Problemkreis sollte genauer abgeklärt werden, er betrifft aber alle Standorte gleichermaßen.

Da das Regenwasser in Dolinen versickert und somit Oberflächengewässer am Bois de la Glaive fehlen, wird die Erosion von Lösungsprozessen bestimmt. Die Nagra schätzt das Eindringen der Vergipsungsfront auf 1-3 mm/Jahr. Wiederum fehlen aber standortspezifische Daten, die eine Modellierung der Vorgänge erlauben würden. Es wird angenommen, dass die Front parallel zur Oberfläche verläuft, da sie an oberflächennahe Spannungsumlagerungen gebunden ist. Die erwähnten Werte für die Abtragung ergeben erst in grösseren Zeiträumen wesentliche Beträge. Offen bleibt, ob nicht lokal, beispielsweise längs zerrüttetem Gebirge entlang von Störungszonen, Wasser tiefer in den Anhydrit eindringen und die Verkarstung auslösen könnte.

Die Wirkung der glazialen Erosion einer zukünftigen Vergletscherung wird für den Anhydrit gleich wie für andere Festgesteine beurteilt. Die diesbezügliche Festigkeit wird durch den Bois de la Glaive demonstriert, der als höchste Erhebung die letzte Eiszeit überstanden hat.

Konflikte mit anderen Nutzungen

Anhydrit ist im Gemisch mit Gips ein Rohstoff, der sowohl in der Gips-, wie auch in der Zement-Industrie verwendet wird. Das Anhydritvorkommen am Bois de la Glaive wurde im zweiten Weltkrieg im Hinblick auf die Schwefelgewinnung abgeklärt. Im benachbarten Gebiet Le Montet wird Gips-Anhydrit für die Gips-Industrie im Tagebau gewonnen. In den Anhydrit-Serien der Trias können Steinsalzlager vorkommen, solche werden beispielsweise im Bergwerk von Bex abgebaut. Im engeren Standortgebiet des Bois de la Glaive wurden bislang keine Hinweise auf grössere Steinsalzvorkommen gefunden. Die Bodengasmessungen zeigten stellenweise hohe Werte für Kohlenwasserstoffe. Da Anhydrit ein Siegelgestein ist, müsste abgeklärt werden, ob Erdgaslager in dieser geologischen Situation möglich sind.

Wenn auch aus heutiger Sicht keine Nutzung des Anhydrit-Gips-Vorkommens am Bois de la Glaive absehbar ist, so muss doch der Rohstoffcharakter des Wirtgesteins eher als Nachteil gewertet werden.

Explorier- und Prognostizierbarkeit

Das Gebiet des Bois de la Glaive ist einigermaßen gut erschlossen und bietet auch von der Topografie her keine unüberwindlichen Probleme. Allerdings sind grosse Teile des Gebietes als Landschaftsschutz- oder Pflanzenschutzgebiet ausgeschieden, was Untersuchungen stark erschweren würde.

Bei der Frage der Prognostizierbarkeit müssen beim Standort Bois de la Glaive zwei Aspekte beachtet werden. Einerseits ist die Prognostizierbarkeit des geologischen Aufbaus zu beurteilen, andererseits müssen Fragen der chemischen Stabilität des Anhydrits diskutiert werden. Der regionale geologische Bau kann nun einigermaßen zuverlässig beurteilt werden. Problematischer sind möglicherweise Prognosen im Kleinbereich, da das Gestein äusserst heterogen aufgebaut ist. Grössere Probleme stellt die Beurteilung der Langzeitstabilität des Anhydrits. Die Präsenz dieses grossen Anhydritvorkommens belegt seine Stabilität über geologische Zeiträume. Prognosen über das zukünftige Verhalten sind jedoch, insbesondere nach dem Bau eines Endlagers, schwierig zu machen, da die entsprechenden Vorgänge mit den heutigen Kenntnissen des chemischen Systems Anhydrit-Gips-Wasser nicht überzeugend modelliert werden können.

Bautechnische Eignung des Gesteins

Das Anhydritgestein hat gute felsmechanische Eigenschaften. Da zudem die Überlagerung der Kavernen nicht übermässig gross ist, sind keine besonderen bautechnischen Schwierigkeiten bei der Erstellung der Kavernen und Stollen zu erwarten.

Probleme bietet bei Bauwerken im Anhydrit die chemische Beständigkeit der Betonteile, da die sulfathaltigen Wässer im Gips-Anhydrit-Gestein äusserst betonaggressiv sind. Durch die unvermeidliche Zufuhr von Feuchtigkeit resp. Wasser während der Bauphase werden später hohe Gebirgsdrucke durch Gipsbildung verursacht, die erhebliche Schäden an den Bauwerken verursachen können.

Erschliessung für Schwertransporte

Der Standort Bois de la Glaive weist gute Erschliessungsmöglichkeiten auf, ist aber weit entfernt von den Kernkraftwerken und Zwischenlagern.

