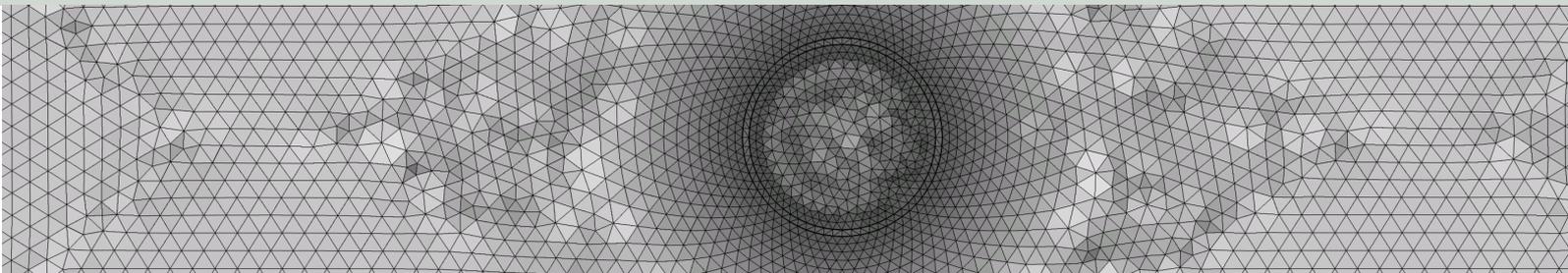




Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

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



# Nachforderung des ENSI zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit

Expertenbericht

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

M. Ramoni  
M. Sommer  
P. Jost  
S. Janele

Basler & Hofmann AG

M. Vogelhuber

Dr. von Moos AG

Dezember 2016

*Disclaimer:*

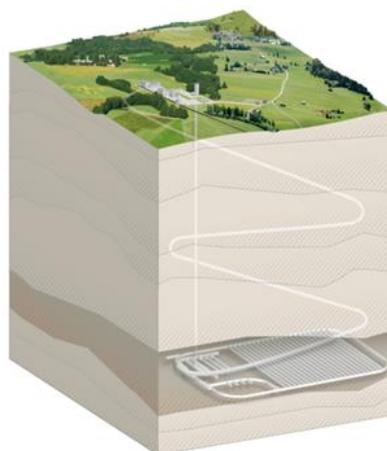
*Die im Bericht dokumentierten Ansichten und Schlussfolgerungen sind diejenigen der Autoren und stimmen nicht notwendigerweise mit denen des ENSI überein.*

# Sachplan Geologische Tiefenlager Etappe 2 Nachforderung des ENSI zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit

Prüfbericht ENSI 33/530

Eidgenössisches  
Nuklearinspektorat ENSI  
Industriestrasse 19  
5200 Brugg

Datum  
9. Dezember 2016



## **Impressum**

---

### **Datum**

9. Dezember 2016

---

### **Bericht-Nr.**

3210.350-04 - ENSI 33/530

---

### **Verfasst von**

Marco Ramoni

Matthias Sommer

Peter Jost

Simon Janele

Martin Vogelhuber, Dr. von Moos AG

---

Basler & Hofmann AG

Ingenieure, Planer und Berater

Forchstrasse 395

Postfach

CH-8032 Zürich

T +41 44 387 11 22

F +41 44 387 11 00

Bachweg 1

Postfach

CH-8133 Esslingen

T +41 44 387 15 22

F +41 44 387 15 00

Titelbild: Modellgraphik ENSI

---

## **Verteiler**

---

Ernando Saraiva ENSI

---

# Inhaltsverzeichnis

---

	<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>Prüfauftrag und Vorgehen</b>	<b>2</b>
1.1	Nachforderung des ENSI	2
1.2	Ziel der Überprüfung	2
1.3	Berücksichtigte Grundlagen / Quellen	3
1.4	Vorgehen und Schwerpunkte der Überprüfung	4
1.5	Stufengerechtigkeit (SIA 103)	4
1.6	Generelle Würdigung	5
1.7	Informationen zum vorliegenden Prüfbericht	5
<b>2.</b>	<b>Lagerauslegung</b>	<b>7</b>
2.1	Vorgehen der NAGRA	7
2.2	Beurteilung durch den Prüferingenieur	7
<b>3.</b>	<b>Nutzungsanforderungen</b>	<b>10</b>
3.1	Vorgehen der NAGRA	10
3.2	Beurteilung durch den Prüferingenieur	10
<b>4.</b>	<b>Projektierungsgrundlagen (Projektbasis)</b>	<b>13</b>
4.1	Vorgehen der NAGRA	13
4.2	Beurteilung durch den Prüferingenieur	13
<b>5.</b>	<b>Massgebende Gefährdungsbilder</b>	<b>15</b>
5.1	Vorgehen der NAGRA	15
5.2	Beurteilung durch den Prüferingenieur	15
<b>6.</b>	<b>Tragwerksanalyse</b>	<b>17</b>
6.1	Vorgehen der NAGRA	17
6.2	Generelle Beurteilung durch den Prüferingenieur	18
6.3	Beurteilung der festgelegten geomechanischen Parameter	19
6.4	Beurteilung der Anwendung der geomechanischen Parameter	20
<b>7.</b>	<b>Bauverfahren und Vordimensionierung</b>	<b>22</b>
7.1	Vorgehen der NAGRA	22
7.2	Beurteilung durch den Prüferingenieur	22
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerung und Beantwortung der Kernfragen</b>	<b>24</b>
8.1	Nicht ausreichende Belastbarkeit der Projektierungsgrundlagen	24
8.2	Kumulation von konservativen Annahmen	25
8.3	Gebirgseigenschaften	26

