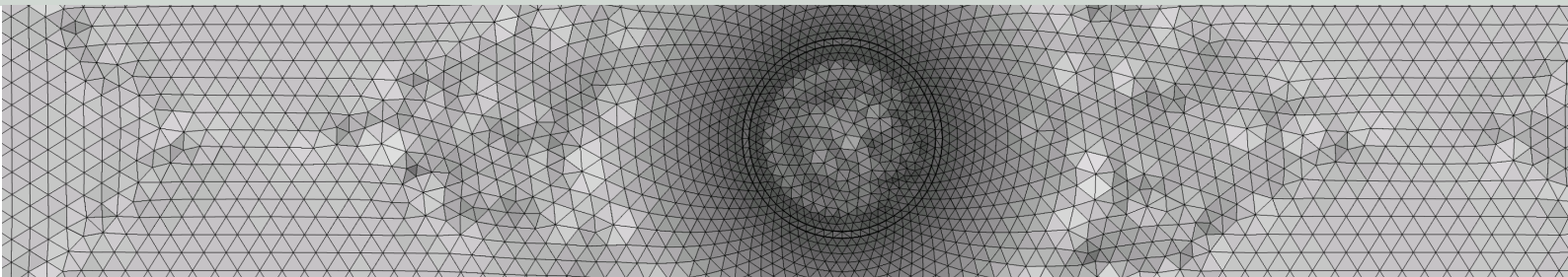




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

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



# Beurteilung der nachgereichten geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage

Expertenbericht

im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager

F. Amann  
S. Löw

ETH Zürich, Professur für Ingenieurgeologie

November 2016

*Disclaimer:*

*Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.*

Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2

## **Expertenbericht (ENSI 33/531)**

*Beurteilung der geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage im Rahmen der Nachforderungen des ENSI zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ im SGT Etappe 2*

Florian Amann, Simon Löw

ETH Zürich, Professur für Ingenieurgeologie

25. November 2016

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1	Kernfragen des ENSI .....	3
1.2	Geprüfte Berichte.....	3
1.3	Beiträge externer Prüfexperten .....	4
2	Generelles Vorgehen der NAGRA .....	4
2.1	Überblick über das generelle Vorgehen der NAGRA.....	4
2.2	Beurteilung der Vorgehensweise und Dokumentation durch die Experten .....	4
3	Standortspezifische geologische Modelle und Baugrundmodelltypen .....	5
3.1	Vorgehensweise der NAGRA .....	5
3.1.1	Standortspezifische geologische Modelle .....	5
3.1.2	Gebirgsmodelle .....	6
3.1.3	Gebirgsspannungen.....	7
3.1.4	Porenwasserdrücke und Durchlässigkeiten.....	7
3.1.5	Baugrundmodelltypen.....	7
3.2	Beurteilung der Experten .....	7
4	Felsmechanische Gesteins- und Gebirgs-Parameter .....	8
4.1	Vorgehensweise der NAGRA .....	8
4.1.1	Grundlegende Eigenschaften des Opalinustons .....	8
4.1.2	Ableitung von Referenzdatensätzen und Gebirgsmodelle .....	9
4.1.3	Parametrisierung der Gebirgsmodelle.....	10
4.2	Beurteilung der Experten .....	11
5	Geologische Gefährdungsbilder und ihre Relevanz für die Beurteilung der Projektkonzepte und Nutzungszustände .....	18
5.1	Vorgehensweise der NAGRA .....	18
5.2	Beurteilung der Experten .....	20
6	Berechnungsmodelle und Anwendung der geomechanischen Parameter .....	20
6.1	Vorgehensweise der NAGRA .....	20
6.1.1	Berechnungsmodelle und grundlegende Annahmen.....	20
6.1.2	Beurteilung des Gebirgsverhalten durch die NAGRA.....	22
6.1.3	Beurteilung des Systemverhaltens durch die NAGRA .....	22
6.2	Beurteilung der Experten .....	22
7	Beantwortung der Kernfragen.....	26
8	Literatur.....	27

# 1 Einleitung

Im Rahmen der Prüfung der Vorschläge der NAGRA zur Standorteinengung in Etappe 2 SGT hat das ENSI im November 2015 Nachforderungen zum Indikator „Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit“ gestellt (Aktennotiz ENSI 33/476 vom 6.11.2015). Im Sommer 2016 hat die NAGRA einen Hauptbericht (NAB 16-41), 5 zugehörige Referenzberichte (NAB 16-42 bis NAB 16-46) sowie weitere Berichte zu Laborversuchen bzw. felsmechanischen Berechnungen als entsprechende Zusatzdokumentation zu den Dokumenten von Etappe 2 SGT den Prüfbehörden übergeben. Der nachfolgende Expertenbericht befasst sich schwerpunktmässig mit den ingenieur-geologischen und felsmechanischen Aspekten dieser Nachlieferung.

Für die Prüfung der nachgelieferten Unterlagen der NAGRA hat das ENSI eine Serie von Kernfragen an seine Experten formuliert, welche als Richtschnur für die Prüfarbeiten und den folgenden Bericht verwendet wurden.

## 1.1 Kernfragen des ENSI

Das ENSI ist mit insgesamt vier Kernfragen an die Experten herangetreten. Die Beantwortung der zwei nachfolgenden Kernfragen ist Gegenstand des vorliegenden Dokuments und erfolgt in Kapitel 8.

- 1) Stellen die überarbeiteten Unterlagen der NAGRA eine ausreichende technisch-wissenschaftliche Basis für die Beurteilung der Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit der BE/HAA-Lager in den Standortgebieten dar?
- 2) Ist eine Beschränkung der BE/HAA- Lagertiefen gemäss der Argumentation der NAGRA nachvollziehbar, ausreichend begründet und robust?

## 1.2 Geprüfte Berichte

- [1] NAB 16-41 (2016): Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht), auszugsweise.
- [2] NAB 16-43 (2016): Geomechanische Unterlagen.
- [3] NAB 16-45 (2016): Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung, auszugsweise
- [4] NAB 16-44 (2016): Standortspezifische geologische Modelle und geologische Gefährdungsbilder.
- [5] Nagra (2016): Consolidated-drained triaxial testing of Opalinus Clay. Nagra unpubl. Interner Bericht, Nagra, Wetztingen
- [6] Ewy, R., S. Giger, R. Stankovic (2016): Consolidated-undrained triaxial test results of Opalinus Clay and comparison with caprock shales. (Submitted Paper).
- [7] Anagnostou und Vrakas (2016): SGT Etappe 2, Comparative rock-support interaction analyses (revised), ETH Zürich
- [8] Anagnostou und Vrakas (2016): SGT Etappe 2, Ground response curves and rock-support interaction analyses for the tunnel profiles F, D and K09, ETH Zürich
- [9] Anagnostou und Vrakas (2016): SGT Etappe 2, Ground response curves for a material exhibiting a sublinear strength envelope at low confinement, ETH Zürich
- [10] Itasca (2016): Parameterstudie Gebirgskennlinien und Vergleich Gebirgsverhalten, Profil F, D und K09, Itasca GMBH

### **1.3 Beiträge externer Prüfexperten**

Martin Vogelhuber (Dr. von Moos AG) hat wesentliche Beiträge zu den Themen Gebirgskennlinien und geomechanische Parameter in Kapitel 4 und 6 erstellt und den vorliegenden Bericht korreferiert. Die Arbeiten in diesem Bericht wurden mit dem Expertenbericht der Basler und Hofmann AG abgestimmt.

## **2 Generelles Vorgehen der NAGRA**

### **2.1 Überblick über das generelle Vorgehen der NAGRA**

Die NAGRA dokumentiert in der Zusatzdokumentation zur Analyse der maximalen Tiefenlage die Lager- und Barrierenkonzepte, die Erosion in der Nordschweiz, die geologischen und tektonischen Verhältnisse in den einzelnen Standortgebieten, dem Platzangebot, sowie die Projektkonzepte der Lagerkammern und Versiegelungsstrecken. Bei der neuen Erarbeitung der Projektkonzepte für die Lagerkammern und übrigen Bauwerke auf Lagerebene sowie bei der Beurteilung der Bauverfahren wird die Tiefenlage in den jeweiligen Standortgebieten explizit berücksichtigt. In einem weiteren Schritt wird eine Vordimensionierung der Ausbruchsicherung vorgenommen. Abschliessend werden die Projektkonzepte in den jeweiligen Standortgebieten bezüglich Sicherheit und Machbarkeit beurteilt. Die Resultate dieser Analyse bilden die Grundlage für die Prüfung der Bewertungsskala zur maximalen Tiefenlage und die Bewertung der einzelnen Standortgebiete bezüglich der maximalen Tiefenlage.

Das Vorgehen bei der neuen Erarbeitung der Projektkonzepte und deren Beurteilung orientiert sich an den Vorgaben zur Tragwerksplanung gemäss SIA 260. Dementsprechend werden folgende Planungselemente von der NAGRA behandelt: 1) Nutzungsanforderungen, 2) Projektierungsgrundlagen bzw. Projektbasis, 3) mögliche Bauverfahren, 4) geologische Grundlagen und Modellannahmen für felsmechanische Betrachtungen und Berechnungen, 5) relevante Gefährdungsbilder, 6) Berechnungsannahmen für die Analyse des Gebirgs- und Systemverhaltens, 7) Anforderungen an das Tragwerk und 8) mögliche Massnahmen zur Beherrschung der Gefährdungsbilder. Darauf basierend wird eine Tragwerksanalyse für unterschiedliche Tiefen durchgeführt, die sowohl das reine Gebirgsverhalten als auch das Systemverhalten (System = Gebirge + Einbauten) berücksichtigt. Die Unsicherheiten in den geologischen Grundlagen werden dabei mit unterschiedlichen Baugrundmodelltypen abgedeckt. Zudem werden mögliche Bauverfahren und Sicherungstypen für abdeckende Gebirgsverhältnisse untersucht. Abschliessend wird der Einfluss verschiedener Gefährdungsbilder auf die Langzeitsicherheit mit Dosisberechnungen aufgezeigt.

### **2.2 Beurteilung der Vorgehensweise und Dokumentation durch die Experten**

Die Vorgehensweisen der NAGRA bei der Festlegung der geotechnischen Bedingungen und der Beurteilung der maximalen Tiefenlage unterscheiden sich im Rahmen der Nachforderung signifikant von den Hauptdokumenten zu SGT Etappe 2. Die Nachforderungen des ENSI wurden von der NAGRA explizit berücksichtigt. Die NAGRA beschreitet bei der Beurteilung der Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit einen stufengerechten und grösstenteils nachvollziehbaren Weg. Dies betrifft sämtliche von der NAGRA behandelten Aspekte (Nutzungsanforderungen, Projektbasis, Gebirgs- und Systemverhaltensanalyse und abschliessende integrierte Bewertung) sowie die entsprechende Dokumentation und Berichtsstruktur.

### **3 Standortspezifische geologische Modelle und Baugrundmodelltypen**

#### **3.1 Vorgehensweise der NAGRA**

Zunächst entwickelt die NAGRA standortspezifische geologische Modelle. In einem zweiten Schritt schlägt die NAGRA Gebirgsmodelle vor, denen geomechanische Parameter zugeordnet werden. Zusammen mit den Spannungsbedingungen, Annahmen zu Porenwasserdrücken und Durchlässigkeiten bilden die Gebirgsmodelle die Grundlage für die Festlegung von Baugrundmodelltypen.

##### **3.1.1 Standortspezifische geologische Modelle**

Für die Erstellung standortspezifischer geologischer Modelle geht die NAGRA stufenweise vor. Basierend auf aktuell vorhandenen Daten zu standortspezifisch bekannten stratigraphischen und mineralogischen Befunden und strukturellen Aspekten erstellt die NAGRA für jedes Standortgebiet ein geologisches Modell auf dem Lagerperimetermassstab (LP-Geomodelle). Diese Modelle illustrieren die vermutete grossräumige Gebirgsstruktur unter Berücksichtigung der regionalen tektonischen Situation (d.h. Lage im Tafeljura (ZNO, SR), Vorfaltenzone (NL, JO), Subjurassische Zone (JS)) in den 5 Standortgebieten (Südranden SR, Zürich Nordost ZNO, Nördlich Lägeren NL, Jura Ost JO und Jura Südfuss JS). Unsicherheiten in der Datengrundlage (zum Beispiel Übertragbarkeit der faziellen Situation aus einer nahe gelegenen Bohrung, Vollständigkeit des Störzoneninventars) werden von der NAGRA explizit diskutiert.

Auf Basis der LP-Geomodelle entwirft die NAGRA kleinräumige Geomodelle zur Illustration der am Standort möglichen faziellen und strukturgeologischen Phänomene auf dem Massstab der Lagerstollen. Die wesentlichen Grundlagen zur Erstellung der Geomodelle sind: 1) die regionale tektonische Situation (tektonisches Regime), 2) die konzeptualisierten geologischen/tektonischen Elemente im Hinblick auf die untertägige Anlagen- und Einlagerungsplanung, 3) Seismikdaten, 4) Daten aus Sondierbohrungen und anderer Bohrungen, 5) Geländebeobachtungen und 6) die Spannungsverhältnisse (insbesondere die Orientierung der maximalen Horizontalspannung SH).

Unter Berücksichtigung der aktuellen Datenlage und Unsicherheiten vergleicht die NAGRA die jeweiligen Standortgebiete. In allen Standortgebieten geht die NAGRA davon aus, dass die Lagerebene unterhalb des sandigeren Bereichs im oberen Teil der Opalinustonsschicht zu liegen kommt. Unterschiede in der Ausbildung der Tonsteine (mehr sandig-kalkiger Tonsteine, generell höherer Tongehalt) zwischen den Standortgebieten können aufgrund der wenigen vorhandenen Bohrungen nicht abschliessend beurteilt werden (NAB 16-44). Als belastbarer sieht die NAGRA die Unterschiede in der tektonischen Situation. In den Standortgebieten NL, JO und JS erwartet die NAGRA eine tektonisch verursachte, lokalisierte mechanische Schwächung des Schichtgefüges sowie die Ausbildung von flachen Überschiebungen. Diese Überprägung ist im JS am deutlichsten ausgeprägt. In den Standortgebieten NL und JO zeigen die Befunde der NAGRA, dass die tektonische Überprägung insbesondere den untersten Bereich des Opalinustons betrifft. Für die Standortgebiete SR und ZNO gibt es keine Hinweise auf eine tektonische Überprägung (NAB 16-44).