Zusammenfassende Beurteilung Bois de la Glaive

Das Anhydritvorkommen am Standort Bois de la Glaive könnte sich für die Errichtung eines SMA-Endlagers eignen. Das Wirtgesteinsvolumen ist ausreichend und bildet ein abgeschlossenes hydraulisches System. Problematisch ist jedoch der Nachweis dieser Situation

im eigentlichen Lagerareal und insbesondere auch ein entsprechender Nachweis, dass die Verhältnisse nach Verschluss des Lagers erhalten bleiben. Das Risiko, dass vertiefte Erkundungen ungünstige Verhältnisse ergeben, ist verhältnismässig gross. Das Gips-Anhydrit-Gestein und darin zirkulierende Wässer sind chemisch aggressiv; diesem Nachteil müsste mit technischen Vorkehrungen begegnet werden.

Diese Gesamtbeurteilung stimmt weitgehend mit den entsprechenden Aussagen der Nagra überein.

4.2 Standort Oberbauenstock

Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins

Das vorhandene Mergelvolumen ist knapp genügend. Es bestehen grosse Unsicherheiten in bezug auf die Lage der Wirtgesteinsgrenzen. Insbesondere der Verlauf der Deckenüberschiebung an der Basis der Drusberg-Decke ist schwierig zu prognostizieren. Ebenso ist der Verlauf der grösseren Störungszonen auf dem Niveau des Endlagers weitgehend unbekannt. Grössere, steilstehende Störungszonen im Endlagerbereich können deshalb nicht ausgeschlossen werden.

Das Wirtgestein ist sehr heterogen aufgebaut und fast durchgehend verfäلتelt und zerschert. Im Seelisbergtunnel, wie auch in den Bohrungen, liessen sich keine weit durchziehenden Einzelstrukturen beobachten. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Schuppen von Kalkgestein, ähnlich den Vorkommen des Singtäus, in die Mergel eingestreut sind.

Das Sorptionsvermögen des Mergels ist bei hohem Tongehalt gut, mit zunehmendem Kalkgehalt werden die Sorptionseigenschaften aber schlechter.

Hydrogeologische Verhältnisse

Es bestehen sehr heterogene hydrogeologische Verhältnisse. Das Gestein ist im allgemeinen wenig durchlässig, stellenweise wurden aber auch hohe Durchlässigkeiten (bis 10^{-7} ms^{-1}) gemessen. Es gelang meist nicht, diese Werte einzelnen Strukturen zuzuweisen. Im Mergel wurden extrem tiefe hydraulische Potentiale festgestellt, die Ursachen dieser Drucksenke wurden bislang nicht klar herausgearbeitet. Im liegenden Diphyoides-Kalk erreichte das hydraulische Potential ungefähr die Werte des Seespiegels des Urnersees. Die Fliesswege zu den durchlässigen Kalken im Liegenden sind verhältnismässig kurz. Es ist unklar, wie weit die hydraulischen Verhältnisse durch den Bau des Seelisbergtunnels gestört wurden. Der Mergel ist stellenweise stark Erdgas führend, das Gas stammt teilweise aus dem Gestein selbst, teilweise wird es aus grösserer Tiefe zugeführt. Die Modellierung der Grundwasserströmung muss aufgrund des Gases möglicherweise einen Zweiphasenfluss berücksichtigen.

Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung

Das Gebiet des Standortes Oberbauenstock liegt in einer Zone leicht erhöhter Seismizität. Im Zeitraum von 100 Jahren ist mit einem Erdbeben der Intensität 6,3 (MKS-1964) zu rechnen, im Zeitraum von 10'000 Jahren entsprechend Intensität 8,7. Erdbeben dieser Intensitäten richten an der Erdoberfläche Schäden an und können beispielsweise Erdrutsche verursachen. Die Wirkung in Untertagebauten ist in der Regel geringer, hängt aber vom Typ der Bebenwellen ab. Die zu erwartenden Belastungen der Stollen und Kavernen des Endlagers sind bautechnisch beherrschbar.

Auf die Frage, ob Erdbeben dieser Stärke eine Reaktivierung und Öffnung von Klüften oder Störungen in tieferen Gesteinsbereichen bewirken können, geht die Nagra nicht ein. Dieser Problemkreis sollte in Zukunft genauer abgeklärt werden, er betrifft alle Standorte gleichermaßen.

Die Langzeitentwicklung wurde im Projekt Gewähr 1985 für einen Zeitraum von 100'000 Jahren untersucht. Wichtigster Faktor war die Erosion des Lagergebietes. Der Gesamtbetrag von Erosion und Denudation wurde auf 0,2 bis einige Millimeter pro Jahr geschätzt. Für den Basisfall der Sicherheitsanalyse wurde schlussendlich angenommen, dass das Lager nach 100'000 Jahren freigelegt wird.