8.4	Tragwerksanalysen	27
8.5	Beantwortung der Kernfragen des ENSI	27
8.6	Fazit	28

**Anhang 1: Gebirgsmodelle: Geomechanische Parameter**

**Anhang 2: Anwendung der geomechanische Parameter**

## Zusammenfassung

Unterlagen NAGRA zu  
Nachforderung des ENSI

Die NAGRA hat im Rahmen des Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) im Januar 2015 ihren Vorschlag für die in der Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete eingereicht. Das ENSI ist im Rahmen ihrer Prüfung zur Einschätzung gelangt, dass die Unterlagen zur Beurteilung der maximalen Tiefenlage nicht aussagekräftig genug sind und hat eine entsprechende Nachforderung gestellt. Die NAGRA hat daraufhin eine zusätzliche Dokumentation [1] zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" erarbeitet und dem ENSI im Juli 2016 zur Prüfung eingereicht.

Überprüfung aufgrund von Kern-  
und Orientierungsfragen

Die Dokumente der NAGRA werden vom ENSI und seinen Experten respektive Prüfteams anhand von drei übergeordneten Kernfragen geprüft. Der vom ENSI beauftragte Prüfenieur Basler & Hofmann legt den Fokus seiner Beurteilung in diesem Bericht auf Grundlagen, Aspekte und Wertungen, welche einen relevanten Beitrag zur Einschätzung des Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" liefern. Implizit liegt damit der Fokus auf Punkten, welche Auswirkungen auf die Belegung von eindeutigen Nachteilen eines möglichen Standortgebietes haben und somit zur Rückstellung eines Gebietes führen können.

Prüfunterlagen

Die von der NAGRA gelieferte Dokumentation ist umfangreich, grundsätzlich sehr detailliert und zeugt gemäss Einschätzung des Prüfenieurs von einer gründlichen Arbeit. Die geprüften Unterlagen der NAGRA werden als konstruktiven Beitrag zur Beurteilung des Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" beurteilt. Sie belegen grösstenteils den aktuellen Wissensstand und sind hilfreich bei der Beurteilung, ob eindeutige Nachteile in Bezug auf die Tiefenlage vorhanden sind.

Prüfergebnisse

Die detailliert dokumentierte Projektierungsarbeit ist stufengerecht (Stufe Machbarkeitsstudie) und teilweise bereits auf Stufe Vorprojekt.

Der Prüfenieur kommt nach Prüfung der eingereichten Unterlagen im Gegensatz zur NAGRA jedoch zum Schluss, dass basierend auf dem aktuellen Wissensstand kein eindeutiger Nachteil bezogen auf die Tiefenlage der Lagerebene unter Terrain belegt werden kann. Diese Schlussfolgerung der Experten basiert auf folgenden Gründen:

- \_ einer als nicht ausreichend belastbar beurteilten felsmechanischen Datenbasis
- \_ einer als zu undifferenziert beurteilten Betrachtung von generell ungünstigen Gebirgseigenschaften
- \_ einer Kumulation von nicht vollumfänglich begründbaren konservativen Annahmen in den verwendeten Berechnungsmodellen.

Die Ergebnisse der Projektierungsarbeit sind daher nicht belastbar, obwohl die Projektierungsarbeit der NAGRA korrekt und nach dem üblichen Vorgehen im Untertagbau durchgeführt wurde.

Fazit

Basierend auf den von der NAGRA im Rahmen der Nachforderung eingereichten Unterlagen kann gemäss Beurteilung des Prüfenieurs kein eindeutiger Nachteil eines Standortgebietes mit Bezug zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" belegt werden.

## 1. Prüfauftrag und Vorgehen

### 1.1 Nachforderung des ENSI

Nachforderung ENSI zu SGT 2

Die NAGRA hat im Rahmen des Sachplan Geologische Tiefenlager (SGT) im Januar 2015 ihren Vorschlag für die in der Etappe 3 weiter zu untersuchenden Standortgebiete eingereicht. Das ENSI ist im Rahmen ihrer Prüfung zur Beurteilung gelangt, dass die Unterlagen zur Beurteilung der maximalen Tiefenlage nicht aussagekräftig genug sind und hat eine entsprechende Nachforderung [7] gestellt. Die NAGRA hat daraufhin eine zusätzliche Dokumentation [1] zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" erarbeitet und dem ENSI im Juli 2016 zur Prüfung eingereicht.

Gesamtgutachten ENSI

Die Dokumente der NAGRA werden vom ENSI und seinen Experten respektive Prüfteams geprüft. In [6] definiert das ENSI die Arbeitsaufteilung und Abgrenzung der Experten, fasst Themenblöcke zusammen und formuliert Orientierungsfragen zu den abgegebenen Dokumenten der NAGRA. Die einzelnen Expertisen werden Bestandteil des ENSI-Gutachtens zum Vorschlag der NAGRA zu den weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebieten (Etappe 3 SGT) im Rahmen des Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager.