Um mögliche Standortunterschiede aufzuzeigen beurteilt die NAGRA zudem die Durchtrennung des Gebirges basierend auf SIA 199 und auf Grundlage von Bohrungen und Beobachtungen an der Oberfläche und in Tunnelbauwerken. Die NAGRA beurteilt die Durchtrennung entlang der Schichtung für SR und ZNO als unbedeutend. Für NL, JO und JS erwartet die NAGRA eine lokalisierte Schwächung des Schichtgefüges die allenfalls zu einer lokalen Durchtrennung entlang der Schichtung höchstens in Abständen im Meterbereich führt (NAB 16-44). Eine massgebende Durchtrennung im NL, JO und JS wird an der Basis-Opalinuston nicht ausgeschlossen.

Als massgebend beurteilt die NAGRA das Auftreten und die Raumlage einlagerungsbestimmender Störungen / Scherflächen mit einer Mächtigkeit im Bereich 0.5–1.0 m und Erstreckungen von > 6 m. In den Standortgebieten SR und ZNO muss insbesondere im Nahbereich grosser Störungen mit ungünstigen Trennflächenlagen gerechnet werden. In den Standortgebieten NL, JO und JS liegen flach einfallende Aufschiebungen in sehr ungünstiger Lage.

Die NAGRA kommt bezüglich der geologischen Modelle zu folgenden Schlüssen: 1) Das Lager wird nach heutigen Kenntnissen deutlich unterhalb des sandigeren Bereichs im oberen Teil des Opalinustons erstellt; 2) aufgrund der Störungshäufigkeiten und Trennflächenabständen sind nur grobe standortspezifisch differenzierbare Aussagen möglich; die grössten Störungshäufigkeiten werden im Standortgebiet JS erwartet, die geringsten in ZNO und SR; 3) die geologischen Modelle repräsentieren die tektonischen Verhältnisse innerhalb der Lagerperimeter; bei einer Erweiterung des Perimeters in den Bereich zu meidender tektonischer Zonen ist mit einer stärkeren tektonischen Überprägung zu rechnen; 4) in allen Standortgebieten ist mit Störungen einer unbekanntem Frequenz (sub-) parallel zu SH zu rechnen; 5) in Standortgebieten im Einflussbereich der alpinen Fernschubtektonik sind flachliegende Aufschiebungen vorhanden (meist im unteren Bereich des Opalinustons).

### 3.1.2 Gebirgsmodelle

In einem weiteren Schritt führt die NAGRA sogenannte Gebirgsmodelle ein. Hier unterscheidet die NAGRA zwischen dem Referenzmodell (GMref), dem hochfesten Modell (GMmax) und dem niedrigsten Modell (GMmin). Jedem dieser drei Modelle werden geomechanische Parameter zugeordnet die sich an ein konzeptionelles Modell und verschiedenen Annahmen anlehnen (wie die maximale Versenkungstiefe und intrinsische Materialparameter; siehe Kapitel 4) beruhen.

GMref repräsentiert gemäss NAGRA einen homogenen, subhorizontal geschichteten und überkonsolidierten Tonstein mit weitgehend unzementierter Matrix (tonige Fazies) dessen Festigkeits- und Verformungsverhalten vom Grad der Überkonsolidierung bestimmt wird (Versenkungstiefe: 1700 m). GMref wird von der NAGRA als repräsentativ für die Lagerebene eingestuft ("erwarteter" Fall; NAB 16-43).

GMmax repräsentiert gemäss NAGRA einen homogenen, subhorizontal geschichteten und überkonsolidierten Tonstein (NAB 16-43), welcher bei der Versenkung eine signifikante Diagenese (Zementation) erfahren hat (Versenkungstiefe: 1700 m, Temperaturen: um die 80°C<sup>1</sup>), welche die Festigkeit und Steifigkeit erhöht und das Quellpotential verringert hat.

GMmin repräsentiert gemäss NAGRA einen homogenen, subhorizontal geschichteten und überkonsolidierten Tonstein, welcher in Folge des alpinen Horizontalschubs bei der Versenkung und späteren Entlastung eine tektonische Überprägung erfahren hat. Dadurch wird die Überkonsolidierung und Zementation gegenüber dem Referenzmodell teilweise aufgehoben, wodurch die Festigkeit und Steifigkeit ab- und das Quellpotential zunimmt. Bei der Herleitung der entsprechenden Kennwerte (siehe Kapitel 3) geht die NAGRA von einer maximalen Versenkung von 900 m aus (NAB 16-43). GMmin stellt für die NAGRA den relevanten Datensatz (gemäss NAB 16-41 und NAB 16-45) für die Beurteilung der maximalen Tiefenlage aus bautechnischer Sicht in den Standortgebieten dar.

Aus dem Grad der Überkonsolidierung leitet die NAGRA die Zunahme der Festigkeit und Steifigkeit mit der Tiefe ab und schlägt für den relevanten Tiefenbereich zwischen 600 und 900 m unter verschiedenen

---

<sup>1</sup> Im Konzept zur Herleitung der geomechanischen Parameter durch die NAGRA wird die Temperatur nicht explizit berücksichtigt. Dies wird bei der Herleitung indirekt über die Annahme einer äquivalenten, scheinbaren maximalen Versenkungstiefe berücksichtigt. Im Fall GMmax beträgt diese 3700 m (siehe auch Kapitel 4; NAB 16-43)



Annahmen Parametersätze für GMref, GMmax und GMmin vor (die Diskussion der Parameter erfolgt in Kapitel 4).

### **3.1.3 Gebirgsspannungen**

Die NAGRA geht bezüglich der Gebirgsspannungen wie bei den Gebirgsmodellen von einem Referenzfall (RSRref) aus. Neben diesem Referenzfall wird der Fall mit niedrigen (RSRmin) und hohen (RSRmax) lateralen horizontalen Spannungen betrachtet. Letzter Fall dient zur Beurteilung der Auswirkungen von Unsicherheiten in der Magnitude der maximalen Horizontalspannung. Um den Unsicherheiten in der Orientierung der Lagerkammern gegenüber der maximalen Horizontalspannung Rechnung zu tragen, wird zudem der (abdeckende) Fall angenommen, dass die Lagerstollen normal zu SH verlaufen können.

### **3.1.4 Porenwasserdrücke und Durchlässigkeiten**

Die für die Baugrundmodelltypen angenommene Gesteinsdurchlässigkeit beträgt zwischen  $10^{-13}$  m/s und  $10^{-12}$  m/s. Zudem wird festgehalten, dass wegen des Durchlässigkeitskontrast zwischen Opalinuston (bzw. Brauner Dogger) und den hangenden Gesteinsformationen der hydrostatische Porenwasserdruck am Top und an der Basis Opalinuston in allen Nutzungszuständen erhalten bleibt. Die NAGRA trifft weitere hydraulische Annahmen, die für die felsmechanischen Berechnungen wesentlich sind (u.a. keine negativen Porendrücke in der plastischen Zone).

### **3.1.5 Baugrundmodelltypen**

Basierend auf der Fazies, dem Gebirgsmodell, den Spannungen, den tektonischen Strukturen und den Gesteinsdurchlässigkeiten entwickelt die NAGRA Baugrundmodelltypen (BGM), welche die Ungewissheiten abdeckend berücksichtigen sollen. Die geologischen Informationen werden dadurch in 3 Baugrundmodelltypen überführt (BGM-1, BGM-2, BGM-3) mit zwei Untertypen bei BGM-1 (A & B) sowie BGM-3 (A & B).

Die beiden BGM-1 Typen werden gemäss NAB 16-45 als repräsentativ für die sandige Fazies ohne und mit Störzone angenommen. Diese BGM Typen kommen für die Lagerkammern nicht zur Anwendung, da von der NAGRA erwartet wird, dass die Lagerkammern ausserhalb der sandigen Fazies zu liegen kommen.

BGM-2 wird gemäss NAB 16-45 als repräsentativ für die tonige Fazies ohne Störzonen in direkter Nähe des Hohlraums für alle Standortgebiete auf Lagerebene angenommen.

Die beiden BGM-3 Typen repräsentieren gemäss NAB 16-45 ungünstige Verhältnisse ohne Störzonen und mit unterschiedlicher Ausrichtung im Spannungsfeld. Mit diesem Baugrundmodell soll der Einfluss der tektonischen Überprägung für den Bereich der Lagerebene abdeckend berücksichtigt werden. Dieser BGM wird von der NAGRA zur abdeckenden Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit auf Lagerebene verwendet.

## **3.2 Beurteilung der Experten**

Die geologischen Informationen zu den einzelnen Standortgebieten und deren Unsicherheiten wurden von der NAGRA stufengerecht in standortspezifische geologische Modelle überführt. Die grossen Unsicherheiten, welche sich aus den sehr lückenhaften Informationen zu den geologischen Verhältnissen in den bevorzugten Lagerperimetern und Tiefenbereichen ergeben, werden diskutiert. Das Vorgehen zur Ermittlung der Baugrundmodelle ist nachvollziehbar dokumentiert und unter Berücksichtigung der Unsicherheiten stufengerecht.

Die Baugrundmodelltypen (BGM 1–3) basieren auf Gebirgsmodellen (GMmin, GMref, GMmax), modellhaften Spannungszuständen (Magnitude und Orientierung), tektonischen Strukturen und Annahmen zur hydraulischen Leitfähigkeit des Wirtgesteins. Während die Annahmen zu den Spannungszuständen, tektonischen Strukturen und Annahmen zur hydraulischen Leitfähigkeit des Wirtgesteins nachvollziehbar und plausibel sind, stellen die Prüfexperten gewisse Annahmen zu den Gebirgsmodellen in Frage. Dies betrifft insbesondere die Annahme der NAGRA, dass GMmin den relevanten Datensatz für die Beurteilung der maximalen Tiefenlage aus bautechnischer Sicht in den Standortgebieten darstellen soll. Wie in Kapitel 4 ausgeführt wird, ist dies nach dem heutigen Stand der geologischen und geomechanischen Kenntnisse nicht begründbar. In diesem Zusammenhang erscheint den Experten auch die Verwendung von GMmin als massgebender Fall für die Identifikation von eindeutigen Nachteilen aufgrund der Tiefenlage nicht zweckmässig.

Unterschiede in der Ausbildung der Tonsteine (mehr sandig-kalkiger Tonsteine, generell höherer Tongehalt) innerhalb eines Standortgebietes und zwischen den Standortgebieten können gemäss NAGRA aufgrund der wenigen vorhandenen Bohrungen nicht abschliessend beurteilt werden. Demzufolge kann auch der Ausschluss der sandigen Fazies für die bautechnische Beurteilung zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschliessend beurteilt werden (siehe Diskussion zum Ausschluss von GMmax in Kapitel 4).

## **4 Felsmechanische Gesteins- und Gebirgs-Parameter**

### **4.1 Vorgehensweise der NAGRA**

#### **4.1.1 Grundlegende Eigenschaften des Opalinustons**

Das Vorgehen der NAGRA bei der Überarbeitung der geomechanischen Grundlagen (NAB 16-41; NAB 16-45; NAB 16-43) als Folge der Nachforderung des ENSI unterscheidet sich grundsätzlich von den Hauptdokumenten zur Etappe 2 SGT (NTB 14-02, Dossier IV; NAB 14-01).

Bei der neuen Herleitung von Referenzdatensätzen beschreibt die NAGRA zunächst grundsätzliche Eigenschaften des Opalinustons mit besonderem Fokus auf drei Schlüsselfaktoren, welche die geomechanischen Eigenschaften (u.a. Porosität, Festigkeit, Quellverhalten, Steifigkeit) von Opalinuston massgebend beeinflussen: 1) geologische Geschichte bzw. Versenkungsgeschichte, 2) die mineralogische Zusammensetzung und 3) die tektonische Überprägung.

Die geologische Geschichte bzw. Versenkungsgeschichte zeichnet sich durch Versenkungs- und Hebungsphasen aus, bei welchen die maximalen Versenkungstiefen und Temperaturen massgebend für die mechanische Kompaktion und diagenetische Verfestigung und damit die Porosität sind. Generell unterscheidet sich die maximale Versenkungstiefe (und heutige Tiefenlage durch Exhumierung) des Opalinustons in den potentiellen Standortgebieten der Nordschweiz gemäss NAB 16-43 von jener des Felslabors Mont Terri und könnte somit die Unterschiede in den geomechanischen Eigenschaften erklären. Die NAGRA geht davon aus, dass die maximale Überdeckung in den Standortgebieten 1500–1700 m betrug und die Temperaturen 80–90° erreichten (beim Standort Mont Terri geht die NAGRA von einer anderen Versenkungsgeschichte mit einer maximalen Überdeckung von 1350 m aus). Vergleichende Laborversuche zwischen aus Gesteinspulver hergestellten Proben („reconstituted samples“) und intakten Gesteinsproben (Favero et al. 2016) belegen, dass die heute vorliegende Porosität von Opalinuston nicht alleine durch die mechanische Kompaktion erklärt werden kann, sondern diagenetische Prozesse mit einschliesst.

Neben obigen Prozessen beschreibt die NAGRA mineralogische Variationen als zusätzlichen Faktor, welcher die Porosität des Opalinustons mit der Tiefe, bodenmechanische Indexeigenschaften (u.a.

Plastizitätszahl) und den Restreibungswinkel beeinflussen. Letzterer wird mit Hilfe empirischer Zusammenhänge für Opalinuston grob zwischen 20° und 35° abgeschätzt.