Konflikte mit anderen Nutzungen

Mergel sind grundsätzlich ein Rohstoff für die Zementindustrie. Das Mergelvorkommen am Oberbauenstock eignet sich aber aufgrund seines heterogenen Aufbaus kaum für eine Ausbeutung. Auch ist die topographische Situation dazu völlig ungeeignet.

Die Bodengasmessungen in der Region zeigen lokal sehr hohe Werte. Man muss auf Grund dieser Befunde mit der Möglichkeit von Gaslagerstätten im tieferen Untergrund rechnen. Explorationskampagnen auf Kohlenwasserstoffe dürften sich jedoch aufgrund der schlechten Zugänglichkeit des Gebietes auf benachbarte Regionen konzentrieren. Bohrungen würden in jedem Falle von Standorten in den Talsohlen abgeteuft.

Der Seelisbergtunnel führt verhältnismässig nahe am potentiellen Lagerareal vorbei (500 m). Die HSK betrachtet die Nähe dieser wichtigen Verkehrsverbindung als Nachteil für das Projekt. Der Tunnel bewirkt komplexe hydrogeologische Verhältnisse, da er als Drainage wirkt. In den betrachteten Zeiträumen der Langzeitanalyse ist zudem mit einem Zerfall des Tunnelbauwerkes zu rechnen.

Explorier- und Prognostizierbarkeit

Das Gebiet des Oberbauenstocks eignet sich aus topographischen Gründen schlecht für Explorationskampagnen von der Erdoberfläche aus. Seismische Kampagnen sind möglich,

aber sehr aufwendig; Bohrungen sind nur von weit ausserhalb liegenden Standorten machbar, was sie aufwendig und technisch schwierig macht.

Die schwierigen geologischen Verhältnisse, insbesondere die Unsicherheiten in bezug auf das Streichen der wesentlichen regionalen Strukturen, machen Prognosen heikel. Der heterogene Aufbau des Wirtgesteins macht Voraussagen auch im Kleinbereich schwierig und erschwert den Einsatz geophysikalischer Erkundungsmethoden.

Bautechnische Eignung des Gesteins

Durch den Bau des Seelisbergtunnels konnten die bautechnischen Bedingungen im Mergel, allerdings bei geringerer Überdeckung, abgeklärt werden. Die Standfestigkeit ist in den Tertiär-Gesteinen und im "Valanginienmergel" zwar mässig, doch sind die Verhältnisse mit entsprechenden Einbauten zu meistern. Es ist deshalb nicht mit ausserordentlichen bautechnischen Problemen zu rechnen. Aus den bestehenden Bauwerken ist bekannt, dass betonaggressive Wässer auftreten. Die Lebensdauer der technischen Barrieren wird dadurch begrenzt sein. Die Gasführung des Mergels wird umfangreiche Sicherheitsmassnahmen erfordern, zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Belüftung werden möglicherweise zwei Zugangstollen nötig sein.

Erschliessung für Schwertransporte

Die Erschliessung des Standortes Oberbauenstock für Schwertransporte ist aufwendig.

Zusammenfassende Beurteilung Oberbauenstock

Die Unterkreide-Mergel am Standort Oberbauenstock wären voraussichtlich für die Errichtung eines SMA-Endlagers geeignet. Es bestehen aber wesentliche Unsicherheiten bezüglich der Wirtgesteinsgrenzen. Das Volumen des Wirtgesteins ist nur knapp genügend. Die Ungewissheiten könnten mit Hilfe eines Sondierstollens geklärt werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die mögliche Anordnung der Lagerkavernen im Wirtgestein zu kurze Migrationswege im Wirtgestein ergibt. Die technische Realisierbarkeit ist gegeben.

Diese Gesamtbeurteilung deckt sich weitgehend mit dem Urteil der Nagra.

4.3 Standort Piz Pian Grand

Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins

Die intensiv verfalteten Gneise und Glimmerschiefer der Adula-Decke bilden einen sehr ausgedehnten Gesteinskörper. Für die Beurteilung des Raumangebotes ist jedoch im kristallinen Gestein des Standortes das regionale Bruchmuster entscheidend. Die Untersuchungen zeigen, dass das Gebiet in unterschiedlich grosse Blöcke aufgeteilt ist. Die Maschenweite des Störungsnetzes variiert stark und liegt im Bereich von hundert bis einigen hundert Metern. Für die von der Nagra vorgeschlagene Anordnung der Endlagerzone ergeben sich auf Endlagerkote 1250 m.ü.M. keine günstigen Verhältnisse. Die Platzierung des Zugangsstollens und der Lagerzone müsste diesen Befunden Rechnung tragen und entsprechend überarbeitet werden.

Das Sorptionsvermögen der Gneise ist mässig, es hängt wesentlich von den Kluftbelägen ab.