Auftrag der NAGRA

Im Rahmen dieses Prüfmandates wurde der Hauptarbeitsbericht NAB 16-41 (vom Juli 2016) "ENSI-Nachforderung zum Indikator 'Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit' in Etappe 2 SGT – Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation" [1] anhand von drei massgeblichen Kernfragen [6] durch Basler & Hofmann, im Folgenden als Prüflingenieur bezeichnet, überprüft. Die Prüfung beinhaltet auch die Überprüfung der Arbeitsberichte NAB 16-42 bis NAB 16-46, auf welche sich der Hauptbericht NAB 16-41 bezieht.

### 1.2 Ziel der Überprüfung

Hauptthema der Prüfung

Im Vordergrund der Prüfung stehen Aspekte, welche gemäss den Forderungen des ENSI in [7] für die Beurteilung des von der NAGRA formulierten Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" von Relevanz sind.

Kernfragen des ENSI

Übergeordnet sind folgende Kernfragen des ENSI basierend auf den Dokumenten der NAGRA durch den Prüflingenieur zu beantworten [6]:

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- und SMA/LMA-Lager in den Standortgebieten dar?
2. Ist eine Beschränkung der BE/HAA- und SMA/LMA-Lagertiefen gemäss der Argumentation der NAGRA nachvollziehbar, ausreichend begründet und robust?
3. Ist die Argumentation der NAGRA basierend auf dem geplanten Ausbaukonzept für die Versiegelungstrecken der BE/HAA-Lagerstollen und den bevorzugten Vortriebsmethoden für den Bau eines BE/HAA-Lagerstollens nachvollziehbar? Wären Alternativen zu dem geplanten Ausbaukonzept für die Versiegelungstrecken der HAA-Lagerstollen bis in einer Tiefe von 900 m u.T. denkbar?

Fokus Auswirkungen auf  
Standorteingrenzung hinsichtlich  
Tiefenlage

Der Prüfer legt den Fokus seiner Beurteilung in diesem Bericht auf Grundlagen, Aspekte und Wertungen, welche einen relevanten Beitrag zur Beurteilung des ENSI bezüglich des Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" liefern. Implizit liegt damit der Fokus auf Punkten, welche Auswirkungen auf die Belegung von eindeutigen Nachteilen eines möglichen Standortgebietes haben und somit zur Rückstellung eines Gebietes führen können.

Weitere Aspekte

Andere Aspekte oder Detailpunkte werden in diesem Bericht nur dann diskutiert, wenn sie einen Einfluss auf die weitere Arbeit der NAGRA haben. So sind im vorliegenden Prüfbericht auch Empfehlungen und Hinweise aufgeführt, die nach Ansicht des Prüfer in Etappe 3 SGT vertiefter zu untersuchen sind. Wenn Aspekte oder Details der Arbeit der NAGRA in diesem Bericht nicht erwähnt oder diskutiert werden, kann dies nicht als Zustimmung des Prüfer zur Arbeit und Beurteilung der NAGRA gewertet werden.

### 1.3 Berücksichtigte Grundlagen / Quellen

Bei der Erstellung des Gutachtens wurden folgende massgebende Berichte und Dokumente berücksichtigt sowie Erfahrungswerte aus Publikationen Dritter mit einbezogen.

Grundlagen der NAGRA

- [1] ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2. Arbeitsberichte der NAGRA; Juli 2016.
  - a) Arbeitsbericht NAB 16-41; Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation (Hauptbericht).
  - b) Arbeitsbericht NAB 16-42; Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte.
  - c) Arbeitsbericht NAB 16-43; Geomechanische Unterlagen.
  - d) Arbeitsbericht NAB 16-44; Standortspezifische geologische Modelle und geologische Gefährdungsbilder.
  - e) Arbeitsbericht NAB 16-45; Projektkonzepte für die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken und deren Bewertung.
  - f) Arbeitsbericht NAB 16-46; Vortriebs- und Sicherheitskonzepte für die Profile F, K09, K04, K04a und D (Ergänzende Unterlagen zu NAB 16-45).
- [2] Ground response curves for a material exhibiting a sublinear strength envelope at low confinement. Prof. Dr. G. Anagnostou, 22.03.2016.
- [3] Comparative rock-support interaction analyses (revised). Prof. Dr. G. Anagnostou, 14.04.2016.
- [4] Ground response curves and rock-support interaction analyses for the tunnel profiles F, D and K09. Prof. Dr. G. Anagnostou, 26.06.2016.
- [5] Parameterstudie Gebirgskennlinien und Vergleich Gebirgsverhalten. Bericht Nr. 13022-001, ITASCA.

Grundlagen des ENSI

- [6] Kernfragen des ENSI, Aktivitäten gemäss Nachforderung (ENSI 33/476, Kap. 4.5); Vorschlag für die Aufteilung der Aufgaben der Experten; Orientierungsfragen für die Prüfungsarbeit und Berichte der Experten. ENSI, 15.08.2016.
- [7] Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in Etappe 2 SGT. Aktennotiz ENSI (33/476); 06.11.2015.

- [8] ENSI-G03; Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis; April 2009
- Grundlagen Dritter [9] Ordnung für Leistungen und Honorare der Bauingenieurinnen und Bauingenieure. Norm SIA 103, Ausgabe 2014.
- Weitere Dokumente [10] Startsitung für die Prüfung des ENSI und seiner Experten im Rahmen der Nachforderung; 05.08.2016. ENSI, Protokoll, 01.09.2016.
- [11] Beurteilung der geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage im Rahmen der Nachforderung des ENSI zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in Etappe 2 SGT. Expertenbericht, ETH Zürich, Professur für Ingenieurgeologe, ENSI 33/531, 25.11.2016.