Als weiteren Punkt, welcher die Porosität des Opalinustons deutlich zu beeinflussen vermag, nennt die NAGRA die tektonische Geschichte. Tektonische Überprägung führt generell zu einer Zunahme der Porosität. Die tektonische Überprägung unterscheidet sich deutlich zwischen dem Felslabor Mont Terri und den Standortregionen der Nordschweiz. Auch innerhalb der Standortregionen sind gemäss NAGRA unterschiedliche tektonische Überprägungen zu verzeichnen.

#### **4.1.2 Ableitung von Referenzdatensätzen und Gebirgsmodelle**

Die Ableitung von neuen Referenzdatensätzen der NAGRA basiert auf einem „Critical State Soil Mechanics Modell“. Die NAGRA verwendet dieses Modell vor dem Hintergrund 1) der Übertragbarkeit elastischer Eigenschaften und der Restfestigkeit aus Gebieten mit unterschiedlicher geologischer Vorgeschichte (Versenkungsgeschichte und tektonische Überprägung), 2) der Begründung von Steifigkeits- und Festigkeitsreduktionen durch tektonische Überprägung, 3) der Begründung von Festigkeits- und Steifigkeitserhöhungen durch diagenetische Prozesse, 4) der Berücksichtigung der Variabilität in der mineralogischen Zusammensetzung auf die Festigkeit und 5) der generellen Berücksichtigung anderer Effekte wie ungesättigtem Verhalten, Quellen, Saugspannung, Selbstabdichtung, und scheinbarer Kohäsion.

Grundsätzlich unterscheidet die NAGRA zwei Modelle: 1) ein homogenes Modell mit isotroper oder anisotroper Festigkeit (Kontinuumsmodell) und 2) ein heterogenes Modell mit einer deterministischen Berücksichtigung von Trennflächen (Diskontinuumsmodell). In der Gruppe der Kontinuumsmodelle definiert die NAGRA wie unter 3.1.2 beschrieben, drei alternative Gebirgsmodelle als Grundlage für geomechanischen Analysen und die Vordimensionierung.

Referenzmodell GMref:

- maximale Versenkungstiefe von 1700 m (Prä-konsolidations-Spannung 28.2 MPa; NAB 16-43)
- unzementiertes Skelett
- grosses Quellpotential
- Festigkeit wird durch Überkonsolidierung bestimmt

Modell mit hoher Festigkeit GMmax:

- maximale Versenkungstiefe von 1700 m und 80°C (NAB 16-43)
- diagenetisch verfestigt/zementiert (dadurch auch geringere Porosität, höhere Festigkeit und Steifigkeit)
- reduziertes Quellpotential
- zur Herleitung der geomechanischen Parameter wird eine Prä-konsolidations-Spannung von 61 MPa angenommen

Modell mit niedriger Festigkeit GMmin:

- tektonisch überprägter Opalinuston mit erhöhter Porosität, reduzierter Festigkeit und Steifigkeit
- volles Quellpotential
- Zur Herleitung der geomechanischen Parameter wird eine Prä-konsolidations-Spannung von 15 MPa angenommen (NAB 16-43)

Die NAGRA nimmt für diese 3 Modelle eine weitere Unterteilung vor (NAB 16-43):

- Bei irregulärer Orientierung von Trennflächen mit geringen Abständen ist ein isotropes Modell mit GMmin-Kennwerten relevant
- Bei regulärer Orientierung von Trennflächen mit geringen Abständen ist ein anisotropes Modell mit GMmax-Kennwerten für die Matrix und GMmin-Kennwerten entlang der Anisotropieebene relevant

#### 4.1.3 Parametrisierung der Gebirgsmodelle

Zur Herleitung der geomechanischen Parameter der Gebirgsmodelle verwendet die NAGRA folgende Grundlagen bzw. Annahmen:

- Resultate von Laborversuchen, die bei der Detailprüfung in Etappe 2 SGT vor der Nachforderung des ENSI noch nicht zur Verfügung standen (Favero et al. 2016, Ewy et al. (under review), Wild et al. 2016)
- „Critical State“ Parameter vornehmlich aus Ödometerversuchen ( $\lambda, \kappa$ : Steigung der Erstbelastungs- bzw. Entlastungs-/Wiederbelastungsgeraden im halblogarithmischen  $e$ - $p'$ -Diagramm)
- Empirische Zusammenhänge (Steigung der „Critical State Line“  $M$  im  $q$ - $p'$  Diagramm)
- Resultate aus Triaxial-Druckversuchen für die Festlegung der Steigung der Hvorslev Geraden  $h$  im  $q$ - $p'$  Diagramm (Favero et al. 2016, Ewy et al. under review)
- Annahme zum Verhältnis zwischen undrainiertem E-Modul  $E_u$  und undrainierter Scherfestigkeit  $c_u$  ( $E_u:c_u = 500:1$ )
- Annahme zum undrainierten E-Modul parallel zur Schichtung (doppelt so hoch wie E-Modul normal zur Schichtung)
- Die drainierten elastischen Eigenschaften werden unter Annahme eines isotropen elastischen Verhaltens berechnet
- Die hydro-mechanischen Kopplungsparameter  $\alpha$  und  $B$  können unter der Annahme der Kornkompressibilität (20 GPa) und der Wasserkompressibilität (2 GPa) berechnet werden

Die Herleitung selbst erfolgt gemäss nachfolgenden Arbeitsschritten:

- Berechnung der Porosität für die vorgesehene Tiefe und Spannungszustand  $RSR_{ref}$
- Berechnung der undrainierten Scherfestigkeit ( $c_u$ )
- Berechnung der effektiven Scherfestigkeitsparameter ( $\phi'$  wird als konstant angenommen und  $c'$  wird berechnet)
- Berechnung der undrainierten E-Moduli unter Annahme  $E_u:c_u = 500:1$
- Berechnung der drainierten E-Moduli unter Annahme isotrop elastischer Verhältnisse

Die Ergebnisse der Herleitung der geomechanischen Kennwerte unter Berücksichtigung verschiedener Annahmen (z.B.  $M$ , Poisson-Zahl,  $h$  gleichbleibend) sind in Tabelle 1 für den relevanten Tiefenbereich 600 m bis 900 m zusammengefasst.

Tabelle 1: Geomechanische Kennwerte für den Tiefenbereich zwischen 600 und 900 m.

			GM-max		GM-ref		GM-min	
			parallel zur Schichtung	normal zur Schichtung	parallel zur Schichtung	normal zur Schichtung	parallel zur Schichtung	normal zur Schichtung
Poissonzahl drainiert	$\nu_d$	[-]	0.20		0.20		0.20	
E-Modul drainiert:								
- "pre-peak"	$E_d$	[GPa]	17.1 - 17.8	7.9 - 8.3	7.3 - 8.4	3.5 - 4.0	4.7 - 5.4	2.3 - 2.6
- "post-peak"	$E_d$	[GPa]	4.7 - 5.4	2.3 - 2.6	4.7 - 5.4	2.3 - 2.6	4.7 - 5.4	2.3 - 2.6
E-Modul undrainiert:								
- "pre-peak"	$E_u$	[GPa]	18.2 - 19.0	9.1 - 9.5	8.4 - 9.6	4.2 - 4.8	5.5 - 6.3	2.7 - 3.1
- "post-peak"	$E_u$	[GPa]	5.5 - 6.3	2.7 - 3.1	5.5 - 6.3	2.7 - 3.1	5.5 - 6.3	2.7 - 3.1
Höchstfestigkeit, Matrix:								
- Kohäsion	$c'_{mp}$	[MPa]	7.2 - 7.5		3.3 - 3.8		2.2 - 2.5	
- Reibungswinkel	$\phi'_{mp}$	[Grad]	20		20		20	
Restfestigkeit, Matrix:								
- Kohäsion	$c'_{mr}$	[MPa]	2.2 - 2.5		2.2 - 2.5		2.2 - 2.5	
- Reibungswinkel	$\phi'_{mr}$	[Grad]	20		20		20	
Dilatanzwinkel, Matrix	$\psi'_m$	[Grad]	3		3		3	
Höchstfestigkeit, Schichtung:								
- Kohäsion	$c'_{bp}$	[MPa]	5.6 - 5.8		2.5 - 2.9		1.7 - 1.9	
- Reibungswinkel	$\phi'_{bp}$	[Grad]	20		20		20	
Restfestigkeit, Schichtung								
- Kohäsion	$c'_{br}$	[MPa]	1.7 - 1.9		1.7 - 1.9		1.7 - 1.9	
- Reibungswinkel	$\phi'_{br}$	[Grad]	20		20		20	
Dilatanzwinkel, Schichtung	$\psi'_b$	[Grad]	0		0		0	

## 4.2 Beurteilung der Experten

Grundsätzlich entspricht das Konzept der NAGRA, dass die maximale Überdeckung und Temperatur (Kompaktion und diagenetische Verfestigung), die mineralogische Zusammensetzung und die tektonische Überprägung massgebend die Festigkeiten und Steifigkeiten von Opalinuston beeinflussen, dem heutigen Stand der Kenntnisse. Diese Zusammenhänge wurden von der NAGRA klar beschrieben. Die drei Gebirgsmodelle (GMmax, GMref, GMmin), mit unterschiedlichen geomechanischen Parametersätzen für den Opalinuston, stellen angesichts der möglichen wirtgesteins-spezifischen und standortbezogenen Unsicherheiten sowie der geringen experimentellen Datenbasis richtigerweise ein breites Spektrum an geomechanischen Parametern dar.

### *Theoretisches Modell und Annahmen zur Ableitung der geomechanischen Kennwerte*

Die NAGRA leitet die Gebirgsmodelle auf Grundlage eines „Critical State“ Modells (CSM) ab, was eine Abschätzung intrinsischer und tiefenabhängiger Materialeigenschaften über die Porosität und das volumetrische Verhalten (Resultate aus Ödometersversuchen) ermöglichen soll. Dieser Modellansatz zeichnet sich dadurch aus, dass der Opalinuston unabhängig von seinem initialen Zustand während des Abscherens einem kritischen Zustand (englisch: „Critical State“) zusteuert, in dem Formänderungen ohne weitere Volumenänderungen weitergehen bzw. der Dilatanzwinkel im Bruchzustand einen Wert von Null aufweist. Dies stellt den eigentlichen Ansatzpunkt des Critical State Modells dar.

Nach Ansicht der Experten bildet das gewählte Modell wichtige Aspekte des Verhaltens des Opalinustons ab (vergleiche Expertenbericht ENSI 33/461). Für die generelle Gültigkeit und Anwendbarkeit des Stoffansatzes für Opalinuston fehlen jedoch empirische Belege<sup>2</sup>. Es ist zudem unklar, ob das für Lockergesteine entwickelte „Critical State“ Modell auf intakten, diagenetisch zementierten Opalinuston

<sup>2</sup> In triaxialen Laborversuchen wurde weder im Nachbruchbereich noch bei Versuchen mit sehr hohen effektiven mittleren Spannungen das Erreichen eines „Critical State“ nachgewiesen.

(Favero et al. 2016) anwendbar ist. Die NAGRA hält dazu in NAB 16-43, Seite 5 fest: "effects of compaction and diagenesis cause the shale to deviate more and more from typical properties and behavior of a clay-rich soil to a hard rock".

Das Verfahren der NAGRA zur Herleitung der geomechanischen Eigenschaften gemäss CSM beruht auf Ergebnissen von Ödometerversuchen ( $\lambda$  (Steigung der Erstbelastungsgerade im halblogarithmischen  $e-p'$ -Diagramm),  $\kappa$  (Steigung der Ent- bzw. Wiederbelastungsgerade im halblogarithmischen  $e-p'$ -Diagramm) sowie auf empirischen Abschätzungen der Steigung der „critical state line“ (M) und der Hvorslev Steigung (h). Die massgebenden Ergebnisse der Abschätzung der geomechanischen Eigenschaften (undrainierter und drainierter E-Modul, effektive Kohäsion  $c'$  und undrainierte Scherfestigkeit  $c_u$ ) sind weitgehend insensitive auf die Parameter aus Ödometerversuchen ( $\lambda$ ,  $\kappa$ ), jedoch sehr sensitiv gegenüber Resultaten, welche mittels triaxialen Druckversuchen (M, h) erhoben werden können. Insbesondere die Annahme für M wurde anhand empirischer Beziehungen zwischen Indexeigenschaften von Opalinuston und dem Restreibungswert grob abgeschätzt, ist experimentell nicht belegt und weist damit grosse Unsicherheiten auf. Die empirischen Zusammenhänge weisen eine signifikante Streuung über das nahezu gesamte Spektrum der in der Natur denkbaren Restreibungswinkel auf ( $20-35^\circ$ ). Die Ursachen dieser Streuung sind in Terzaghi et al. (1996) erläutert. Zudem liegt ein Widerspruch zwischen den von der NAGRA verwendeten Werten für M ( $30^\circ/33^\circ$ ) und dem aus triaxialen Druckversuchen ermittelten Restreibungswinkel ( $20^\circ$ ) vor. In NAB 16-43 argumentiert die NAGRA, dass der Restreibungswinkel dem „critical state friction angle“ entspricht. Diese Annahmen haben einen erheblichen Effekt auf die effektive Kohäsion, die undrainierte Scherfestigkeit und somit auch auf die Steifigkeit.

Datenpunkte aus triaxialen Druckversuchen liegen in den Darstellungen der NAGRA (ohne Resultate der Daten aus Ewy et al. (under review)) zum Teil rechts der Critical State Line. Fügt man letztere Daten zur Datenbasis hinzu, lässt sich feststellen, dass auch aus der Datenreihe von Ewy et al. (under review) zwei von fünf Datenpunkten deutlich rechts der Critical State Line zu liegen kommen. Dies könnte entweder darauf hinweisen, dass die Steigung der Critical State Line M zu steil angenommen wurde, oder zur Argumentation beitragen, welche die Anwendbarkeit des Modellansatzes für zementierten Opalinuston in Frage stellt.

