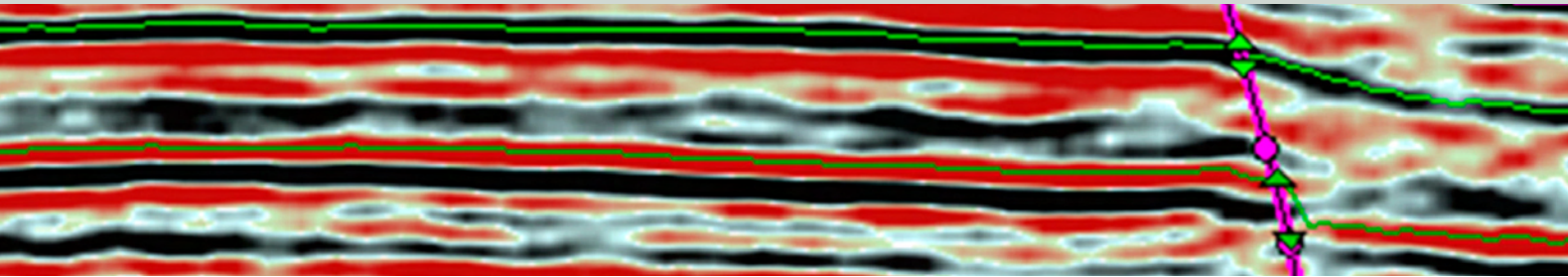




Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI
Inspection fédérale de la sécurité nucléaire IFSN
Ispettorato federale della sicurezza nucleare IFSN
Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate ENSI



Stellungnahme zur Abklärung ergänzender geologischer Untersuchungen der Nagra zur Standsicherheit und Erschliessung der Lagerkammern

Expertenbericht

im Hinblick auf Etappe 2 des Sachplans geologische Tiefenlager

Dr. Florian Amann und Prof. Dr. Simon Löw
Ingenieurgeologie der ETH Zürich

**Stellungnahme zur Abklärung der Notwendigkeit
ergänzender geologischer Untersuchungen in SGT Etappe 2
für die Beurteilung der Standsicherheit und Erschliessung
der Lagerkammern (NTB 10-01: Bautechnische Aspekte)**

Dr. Florian Amann

Prof. Dr. Simon Löw

Professur für Ingenieurgeologie

ETH Zürich

Expertenbericht

zuhanden des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI)

17. März 2011

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
Beurteilungsgrundlagen	3
Vorgehen der Nagra zur Darlegung und Bewertung des Kenntnisstandes.....	3
Aufbau der vorliegenden Stellungnahme	4
2. Bautechnische Prozesse und Parameter	5
Tiefenlage unter Terrain (PB-1)	5
Anordnungsbestimmende geologische Elemente (PB-3).....	5
In-situ-Temperaturen (PB-5)	6
In-situ-Gebirgsspannungen (PB-6)	6
Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein (PB-7).....	7
Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen (PB-8). 8	
3. Technische Machbarkeit der Lagerstollen und Zugangsbauwerke	10
Beurteilung der technischen Machbarkeit SMA-Lagerkavernen	10
Beurteilung der technischen Machbarkeit HAA-Lagerstollen	11
Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung.....	11
4. Zusammenfassung	12
5. Literaturverzeichnis	13

1. Einleitung

Beurteilungsgrundlagen

Gemäss Konzeptteil des Sachplans geologische Tiefenlager (SGT) hat die Nagra in der 2. Etappe die Aufgabe, frühzeitig mit der Aufsichtsbehörde abzuklären, ob der heutige Kenntnisstand für die provisorischen Sicherheitsanalysen, die Beurteilung der technischen Machbarkeit sowie den sicherheitstechnischen Vergleich der Standorte ausreichend ist oder ob über die laufenden Arbeiten hinaus weitere ergänzende Untersuchungen notwendig werden. Grundsätzlich darf kein Standort aufgrund unzureichender geologischer Kenntnisse ausgeschlossen werden. Die Nagra hat darum gemäss ENSI 33/075 alle bisherigen Erkenntnisse und laufenden Untersuchungen zur Geologie zusammenfassend im Bericht NTB 10-01 zusammengetragen und bewertet. In diesem Bericht soll gemäss ENSI 33/075 auch gezeigt werden, welche Prozesse und Parameter für die provisorische Sicherheitsanalyse in Etappe 2 relevant sind. Zudem sollen Annahmen ausgewiesen werden, welche aufgrund der unterschiedlichen Kenntnisstände in den jeweiligen geologischen Standortgebieten getroffen wurden. Sollte der Wissensstand den Anforderungen an eine quantitative und qualitative vergleichende Standortbewertung nicht genügen, müssen die Entsorgungspflichtigen die erforderlichen ergänzenden Untersuchungen vorschlagen. Diese Zusammenstellung wird von der Aufsichtsbehörde ENSI geprüft, welche im Bedarfsfall auch weitere Untersuchungen zu Etappe 2 verlangen kann.