#### 1.4 Vorgehen und Schwerpunkte der Überprüfung

Vorgehen

Die Prüfarbeit startete mit der Startsitung beim ENSI am 05.08.2016 [10]. Im Anschluss an diese Sitzung wurden dem Prüffingenieur umfangreiche Dokumente im Kontext zu den aktuellen Kern- und Orientierungsfragen übergeben. Sukzessive und iterativ wurden relevante Dokumente studiert und Fachsitzungen mit dem ENSI abgehalten.

Prüfeschwerpunkte

Die Projektierungsarbeit der NAGRA wurde schwerpunktmässig hinsichtlich Plausibilität, Nachvollziehbarkeit und insbesondere Belastbarkeit der wesentlichen in den Berichten gemachten Aussagen zur Tiefenlage geprüft. Insbesondere ist es darum gegangen, die Belastbarkeit und die Stufengerechtigkeit der Beurteilung der NAGRA in Bezug auf das Vorhandensein eindeutiger Nachteile aufgrund der Tiefenlage für den Standort Nördlich Lägern zu prüfen und zu hinterfragen.

Beurteilungen Dritter:  
ETH Zürich

Die geomechanischen Grundlagen wurden durch die Experten der ETH Zürich mit Unterstützung der Dr. von Moos AG geprüft und in [11] dokumentiert. Deren Prüfung bildet eine wichtige Grundlage für die Beurteilung und Bewertung der baulichen Aspekte, welche Gegenstand des vorliegenden Berichtes sind. Die Erkenntnisse aus [11] sind im vorliegenden Bericht eingeflossen.

Beiträge Dritter:  
Dr. von Moos AG

Die Thematik des vorliegenden Prüfberichts beinhaltet signifikante Schnittstellen zur Ingenieurgeologie. Dank intensivem Austausch speziell mit Martin Vogelhuber und auch Beat Rick von der Dr. von Moos AG konnten wertvolle Synergien genutzt werden. Martin Vogelhuber hat in den Kapiteln 6.2 bis 6.4 (inkl. Anhänge 1 und 2) wesentliche Informationen und Beiträge zum vorliegenden Bericht beigesteuert. Seine Beiträge sind an dieser Stelle bestens verdankt.

#### 1.5 Stufengerechtigkeit (SIA 103)

Bei der Einordnung und Prüfung der Arbeit der NAGRA ist zu berücksichtigen, dass sich die Etappe 2 SGT im Rahmen einer Vorstudie nach SIA103 [9] (Phase 2, Abbildung 1) bewegt und in Etappe 3 SGT weitere stufengerechte, vertiefende Untersuchungen anstehen.

Phasen	Teilphasen
1 Strategische Planung	11 Bedürfnisformulierung, Lösungsstrategien
2 Vorstudien	21 Definition des Bauvorhabens, Machbarkeitsstudie 22 Auswahlverfahren
3 Projektierung	31 Vorprojekt 32 Bauprojekt 33 Bewilligungsverfahren / Auflageprojekt
4 Ausschreibung	41 Ausschreibung, Offertvergleich, Vergabeantrag
5 Realisierung	51 Ausführungsprojekt 52 Ausführung 53 Inbetriebnahme, Abschluss
6 Bewirtschaftung	61 Betrieb 62 Überwachung / Überprüfung / Wartung 63 Instandhaltung

Abbildung 1: SIA 103 (Ausgabe 2014), Kap. 3.2 [9].

### 1.6 Generelle Würdigung

Umfang

Die von der NAGRA gelieferte Dokumentation ist umfangreich, grundsätzlich sehr detailliert und zeugt von einer gründlichen Arbeit. Die detailliert dokumentierte Projektierungsarbeit ist stufengerecht (Stufe Machbarkeitsstudie) und teilweise bereits auf Stufe Vorprojekt.

Prüfunterlagen

Die geprüften Unterlagen der NAGRA werden als konstruktiven Beitrag zur Beurteilung des Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" beurteilt. Sie belegen grösstenteils den aktuellen Wissensstand und sind sehr hilfreich bei der Beurteilung, ob eindeutige Nachteile in Bezug auf die Tiefenlage vorhanden sind.

### 1.7 Informationen zum vorliegenden Prüfbericht

Dokumentation des  
Prüfingenieurs

In den folgenden Kapiteln wird detailliert auf die Prüfung der Grundlagen der NAGRA eingegangen. Diese orientiert sich an den Orientierungsfragen und fokussiert auf die Beantwortung der Kernfragen.

Die Prüfung orientiert sich am allgemeinen Vorgehen für die Projektierung und die Durchführung von Berechnungen im Untertagebau. Die Dokumentation der Prüfung ist in die folgenden Kapitel gegliedert:

- \_ Lagerauslegung
- \_ Nutzungsanforderungen
- \_ Projektierungsgrundlagen (Projektbasis)
- \_ Massgebende Gefährdungsbilder
- \_ Tragwerksanalyse
- \_ Bauverfahren und Vordimensionierung
- \_ Schlussfolgerung und Beantwortung der Kernfragen

In den einzelnen Kapiteln 2 bis 7 wird das Vorgehen und die Beurteilungen der NAGRA kurz beschrieben und die entsprechende Beurteilung durch den Prüfingenieur

dokumentiert. Wo relevant sind Empfehlungen des Prüferingenieurs für die weitere Vertiefung der Arbeiten der NAGRA in Etappe 3 des Sachplanverfahrens geologische Tiefenlager erwähnt.