Porositäten  $> 15\%$ , wie sie an Opalinustonproben aus dem Felslabor Mont Terri (Faltenjura) gemessen wurden, werden von der NAGRA für die Standortgebiete aus folgenden Gründen als nicht zutreffend beurteilt: 1) Unterschiedliche Versenkungsgeschichte (maximale Versenkungstiefen und Entlastungen); 2) Unterschiedliche tektonische Überprägung; und 3) In den Standortgebieten in grösseren Tiefenlagen gemessene Porositäten (immer  $< 15\%$ ). Die Experten stimmen dieser Einschätzung der NAGRA generell zu und halten fest, dass im Sinne der Argumentation der NAGRA geomechanische Eigenschaften von Opalinustonproben aus Mont Terri nicht auf die Standortgebiete anwendbar sind (siehe auch NTB 14-02, Dossier IV). Die Steifigkeiten und Festigkeiten von Opalinuston in den tektonisch weniger beanspruchten Standortgebieten mit tieferer Versenkungsgeschichte sind höher als jene im Felslabor Mont Terri. Bei Opalinustonproben aus Lausen (Westlicher Tafeljura; Ewy et al. (in Review)) ist grundsätzlich von einer geringeren tektonischen Überprägung als im Felslabor Mont Terri auszugehen. Allerdings stammen die Proben aus Lausen aus einer Tiefe von nur rund 33 m, was eine Entlastungsgeschichte nahelegt, die von den bevorzugten Tiefenlagen in den Standortgebieten stark abweicht. Gemäss dem Konzept der NAGRA sind in den wenig tektonisch beanspruchten Standortgebieten, insbesondere auf Lagerebene, und im Tiefenbereich zwischen 500 und 900 m, höhere Steifigkeiten und Festigkeiten als an den Proben von Lausen zu erwarten. Nachfolgend wird die Konsistenz der vorgeschlagenen, theoretisch ermittelten Parameter durch einen Vergleich mit tatsächlich, experimentell ermittelten Daten überprüft.

Für GMmin wird eine Porosität je nach Tiefenlage zwischen 12.6% (900 m) und 13.3% (500 m) erwartet. Neue triaxiale Druckversuche (Nagra 2016) an Proben vom Felslabor Mont Terri mit Porositäten zwischen 17% und 19%, zeigen jedoch effektive Scherfestigkeiten die mit den effektiven Scherfestigkeiten für GMref vergleichbar sind<sup>3</sup>. Versuchsergebnisse an Proben von Lausen (Tafeljura, Ewy et al. (in Review)), welche sich durch eine Porosität zwischen 12% und 15% auszeichnen (d.h. Porositäten vergleichbar mit GMmin), weisen eine effektive Matrix-Scherfestigkeit auf, die mit dem Gebirgsmodell GMmax vergleichbar ist. Nach Einschätzung der Experten bestätigen diese Inkonsistenzen, dass der verwendete theoretische Ansatz zur Abschätzung der Festigkeit (und Tiefenabhängigkeit) mit grossen Unsicherheiten behaftet ist.

#### *Ausschluss von GMmax*

Die NAGRA beschreibt, dass an allen potentiellen Standortgebieten die maximale Überdeckung zwischen 1500 und 1700 m und die maximalen Temperaturen in der Entwicklungsgeschichte zwischen 80 und 90°C lagen. Dies stimmt mit den Ergebnissen von Matzerek et al. (2006) überein. Aufgrund der maximalen Versenkungstiefe und Temperaturen kam es in den Standortgebieten zur Kompaktion und einer diagenetischen Verfestigung, was zur Ausbildung einer charakteristischen Struktur führte und das hydro-mechanische Verhalten beeinflusst (Favero et al. 2016). Um diese Prozesse bei der Herleitung der geomechanischen Eigenschaften zu berücksichtigen (die Temperatur kann im Verfahren der NAGRA nicht explizit berücksichtigt werden), wird von der NAGRA eine scheinbare Versenkungstiefe von 3700 m angenommen. Dies führt zu den vorgeschlagenen Kennwerten von GMmax für diagenetisch verfestigten Opalinuston. Obgleich die Überlegungen der NAGRA den Experten grundsätzlich nachvollziehbar erscheinen, ist die Zuordnung der geomechanischen Kennwerte von GMmax im NAB 16-45 zur sandigen Fazies und der damit einhergehende Ausschluss von GMmax bei den geomechanischen Berechnungen nicht nachvollziehbar und widersprüchlich. Die NAGRA beschreibt in NAB 16-43, dass „The process which controls the actual rock strength (state) at repository depth is the overconsolidation of the material...“ Auf Grundlage des heutigen Stands der Kenntnisse zur maximalen Versenkungstiefe und Temperaturen in den Standortgebieten lässt sich der Ausschluss von GMmax-Kennwerten durch obige Argumentation nicht begründen. Die massgebenden und belastbaren Laborversuche (Ödeometer und triaxiale Druckversuche) an Proben der Bohrung Schlattingen weisen Quarzgehalte zwischen 17-32% und Tonmineralgehalte zwischen 44-68% auf. Die Proben von Lausen zeigen 30% Quarz- und 50% Tongehalt. Aus den bestehenden Daten kann kein belastbarer Zusammenhang zwischen Tonmineralgehalt, Steifigkeit und Festigkeit ermittelt werden. Zudem ist zu erwähnen, dass das Vorgehen der NAGRA drei Gebirgsmodelle vorzuschlagen auf dem Grundsatz basiert, die „wirtgesteinsspezifischen und standortbezogenen Ungewissheiten“ durch eine „entsprechend grosse Parameter-Bandbreite“ zu berücksichtigen (NAB 16-41, Seite 94). Die oben erwähnte Zuordnung der Gebirgsmodelle zur Fazies (tonig, sandig) im NAB 16-45 führt jedoch dazu, dass GMmax keine Rolle

---

<sup>3</sup>Die in Nagra (2016) dokumentierten konsolidierten, drainierten Triaxialversuche wurden sehr sorgfältig ausgeführt. Einer der beiden Versuche wurde als Einstufentest, der zweite Versuch als Mehrstufentest (3 Stufen) an Opalinustonproben aus Mont Terri ausgeführt. Bei letzterem wurde bei jeder Einspannungsstufe die Spitzenfestigkeit zweimal überschritten, was sich durch einen zweimaligen Spannungsabfall oder einem Plateau nach Erreichen der Spitzenfestigkeit äussert. Dieses Vorgehen kann zu einer erheblichen Schädigung der Probe führen, die sich in der nachfolgenden Einspannungsstufe relevant auf die Spitzenfestigkeit auswirken kann (effektive Kohäsion und Reibungswinkel werden unterschätzt; dies wird auch in Nagra (2016) thematisiert). Folglich sind die Resultate der 2. und 3. Druckstufe des Mehrstufentests mit Unsicherheiten behaftet.

bei der Beurteilung der maximalen Tiefenlage spielt und somit die postulierte Bandbreite der geomechanischen Eigenschaften des Opalinustons auf Lagerebene verloren geht.

### *Geomechanische Kennwerte*

Die theoretisch hergeleiteten Materialparameter lassen sich nur sehr eingeschränkt experimentell überprüfen. In NTB 14-02, Dossier IV hat die NAGRA die Daten aus der Bohrung Benken (Proben aus ca. 600 m Tiefe) sowie der Bohrung Schlattingen (Proben aus ca. 900 m Tiefe) als repräsentativ beurteilt für die geomechanischen Parameter von Opalinuston im relevanten Tiefenbereich von 600 m bis 900 m sowie die Daten aus dem Felslabor Mont Terri in weniger als 300 m Tiefe ausdrücklich davon ausgeschlossen. Die Experten des ENSI stimmen dieser Einschätzung der NAGRA zu. In ENSI 33/461 haben die Experten des ENSI zudem gezeigt, dass die Triaxialversuche an Proben der Bohrung Benken (Nagra 1999) nicht, jene an Proben der Bohrung Schlattingen (NAB 13-18) nur teilweise belastbar sind (2 Versuche bezüglich Festigkeit und 8 Versuche bezüglich Steifigkeit). Die NAGRA bestätigt die Bewertung der Experten des ENSI weitgehend, indem bei ihrer Nachlieferung nur noch die gemäss NAB 13-45 mit Qualität B gekennzeichneten Triaxialversuche von NAB 13-18 berücksichtigt wurden. Die vorhandenen 4 Ödometerversuchen an Proben der Bohrung Schlattingen (NAB 12-50) wurden im Rahmen der Nachlieferung der NAGRA durch weitere 3 Ödometerversuche ebenfalls an Proben der Bohrung Schlattingen (Ferrari et al 2016, Favero et al 2016) ergänzt, die zusätzliche Aussagen zu den Steifigkeitsparametern (E-Modul), nicht jedoch zu den Festigkeitsparametern (Kohäsion, Reibungswinkel) erlauben. Insgesamt verbleibt eine sehr eingeschränkte geomechanische Datenbasis.

Die Gebirgsmodelle sind durch unterschiedliche Festigkeitsparameter (Kohäsion variabel, Reibungswinkel konstant  $20^{\circ}$ <sup>4</sup> (basierend auf neuen Triaxialversuchen in Nagra (2016), Ewy et al. und Vergleichen mit Callovo-Oxfordian argillite)) der Matrix sowie entlang der Schichtung bzw. durch unterschiedliche Steifigkeitsparameter (E-Modul variabel) parallel sowie senkrecht zur Schichtung gekennzeichnet. Die NAGRA differenziert für sämtliche Gebirgsmodelle (ausser GMmin) hinsichtlich der Festigkeitsparameter jeweils zwischen „peak“- und „residual“-Werten der Kohäsion bzw. hinsichtlich der Steifigkeitsparameter zwischen „pre-peak“- und „post-peak“-Werten des E-Moduls (Tabelle 1). Die an Proben der Bohrung Schlattingen durchgeführten Triaxial- und Ödometerversuchen zeigen im Vergleich mit den theoretisch hergeleiteten Materialparametern, dass die Festigkeit des untersuchten Opalinustons am ehesten mit GMmax beschrieben werden kann. In Bezug auf die Spitzenfestigkeitsparameter (Figur 1) liegen die Versuchsergebnisse fallweise über GMmax (Festigkeit der Matrix, jeweils 2 Versuche mit korrekter Ermittlung der Festigkeit bzw. mit Unterschätzung der Festigkeit (ENSI 33/461)) oder tendenziell eher zwischen GMmax und GMmin (Festigkeit entlang der Schichtung, 4 Versuche mit Unterschätzung der Festigkeit (ENSI 33/461)). Somit ist bezüglich der Spitzenfestigkeit entlang der Schichtung keine eindeutige Einschätzung möglich. In Bezug auf die Steifigkeitsparameter (siehe Figur 2) liegen die Versuchsergebnisse stets zwischen GMmax und GMref (Verhalten parallel sowie senkrecht zur

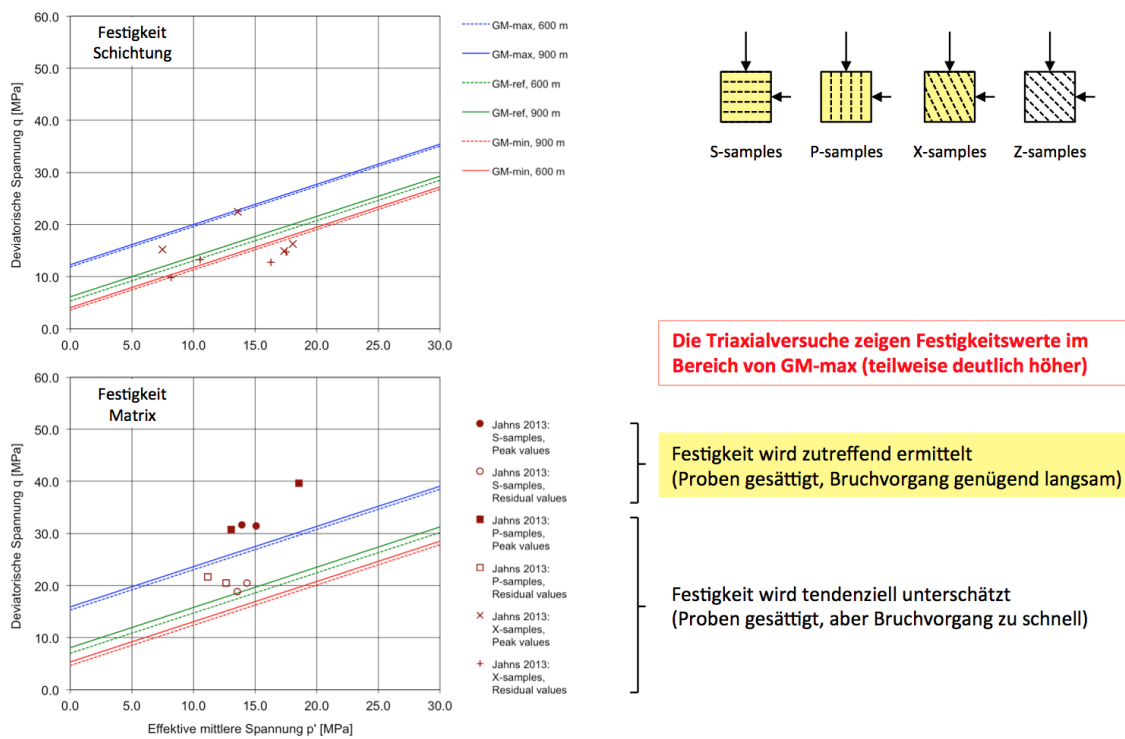
---

<sup>4</sup> Die von der NAGRA postulierte, kompaktionsbedingte Struktur des Opalinustons hat, insbesondere bei tiefen Einspannungen, eine Auswirkung auf den mobilisierbaren Reibungswiderstand. Dieser strukturelle Effekt ist bei sehr hohen Einspannungen unbedeutend und die Annahme Restreibungswinkel  $\approx$  Spitzenreibungswinkel vertretbar. Bei niedrigen, für den Tunnelbau relevanten effektiven Spannungen (gemäss NAGRA zwischen 5 und 15 MPa effektiver mittlerer Spannung) kann der Spitzenreibungswinkel grösser als der Restreibungswinkel sein. Von den 5 triaxialen Druckversuchen in Ewy et al. (under review) wurden 4 unter effektiven Spannungsbedingungen getestet, die weit über dem von der NAGRA als relevant betrachteten effektiven Spannungsbereich. Die Anwendung des ermittelten Reibungswinkel für tiefere effektive Spannungsverhältnisse ist mit Unsicherheiten behaftet.