Hydrogeologische Verhältnisse

Die vorliegenden Daten aus den Kurzbohrungen zeigen, dass die Gneise und Schiefer lokal sehr gering durchlässig sind. Wegen der bescheidenen Reichweite der Tests, die bei den gewählten Bedingungen nur wenige Dezimeter beträgt, sind diese Werte aber kaum repräsentativ für grössere Gesteinsblöcke. Die Bohrungen laufen zudem parallel zur Hauptklüftung des Gesteins. Die Befunde aus dem Freispiegelstollen weisen denn auch in einzelnen Stollenabschnitten auf weit grössere Durchlässigkeiten hin. Die bisherigen Erfahrungen in Kristallingesteinen haben gezeigt, dass die Wasserführung variabel und generell schlecht prognostizierbar ist. Eine präzise Ermittlung der Verteilung der Durchlässigkeiten wird als schwierig beurteilt. Aufgrund des starken Reliefs ist im Gebiet des Piz Pian Grand mit hohen hydraulischen Gradienten zu rechnen.

Der Freispiegelstollen wirkt als hydraulische Senke, er verbindet das Innere des Gebirges direkt mit der Biosphäre. Der Abstand der potentiellen Lagerzone zum Stollen beträgt lediglich 200 m. Dies entspricht somit dem kürzesten Ausbreitungspfad im Gestein. Trotz der Lage tief im Berginnern, ist somit das Endlager nur 200 m weit von der Biosphäre entfernt.

Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung

Das Gebiet des Standortes Piz Pian Grand liegt in einer Zone mässiger seismischer Aktivität. In Zeitraum von 100 Jahren ist mit einem Erdbeben der Intensität 5,9 (MKS-1964) zu rechnen, im Zeitraum 10'000 Jahre mit einer Intensität von 7,8. Erdbeben dieser Intensität richten an der Erdoberfläche mässige Schäden an, die Wirkung in den Untertagebauten ist gering. Allfällige Auswirkungen auf das Endlager wurden von der Nagra nicht untersucht. Messungen der Landestopographie ergaben für das Gebiet des Piz Pian Grand Hebungsraten von

bis zu 1,3 mm/Jahr. Die Neukartierung des Gebietes brachte Hinweise, dass einige Störungen postglaziale Bewegungen aufweisen. Diese jung bewegten Störungen haben Auswirkungen auf die Hydrogeologie des Gebietes, indem Riss- und Kluftbildung und die damit verbundenen Spannungsumlagerungen zu einer zunehmenden Durchlässigkeit des Gesteins führen können. Aufgrund der Nähe des Freispiegelstollen ist diese junge Kluftbildung gravierend, da leicht Kurschlüsse zum Stollen und damit zur Biosphäre möglich sind. Die aktive Neotektonik ist für diesen Standort negativ zu werten.

Konflikte mit anderen Nutzungen

Mit Ausnahme der Mineralquelle von San Bernardino sind im Standortgebiet keine Bodenschätze bekannt. Ein Nutzungskonflikt besteht möglicherweise bezüglich der Wasserkraftanlagen.

Explorier- und Prognostizierbarkeit

Der Standort Piz Pian Grand liegt in hochalpinem Gelände, die Überdeckung des Endlagers erreicht 1400 m. Das über dem Lagerareal liegende Gebiet ist für Fahrzeuge nicht zugänglich. Sondierkampagnen von der Erdoberfläche sind deshalb nur mit unverhältnismässig grossem Aufwand möglich. Auf diese Schwierigkeiten hat die HSK bereits im Stollengutachten hingewiesen.

Die Oberflächengeologie konnte nicht mit den geologischen Aufnahmen des Freispiegelstollens korreliert werden. Es ist unsicher, ob das Störungsmuster, welches an der Erdoberfläche kartiert wurde, auf die Lagerebene extrapoliert werden kann. Aus diesem Blickwinkel muss die Prognostizierbarkeit eher als schlecht bezeichnet werden.

Bautechnische Eignung des Gesteins

Beim Bau des Freispiegelstollens traten beim Vortrieb in der Zone der Schiefergneise beträchtliche Firststeinbrüche auf. Das Ausmass des Schichtzerfalls im First reichte vom Ablättern der Schichten bis zum Einbruch ganzer Firstpartien, wobei eine ausgeprägte, beinahe senkrecht stehende Längsklüftung sichtbar wurde. Diese Erscheinungen weisen auf beträchtliche Gebirgsspannungen hin. Der Stollen wurde deshalb über weite Strecken durch aufwendige Stahleinbauten gesichert. Die helleren, feldspatreichen Gneise zeigten eine bessere Standfestigkeit. Aber auch in diesen Gesteinen waren streckenweise Felsanker erforderlich. Der Stollen wurde auf der ganzen Länge mit einer kreisförmigen Betonverschalung (Wandstärke 50 cm) ausgekleidet.

Die bautechnischen Verhältnisse müssen bei diesem Standort als schwierig eingestuft werden. Es ist mit aufwendigen, durch die grosse Auflockerung auch sicherheitsmässig problematischen Verhältnissen zu rechnen.