Im Kapitel "Schlussfolgerung und Beantwortung der Kernfragen" werden die Erkenntnisse der vorhergehenden Kapitel in einer Gesamtbeurteilung zusammenfassend dokumentiert. Auf den inhaltlichen Schlussfolgerungen basierend beantwortet der Prüferingenieur die drei Kernfragen des ENSI.

## 2. Lagerauslegung

### 2.1 Vorgehen der NAGRA

Vorgehen in 2 Schritten

Die NAGRA hat in zwei Schritten mögliche Lager- und Barrierenkonzepte untersucht. In einem ersten Schritt hat sie die grundsätzliche Eignung unterschiedlicher, weltweit verwendeter beziehungsweise betrachteter Lager- und Barrierenkonzepte geprüft, unter Beachtung der spezifischen Randbedingungen in der Schweiz und basierend auf den Ergebnissen der Etappe 1 des Sachplanverfahrens.

Im zweiten Schritt hat sie die Lagerarchitektur und die Ausgestaltung der Lagerkammern für diejenigen Lager- und Barrierenkonzepte detaillierter beurteilt, welche nach dem ersten Schritt als grundsätzlich möglich beurteilt wurden.

Referenzkonzepte als vorteilhaft bewertet

Darauf basierend hat die NAGRA Aspekte der Lager- und Barrierenkonzepte für das HAA respektive das SMA-Lager beschrieben und kommt zum Schluss, dass die bisher verwendeten Referenzkonzepte im Vergleich zu anderen Konzepten vorteilhaft sind. Die NAGRA betont jedoch ausdrücklich, dass "die Prüfung der Lager- und Barrierenkonzepte in Zusammenhang mit der Einengung in Etappe 2 SGT keine abschliessende Festlegungen bezüglich des zukünftigen zu verwendenden Lager- und Barrierenkonzepts macht, sondern nur festhält, dass mit den Vorschlägen der NAGRA für Etappe 3 SGT keine Standortgebiete gewählt werden sollten, welche die gegenwärtigen Lager- und Barrierenkonzepte ausschliessen würden." (NAB 16-42, Seite 2).

### 2.2 Beurteilung durch den Prüfenieur

Methodik, Vorgehen

Das gewählte Vorgehen der NAGRA ist aus Sicht des Prüfenieurs zweckmässig. Die Breite der Betrachtung mit den weltweit verwendeten respektive betrachteten Lager- und Barrierenkonzepten stellt sicher, dass keine grundsätzlich unterschiedlichen und möglichen Varianten vergessen wurden. Darüber hinausgehende Betrachtungen von allenfalls nur für die Schweiz spezifischen Varianten wurden jedoch nicht gemacht respektive nicht dokumentiert.

Nachvollziehbarkeit

Der Bericht 16-42 wurde aus Sicht der Nachforderung Etappe 2 SGT verfasst und nimmt die Resultate der Etappe 1 SGT sowie der Hauptarbeiten der Etappe 2 SGT als gegeben an. Zahlreiche Aussagen, Bewertungen oder Schlussfolgerungen werden nicht begründet und Grundlagen nicht zitiert, die Nachvollziehbarkeit des Berichts ist daher eingeschränkt.

Die NAGRA stellt beispielsweise fest, dass die Wahl des Verfüllmaterials (zementbasiert oder Bentonit) keinen Einfluss auf die maximale Tiefenlage hat. Diese Einschätzung wird jedoch nicht begründet und für den Prüfenieur ist sie nicht offensichtlich. Unklar ist ebenfalls, wie die NAGRA unter anderem auf die ‚Betrachteten Varianten‘ (z.B. Betriebstunnel D=5m; Lagerstollen D=1 bzw. 3m) für die Lagerkammern BE/HAA gekommen ist. Dem Prüfenieur scheint die Auswahl bautechnisch zwar sinnvoll. Jedoch sollte aus Gründen der Nachvollziehbarkeit in den Folgephasen das ganze Spektrum dargestellt und Überlegungen und Entscheide dokumentiert werden.

Vollständigkeit fraglich

Die NAGRA betrachtet breit die grundsätzlich möglichen Lager- und Barrierenkonzepte. Trotz der Breite sind diese Betrachtungen jedoch nicht vollständig. So wird beispielsweise die Einlagerung von Castorbehältern aus geometrischen Gründen verworfen, da diese stehend in grossen Lagerkammern zu viel Platz im Wirtsgestein beanspruchen. Die Lagerung von Castorbehältern in horizontalen Lagerstollen könnte jedoch auch ein Konzept sein, wird aber im Variantenfächer gemäss Kapitel 3.1 des Berichts 16-42 nicht erwähnt.