Die Ingenieurgeologie der ETH Zürich wurde am 16. November 2010 vom ENSI beauftragt, zu nachfolgenden bautechnische Fragen Stellung zu nehmen:

- (1) Ist der in den Kapiteln 4 und 5 dargelegte aktuelle Kenntnisstand zur Bautechnik nachvollziehbar?
- (2) Sind die in Kapitel 8 dargelegten ergänzenden Untersuchungen zusammen mit dem aktuellen Kenntnisstand zielführend, um die bautechnischen Annahmen für die provisorische Sicherheitsanalyse des SMA- und des HAA-Lagers belastbar aufzuzeigen? (Belastbar heisst, dass die Aussagen auch unter Berücksichtigung der bestehenden Variabilität und Ungewissheiten in Daten und Prozessen gültig sind).

Vorgehen der Nagra zur Darlegung und Bewertung des Kenntnisstandes

Die Nagra gliedert die Darlegung des Kenntnisstandes gemäss ENSI 33/075 nach relevanten Prozessen und Parametern für Etappe 2. Dabei wird in Kapitel 4 von NTB 10-01 zunächst ein Überblick über die vorhandenen geologischen Kenntnisse je Wirtgestein bzw. Standortgebiet sowie die jeweils geplanten zusätzlichen Untersuchungen gegeben. Anschliessend wird der geologische Kenntnisstand einschliesslich der bestehenden Unsicherheiten für die einzelnen Prozesse und Parameter dargelegt. Dabei wird zwischen relevanten Prozessen und Parametern bezüglich der quantitativen Beurteilung der Sicherheit (PG), relevanten Prozessen und Parametern bezüglich der Beurteilung der technischen Machbarkeit (PB) und weiteren relevanten Prozessen und Parametern ausschliesslich für die qualitative Beurteilung (PI) unterschieden.

Basierend auf dem Wissensstand der Parameter und Prozesse aus Kapitel 4 prüft die Nagra in Kapitel 5 von NTB 10-01 die bautechnische Machbarkeit respektive Standsicherheit der Lagerkammern und der Erschliessungsbauwerke. Schliesslich wird in Kapitel 7 der Kenntnisstand im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit evaluiert und die vergleichende qualitative Bewertung der Standortgebiete angesprochen.

Aufbau der vorliegenden Stellungnahme

Aus Sicht der Berichterstatter sind für die weiterführenden bautechnischen Planungen und die vergleichende bautechnische Beurteilung der Standorte in Etappe 2 SGT diejenigen geologischen und geotechnischen Grundlagen zentral, welche zu einer relevanten Verbesserung des Kenntnisstandes der unten aufgeführten Modelle¹ beitragen und eine vergleichende bautechnische Beurteilung der Standorte zulassen. Nachfolgende Modellbildungsprozesse sind dabei wesentlich:

- (1) Geologische bzw. geotechnische Modellbildung als Grundlage der weiterführenden bautechnischen Planung. Dies umfasst die Charakterisierung des Gebirges bezüglich felsmechanischer Gesteinseigenschaften, den strukturellen Bau wie klein- und grossmassstäbliche effektive Trennflächen, bautechnisch relevante Heterogenitäten (sedimentäre Wechsellagerungen), die felsmechanischen Gebirgseigenschaften, die *In-situ*-Gebirgsspannungen als auch die Variabilität und Unsicherheiten der relevanten Parameter und Prozesse.
- (2) Gebirgsverhaltensmodell bzw. qualitative Risikoanalyse (Gefährdungsbildanalyse) auf Grundlage der geologischen Modelle unter Berücksichtigung der Variabilität und Unsicherheiten.

Für die vorliegende Stellungnahme von primärer Bedeutung sind die relevanten Prozesse und Parameter für die bautechnische Machbarkeit (PB-5 bis PB-8). Indirekt von Bedeutung, und darum auch aus bautechnischer Sicht kommentiert, werden weitere Untersuchungen zur Verbesserung des Kenntnisstandes des geologischen Baus, insbesondere der Tiefenlage der Endlagerebenen (PB-1) und der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente (PB-3).

¹ Unter «Modellen» werden in der Geotechnik vereinfachte zweckorientierte Darstellungen des Baugrundes, und nicht zwingend digitale Modelle verstanden.