Erschliessung für Schwertransporte

Der Standort Piz Pian Grand ist durch eine dezentrale und hochalpine Lage gekennzeichnet, die hinsichtlich Erschliessung ungünstig ist. Die Zugänglichkeit ist im Winter stark erschwert.

Zusammenfassende Beurteilung Piz Pian Grand

Das Wirtgesteinsvolumen am Standort Piz Pian Grand ist sehr gross. Es ist lokal wenig durchlässig und könnte sich aus diesem Blickwinkel für die Errichtung eines SMA-Endlagers eignen. Allerdings ist die Prognostizierbarkeit des Kristallingesteins schwierig, was die Realisierung aufwendig macht. Das Gebiet wird von einem engmaschigen Störungsnetz durchzogen; dies macht die Platzierung des Zugangsstollens und der Lagerkavernen heikel. Die beobachtete neotektonische Aktivität wird als Nachteil beurteilt. Der Nachweis der Langzeitsicherheit wird unter diesen Umständen schwierig zu erbringen sein. Die Realisierung ist technisch möglich, die geographische Lage des Standortes ist jedoch ungünstig.

Die HSK bewertet die Eignung des Standortes Piz Pian Grand kritischer als die Nagra. Hauptgrund dafür ist die unterschiedliche Einschätzung der Auswirkungen der Neotektonik und die schlechte Prognostizierbarkeit.

4.4 Standort Wellenberg

Ausdehnung und Qualität des Wirtgesteins

Das vorhandene Mergelvolumen ist genügend ausgedehnt, es bestehen Reserven die eine flexible Anordnung der Lagerkavernen erlauben. Da auch die südlich angrenzenden Gesteine des Tertiärs der Axen-Decke gute Gesteinseigenschaften aufweisen, ergibt sich zusätzlicher Raum. Die Grenzen des Wirtgesteins sind genügend präzise erfasst, Unsicherheiten bestehen vor allem in tieferen, weit unterhalb der Endlagerebene liegenden Bereichen.

Unklar ist die Auswirkung steilstehender Störungszonen auf das Raumangebot. Die im Nebengestein beobachteten Störungen zeigen allerdings Abstände, die keine grösseren Probleme erwarten lassen. Das Risiko, dass im Wirtgesteinskörper Malmkalkschuppen auftreten, kann mit den heutigen Kenntnissen schlecht abgeschätzt werden. Aufgrund der tektonischen Vorstellungen sind solche Schuppen möglich. Sie bilden vor allem ein Risiko, wenn sie Gas enthalten oder Wasser führen. Eine Klärung dieser Problematik wird wie beim Standort Oberbauenstock, erst nach Vortrieb des Sondierstollens oder durch Schräg- resp. Horizontalbohrungen möglich sein.

Das Wirtgestein ist an der Erdoberfläche nur selten aufgeschlossen. In den Bohrungen erwies es sich als sehr inhomogen, die ursprüngliche Schichtung ist in weiten Bereichen durch die tektonische Beanspruchung zerstört. Dadurch wird andererseits die Ausbildung von Fließwegen längs weit durchziehenden Kalkbänken unwahrscheinlich.

Die mächtige Rutschmasse von Altzellen ist gemäss den vorliegenden Vermessungen heute ruhig. Stabilitätsberechnungen der Rutschmasse zeigten, dass nur bei Ausräumung des Engelbergertales eine Wiederbelebung des Rutschkörpers angenommen werden muss. Der Rutschkörper ist allerdings aufgelockert und führt Wasser.

Wie für den Standort Oberbauenstock ist das Sorptionsvermögen des Mergels bei hohem Tongehalt gut.

Hydrogeologische Verhältnisse

Die Mergel erwiesen sich im grossen Ganzen als sehr gering durchlässig. Es konnten drei Typen wasserführender Systeme erkannt werden, am wichtigsten waren die kataklastischen Störungszonen, die die meisten Zuflussstellen verursachten. Im zentralen Bereich des Mergels beobachtete man eine ausgeprägte Zone niedriger hydraulischer Potentiale. Unterhalb dem Wirtgestein stiegen die Potentiale in den Kalkgesteinen auf artesische Werte an. Die hydrochemischen Untersuchungen weisen auf drei übereinanderliegende Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichem Wasserchemismus. Für die hochmineralisierten Wässer im zentralen Bereich des Mergels wird ein hohes Alter vermutet.

Aufgrund der hydrogeologischen Daten und der darauf aufbauenden Modellierung kann im weiteren Endlagerbereich mit günstigem und geringem Wasserfluss gerechnet werden. Die hydraulischen Potentiale weisen auf eine Südost-Nordwest gerichtete Strömung im Wirtgestein. Die gegenwärtige Situation mit einer hydraulischen Senke im zentralen Teil des Wirtgesteins wäre für das Endlager günstig, kann aber nicht unbesehen in die Zukunft projiziert werden. Offen ist allerdings, ob nicht steilstehende, durchlässige Störungszonen Kurzschlüsse zur Erdoberfläche bewirken. Letzteres kann aber mit den zur Verfügung stehenden Daten nicht abschliessend beurteilt werden, denn die Reichweite der hydraulischen Tests übersteigt selten einige Meter.