Obwohl die Betrachtung der grundsätzlich möglichen Konzepte (gemäss Kapitel 3 aus NAB 16-42, z.B. Einlagerung der Abfälle in horizontalen Lagerkammern, vertikale Lagerung in vertikalen Lagerkammern, Einlagerung von Castoren etc.) aus Sicht des Prüfsingenieurs nicht vollständig ist, ist er trotzdem der Ansicht, dass die relevanten grundsätzlich möglichen Konzepte beschrieben wurden und dass zusätzliche Varianten keinen Einfluss auf das Resultat der Überlegungen und die Schlussfolgerungen der NAGRA für die Etappe 2 SGT gehabt hätten.

Der Prüfsingenieur beurteilt jedoch die angestellten Überlegungen zur "Beurteilung und Festlegung von Varianten der grundsätzlich möglichen Lager- und Barrierenkonzepte" (siehe Kapitel 4 in NAB 16-42, z.B. Zugänge nach Untertag oder Wahl des Verfüllmaterials für die Lagerkammern etc.) als unvollständig mit dem Potential einer Beeinflussung der Resultate der Etappe 2 SGT.

Zusätzliche Varianten für Zugangsbauwerke prüfen

Der Prüfsingenieur beurteilt den Variantenfächer für die Zugangsbauwerke als nicht umfassend. Gemäss seiner Einschätzung sollte bei den betrachteten Varianten darauf geachtet werden, dass das Spektrum möglichst breit bleibt und nicht schon durch Präferenzen oder Annahmen eingeschränkt wird. So ist der Prüfsingenieur der Ansicht, dass mindestens zusätzliche Varianten mit abgesetzten Schächten oder nur mit Rampen ohne zusätzliche Schächte für das Standortgebiet Jura Ost zu prüfen sind.

Stufengerechtigkeit

Die NAGRA geht im NAB 16-42 prioritär auf Lagerkammern und -stollen und deren Verfüllung ein. Dies wird als stufengerecht beurteilt. In den folgenden Projektphasen wird jedoch auch eine standortspezifische Auseinandersetzung mit den Verschluss- und Versiegelungsbauwerken (als Bestandteil des Barrierenkonzeptes) erwartet. Welche Konzepte sind für die Zwischensiegel und die Versiegelung der Lagerkammern, der Lagerfeldgruppen und der Zugangsbauwerke möglich und sinnvoll und was sind die Konsequenzen daraus für das Gesamtsystem?

Festlegung Lager- und Barrierenkonzepte

Die vorgeschlagenen Lager- und Barrierenkonzepte sind, obwohl nicht ausreichend dokumentiert, grundsätzlich plausibel und stellen nach Einschätzung des Prüfsingenieurs eine gute Basis für die weitere Detaillierung in Etappe 3 SGT dar.

Versiegelungsstrecken können keinen Beitrag zur Eingrenzung der Tiefenlage leisten

Die Versiegelungsstrecken sind jedoch nur am Rande thematisiert. Die NAGRA hält ausserdem in der Legende der Figur 4.2-6 des Berichts 16-42 fest, dass die Zwischensiegel nicht zwingend notwendig sind. Konsequenterweise muss daher festgehalten werden, dass basierend auf den Versiegelungsstrecken kein Nachteil bezogen auf die Tiefenlage belegt werden kann. Argumente, welche einen Nachteil

beim Bau von Versiegelungsstrecken in grösseren Tiefen betonen, erachtet der Prüferingenieur als nicht belastbar.

#### Verfüllmaterial

In Kap. 4.2.2.3 des Berichts 16-42 betrachtet die NAGRA drei Verfüllmaterialien. In der Folgephase sollten auch Mischlösungen (z.B. Bentonit und Zement sowie entsprechende Mischungsverhältnisse) analysiert und dokumentiert werden. Im Bauwesen werden z.B. Bentonite dem Beton von Klärbecken beigemischt, um die Wasserdichtigkeit zu erhöhen und das Schwinden zu reduzieren. Eventuell können auch für die Tiefenlager vorteilhafte Synergien der Baustoffe genutzt werden.

#### Schlussfolgerungen

Das Lagerkonzept ist nicht detailliert genug diskutiert und dokumentiert, um darauf basierend einen eindeutigen Nachteil eines Standortgebietes basierend auf der Tiefenlage zu begründen. Hierzu bedürfte es einer umfassenden Diskussion der möglichen Lagerkonzepte mit den Teilaspekten Versiegelung, Verfüllung und möglicher Ausbauvarianten und deren Konsequenzen auf das Gesamtsystem. In den Unterlagen ist eine solche Diskussion jedoch nicht dokumentiert.

Auch die Aussage der NAGRA, dass das verwendete Lager- und Barrierenkonzept für die Einengung in Etappe 2 SGT kein Präjudiz für das zukünftige Lager- und Barrierenkonzept darstellt, lässt aus Sicht des Prüferingenieurs nur den Schluss zu, dass zwar in den für die Etappe 3 SGT vorgeschlagenen Gebiete die aktuellen Lager- und Barrierenkonzepte umsetzbar sein müssen (Belegung der Sicherheit und der bautechnischen Machbarkeit), die Konzepte jedoch für den Standortvergleich im Sinne einer Optimierung respektive der Belegung von Nachteilen nicht verwendet werden können, da sie zu wenig erhärtet und robust sind.

Die Belegung von "Eindeutigen Nachteilen" bezogen auf die Tiefenlage ist aus Sicht des Prüferingenieurs basierend auf den aktuell vorhandenen Grundlagen nicht möglich.