2. Bautechnische Prozesse und Parameter

Tiefenlage unter Terrain (PB-1)

Ein wichtiger Aspekt zur Beurteilung der technischen Machbarkeit ist die Tiefenlage der Lagerstollen unter Terrain und damit der Bezug zur vertikalen Spannungsmagnitude. Zusätzlich zu den in Etappe 1 SGT durchgeführten Untersuchungen zur Tiefenlage werden in der 2. Etappe SGT die bereits erhobenen seismischen Daten reprozessiert sowie ein umfangreiches Netz neuer seismischer Linien für die HAA-Gebiete Bözberg – Nördlich Lägeren erstellt. Zudem werden Daten aus den neuen EWS-Bohrungen, Aufschluss- und Bohrungsinformationen aus dem süddeutschen Raum, Bohrungen Dritter und geologische 3D Modelle unter Berücksichtigung der kinematischen Plausibilität zur Konsolidierung und Prüfung des vorhandenen Datensatzes herangezogen. Am Wellenberg werden die bestehenden tektonischen Modelle unter Zugrundelegung neuester erdwissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst.

Nach Auffassung der Berichtersteller ist der momentane Kenntnisstand für die bautechnische Beurteilung der Tiefenlage (insbesondere bzgl. Vertikalspannungen, PB-6) genügend.

Anordnungsbestimmende geologische Elemente (PB-3)

Anordnungsbestimmenden geologischen Elementen, wie lokalen Störzonen, sedimentären Architekturelementen oder Fremdgesteinseinschlüssen (Wellenberg), wird beim Bau der Lagerstollen ausgewichen und sie bestimmen demnach die Anordnung der Lagerkammern. Inwieweit ein geologisches Element anordnungsbestimmend ist, hängt von den Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und den lithofaziellen Variabilitäten ab. Als bedeutende Störzonen beurteilen die Entsorgungspflichtigen solche Störzonen mit stratigraphischen Versatzbeträgen > 20 m, welche in allen Standortgebieten erwartet werden. In Etappe 1 SGT wurden anordnungsbestimmende Störzonen (insbesondere Dichte und Orientierung) mit Hilfe geologischer Karten, Hinweisen aus Fernerkundungsdaten, Aufschlussbeobachtungen und qualitativer tektonischer Überlegungen (u.a. abnehmende Einengung des Alpenvorlandes von West nach Ost) abgeleitet. Versatzbeträge wurden auf Grundlage der Ausstrichlänge und deren erfahrungsgemässen Korrelierbarkeit mit dem stratigraphischen Versatz abgeschätzt. Zudem kamen reflexionsseismische Daten zur Anwendung. In den Standortgebieten Zürich Nord-Ost und Südranden erlaubt die Interpretation der 3D Seismik die Erstellung eines flächendeckenden strukturgeologischen Modells. In den übrigen Standortgebieten der Nordschweiz liegen 2-dimensionale seismische Profile vor.

In Etappe 2 SGT werden die bisherigen Erkenntnisse zur Geometrie und Frequenz lokaler anordnungsbestimmender Störzonen durch Analysen von Fernerkundungsdaten weit über die Standortgebiete hinaus, überprüfende Felduntersuchungen, Reprozessierung vorhandener seismischer Daten, neue seismische Linien in der Region Bözberg – Nördlich Lägeren sowie Retrodeformationen von geologischen 2D Schnitten und 3-dimensionalen geologischen Modellen ergänzt. Die Ergebnisse der 2D Seismik werden insbesondere auch für die Planung einer flächendeckenden 3D Seismik benutzt.

Die Berichtersteller erachten die von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen weiterführenden Untersuchungen in Etappe 2 SGT für die bautechnische Bewertung der anordnungsbestimmenden geologischen Elemente als notwendig und zielführend.

In-situ-Temperaturen (PB-5)

Nach NTB 10-01 sind die Erwartungswerte für In-situ-Temperaturen auf Lagerebenen zwischen 400 bis 900 m aufgrund zahlreicher Tiefbohrungen in der Nordschweiz (Schafisheim, Weiach, Riniken, Benken und EWS-Bohrung Oftringen) gut bekannt und unterliegen mit Ausnahme weniger Anomalien durch zirkulierende Thermalwässer nur geringen regionalen Schwankungen. Im Wellenberg wurden belastbare Temperaturmessungen in den 7 Tiefbohrungen durchgeführt.

Die Übertragung der In-situ-Temperaturen aus nahegelegenen Bohrungen, wie von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagen, wird von den Berichterstellern für bautechnische Vergleiche in SGT Etappe 2 als zulässig erachtet.