Die Mergel enthalten stellenweise Erdgas und auch im Liegenden (Tertiär) treten eigentliche Gasvorkommen auf. Auch die Bodengasmessungen zeigen stellenweise hohe Werte. Die Gasdurchlässigkeit des Mergels ist positiv zu werten, da damit das Korrosionsgas des Endlagers vom Lager wegströmen kann.

Neotektonische Situation und Langzeitentwicklung

Das Gebiet des Wellenbergs liegt in einer Zone leicht erhöhter Seismizität. Im Zeitraum von 100 Jahren ist mit einem Erdbeben der Intensität 6,4 (MKS-1964) zu rechnen, im Zeitraum

10'000 Jahre entsprechend 8,7. Erdbeben dieser Stärke richten an der Erdoberfläche Schäden an und können beispielsweise zu Erdrutschen führen. Die Auswirkungen in tiefliegenden Untertagebauten sind geringer als bei Oberflächenbauten, doch ist das Schadenausmass von der Entfernung zum Epizentrum und auch vom Typ der Bebenwellen abhängig.

Auf die Frage, ob Erdbeben dieser Stärke eine Reaktivierung und Öffnung von Klüften oder Störungen in tieferen Gesteinbereichen bewirken können, geht die Nagra nicht ein. Dieser Problemkreis sollte genauer abgeklärt werden, er betrifft alle Standorte gleichermassen.

Die Werte für die gleichmässige Hebung des Gebietes sind vernünftig gewählt, sie decken ein breites Spektrum ab. Die Erosionsszenarien zeigen, dass eine wesentliche Reduzierung der Endlager-Überdeckung nur nach sehr langen Zeiträumen möglich ist, die Analysen gingen zudem von sehr konservativen Annahmen aus. Die Nagra hat Effekte der Glazial-Isostasie (stärkere Eisbelastung in den Tälern) nicht betrachtet; man sollte bei tektonischen Interpretationen entsprechende Effekte im Auge behalten.

Konflikte mit anderen Nutzungen

Mergel gelten grundsätzlich als Rohstoff für die Zementindustrie. Das Mergelvorkommen am Wellenberg eignet sich aber aufgrund des heterogenen Aufbaus kaum für diesen Zweck, die Karbonatgehalte dürften zudem ungenügend sein. Andere mineralische Rohstoffe sind nicht bekannt.

In den tertiären Formationen des Parautochthons wurden in Sandsteinlagen Gasvorkommen erschlossen. Die in Sondierbohrung SB1 ermittelten Gasmengen waren allerdings für eine Ausbeutung ungenügend. Es wird vermutet, dass im tieferen Untergrund des Gebietes grössere Erdgaslagerstätten vorliegen könnten. Entsprechende Konzessionen liegen in der Hand des Tiefengaskonsortiums (TGK). Das engere Gebiet des Wellenbergs eignet sich allerdings nicht für die Erschliessung allfälliger Vorkommen, entsprechende Bohrungen würden in jedem Falle von Standorten in der Talsohle abgeteuft.

Explorier- und Prognostizierbarkeit

Das Gebiet des Standortes Wellenberg ist verhältnismässig gut erschlossen. Trotz des topographisch eher schwierigen Geländes können Sondierungen von der Erdoberfläche aus an den erforderlichen Orten ausgeführt werden.

Die geologischen Verhältnisse sind teilweise kompliziert, insbesondere bestehen Unsicherheiten in Bezug auf das Streichen der regionalen Strukturen. Die Prognosen sind deshalb eher schwierig, das grosse Raumangebot erlaubt allerdings bei diesem Standort ein flexibles Vorgehen. Der heterogene Aufbau des Wirtgesteins macht Prognosen auch im Kleinbereich heikel und erschwert den Einsatz geophysikalischer Erkundungsmethoden.

Bautechnische Eignung des Gesteins

Die bautechnischen Bedingungen sind den Verhältnissen am Standort Oberbauenstock vergleichbar. Die Bohrungen brachten standortspezifische Daten, die diesen Schluss stützen. Es muss somit nicht mit ausserordentlichen bautechnischen Problemen gerechnet werden. Vermutlich treten betonaggressive Grundwässer auf, welche die Lebensdauer der technischen Barrieren vermindern. Für die Zeit der Offenhaltung der Kavernen ist dies aber ohne Bedeutung.

Die Gasführung des Mergels könnte lokal gross sein. Dies wird umfangreiche Sicherheitsmassnahmen erfordern. Zur Aufrechterhaltung eines genügenden Belüftungsstromes werden möglicherweise zwei Zugangsstollen nötig sein.