#### Empfehlungen

Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:

- \_ Die Versiegelungsstrecken sind standortspezifisch detailliert zu betrachten (konzeptionell, bauspezifisch, Auswirkungen auf das Gesamtsystem etc.) und deren Wichtigkeit respektive Anforderungen zur Erfüllung des übergeordneten Schutzziels der Langzeitsicherheit klar zu begründen.
- \_ Die Varianten für den Zugang nach Untertag sind standortspezifisch zu erweitern um mindestens eine Variante mit abgesetzten Schächten sowie eine Variante ausschliesslich mit Rampen ohne Schächte (Standortgebiet Jura Ost).
- \_ In Etappe 3 SGT sind die Verfüllmaterialvarianten Bentonit und Zementbasiert detailliert zu untersuchen und die Konsequenzen für das Gesamtsystem aufzuzeigen. Auch soll analysiert und dokumentiert werden, ob nicht unterschiedliche Verfüllmaterialien für einzelne Abfallinventar (BE, HAA) sinnvoll wären. Gegebenenfalls sind auch die Beladungsvarianten der Endlagerbehälter zu hinterfragen (z.B. verglaste Abfälle von BE örtlich zu separieren).
- \_ Die Überlegungen zu den Lager- und Barrierenkonzepten sind so zu dokumentieren, dass sie auch in Zukunft durch die Öffentlichkeit nachvollzogen werden können (vollständige Dokumentation über den ganzen Prozess, Begründung von Schlussfolgerungen, Zitieren von Grundlagen und Quellen etc.).

### 3. Nutzungsanforderungen

#### 3.1 Vorgehen der NAGRA

Nutzungsvereinbarung gemäss  
SIA 260

Die NAGRA hat eine Nutzungsvereinbarung erarbeitet, welche sich an den Vorgaben der Norm SIA 260 (2013) orientiert. In der Nutzungsvereinbarung sind die relevanten übergeordneten, bauwerkspezifischen Nutzungsanforderungen zusammengestellt, welche bezogen auf die Langzeitsicherheit von Relevanz sind. Den Fokus hat die NAGRA aktuell auf die Lagerkammern und Versiegelungsstrecken auf Lagerebene gelegt, da diese im Hinblick auf die Frage der maximal möglichen Tiefenlage der Lagerebene von Bedeutung sind.

Nutzungsphasen,  
Nutzungsdauern,  
Nutzungszustände

In einem ersten Schritt unterscheidet die NAGRA verschiedene Nutzungsphasen und legt deren geplanten Nutzungsdauern fest. In einem zweiten Schritt legt sie dann Nutzungszustände beginnend beim Vortrieb (NZ-1) bis hin zur Langzeit (NZ-6) fest. Diese Festlegungen erlauben es der NAGRA die nachfolgend definierten Nutzungsanforderungen für spezifische Situationen festzulegen.

Übergeordnete  
Nutzungsanforderungen

Die NAGRA definiert 11 übergeordnete Nutzungsanforderungen (NA) und präzisiert diese als unabdingbare Anforderungen (muss: m) respektive wünschbare Anforderungen (soll: s). Die übergeordneten Nutzungsanforderungen sind wiederum untergliedert in spezifischere Anforderungen, die zur Erfüllung der übergeordneten Anforderung notwendig oder erstrebenswert ist. So ist beispielsweise für die Erfüllung der NA-2 "Machbarkeit – Gewährleistung der zuverlässigen Machbarkeit von Bau, Einlagerung und Verfüllung sowie Verschluss" unter anderen die spezifischere Anforderung aufgeführt, dass dies mit heute bekannter und erprobter Technologie möglich sein soll.

Randbedingungen für  
Projektkonzepte und Vergleich

Für die Erarbeitung der Projektkonzepte und ihren Vergleich führt die NAGRA die Nutzungsanforderungen "Sicherheit – Beachtung des Optimierungsgebots [8] (NA-12)" und "Ungewissheiten – vorhandene Ungewissheiten müssen in den Überlegungen explizit berücksichtigt werden (NA-13)" ein. Diese Anforderungen versteht die NAGRA als Randbedingungen für ihr Vorgehen auch im Rahmen der Standorteingrenzung und Auswahl.

#### 3.2 Beurteilung durch den Prüflingenieur

Fokussierung auf Bauwerke auf  
Lagerebene stufengerecht

Die durch die NAGRA vorgenommene Fokussierung auf die Bauwerke auf Lagerebene ist für den Prüflingenieur nachvollziehbar und stufengerecht. Sie lenkt die Aufmerksamkeit auf die relevanten Fragestellungen, welche im Zusammenhang mit der Eingrenzung der Standortgebiete zu beantworten sind. Wie von der NAGRA vorgesehen, sind die weiteren Bauwerke (z.B. Zugangsbauwerke, Verzweigungsbauwerke, Lüftungs-, Bau- und Betriebstunnel, Oberflächenanlage etc.) in der Etappe 3 SGT zu behandeln und die entsprechenden Nutzungsanforderungen zu definieren.

Nutzungsphasen,  
Nutzungsdauern und  
Nutzungszustände sind  
nachvollziehbar und sinnvoll

Die Nutzungsphasen und Nutzungsdauern für die untertägigen Bauwerke der HAA- und SMA-Lager sind für den Prüfenieur nachvollziehbar und plausibel und stufengerecht dokumentiert. Die Phasen und die dazugehörigen Nutzungszustände zur Beschreibung des als relevant betrachteten Verhaltens der untertägigen Bauwerke und des umgebenden Gebirges werden als sinnvoll gewählt und vollständig beurteilt.