In-situ-Gebirgsspannungen (PB-6)

Bezüglich der räumlichen Anordnung und Standsicherheit der Lagerkammern stellen die Orientierung der maximalen und minimalen horizontalen Spannungen sowie die Magnituden des Spannungstensors ein wesentliches bautechnisches Kriterium dar. Die vertikale Spannungsmagnitude, welche sich aus der Tiefenlage der Lagerkammern ableiten lässt (PB-1), kann als gut gesichert angenommen werden. Spannungsmessungen auf Tiefenlage der geplanten Lagerstollen existieren in der Nordschweiz nur aus der Bohrung Benken. Zudem kann auf zahlreiche Studien über das Spannungsfeld der Nordschweiz zurückgegriffen werden, welche sich auf Bohrlochrandausbrüche, Herdflächenlösungen von Erdbeben und direkte Spannungsmessungen in Bohrlöchern verschiedener Tiefen stützen. Die Entsorgungspflichtigen erachten die Kenntnisse über das Spannungsfeld als ausreichend für die Etappe 2 SGT. Zur Überprüfung und Konsolidierung der Annahmen werden alle bisher verfügbaren Daten neu kompiliert, wobei bisher nicht berücksichtigte Daten integriert werden (u.a. Interpretation bzw. Neuauswertung von Bohrlochrandausbrüchen). Gemäss NAB 10-25 werden zudem Spannungsmessungen in der Bohrung Schlattingen/TG durchgeführt. In Etappe 3 sind 3-dimensionale Modelle des regionalen Spannungsfeldes geplant.

Nach Auffassung der Berichtersteller sind die Darlegung des Kenntnisstandes und deren Unsicherheiten grundsätzlich nachvollziehbar.

Während bei der verwendeten Methodik zur Schätzung der Spannungen im Bohrloch Benken die minimale horizontale Spannung (σ_{H}) direkt abgeschätzt werden kann, existieren bei der Abschätzung der maximalen Horizontalspannung (σ_{H}) grosse Unsicherheiten aufgrund der Messmethodik und Interpretation (Evans 2002). Grundsätzlich kann die minimale horizontale Spannung und deren Orientierung in den Regionen Zürich Nord-Ost und Südranden auf Lagerebene als belastbar bezeichnet werden. Dies trifft auf die maximale horizontale Spannung nicht zu. Aufgrund von Bohrlochwandausbrüchen ist von grossen Differenzialspannungen in der horizontalen Ebene auszugehen (Evans 2002), was bei der Orientierung der Lagerstollen in Richtung der maximalen Horizontalspannung Auswirkungen auf die Spannungsumlagerungen hat. Wegen der lithostratigraphischen Verhältnisse und Unsicherheiten in der maximalen horizontalen Spannung ist von einer entsprechend grossen Variabilität bzw. einer ungünstigen Annahme in den bautechnischen Analysen auszugehen, wie dies bereits im Pöyry (2010b) umgesetzt und diskutiert wurde.

Die Übertragbarkeit der Spannungsorientierung aus der Bohrung Benken auf die anderen Nord-schweizer Standortgebiete unterliegt Unsicherheiten, was allerdings auf die vergleichende Beurteilung der Standorte aus bautechnischer Sicht in Etappe 2 SGT wenig Einfluss hat. Entscheidend hingegen sind die Spannungsverhältnisse (σ_h/σ_v bzw. σ_H/σ_V) und Magnituden der horizontalen Spannungs-komponenten, die je nach Tiefenlage unter Terrain und Wirtgestein in den jeweiligen Standortgebieten variieren können (die Spannungsverhältnisse in kompetenteren Sedimentgesteinen können deutlich von denen in den sehr tonreichen Sedimenten abweichen). Die Berichtersteller empfehlen, systematische Analysen der vertikalen Variationen der Spannungsverhältnisse (insbesondere Spannungs-heterogenitäten aufgrund lithologischer Unterschiede) basierend auf den bisherigen Daten und neuen Ergebnissen der Bohrung Schlattingen/TG in Etappe 2 SGT durchzuführen. Speziell anhand der neuen Bohrung Schlattingen/TG, in der neben Spannungsmessungen auch 4-Arm-Kaliberlogs und Televierwer-Aufnahmen durchgeführt werden (siehe NAB 10-25), können die Variabilität und Unsicherheiten in Magnitude und Orientierung der Spannungen sowie die lithologisch bedingten Spannungsvariationen im Tafeljura besser quantifiziert werden. Die Berichtersteller weisen aber darauf hin, dass die Unsicherheiten bezüglich der Spannungsverhältnisse im Standortgebiet Jura-Südfuss und in den Effinger Mergeln durch die Erkenntnisse in der Bohrung Schlattingen/TG nicht geklärt werden können. Diesbezüglich ist zu empfehlen, alle Indikatoren zu Spannungsorientierungen und Magnituden aus bestehenden Bohrungen und Untertagebauwerken im Bereich des Standortgebietes Jura-Südfuss detailliert aufzuarbeiten.

Grundsätzlich sind die Berichtersteller der Auffassung, dass unter Berücksichtigung neuer Untersuchungen und einer für die Bautechnik sinnvoll gewählten Variabilität² der Spannungsverhältnisse (horizontale Komponenten) in allen Standortgebieten die bautechnische Beurteilung stufengerecht durchführbar ist³. Die von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Untersuchungen zur Konsolidierung und Prüfung sind sinnvoll. Details zu den zusätzlich geplanten Untersuchungen in der Bohrung Schlattingen und im Standortgebiet Jura-Südfuss stehen noch aus und sollten nachgeliefert werden.

Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften Wirtgestein (PB-7)

Von den Wirtgesteinen Opalinuston und Mergel-Formationen des Helvetikums liegen umfangreiche, für die Effinger Schichten ausreichende Datensätze von Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften vor. Diese Datensätze der Gesteinseigenschaften werden in Anbetracht der in NTB 10-01 vorgeschlagenen Möglichkeiten bei der Ausbruchsicherung von den Entsorgungspflichtigen als genügend betrachtet. Für den Braunen Dogger, dessen felsmechanische Eigenschaften bisher aufgrund der lithologischen Ähnlichkeiten vom Opalinuston übernommen wurden (jedoch mit der Berücksichtigung einer höheren Variabilität), werden in Etappe 2 SGT an Bohrkernen der Bohrung Schlattingen/TG zusätzliche felsmechanische Untersuchungen ausgeführt.

² Die Variabilität der Spannungsmagnituden ist vor allem auch zusammen mit der Variabilität der Gesteins- bzw. Gebirgseigenschaften zu sehen. Ungünstige Spannungsmagnituden (hohe Spannungen) bei gleichzeitig ungünstigen felsmechanischen Kennwerten sind besonders bei der Bewertung der Gefährdungsbilder bzw. unerwünschter Ereignisse wesentlich.

³ Aus Sicht der vergleichenden Beurteilung der Standorte (insbesondere für HAA) ist für Etappe 2 vor allem die Variation der Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain wesentlich. Diesbezügliche Informationen sind heute belastbar und werden in den weiteren Untersuchungen der Etappe 2 konsolidiert.

Die Berichterstatter erachten die neuen felsmechanischen Versuche an Bohrkernen des Braunen Doggers und des Opalinustons der Bohrungen Schlattigen/TG, wie im NAB 10-25 von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagen, als sinnvoll und erforderlich. Diese zusätzlichen Untersuchungen an Opalinuston-Kernen sind besonders auch für die Quantifizierung der natürlichen Variabilitäten⁴ und die Überprüfung der Übertragbarkeit der felsmechanischen Kennwerte des Opalinustons von der Bohrung Benken auf die anderen Standortgebiete wertvoll⁵.

Da die Bemessung der Ausbruchsicherung von den Verformungen und damit auch von den elastischen Eigenschaften abhängt, ist in Etappe 2 auch die zentrale Frage zu klären, ob es sich bei den im Labor erhobenen elastischen Eigenschaften (insbesondere extrem geringdurchlässiger Wirtgesteine) um drainierte oder undrainierte Eigenschaften handelt (siehe auch Diskussion in Pöyry 2010b). Als Funktion der poro-elastischen Parameter können die Unterschiede in den elastischen Eigenschaften signifikant sein.

Die Berichterstatter betonen, dass es sich bei diesen felsmechanischen Kennwerten aus Laboruntersuchungen nicht um Gebirgseigenschaften sondern um reine Gesteinseigenschaften handelt. Um die eventuell verminderte Gebirgsfestigkeit durch das etwaige Auftreten massstabs- bzw. bautechnisch relevanter Trennflächen abzuschätzen, wird empfohlen, verfügbare Daten zu kleinmassstäblichen Trennflächensystemen systematisch aus allen Standortgebieten zu kompilieren (wie in AN 09-269 bereits begonnen) und zu interpretieren. Diese Daten basieren neben Geländeaufschlüssen (an denen Oberflächeneffekte von systematischen Kluftsystemen differenziert werden müssen) auf Bohrlochaufnahmen und Dokumenten zu früher ausgeführten Tunnelbauwerken (wie z.B. Bözberg-Autobahntunnel). Diese Untersuchungen sollten insbesondere auch für die SMA-Standortgebiete in tektonisch beanspruchten Gebieten (Wellenberg, Jura-Südfuss) wertvolle Zusatzinformationen für den Standortvergleich in Etappe 2 liefern.

Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen (PB-8)

Die Entsorgungspflichtigen beurteilen die momentan vorhandenen Unterlagen zu den geotechnischen und hydrogeologischen Verhältnissen in den überlagernden Gesteinen als genügend für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit im NTB 10-01. Die bisherigen hydrogeologischen Kenntnisse werden in der 2. Etappe SGT durch vorhandene hydrogeologische Datensätze aus der Nordschweiz und aus Süddeutschland, durch hydrodynamische Modellrechnungen und durch Analysen von Transportwegen von Kohlenwasserstoffen ergänzt. Für die Zugangsbauwerke in den Standortgebieten der Nordschweiz liegt eine erste qualitative Beschreibung der Gefährdungsbilder vor (Kellerhals & Haefeli 2010).