Erschliessung für Schwertransporte

Die Erschliessungsmöglichkeiten des Standorts Wellenberg für Schwertransporte sind gut; insbesondere lässt sich ein direkter Bahnanschluss leicht verwirklichen.

Zusammenfassende Beurteilung Wellenberg

Das am Standort Wellenberg vorgefundene Mergelvorkommen ist für die Errichtung eines SMA-Endlagers wahrscheinlich geeignet. Das gering durchlässige Mergelvolumen bietet Reserven für die Platzierung der Lagerkavernen, so dass genügend lange Migrationswege gewährleistet werden können. Die Explorationsmöglichkeiten für die vertiefte Erkundung sind gut; das Gebiet ist gut erschlossen. Die Realisierung stellt keine besonderen Probleme.

Diese Gesamtbeurteilung ist weitgehend im Einklang mit der entsprechenden Einschätzung der Nagra.

5. WAHL DES STANDORTES

Es wurden an keinem Standort Verhältnisse gefunden, welche die Realisierung eines sicheren SMA-Endlagers verunmöglichen würden. Allerdings weisen die einzelnen Standorte Unterschiede in der Beurteilung auf, die bei der Auswahl des vertieft zu untersuchenden Standortes zu betrachten sind.

Hinsichtlich der Voraussetzungen für den späteren Nachweis der Langzeitsicherheit stellt der Standort Bois de la Glaive einen speziellen Fall dar. Das Anhydritvorkommen am Bois de la Glaive könnte ausgezeichnete Bedingungen bieten, wenn der Anhydrit wie vermutet kein Wasser führt. Der Nachweis, dass diese Situation zutrifft und für die betrachtete Endlagerdauer unter Einwirkung aller möglichen Vorgänge und Ereignisse erhalten bleibt, ist jedoch schwierig zu erbringen.

Bei den anderen Standorten wird von einer Durchströmung des potentiellen Endlagers ausgegangen. Entscheidend ist dabei, dass der Wasserfluss durch das Endlager gering bleibt und die Migrationswege genügend lang sind und damit eine ausreichende Rückhaltung austretender Radionuklide gewährleisten. Die beiden Standorte Oberbauenstock und Piz Pian Grand weisen verhältnismässig kurze Migrationswege auf, was als Nachteil gewertet werden muss. Bei beiden Standorten wirkt sich die Nähe bestehender Untertagebauwerke mit Auflockerungszonen nachteilig aus.

Offen bleibt bei allen vier Standorten die Bedeutung steilstehender Störungszonen für die Wasserführung. Diese wirken sich vor allem bei den Standorten Oberbauenstock und Bois de la Glaive nachteilig aus, da hier das Raumangebot aufgrund der geologischen Verhältnisse bereits knapp ist. Beim Standort Piz Pian Grand wurden zudem Indizien für junge Bewegungen an diesen steilen Störungen beobachtet. Belastbare Daten zur Bedeutung der steilstehenden Störungen sind erst aus einem Sondierstollen oder allenfalls mit Schrägbohrungen zu erwarten.

Das hydrogeologische Regime zeichnet sich an den drei Standorten Bois de la Glaive, Oberbauenstock und Wellenberg durch Zonen extrem niedrigen hydraulischen Potentials aus. Als Ursache werden Entlastungsvorgänge nach der Eiszeit und die alpinen Hebungen vermutet. Diese hydraulischen Senken sind grundsätzlich positiv für ein Endlagerprojekt, da der Wasserfluss in diese Senken erfolgen würde. Allerdings scheint es aus heutiger Sicht unmöglich, die Langzeitentwicklung dieser Drucksinken zuverlässig abzuschätzen.

Die Rückhaltung der austretenden Radionuklide durch Sorption dürfte in den Mergeln der Standorte Oberbauenstock und Wellenberg am besten sein, geringere Werte sind für die Gneise des Piz Pian Grand zu erwarten. Die Sorptionseigenschaften der Anhydrit-Formation am Bois de la Glaive sind schlecht, was aber nicht von Bedeutung ist, wenn das Wirtgestein kein Wasser führt.

Die Standfestigkeit der untersuchten Wirtgesteine ist unterschiedlich. Es sind aber an keinem Standort Verhältnisse zu erwarten, die sich bautechnisch nicht meistern lassen.

Hinsichtlich des Antransportes der Abfälle bietet der Standort Wellenberg die besten Voraussetzungen. Insbesondere lässt sich hier problemlos ein Anschluss an die Bahn verwirklichen. Der Zugang zum Standort Piz Pian Grand ist im Winter erschwert, die geographische Lage dieses Standortes ist ungünstig.