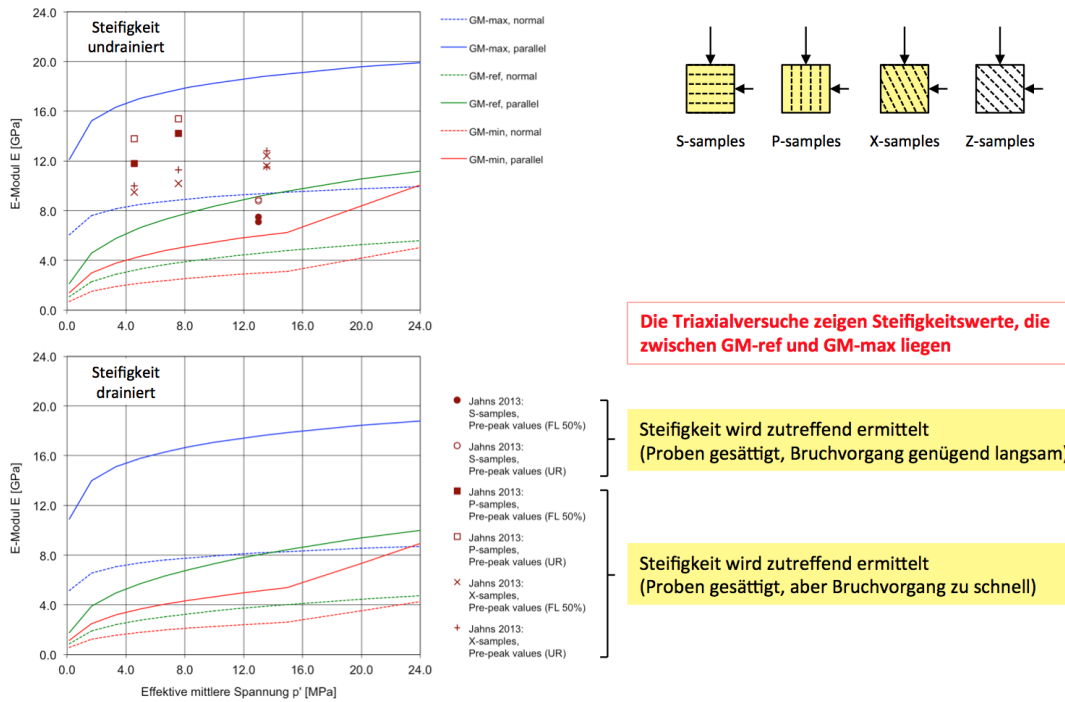


Schichtung, 4 Versuche mit korrekter Ermittlung der Steifigkeit (ENSI 33/461)), jedoch näher zu GMmax als zu GMref. Die weiteren belastbaren Daten der Triaxialversuchen mit unter 30° zur Prüfkörperachse geneigter Schichtung wie auch die Ödometerversuchen (S-Proben; Figur 3) bestätigen obige Aussagen zu den „pre-peak“-Werten des E-Moduls.

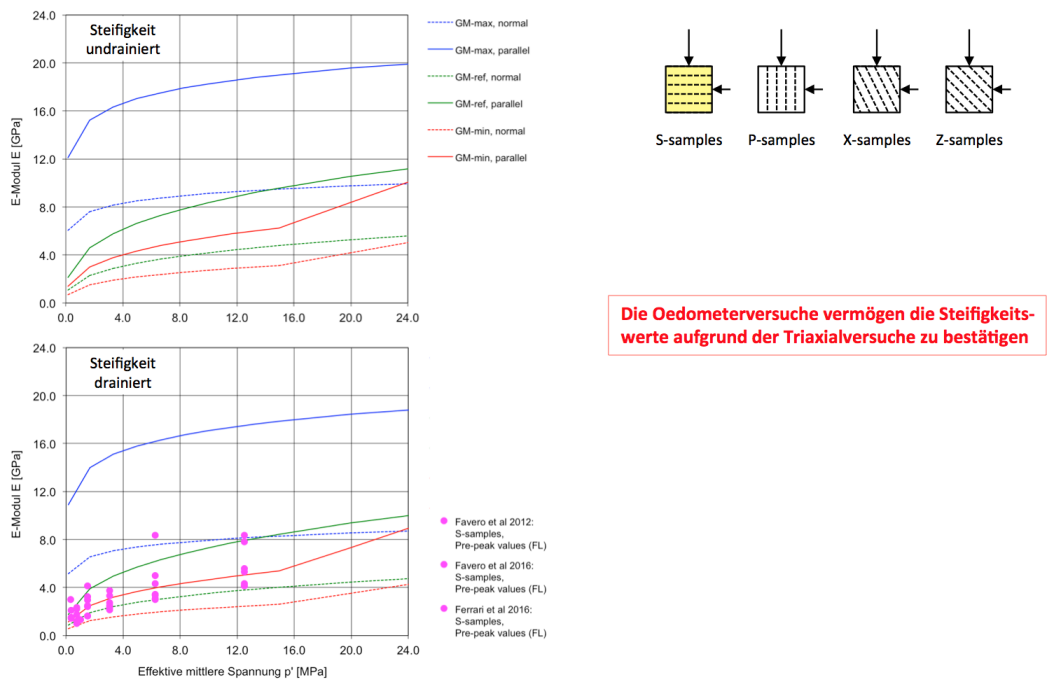
Die generelle Annahme des Datensatzes GMmin für die Tiefenlage und tektonische Situation in den Standortgebieten bleibt darum unbegründet. Allerdings stimmen die Experten zu, dass eine derart niedrige effektive Festigkeit und Steifigkeit im Nahbereich von Störzonen möglich ist. Wie in den geologischen Modellen durch die NAGRA beschrieben, ist in den Standortgebieten NL, JO und JS aber nur von einer allenfalls lokalen tektonischen Schwächung des Schichtgefüges auszugehen. Die Annahme von GMmin für ein gesamtes Standortgebiet ist demzufolge nicht nachvollziehbar.



Figur 1: Gegenüberstellung von Triaxialversuchen an Proben aus Schlattigen (CU aus NAB 13-18) mit den von der NAGRA vorgeschlagenen effektiven Höchstfestigkeiten für die drei Gebirgsmodelle.



Figur 2: Gegenüberstellung von Triaxialversuchen (CU Versuche aus NAB 13-18) mit den von der NAGRA vorgeschlagenen Steifigkeiten für die drei Gebirgsmodelle (FL 50%: „First Loading“; Ermittlung als Sekantenmodul zwischen Zustand vor Abscheren und Zustand bei 50% der maximalen differentiellen Spannung; UR: „Unloading / Reloading“; Ermittlung als Tangentenmodul).



Figur 3: Gegenüberstellung belastbarer Ödometerversuche (Ferrari et al. 2016, Favero et al. 2016, NAB 12-50) mit den von der NAGRA vorgeschlagenen Steifigkeiten für die drei Gebirgsmodelle. Die Ermittlung von  $p'$  basiert auf elastischen Annahmen mit einer Poisson-Zahl von 0.25. FL: „First Loading“; Ermittelt als Sekantenmodul.

Der Vergleich der verschiedenen Gebirgsmodelle zeigt, dass die „peak“-Werte der Kohäsion sowie die „pre-peak“-Werte des E-Moduls von GMmin zu GMmax stark zunehmen, während die „residual“-Werte der Kohäsion sowie die „post-peak“-Werte des E-Moduls von der NAGRA für alle Gebirgsmodelle gleich gross angenommen und mit denen von GMmin gleichgesetzt werden (Tabelle 1). Diese Vorgehensweise der NAGRA hat zur Folge, dass für den E-Modul im Nachbruchbereich bei GMref ein um 35% geringerer Wert und bei GMmax sogar ein um 70% geringerer Wert resultiert. Die Experten des ENSI halten so grosse Unterschiede zwischen „pre-peak“- und „post-peak“-Werten des E-Moduls für fragwürdig. Die belastbaren Daten (ausgewählte Triaxialversuche von Jahns (2013) an Proben aus der Bohrung Schlattingen) zeigen viel geringere Unterschiede (wenn überhaupt) und bestätigen diese Beurteilung der Experten des ENSI. Je nach Auswertungsmethode zeigen die Versuchsergebnisse eine Abnahme des E-Moduls im Nachbruchbereich um nur durchschnittlich 15% (Auswertung als Tangentenmodul aus Ent- bzw. Wiederbelastung) oder sogar eine geringfügige Zunahme des E-Moduls im Nachbruchbereich (Auswertung als Sekantenmodul bei 50% maximalen Hauptspannungsdifferenz aus Erstbelastung).

Die einfachere, direkte und auch von der NAGRA als naheliegender<sup>5</sup> bezeichnete Ableitung der Steifigkeitsparameter („pre-peak“-Werte des E-Moduls) aus  $\lambda$  und  $\kappa$  im Vergleich zur theoretischen Vorgehensweise der NAGRA weist auf eine deutlich ausgeprägtere Zunahme der Steifigkeit im Tiefenbereich zwischen 600 und 900 m hin. Während die NAGRA gemäss NAB 16-43 je nach betrachtetem Gebirgsmodell von einer Zunahme des E-Moduls von 5% bis 15% ausgeht, würde sich aufgrund der direkten Methode eine Zunahme des E-Moduls von rund 50% ergeben. Die vorliegenden Laborversuche lassen bezüglich der Steifigkeit keine klaren Schlüsse zu, welches Szenario wahrscheinlicher ist. Es liegen zudem bezüglich der tiefenabhängigen Festigkeit keine Laborversuche vor, um die Angaben der NAGRA zu prüfen. Es bestehen darum aufgrund der geringen Datenbasis grosse Unsicherheiten bezüglich der Quantifizierung der geomechanischen Parameter. Diese Unsicherheiten betreffen nicht nur die Bandbreite der Festigkeits- und Steifigkeitsparameter, sondern auch das Ausmass der Änderung dieser Materialparameter mit zunehmender Tiefenlage. Deshalb wird von den Experten auch die von der NAGRA angenommene Tiefenabhängigkeit der geomechanischen Kennwerte in Frage gestellt.

Der gemäss NAGRA massgebende Fall GMmin ist nach heutigem Stand der geologischen und geomechanischen Kenntnisse bezüglich der effektiven Festigkeiten und Steifigkeiten als zu konservativ für den Opalinuston in den Standortgebieten zu bezeichnen. Diese Einschätzung stimmt auch weitgehend mit der Einschätzung der NAGRA in NAB 16-43 zur effektiven Festigkeit überein: „From the experimental data, GMmax is considered more realistic for in-situ properties for situations represented by Benken and Schlattingen boreholes. For a Weiach and Riniken borehole environment with clay mineral contents around 60% GMref is considered to be more appropriate”.

Nach Einschätzung der Experten des ENSI ist eine stärkere Eingrenzung der Materialparameter zum heutigen Zeitpunkt angesichts der geringen belastbaren experimentellen Datenbasis nicht möglich. Erst während der 3. Etappe des Sachplans geologische Tiefenlager wird sich das Festigkeits- und Verformungsverhalten mittels der geplanten standortspezifischen Bohrungen mit Probenentnahmen im relevanten Tiefenbereich und einer geeigneten Versuchsdurchführung genauer eingrenzen lassen.

#### *Konsistenzprüfungen der geomechanischen Kennwerte durch die NAGRA*

---

<sup>5</sup> Gemäss NAB 16-43, Seite 24 gilt diesbezüglich, dass „the more consistent derivation of Young’s moduli based on lambda and kappa parameters within the chosen framework is currently work in progress“.

Die hergeleiteten geomechanischen Parametersätze werden in NAB 16-43 mit der normalisierten undrainierten Scherfestigkeit von verschiedenen Tonschiefern verglichen. Allerdings werden die belastbaren Daten von Opalinuston nicht gezeigt, was eine abschliessende Beurteilung erschwert. Zudem werden die effektiven Scherfestigkeitsparameter mit effektiven Scherfestigkeiten aus triaxialen Druckversuchen an Callovo-Oxfordian Tonstein verglichen und gezeigt, dass diese mit GMref gut zusammenpassen. Es bleibt unklar, welche Aussagekraft dieser Vergleich bezüglich der Belastbarkeit der hergeleiteten effektiven Scherfestigkeitsparameter haben soll. Vergleicht man diese Daten mit anderen in der Literatur bestimmten effektiven Scherfestigkeiten an anderen Tonsteinen oder Tonschiefern, könnte sich ein vollkommen anderes Bild ergeben. Beispielsweise ist die an Pierre Shale (Porosität um 23%) ermittelten effektiven Kohäsion (10.5 MPa) und der effektive Reibungswinkel (26-28°) deutlicher höher als die für GMmax vorgeschlagenen Werte (Islam und Skalle 2013).