Die Berichterstatter erachten die Darlegung der geologischen und bautechnischen Grundlagen zu den Zugangsbauwerken als nachvollziehbar und stufengerecht. Besonders die zusammenfassenden Be-

⁴ Für die bautechnische Beurteilung erachten die Berichterstatter auch die Variabilität der Gesteinseigenschaften als relevant. Im Fall des Opalinustons ist die Standartabweichung der einaxialen Druckfestigkeit signifikant ($\pm 20\%$), was bei der vergleichenden Beurteilung von sicherheitsrelevanten Gefährdungsbildern mit zunehmende Tiefe zu berücksichtigen ist.

⁵ Siehe auch Antwort der Berichterstatter auf Frage 46b Technisches Forum Sicherheit

richte über bautechnische Erfahrungen in ähnlichen oder übereinstimmenden geologischen Formationen (Kellerhals & Haefeli 2011, Schubert et al. 2010) wird als wesentlich für die Auslegung der Zugänge als auch die vergleichende Beurteilung erachtet.

Die von den Entsorgungspflichtigen in Kapitel 5 von NTB 10-01 vorgeschlagene geotechnische Beschreibung der Zugangsvarianten, basierend auf den Erfahrungen und Erkenntnissen aus Tunnelbauwerken der Nordschweiz unter Einbezug der hydrogeologischen Erkenntnisse, ist zielführend und kann auf Basis der vorhandenen und neu erhobener Kenntnisse erstellt werden. Wenn auch nicht explizit im NTB 10-01 erwähnt, gehen die Berichtersteller davon aus, dass für die Vergleichbarkeit der Standortgebiete für jede Zugangsvariante eine qualitative Risikoanalyse bezüglich geotechnischer/hydrogeologischer und baubetrieblicher Gefährdungsbilder durchgeführt wird (siehe Ausführungen in Kapitel 3).

3. Technische Machbarkeit der Lagerstollen und Zugangsbauwerke

Für die Beurteilung der technischen Machbarkeit der Lagerstollen und Zugangsbauwerke in den verschiedenen Standortgebieten wird auf die relevanten Prozesse und Parameter PB-1 bis PB-10 zurückgegriffen. Die Auslegung der Lagerkammern (PT-7) und deren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit beruhen auf den relevanten Prozessen und Parametern PB-1, PB-6 und PB-7. Dies wird in der Systemanalyse evaluiert und ist nicht Gegenstand dieser Stellungnahme.

Beurteilung der technischen Machbarkeit SMA-Lagerkavernen

Als grundlegend für die Auslegung der Lagerkavernen gilt eine ausreichende Stabilität für Bau und Betrieb sowie eine geringe Beeinträchtigung der umgebenden Wirtgesteine. Dies verlangt beschränkte Deformationen während dem Bau und Betrieb zur Vermeidung grossräumiger Auflockerungen (grossräumig bedeutet hier, dass ein signifikanter Teil der Transportbarriere beeinträchtigt ist; detaillierte Informationen zur Auswirkung von Auflockerungszonen auf die provisorischen Sicherheitsanalysen finden sich auf Seite 143 NTB 10-01). Zudem müssen die Bedingungen für die Einlagerung und für eine allfällige Rückholung erfüllt sein. Unter Einbezug von Erfahrungen im Tunnelbau, geomechanischen Modellrechnungen und Bewahrung der Flexibilität bezüglich Kavernenform, Kavernengrösse, Sicherungsmittel und Vortriebsmethode beurteilen die Entsorgungspflichtigen die technische Machbarkeit für das Spektrum der erwarteten geomechanischen Bedingungen als gegeben.

Die bautechnische Machbarkeit von SMA-Lagerkavernen wurde bereits in Etappe 1 SGT von den prüfenden Gremien und den Berichterstattern beurteilt und kommentiert. Weiterführende Untersuchungen zur Optimierung der Auslegung (u.a. Pöyry 2010a) und Abschätzung potentieller Gefährdungsbilder basierend auf Erfahrungen bei ähnlichen geomechanischen Randbedingungen (Kellerhals & Haeffeli 2011; Schubert et al. 2010) erachten die Berichterstatter als wesentliche Grundlagen für die 2. Etappe SGT. Neu gewonnene geologische Informationen (PB-1 bis PB-10 sowie PG-11) erlauben eine Verbesserung des Detaillierungsgrades der jeweiligen geologischen Modelle und eine Einengung der Unsicherheiten.