Aus dieser Zusammenstellung geht hervor, dass der Standort Wellenberg aufgrund des derzeitigen Kenntnisstandes gegenüber den anderen Standorten Vorteile bietet. Das Mergelvorkommen bietet Reserven für die Platzierung des Lagers. Die hydrogeologische Situation ist aufgrund der Befunde als geeignet einzustufen. Die Möglichkeiten der Exploration sind gut. Der Standort bietet auch Vorteile für den Betrieb eines Endlagers. Die HSK nimmt ferner zur Kenntnis, dass der Standort auch hinsichtlich des Umweltschutzes und der Raumplanung positiv beurteilt wird.

Die HSK erachtet deshalb die Wahl des Standortes Wellenberg, der im Hinblick auf die Realisierung des SMA-Endlagers vertieft erkundet werden soll, als zweckmässig. Die Standortauswahl der Nagra kann nachvollzogen werden; sie erfolgte anhand einer vergleichenden Bewertung der vier Standorte mittels geeigneter Kriterien und auf der Basis eines für diesen Zweck genügenden Kenntnisstandes.

6. WEITERES VORGEHEN

Die positive Beurteilung der Standortwahl bedeutet nicht, dass die HSK die Sicherheit eines zukünftigen SMA-Endlagers am Standort Wellenberg jetzt schon beurteilt hätte. Für eine entsprechende Aussage sind eingehendere Erkundungen zur Klärung noch offener Fragen erforderlich.

Basierend auf den bisherigen Kenntnissen hat die Nagra die geologischen Grundlagen und einen Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des potentiellen SMA-Endlagers am Standort Wellenberg zusammengestellt [3]. Zusammen mit der Festlegung des einzulagernden Aktivitätsinventars und der Auslegung der Endlageranlage diente dieser Datensatz als Grundlage für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit [4]. Diese Berichte sind Vorarbeiten im Hinblick auf die für das Rahmenbewilligungsgesuch zu erstellende Dokumentation.

Nach Ansicht der HSK sind nach der abschliessenden Auswertung der bisherigen Sondierungen ausreichende Kenntnisse über den Wellenberg vorhanden, um ein Rahmenbewilligungsverfahren einzuleiten. Die Verhältnisse am Standort Wellenberg deuten darauf hin, dass die Sicherheit des Endlagers mit guter Aussicht erreicht und nachgewiesen werden kann. Das Rahmenbewilligungsgesuch muss von einem dieser Bewilligungsstufen entsprechenden Sicherheitsbericht begleitet sein.

Im Hinblick auf das spätere Gesuch um Baubewilligung sind die heutigen Kenntnisse über den Standort zu vervollständigen. Um die Realisierung des Endlagers nicht unnötig zu verzögern, sollten vertiefte Untersuchungen (weitere Bohrungen, ev. Sondierstollen) parallel zum Rahmenbewilligungsverfahren durchgeführt werden. Diese sollen dazu dienen, noch offene sicherheitstechnische Fragen zu klären und die bauliche Auslegung zu verfeinern.

Würenlingen, den 18. Januar 1994

Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Der Direktor

R. Naegelin

REFERENZEN

[1] Nagra; Endlager für kurzlebige Abfälle, Vorbericht zur Standortwahl; NTB 93-15, Juni 1993.

[2] Nagra; Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA), vergleichende Beurteilung der Standorte Bois de la Glaive, Oberbauenstock, Piz Pian Grand und Wellenberg; NTB 93-02, Textband und Beilageband, September 1993.

[3] Nagra; Untersuchungen zur Standorteignung im Hinblick auf die Endlagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle, Geologische Grundlagen und Datensatz zur Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für schwach- und mittelaktive Abfälle am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW); NTB 93-28, September 1993.

[4] Nagra; Endlager für kurzlebige schwach- und mittelaktive Abfälle (Endlager SMA), Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers SMA am Standort Wellenberg (Gemeinde Wolfenschiessen, NW); NTB 92-26, September 1993.

[5] HSK; Gutachten zu den Stollenanträgen der Nagra vom 23. November 1988; HSK 23/31, Dezember 1989.

[6] Nagra; Recherches sur l'aptitude des sites à accueillir un dépôt final de déchets faiblement et moyennement radioactifs à vie courte, Résultats des recherches effectuées sur le site potentiel du Bois de la Glaive; NTB 93-29, Septembre 1993.

[7] Nagra; Anhydritvorkommen als Wirtgestein für die Lagerung schwach- und mittelaktiver Abfälle dargestellt am Beispiel des Bois de la Glaive: Statusbericht; NTB 88-15, August 1990.

[8] Nagra; Modellierung der Grundwasser-Strömungsverhältnisse am Oberbauenstock; NTB 89-04, Mai 1992.

[9] Nagra; Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Oberbauenstock; NTB 88-18, Oktober 1988.

[10] Nagra; Berichterstattung über die Untersuchungen der Phase I am potentiellen Standort Piz Pian Grand; NTB 88-19, Oktober 1988.

[11] HSK, KSA; Schutzziele für die Endlagerung radioaktiver Abfälle; Richtlinie HSK-R-21/d, November 1993.