Die GMmin-Kennwerte wurden im NAB 16-43 einer Konsistenzprüfung unterzogen. Dazu wurden vereinfachte Modelle (Gebirgskennlinienberechnungen) in totalen Spannungen einerseits mit effektiven Scherfestigkeiten (Modell 1), andererseits mit der undrainierten Scherfestigkeit (Modell 2) ausgeführt. Bei ersteren Modellen, welche das langzeitverhalten Abbildung sollen<sup>6</sup>, wurde der Reibungswinkel und der E-Modul (undrainierter E-Modul von 2.2 GPa bzw. 4.0 GPa) konstant gehalten und die effektive Kohäsion variiert. Bei zweiteren Modellen wurde die undrainierte Scherfestigkeit variiert. Die Ergebnisse der einzelnen Berechnungen wurden mit gemessenen Konvergenzen im FE-Tunnel im Felslabor Mont Terri sowie den abgeschätzten Ausdehnungen der plastischen Zone verglichen. Die beschriebenen Berechnungen sind bezüglich der verwendeten Stoffparameter teilweise nicht nachvollziehbar (zum Beispiel Kombination aus effektiver Festigkeit mit undrainierter Steifigkeit im Modell 1), kommen aber zu Schluss, dass GMmin Kennwerte ein stark tektonisiertes Gebirge in der tonige Fazies in Mont Terri repräsentieren. Im Abschnitt des FE Tunnels wurden effektive Trennflächenabstände von etwa 0.4 m erfasst (NAB 14-87) und ab Tunnelmeter 12 lag der Stollen im unmittelbarem Einflussbereich einer Störzone. Es ist davon auszugehen, dass effektive Trennflächen im Abstand von 0.4 m einen relevanten Einfluss auf die Gebirgsfestigkeit (eine Kombination aus Matrix und Trennflächeneigenschaften) haben. Die theoretisch hergeleiteten Kennwerte der Gebirgsmodelle stellen gemäss dem Konzept der NAGRA jedoch Matrixeigenschaften dar, die im Zusammenhang mit der Versenkungsgeschichte und einer tektonischen Überprägung stehen. Effektive Trennflächen werden dabei nicht berücksichtigt. Gemäss NAGRA können in den Standortgebieten lokal effektive Trennflächen erwartet werden, allerdings mit Abständen > 1 m. Aus Sicht der Experten zeigt sich, dass GMmin allenfalls für ein stark tektonisiertes Gebirge in Mont Terri, mit einer von den Standortgebieten stark abweichenden Versenkungsgeschichte anwendbar ist, für die Standortgebiete als abdeckender Fall aber nicht begründbar ist.

## **5 Geologische Gefährdungsbilder und ihre Relevanz für die Beurteilung der Projektkonzepte und Nutzungszustände**

### **5.1 Vorgehensweise der NAGRA**

Basierend auf der Beschreibung der geologischen, hydrogeologischen und geotechnische Verhältnisse definiert die NAGRA in Anlehnung an SIA 199 Gefährdungsbilder bzw. unerwünschte Ereignisse. Die Beschreibung erfolgt standortspezifisch und primär qualitativ und wird, wo möglich, mit quantitativen Angaben ergänzt (insbesondere bei der Beurteilung der Druckhaftigkeit).

---

<sup>6</sup> Die steht im Widerspruch zu NAB 16-45, wo gezeigt wird, dass unter gewissen Annahmen (Porendruckbegrenzung in der plastischen Zone) eine Totalspannungsanalyse mit effektiven Kennwerten das Kurzzeitverhalten abbilden kann.

Bei der standortspezifischen Beurteilung der Grundlagen der geologischen Gefährdungsbilder hält die NAGRA fest, dass 1) die auf Lagerebene erwarteten lithologische Ausbildung des Opalinuston keine klare Unterscheidung zwischen den Standorten zulässt, 2) dass innerhalb eines Lagers mehrere Faziestypen (sandig/tonig) auftreten können, 3) dass die Raumlage relevanter Trennflächen und/oder Störungen in den standortspezifischen geologischen Modellen nur relativ geringe Variationen aufweisen, und 4) dass aufgrund der Störungshäufigkeit und Trennflächenabständen die vorhandenen Daten nur grobe standortspezifisch differenzierbare Aussagen ermöglichen. Die NAGRA schliesst zudem aus, dass eine systematische Durchtrennung des Opalinuston durch effektive Trennflächen weiträumig und in engen Abständen in den Stollenstrecken vorkommt. Relevante Strukturen werden vor allem im Bereich von einlagerungsbestimmenden Störungen vermutet.

Da aufgrund der heute vorliegenden geologischen Daten nur grobe Unterschiede zwischen den Lagerebenen der Standortgebiete ausgeschieden werden können, basiert die NAGRA ihre standortspezifische Beurteilung auf folgende Punkte: 1) den Unterschied in der Lagertiefe, der sich zwischen den Standortgebieten um bis zu 450 m unterscheidet (Spannungsverhältnisse), und 2) die Lage des Standortgebietes innerhalb des Einflussbereiches der alpinen Fernschubtektonik (NL, JO, JS). Innerhalb des Einflussbereiches rechnet die NAGRA mit einer stärker ausgeprägten Gebirgsanisotropie und dem Auftreten von flach einfallenden Aufschiebungen und sub-horizontalen Scherzonen. Die stärkste tektonische Überprägung wird im Standortgebiet JS erwartet.

Bei den geologischen Gefährdungsbildern unterscheidet die NAGRA hinsichtlich ihrer Relevanz. Wasser- und gasbedingte Gefährdungsbilder werden wegen der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Opalinuston und der geringen Maturität des organischen Materials als irrelevant eingestuft. Als relevant werden Gefährdungsbilder bezeichnet, die zum Versagen des ausbruchnahen Gebirges oder zu übermässigen Deformationen führen und damit den Umfang der gebirgsstützenden Massnahmen und die Wahl des Bauverfahrens beeinflussen oder die Barriereigenschaften beeinträchtigen. Somit bezieht die NAGRA das Bauverfahren, die Nutzungsanforderungen und Nutzungszustände mit in die Beurteilung ein. Eine massgebende Rolle bei der Beurteilung sieht die NAGRA in den geomechanischen Eigenschaften (Gebirgsfestigkeiten und -verformbarkeit) in Kombination mit Störungen, Porenwasserdruckverhältnissen und Gebirgsspannungen.

Die NAGRA weist darauf hin, dass im tektonisch wenig beanspruchten Umfeld der Nordschweiz keine eins-zu-eins übertragbaren Verhältnisse in bestehenden Tunnelbauwerken bestehen. Die entsprechenden Erkenntnisse können aber unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse zur Ableitung von Gefährdungsbildern genutzt werden.

Die NAGRA unterscheidet grundsätzlich 5 Gefährdungsbildgruppen (GBG):

- Gefährdungsbildgruppe GBG 1: Gravitations- und trennflächenbedingte Auflockerungen und Ablösungen
- Gefährdungsbildgruppe GBG 2: Gravitations- und durch Bruchvorgänge bedingte Auflockerungen und Ablösungen
- Gefährdungsbildgruppe GBG 3: Druckhaftes Gebirgsverhalten
- Gefährdungsbildgruppe GBG 4: Abschaltungen und Ablösungen infolge spannungsinduzierter Extensionsbrüche

- Gefährdungsbildgruppe GBG 5: Übrige geologische Gefährdungsbilder (Quellhebungen, Staubbelastung, Asbest, Radioaktivität, Gebirgstemperaturen<sup>7</sup>)

Die Gefährdungsbildgruppen beurteilt die NAGRA hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen für die jeweiligen Standortgebiete zunächst ohne die Berücksichtigung von Massnahmen. In einem weiteren Schritt werden Massnahmen je GBG definiert (bauverfahrensspezifische Massnahmen und Stützmittel).

Die Ausprägung der Gefährdungsbilder in den verschiedenen Standortgebieten hängt von den Unterschieden in den Störungsmustern sowie der Tiefenlage ab. Die unterschiedlichen Tiefenlagen beeinflussen die Intensität eines Gefährdungsbildes. Im Hinblick auf die Störungshäufigkeiten sind nur grobe Standortunterschiede zu erkennen. Die grössten Störungshäufigkeiten werden im Standort JS erwartet, die geringsten in den Standorten ZNO und SR. In allen Standortgebieten treten Störungen (sub-) parallel zur maximalen Horizontalspannung auf. In Standortgebieten innerhalb der Fernschubzone sind flachliegende Aufschiebungen vorhanden (in den Bohrungen v.a. im untersten Bereich des Opalinustons).

Die NAGRA beurteilt die Intensität der Gefährdungsbilder zu einem erheblichen Teil aufgrund der Resultate von numerischen Berechnungen basierend auf den Gebirgsmodellen bzw. Baugrundmodelltypen. In der Beurteilung spielen die Kurzzeitdeformationen bis zum Einbau der Ausbruchsicherung (GBG 1, 2, 4) und die gesamte Tunnelkonvergenz (GBG 3) eine wesentliche Rolle.

## 5.2 Beurteilung der Experten

Die NAGRA hat im Zuge der Nachforderung einen umfangreichen Katalog an Gefährdungsbildern erarbeitet. Die als relevant erachteten Gefährdungsbilder wurden in die bautechnische Bewertung nach Stand der Technik integriert. Das diesbezügliche Vorgehen ist nachvollziehbar und plausibel.

Neben strukturkontrollierten Gefährdungsbildern (u.a. Niederbrüche) erachtet die NAGRA das Gefährdungsbild „druckhafte Verhältnisse“ als massgebend. Mit zunehmender Tiefe spielt gemäss NAGRA dieses Gefährdungsbild eine zunehmende Rolle bei der integrierten bautechnischen Beurteilung. Druckhafte Verhältnisse wurden bisher aber in Tunnelbauwerken im Opalinuston in der Nordschweiz selbst in 800 m Tiefe und bei signifikanter tektonischer Überprägung im Faltenjura nicht beschrieben (Steiner und Metzger 1988). Dies steht im Gegensatz zu den felsmechanischen Prognosemodellen der NAGRA, die unter Annahme tektonisch bedingter, stark abgeminderter effektiver Scherfestigkeit und Steifigkeit (GMmin) in 800 m Tiefe zum Teil stark druckhafte Verhältnisse vorhersagen. Entsprechend teilen die Experten die Einschätzung der NAGRA bezüglich druckhafter Verhältnisse und dessen Intensität nicht vorbehaltlos. Den als relevant eingestuften strukturkontrollierten Gefährdungsbildern stimmen die Prüfexperten zu. Allerdings hängt die Beurteilung der Intensität der Gefährdungsbilder (insbesondere druckhafte Verhältnisse) stark von den Berechnungsannahmen (geomechanische Parameter für den massgebenden Fall, vereinfachende Berechnungsannahmen (Kapitel 6)) ab. Wie oben erwähnt und im Kapitel 6 diskutiert, werden diese Annahmen von den Experten zum Teil in Frage gestellt.

## 6 Berechnungsmodelle und Anwendung der geomechanischen Parameter

### 6.1 Vorgehensweise der NAGRA

#### 6.1.1 Berechnungsmodelle und grundlegende Annahmen

Die von der NAGRA dokumentierten Berechnungen zur Beurteilung der Intensität von Gefährdungsbildern, der Tunnelkonvergenz, der zeitabhängigen Ausdehnung der plastischen Zone sowie

<sup>7</sup> Temperaturen bis zu 48°C werden in 900 m erwartet und nicht als Gefährdung, sondern als Erschwernis beurteilt.

der Vordimensionierung umfassen analytische und numerische Verfahren mit zum Teil unterschiedlichen Annahmen. Generell wird die Gebirgsfestigkeit entweder isotrop (analytische Kennlinienverfahren, numerische Kontinuumsberechnungen mit ABAQUS) oder transversal isotrop (numerische Kontinuumsberechnungen mit FLAC3D) dargestellt. Folgende Berechnungen wurden durchgeführt:

- Orientierende Vordimensionierung („scoping calculations“) auf Basis analytischer Gebirgskennlinien und Kennlinienverfahren (NAB 16-45, Anhang A)
- Numerische Kontinuumsberechnungen mit einem rotations-symmetrischen ABAQUS-Modell zur Analyse des hydraulisch-gekoppelten Gebirgsverhaltens (Anagnostou und Vrakas 2016a, b, c)
- Numerische Kontinuumsberechnungen mit einem axial-symmetrischen ABAQUS-Modell zur Analyse des hydraulisch-gekoppelten Systemverhaltens (Anagnostou und Vrakas 2016a, b, c)
- Numerische Kontinuumsberechnungen mit einem FLAC-Scheibenmodell zur Analyse des hydraulisch-gekoppelten reinen Gebirgsverhaltens (Anagnostou und Vrakas 2016a, b, c)

Die einzelnen Berechnungsverfahren und die getroffenen Annahmen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die verwendeten Stoffparameter sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 2: Wesentliche Annahmen der einzelnen Berechnungsverfahren.

	<b>Analytische Kennlinienverfahren</b>	<b>Rotations-symmetrische Modelle (ABAQUS)</b>	<b>Axial-symmetrische Modelle (ABAQUS)</b>	<b>Scheibenmodelle (FLAC3D)</b>
<b>Nutzungszustände</b>	NZ 1	NZ 1-5		
<b>Initialspannungen</b>	isotrop	anisotrop	anisotrop	anisotrop
<b>Analyse</b>	Totalspannungen <sup>1)</sup>	Effektivspannungen	Effektivspannungen	Effektivspannungen
	kurzfristig	zeitabhängig	zeitabhängig	zeitabhängig
	Elasto-plastisch und Elasto-spröde-plastisch (unmittelbare Entfestigung)	Elasto-plastisch	Elasto-plastisch	Elasto-spröde-plastisch (allmähliche Entfestigung)
<b>Gebirgsmodell</b>	GMmin / GMref (nicht für HAA)	GMmin	GM3 <sup>2)</sup>	GMmin / GMref
<b>Festigkeit</b>	isotrop	isotrop	isotrop	transversal isotrop
	Effektive Festigkeiten			
	Festigkeit der Schichtung			Festigkeit Matrix und Schichtung
<b>Steifigkeit</b>	isotrop	isotrop	isotrop	isotrop
	Steifigkeit im Nachbruchbereich normal zur Schichtung			

<sup>1)</sup>Mit effektiven Scherfestigkeiten, <sup>2)</sup>Aus NAB 14-81

Sonstige Annahmen:

- 1) Das kurzfristige Gebirgsverhalten (Nutzungszustand NZ 1) kann mit einer Totalspannungsanalyse und effektiven Festigkeitsparametern ausreichend genau berechnet werden (Anagnostou und Vrakas 2016a)
- 2) Innerhalb der plastische Zone entsättigt das Gebirge, wenn der Porenwasserdruck unter null fällt (Anagnostou und Vrakas 2016a)

- 3) Partialsicherheitsfaktoren zur Berücksichtigung der ungleichförmigen Verteilung des Gebirgsdrucks sowie von Modellunsicherheiten

Basierend auf obigen Modellen und Annahmen führt die NAGRA umfangreiche Berechnungen zum Gebirgs- und Systemverhalten in Abhängigkeit der Tiefe durch. Dabei werden auch wesentliche Einflussfaktoren wie u.a. die Druckverteilung, die Randbedingungen, die Durchlässigkeiten, Konsolidationsprozesse, die Festigkeitsanisotropie und die Hauptspannungsanisotropie untersucht.