Für eine vergleichende Beurteilung der Standorte in Etappe 2 erachten die Berichterstatter weiterführende Untersuchungen für eine Verbesserung des Detaillierungsgrades der geologischen Baugrundmodelle und eine bautechnische Risikoanalyse als erforderlich. Diese Baugrundmodelle können insbesondere aufgrund der von den Entsorgungspflichtigen vorgeschlagenen Untersuchungen zu PB-1 bis PB-10, PG-11, sowie einer expliziten Berücksichtigung folgender ingenieurgeologischer Elemente verbessert werden:

- *systematische Charakterisierung kleinmassstäblicher Trennflächen (wie bereits unter PB-7 vorgeschlagen)*
- *bautechnisch relevante sedimentäre Heterogenitäten und Anisotropien*
- *Störzonen (nicht gebietsbegrenzende oder anordnungsbestimmende Störzonen) auf Lagerzebene (insbesondere Brauner Dogger, Effinger Schichten, Helvetikum).*

Die qualitative bautechnische Risikoanalyse umfasst die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer denkbaren Gefährdung und des Schadenausmasses mit und ohne Massnahmen. In vorliegendem Fall wird eine Risikoanalyse je Wirtgestein bzw. Standortgebiet unter Einbezug der Variabilität

der Gebirgseigenschaften (Heterogenitäten, Trennflächensysteme), In-situ-Spannungen, Kavernenquerschnittsgrössen, Vortriebsmethoden, Massnahmen und des verbleibenden Restrisikos empfohlen. Die Auswirkungen unerwünschter geotechnischer Ereignisse (z.B. Verbrüche) auf die Langzeitsicherheit sollten systematisch überprüft werden.

Beurteilung der technischen Machbarkeit HAA-Lagerstollen

Für die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der HAA-Lagerstollen wurden bereits in der Etappe 1 SGT weitreichende Konzepte zur Bewältigung der bautechnischen Schwierigkeiten besonders auch bei Überlagerungen grösser 650 m vorgestellt und in Pöyry (2010b) orientierend felsmechanisch analysiert bzw. in Pöyry (2010c) vordimensioniert. Das Referenzkonzept sieht einen kreisrunden Querschnitt mit entsprechendem Lichtraumprofil, ausreichende Flexibilität bezüglich der Sicherungsmittel und Baumethoden sowie Möglichkeiten zur Beherrschung der Längsläufigkeit von Wasser in der Spritzbetonverkleidung vor (gilt für anspruchsvolle geomechanische Bedingungen, welche den Einsatz einer flächenhaften Ausbruchsicherung erfordern). Die orientierenden felsmechanischen Analysen berücksichtigen den Kenntnisstand zu PB-1, PB-6 und PB-7 (ohne tektonische Trennflächen). Orientierende felsmechanische Untersuchungen werden in der Etappe 2 SGT weitergeführt und vertieft bzw. dem Kenntnisstand angepasst.

Die Berichtersteller erachten die Vorgehensweise bei der Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit für die Etappe 2 SGT, basierend auf den erwarteten neuen Erkenntnissen zu den relevanten Prozessen und Parametern, als zielführend. Dabei sollte aber die heute vorliegende Beschreibung der Gesteinseigenschaften durch eine umfassende Analyse weiterer Gebirgseigenschaften (insbesondere kleinmasstäbliche Trennflächensysteme, Heterogenitäten und bautechnisch relevante Störungen) ergänzt werden. Für eine vergleichende Beurteilung der HAA-Standorte in Etappe 2 erachten die Berichtersteller eine bautechnische Risikoanalyse auf Grundlage eines verbesserten Baugrundmodells als wesentlich (siehe Beurteilung zur bautechnischen Machbarkeit von SMA-Lagerkavernen), mit entsprechenden Untersuchungen der Auswirkungen unerwünschter Ereignisse (z.B. Verbrüche) auf die Langzeitsicherheit.

Beurteilung der technischen Machbarkeit bezüglich der untertägigen Erschliessung

Die Beurteilung der technischen Machbarkeit der Zugangsbauwerke beruht auf relevanten Prozessen und Parametern bezüglich Geologie, Geotechnik und Hydrogeologie unter Einbezug der Anforderungen an die nukleare Sicherheit, den Gesundheits- und Arbeitsschutz und die Umweltverträglichkeit. Wegen der langen Betriebsdauer der Anlagen werden redundante Systeme und Anlagen erforderlich. Diesbezüglich werden zahlreiche Varianten vorgestellt, die je nach lokalen Randbedingungen zur Anwendung kommen. Die generelle Machbarkeit wird durch die Erfahrungen aus zahlreichen Projekten in ähnlichen Lithologien und Randbedingungen bei sorgfältiger Massnahmenplanung, wie etwa einer systematischen Vorauserkundung oder Vorausbehandlungen, und maximaler Flexibilität auch während des Baus als gegeben erachtet. Grundsätzlich basiert die Beurteilung der Entsorgungspflichtigen auf den erwarteten Gefährdungsbildern und entsprechenden Massnahmen zur Früherkennung und/oder Bewältigung.