### **6.1.2 Beurteilung des Gebirgsverhalten durch die NAGRA**

Die Beurteilung des Gebirgsverhalten beruht auf den Berechnungen von Itasca (2016) und stützt sich auf die Konvergenzen, die Ausdehnung der plastischen Zone, Volumendehnungen innerhalb der plastischen Zone und die Verteilung der Volumendehnung um den Hohlraumrand und am Hohlraumrand. Diese Berechnungen berücksichtigen BGM-2 sowie BGM-3 a und b (d.h. Kennwerte gemäss GMmin- als auch GMref).

### **6.1.3 Beurteilung des Systemverhaltens durch die NAGRA**

Die Beurteilung bezieht wesentliche bautechnische Aspekte wie Ausbauten (insbesondere Spritzbeton, Stahlbögen, Tübbinge) im Widerstands- und Ausweichprinzip, den erforderlichen Stützdruck bzw. Tragwiderstand, die Vordimensionierung der Ausbruchsicherung, die Anwendung verschiedener Vortriebsmethoden sowie eine Analyse des Verklemmens einer TBM und den dadurch erforderlichen Überschritt mit ein. Die Beurteilung des Systemverhaltens beruht vor allem auf den analytischen Gebirgskennlinien in NAB 16-45 („scoping calculations“) sowie auf den Berechnungen aus Anagnostou und Vrakas (2016). Die Berechnungen wurden mit den Kennwerten gemäss GMmin (Anagnostou und Vrakas 2016) bzw. mit Kennwerten gemäss GMmin und GMref (NAB 16-45) ausgeführt.

## **6.2 Beurteilung der Experten**

Für die felsmechanischen Berechnungen werden vereinfachte Stoffansätze basierend auf einem isotropen linear-elastischen Stoffansatzes mit Mohr-Coulomb-Bruchbedingungen und spröd-plastischem oder ideal-plastischem Nachbruchverhalten verwendet. Die Festigkeit wird in den Modellen sowohl isotrop als auch transversal isotrop abgebildet. Die Anwendung dieser Stoffansätze erscheint den Experten grundsätzlich nachvollziehbar, plausibel und stufengerecht.

Wie bereits gezeigt, ist die von der NAGRA vorgeschlagene Definition und Zuordnung der Gebirgsmodelle (GMmax: repräsentativ für sandige Fazies, GMref: repräsentativ für tonige Fazies, GMmin: repräsentativ für tektonische Überprägung) nicht begründbar. Die Bewertung der NAGRA basiert auf den Gebirgsmodellen GMref (erwartet) und vor allem GMmin (abdeckend für Prüfung der Machbarkeit) – das Gebirgsmodell GMmax (repräsentativ für die sandige Fazies) wird als irrelevant eingestuft, da in keinem der betrachteten Standortgebiete eine ausreichend mächtige sandige Fazies erwartet wird (NAB 16-41, Seite 149, 150 bzw. gemäss NAB 16-45, Seite 73). Abgesehen von dieser widersprüchlichen (siehe Kapitel 4), nicht belegbaren Prämisse, welche aber die Berechnungsergebnisse massgebend beeinflussen, sind die daraus abgeleiteten Berechnungsmodelle, Berechnungsergebnisse und Schlussfolgerungen zum druckhaften Gebirgsverhalten nachvollziehbar und zum grossen Teil auch plausibel (Ausnahmen werden nachfolgend erläutert).

Das Gebirgsmodell GMmin bildet gemäss NAGRA den abdeckenden Fall für die Prüfung der Machbarkeit. Demzufolge wurden die meisten Berechnungen zum Einfluss der Tiefenlage auf das druckhafte Verhalten (grosser Teil der „scoping calculations“ gemäss Anhang A von NAB 16-45, sämtliche Berechnungen von Anagnostou und Vrakas (2016) gemäss separatem Bericht, grosser Teil der



Itasca-Berechnungen gemäss separatem Bericht) für das Gebirgsmodell GMmin durchgeführt. Bei diesen Berechnungen hat die NAGRA verschiedene konservative Annahmen getroffen. Die Vereinfachungen betreffen die Annahme eines isotropen Festigkeits- und Verformungsverhaltens mit der Kohäsion entsprechend den Materialparametern entlang der Schichtung („peak“-Wert und „residual“-Wert identisch) bzw. mit dem E-Modul entsprechend den Materialparametern senkrecht zur Schichtung („pre-peak“-Wert und „post-peak“-Wert identisch). Die NAGRA hat hier somit in beiden Fällen die denkbar ungünstigsten Annahmen gewählt. Bei den „scoping calculations“ der NAGRA und den Berechnungen von Anagnostou und Vrakas (2016) ist die Bedingung der Rotationssymmetrie nicht kompatibel mit einem anisotropen Materialverhalten (das gewählte Berechnungsmodell bedingt die Annahmen eines isotropen Materialverhaltens). Die Itasca-Berechnungen, ohne die Bedingung der Rotationssymmetrie, basieren bezüglich der Steifigkeitsparameter auf gleichen Annahmen. Nur bezüglich der Festigkeitsparameter enthalten sie eine Differenzierung zwischen dem Verhalten in der Matrix bzw. entlang der Schichtung und damit anisotrope Stoffgleichungen. Die Vorgehensweise der NAGRA mit dem Gebirgsmodell GMmin als „abdeckend für die Prüfung der Machbarkeit“ sowie weiterer konservativer Annahmen zur Vereinfachung des Berechnungsmodells (also eine Superposition konservativer Annahmen) ist aus Sicht der Experten des ENSI sinnvoll für die Prüfung der Machbarkeit eines Standortes, jedoch nicht um eindeutige Nachteile eines Standortes gegenüber anderen Standorten nachzuweisen.

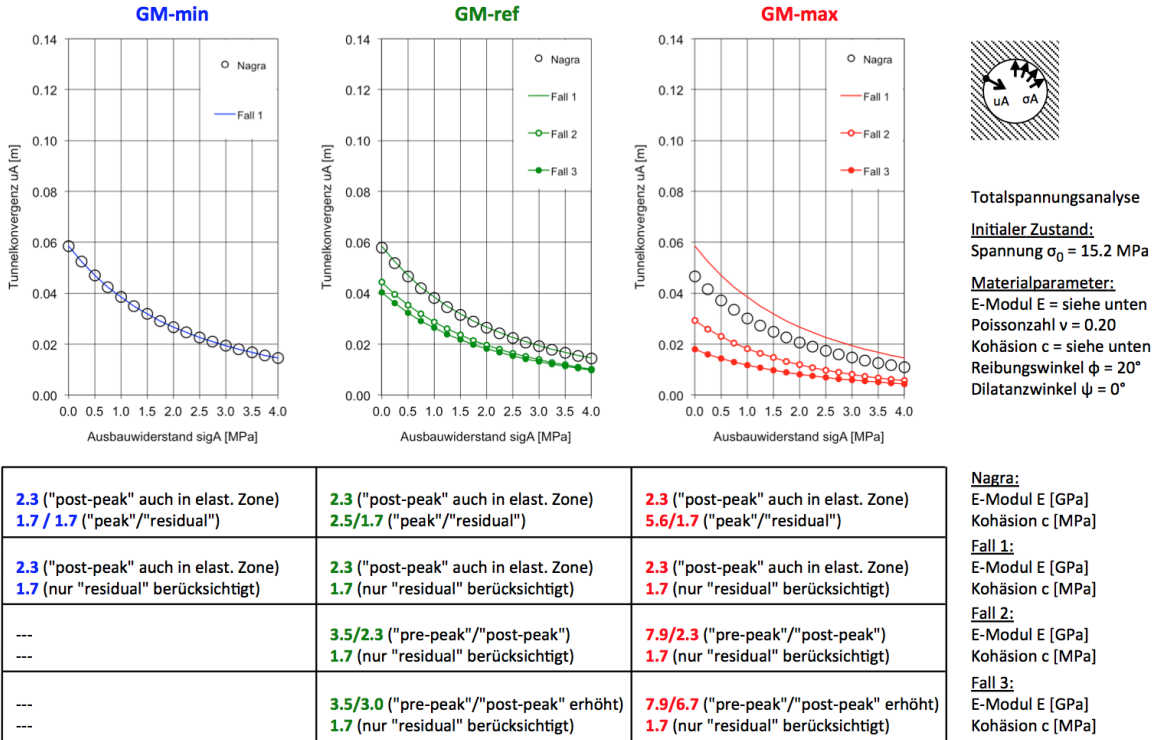
Das Gebirgsmodell GMref bildet gemäss NAGRA den erwarteten Fall. Die wenigen Berechnungen zum Einfluss der Tiefenlage auf das druckhafte Verhalten (kleiner Teil der „scoping calculations“ gemäss Anhang A von NAB 16-45, kleiner Teil der Itasca-Berechnungen gemäss separatem Bericht), die von der NAGRA für das Gebirgsmodell GMref durchgeführt wurden, enthalten verschiedene zusätzliche konservative Annahmen. Einerseits wird der Festigkeitsabfall, also der Abfall der Kohäsion vom „peak“-Wert auf den „residual“-Wert, als starr-plastisch angenommen (erfolgt also schlagartig nach dem Bruch und nicht kontinuierlich). Andererseits wird der E-Modul nicht nur in der plastischen Zone, sondern auch in der elastischen Zone entsprechend dem „post-peak“-Wert angenommen, obwohl dort definitionsgemäss der „pre-peak“-Wert gilt. Die NAGRA hat auch hier die denkbar ungünstigsten Annahmen gewählt. Die Itasca-Berechnungen basieren bezüglich der Steifigkeitsparameter auf gleichen Annahmen. Nur bezüglich der Festigkeitsparameter sind die Annahmen weniger konservativ, indem der Festigkeitsabfall als Funktion der plastischen Deformation sowohl in der Matrix als auch entlang der Schichtung modelliert wird. Aufgrund der beschriebenen Vorgehensweise der NAGRA gehen die Unterschiede zwischen GMref und GMmin verloren, wodurch die damit erzielten Berechnungsergebnisse praktisch übereinstimmen. Somit sind das zugehörige Berechnungsmodell bzw. die vereinfachenden Annahmen ungeeignet, um den Einfluss der unterschiedlichen Materialparameter auf das druckhafte Gebirgsverhalten zu erfassen.

Das Gebirgsmodell GMmax ist nach Ansicht der NAGRA irrelevant, da die sandige Fazies von der NAGRA auf Lagerebene nicht erwartet wird (gemäss NAB 16-41 bzw. NAB 16-45). Die NAGRA eliminiert somit den Grossteil der durch die drei Gebirgsmodelle (GMmax, GMref, GMmin) gegebenen Bandbreite der geomechanischen Parameter und verlässt ihren auf Empfehlung der Experten des ENSI zunächst eingeschlagenen Weg, wonach Ungewissheiten bezüglich des Materialverhaltens mit einer ausreichend grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter Rechnung getragen werden soll (siehe ENSI 33/461). Aufgrund der obigen Bewertung hat die NAGRA konsequenterweise keine Berechnungen für das Gebirgsmodell GMmax in den abgegebenen Berichten dokumentiert, obwohl dieser Parametersatz die wenigen zuverlässigen, für den relevanten Tiefenbereich von 600 bis 900 m massgebenden Triaxial- und Ödometerversuche am besten wiedergibt.

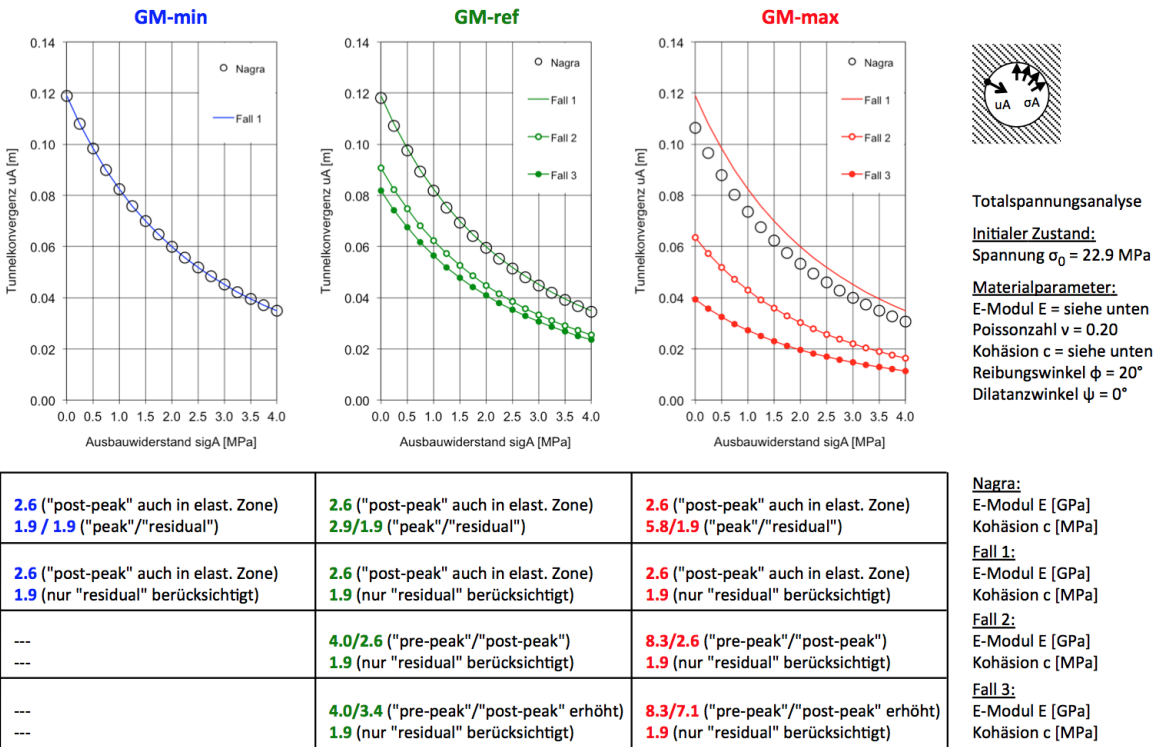
Um die Auswirkung gewisser Berechnungsannahmen der NAGRA besser zu verstehen, wurden von den Experten des ENSI eigene vereinfachte Tunnelberechnungen durchgeführt. Als Berechnungsmodell dient hierfür die gelochte Scheibe im ebenen Verformungszustand unter der Voraussetzung der Rotationssymmetrie (Kreisprofil, initialer Spannungszustand isotrop, Materialeigenschaften isotrop). Es handelt sich um eine Totspannungsanalyse, womit der Einfluss des Porenwasserdrucks auf das druckhafte Gebirgsverhalten ignoriert wird. Die initialen Spannungen werden einfachheitshalber als allseitig gleich entsprechend dem Überlagerungsdruck angenommen. Die Festigkeitsparameter werden entsprechend der Restfestigkeit und somit unabhängig vom Gebirgsmodell gemäss dem gleichen residualen Wert der Kohäsion angenommen. Die Steifigkeitsparameter („pre-peak“-Wert und „post-peak“-Wert des E-Moduls) lassen sich differenziert der elastischen Zone bzw. der plastischen Zone zuordnen. Dieses Berechnungsmodell bildet die Grundlage für die durchgeführten Kontrollrechnungen der Experten des ENSI (Figuren 4 und 5, Fälle 1 bis 3). Als Vergleich dient, wie bei den „scoping calculations“ der NAGRA, ein Berechnungsmodell mit einem starr-plastischen Abfall von der Höchst- auf die Restfestigkeit sowie einen auf sämtliche Gebirgsbereiche (unabhängig von der Plastifizierung) angesetzten E-Modul entsprechend dem Nachbruchverhalten (Figuren 4 und 5, NAGRA). Die Herleitung der zugehörigen Gebirgskennlinie hat die NAGRA bereits in NAB 14-81 dokumentiert.

Die Berechnungen der Experten des ENSI zeigen, dass der Einfluss der Höchstfestigkeit auf die Berechnungsergebnisse aufgrund dieser NAGRA-Vereinfachung (unmittelbarer Abfall von der Spitzen- auf die Restfestigkeit) beim Gebirgsmodell GMref (mit Einschränkung auch beim Gebirgsmodell GMmax) so stark zurückgeht, dass praktisch nur noch die Restfestigkeit massgebend ist. Obwohl die verschiedenen Gebirgsmodelle unterschiedliche „peak“-Werte der Kohäsion aufweisen, resultiert unter der Bedingung identischer Steifigkeitsparameter in sämtlichen Fällen praktisch die gleiche Gebirgskennlinie (Figur 4 bzw. Figur 5). Dies ist auf die erwähnte Vereinfachung der NAGRA zurückzuführen in Kombination mit der Annahme, dass die verschiedenen Gebirgsmodelle den stets gleichen residualen Wert der Kohäsion aufweisen.

Nicht nur die „scoping calculations“ der NAGRA, sondern auch die Itasca-Berechnungen wurden für die verschiedenen Gebirgsmodelle ausnahmslos mit dem stets gleichen „post-peak“-Wert des E-Moduls (für das ganze Berechnungsmodell ohne Unterscheidung zwischen elastischer und plastischer Zone) durchgeführt und somit das Nachbruchverhalten auch auf jene Gebirgsbereiche angewendet, wo der Bruchzustand gar nicht erreicht ist. Zudem geht die NAGRA von einer grossen Abnahme des E-Moduls im Nachbruchbereich um 35% für das Gebirgsmodell GMref (bzw. sogar um 70% für das Gebirgsmodell GMmax) aus. Die Berechnungen der Experten des ENSI zeigen, dass dadurch die Unterschiede zwischen den Gebirgsmodellen GMref und GMmin nahezu vollständig verloren gehen und selbst eine Berechnung mit dem Gebirgsmodell GMmax unter dieser Voraussetzung die praktisch gleichen Berechnungsergebnisse liefern würde (Figur 4 bzw. Figur 5). Die Vereinfachungen der NAGRA gehen also so weit, dass die Gebirgskennlinie für alle Gebirgsmodelle praktisch übereinstimmt. Es bestätigt sich auch, dass der Einfluss des Gebirgsmodells den Einfluss der Tiefenlage teilweise sogar übersteigt (jeweils im betrachteten Rahmen von GMmin bis GMmax bzw. 600 bis 900 m), sofern die Zuordnung der „pre-peak“-Werte und „post-peak“-Werte des E-Moduls auf die elastische und plastische Zone korrekt ist und eine geringere Abnahme des E-Moduls im Nachbruchbereich beispielsweise um nur 15% für das Gebirgsmodell GMref (bzw. auch für das Gebirgsmodell GMmax) angenommen wird. Die Verbesserung der Materialeigenschaften mit zunehmender Tiefenlage ist somit wichtig und kompensiert (oder übersteigt) den negativen Einfluss der grösseren Überdeckung.



Figur 4: Gebirgskennlinien für eine Tiefenlage von 600 m unter verschiedenen Annahmen.



Figur 5: Gebirgskennlinien für eine Tiefenlage von 900 m unter verschiedenen Annahmen.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die vorliegenden Berechnungen der NAGRA mit dem Gebirgsmodell GMref durch fragwürdige Annahmen (Festlegung des Übergangs von Höchst- auf Restfestigkeit, Festlegung und Anwendung des E-Moduls im Nachbruchbereich) belastet sind. Solche mit dem Gebirgsmodell GMmax fehlen sogar ganz. Die Experten des ENSI kommen zum Schluss, dass die NAGRA den Einfluss der Bandbreite der geomechanischen Parameter stark unterschätzt bzw. im Vergleich dazu den Einfluss der Tiefenlage stark überschätzt. Die Aussage der NAGRA in NAB 16-45, Seite 125, wonach „Berechnungen zeigen, dass trotz tiefenabhängiger Verbesserung der Gebirgseigenschaften das Gebirgsverhalten mit der Tiefe deutlich ungünstiger wird. Dies gilt auch, wenn für die grössere Tiefe ein günstigeres Baugrundmodell unterstellt wird als in geringerer Tiefe“, erweist sich als nicht zutreffend. Die vorliegende Sensitivitätsstudie der Experten des ENSI, die alle Gebirgsmodelle umfasst, eine weniger ausgeprägte Abnahme des E-Moduls im Nachbruchbereich (gegenüber dem Verhalten vor Erreichen des Bruchzustands) vorsieht, und eine Zuordnung des E-Moduls im Nachbruchbereich einzig auf die plastische Zone vorsieht, weist darauf hin, dass rechnerisch der Einfluss der möglichen Materialeigenschaften (GMmin bis GMmax) teilweise sogar bedeutender sein kann als der Einfluss der Tiefenlage (600 bis 900 m).

## 7 Beantwortung der Kernfragen

*ENSI Kernfrage 1: Stellen die überarbeiteten Unterlagen der NAGRA **eine ausreichende technisch-wissenschaftliche Basis** für die Beurteilung der Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit der BE/HAA-Lager in den Standortgebieten dar?*

Die Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit der NAGRA basiert auf umfassenden wissenschaftlich-technischen Unterlagen, welche Nutzungsanforderungen, standortspezifische geologische Modelle, Baugrundmodelle, geomechanische Datensätze, Gefährdungsbilder, Bewertungen von Baumethoden sowie geomechanische Modellrechnungen zum Gebirgs- und Tragwerksverhalten beinhalten. Der von der NAGRA beschrittene Weg zur Beurteilung der maximalen Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit wird von den Experten als stufengerecht und nachvollziehbar beurteilt.

Generell bestätigt das Vorgehen der NAGRA, unter Einbeziehung überwiegend konservativer geomechanischer Grundlagen (abdeckende effektive Festigkeiten GMmin) und vereinfachter Berechnungsannahmen (effektive Festigkeiten der Bettung, E-Modul normal zur Schichtung) die bautechnische Machbarkeit an allen diskutierten Standortgebieten. Die Experten beurteilen die dazu verwendeten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen im Sinn rein bautechnischer Machbarkeitsüberlegungen als ausreichend.

Für die quantitative Beurteilung der Tiefenlage (Bewertungsskala) und für den Nachweis eindeutiger Nachteile eines Standortgebietes aus bautechnischer Sicht ist die geologisch-geotechnische Grundlage, insbesondere die Annahmen zu den geomechanischen Parametern der Gebirgsmodelle und deren Zuordnung auf die einzelnen Standortgebiete und Tiefenlagen (Annahme GMmin für ein gesamtes Standortgebiet), nicht ausreichend belastbar.

*Kernfrage 2: Ist eine **Beschränkung der BE/HAA- Lagertiefen** gemäss der Argumentation der NAGRA nachvollziehbar, ausreichend begründet und robust?*

Die spärliche Datengrundlage zu den standortspezifischen geomechanischen und geologischen Verhältnissen sowie die Superposition von vorwiegend konservativen Annahmen (abdeckende effektive Festigkeit und Steifigkeit gemäss GMmin, vereinfachende Berechnungsannahmen) erlauben keine abschliessende und belastbare quantitative Beurteilung der maximalen Tiefenlage im Hinblick auf den Nachweis eindeutiger Nachteile aus bautechnischer Sicht. Die für die Argumentation von der NAGRA

verwendeten geomechanischen Kennwerte und vereinfachten Berechnungsannahmen (effektive Festigkeiten der Bettung, E-Modul normal zur Schichtung) werden von den Experten als nicht belastbar bzw. zu konservativ beurteilt. Dies betrifft insbesondere die Annahme der NAGRA, dass GMmin für gesamte Standortgebiete massgebend ist, den nicht stichhaltigen Ausschluss von GMmax für die Beurteilung der Tiefenlage, die verbleibenden grossen Unsicherheiten bei den tiefenabhängigen effektiven Festigkeiten und Steifigkeiten, sowie die vereinfachenden Annahmen zu den geomechanischen Kennwerten in numerischen Berechnungen mit GMmin und GMref. Folglich ist das Ergebnis der Argumentation der NAGRA zur Beschränkung der BE/HAA-Lagertiefen nicht ausreichend robust.

## 8 Literatur

ENSI 33/461 (2015): Assessment of Geomechanical Properties of Intact Opalinus Clay. F. Amann und M. Vogelhuber.

Favero V. A. Ferrari, L. Laloui (2016): On the hydro-mechanical behaviour of remoulded and natural Opalinus Clay. *Engineering Geology*, 208, 128-135

Ferrari, A., V. Favero, L. Laloui (2016): One-dimensional compression and consolidation of shales. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 88, 286-300.

Islam, Md. A. und P. Skalle (2013): An Experimental Investigation of Shale Mechanical Properties Through Drained and Undrained Test Mechanisms. *Rock Mech. Rock Eng.*, DOI 10.1007/s00603-013-0377-8

Mazurek, M., A. J. Hurford, W. Leu (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. *Basin Research*, 18, 27-50.

NAB 12-50 (2012): Geotechnical characterization of core samples from the geothermal well Schlattingen SLA-1 by LMS/EPFL. A. Ferrari, Favero V., D. Manca L. Laloui.

NAB 13-18 (2013): Geomechanical laboratory tests on Opalinus Clay cores from the bore hole Schlattingen SLA-1, Jahns E.

NAB 13-45 (2013): Diagnostic analyses of the geomechanical data base from SLA-1 borehole. Favero V. A. Ferrari, L. Laloui.

NAB 14-87 (2014): Development and evolution of the Excavation Damaged Zone (EDZ) in the Opalinus Clay – A synopsis of the state of knowledge from Mont Terri. G.W. Lanyon, D. Martin, S. Giger, P. Marschall

NAB 14-81 (2014): Unterlagen zur Anlagenauslegung in Bezug auf maximale Tiefenlage und Platzbedarf. Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter.

Nagra (1999): Sondierbohrung Benken - Felsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen. Nagra unpubl. Interner Bericht, Nagra, Wettingen

NTB 14-02, Dossier IV (2015): SGT Etappe 2, Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage - Geologische Grundlagen - Geomechanische Unterlagen

Steiner und Metzger (1988): Erfahrungen aus Tunneln in quellendem Gestein. Bericht der Ingenieurgesellschaft Wisenberg-Tunnel. B & S AG.

Terzaghi K., R. Peck, G. Mesri (1996): Soil Mechanics in Engineering Practice. 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 664p.

Wild, K.M., F. Amann, C.D. Martin, J. Wassermann, C. David, M. Barla (2015): Dilatancy of clay shales and its impact on pore pressure evolution and effective stress for different triaxial stress path. ARMA: 49<sup>th</sup> US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, San Francisco.



ENSI 33/531

ENSI, CH-5200 Brugg, Industriestrasse 19, Telefon +41 56 460 84 00, E-Mail [Info@ensi.ch](mailto:Info@ensi.ch), [www.ensi.ch](http://www.ensi.ch)