Die Berichtersteller sind der Auffassung, dass die vorgeschlagenen relevanten Prozesse und Parameter für eine Beurteilung der Machbarkeit der untertägigen Erschliessung in Etappe 2 umfassend und

zielführend sind. Wie für den Vergleich der Lagerstollen und Kavernen, ist bei der vergleichenden Beurteilung der Zugangsbauwerke eine qualitative Risikoanalyse unter Einbezug geologischer, geotechnischer, hydrogeologischer und baubetrieblicher Gefährdungsbilder je Standortgebiet und Variante erforderlich. Die Auswirkungen unerwünschter technischer Ereignisse (wie Flutung der Endlagerebene) auf die Sicherheit während den verschiedenen Projektphasen sollten systematisch untersucht werden.

4. Zusammenfassung

Die Darlegung des bisherigen Kenntnisstandes zur Beurteilung der technischen Machbarkeit ist nachvollziehbar dargestellt und in zahlreichen Begleitberichten ausführlich dokumentiert und bezüglich Unsicherheiten diskutiert. Die laufenden und von den Entsorgungspflichtigen geplanten Untersuchungen werden als sinnvoll und stufengerecht beurteilt und führen zu einem genügend belastbaren Kenntnisstand bezüglich der felsmechanischen Gesteinseigenschaften aller Standortgebiete.

Aus bautechnischer Sicht empfehlen die Berichtersteller, die geologischen und geotechnischen Informationen in gebietsspezifische und formationsspezifische Baugrundmodelle und Gebirgsbeschreibungen zu überführen. Besonders für die SMA-Standorte bzw. tektonisch beanspruchte Standorte sind alle vorhandenen Informationen zu bautechnisch relevanten Trennflächen systematisch zu ergänzen. Bezüglich der In-situ-Gebirgsspannungen besteht unter Berücksichtigung der in NTB 10-01 beschriebenen Zusatzuntersuchungen nur für die Standortregion Jura-Südfuss eine für Etappe 2 relevante Kenntnislücke. Diesbezüglich wird empfohlen, alle Hinweise auf Spannungsorientierung und Magnituden bestehender Bohrungen und Untertagebauwerke im Bereich des Standortgebietes Jura-Südfuss detailliert zu analysieren.

Für den bautechnischen Vergleich der Standortgebiete, der SMA- und HAA-Lagerkammern sowie die Erschliessungsbauwerke, empfehlen die Berichtersteller systematisch qualitative bautechnische Risikoanalysen auf Grundlage detaillierter Baugrundmodelle auszuführen und die Resultate in den Analysen der Betriebs- und Langzeitsicherheit explizit zu berücksichtigen.

5. Literaturverzeichnis

ENSI Berichte

ENSI (2010): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. ENSI 33/075.

ETH Aktennotizen

Evans, K. F. (2002): Comments on results of stress characterisation at Benken site reported in Nagra NIB 99-36A.

Nagra Aktennotizen

AN 09-269 (2009): Felsmechanisch relevante Eigenschaften von Trennflächen in Opalinuston (Entwurf).

Nagra Arbeitsberichte

NAB 10-25 (2010): Kurzarbeitsprogramm Geothermiebohrung Schlattingen.

Nagra Interne Berichte

Kellerhals & Haefeli (2010): Bautechnische Beschreibung des mit Zugangsbauwerken zu geologischen Tiefenlagern zu durchfahrenden Gebirges in der Nordschweiz. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

Kellerhals & Haefeli (2011): Zusammenfassung von geotechnischen Erfahrungen bei Tunnel- und Schachtbauwerken in der Schweiz. Unpubl. Nagra Interner Bericht. Revision Februar 2011.

Pöyry (2010a): Orientierende felsmechanische Berechnungen und Vordimensionierung für SMA-Lagerkavernen in 300 bis 800 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston, in Palfris-Formation und Effinger Schichten für Kavernentyp K06, K09, K12 und K16. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

Pöyry (2010b): Orientierende felsmechanische Berechnungen und Vordimensionierung für BE/HAA-Lagerstollen in 400 m, 650 m und 900 m im intakten und gestörten Opalinuston. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

Pöyry (2010c): Orientierende Vordimensionierung für BE/HAA-Lagerstollen in 900 m Tiefe im intakten und gestörten Opalinuston für verschiedenen Ausbaukonzepte. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

Schubert, W., Steidl, A. & Otto, R. (2010): Geotechnische Probleme und deren Lösungen im österreichischen Tunnelbau – Erfahrungen aus den Tunnel-, Stollen und Schachtbauwerken in Österreich. Unpubl. Nagra Interner Bericht.

Nagra Technische Berichte

NTB 10-01 (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2. Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen.

ENSI 33/127

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 (0)56 460 84 00, Fax +41 (0)56 460 84 99, www.ensi.ch