Nutzungsanforderungen sind  
stufengerecht

Die Auflistung der Nutzungsanforderungen ist breit abgestützt, ausreichend und stufengerecht detailliert. Die Unterteilung der Nutzungsanforderungen in Soll- und Muss-Anforderungen ist sinnvoll. Die Zuordnung zu "m" (muss) und "s" (soll) ist grösstenteils plausibel, in einigen Fällen jedoch zu hinterfragen wie die Beispiele im folgenden Abschnitt erläutern. Dies gilt ebenfalls für die Zuordnung der Anforderungen zum SMA- und/oder zum HAA-Lager.

zu hinterfragende Zuordnung  
(soll-muss) respektive SMA - HAA

Die NAGRA verlangt beispielsweise mit der NA-6 "Langzeitsicherheit – Beschränkung der Wasserwegsamkeit in der Auflockerungszone" (soll-Kriterium) eine Beschränkung der Wasserwegsamkeit des an die Ausbruchslaibung angrenzenden Gebirges im Bereich des BE/HAA-Lagers. Für das SMA-Lager stellt sie keine entsprechenden Anforderungen. Eine solche Anforderung wäre jedoch aus Sicht des Prüfenieurs angebracht zum Schutz der Barrierenwirkung des Opalinustons. Der Prüfenieur ist ebenfalls der Meinung, dass das Kriterium beim BE/HAA-Lager analog zur Definition bei NA-7 als kombiniertes Kriterium definiert sein sollte (s, bei Überschreiten einer kritischen Grösse: m).

Nutzungsanforderungen nicht  
vollständig in Projektbasis  
eingeflossen

Es ist üblich, dass alle Punkte der Nutzungsanforderungen in der Projektbasis weiterverarbeitet werden. Dies ist nicht bei allen Anforderungen der Fall. So fällt beim Vergleich beispielsweise auf, dass die NA-2 '**Machbarkeit**' für die Nutzungszustände **NZ 1-3** (Vortrieb, Betrieb, Verschluss) gilt – das Pendant der **Projektbasis** (Kap. 4.6.4) '**Ausführbarkeit**' jedoch nur für den **NZ 1** (Bau). Die entsprechenden Anforderungen in der Projektbasis für den NZ 2 (Betrieb; z.B. Sohlgefälle) und den NZ 3 (Verschluss, z.B. Verzahnung des Dichtmaterials mit dem Wirtgestein) sind in der Etappe 3 SGT zu integrieren.

Randbedingungen für  
Projektkonzepte sind sinnvoll und  
ausreichend

Die von der NAGRA aufgeführten Randbedingungen NA-12 und NA-13 stehen unter der Prämisse "Sicherheit – Beachtung des Optimierungsgebots [8]. Dazu gehört auch der Vergleich von Varianten" (NA-12) und "Ungewissheiten – vorhandene Ungewissheiten müssen in den Überlegungen explizit berücksichtigt werden" (NA-13). Der Prüfenieur erachtet diese Anforderungen als sinnvoll gewählt und zielführend. Bei der Anwendung ist speziell bei der NA-12 jedoch darauf zu achten, dass durch die Anwendung des Optimierungsgebots nicht verfrühte Grundsatzentscheide gefällt werden, welche die Bandbreite der Möglichkeiten zu einem frühen Zeitpunkt unnötigerweise einschränken. Dies wäre der übergeordneten Prämisse der Sicherheit abträglich.

Empfehlungen

Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:

- \_ Die Nutzungsanforderungen sind für alle Bauwerke des Tiefenlagers festzulegen.
- \_ Die Nutzungsvereinbarung und Projektbasis sind als separate Dokumente zu erstellen. Die vollständige Übernahme respektive Weiterbearbeitung aller

Nutzungsanforderungen in allen hierfür relevanten Nutzungszuständen ist in der Projektbasis übersichtlich sicherzustellen.

- \_ Die Nutzungsanforderungen sind standortspezifisch zu ergänzen und zu präzisieren. Die Zuteilung der Nutzungsanforderungen zu HAA und/oder SMA respektive zu Muss-/Soll-Kriterien ist kritisch zu hinterfragen. Neue Erkenntnisse, der aktuelle Stand der Technik sowie die aktuellen Regeln der Baukunde sind dabei zu berücksichtigen.

## 4. Projektierungsgrundlagen (Projektbasis)

### 4.1 Vorgehen der NAGRA

Arbeit der NAGRA

Gemäss Norm SIA 260 sind *"die aus dem Entwurf sich ergebenden Grundlagen und Anforderungen für die weitere Projektführung, Nutzung und Erhaltung in der Projektbasis darzustellen"*. Die NAGRA nimmt diese Forderung wahr und dokumentiert die Projektierungsgrundlagen im Sinne einer Projektbasis (in Anlehnung an die SIA 260) im Arbeitsbericht NAB 16-45 (Kap. 4). Behandelt werden die geomechanischen Kennwerte des Opalinustons (Wirtgestein) inkl. die für die numerischen Berechnungen verwendeten Stoffgesetze, die Baugrundmodelle (Gebirgsmodelle) mit den zugewiesenen geomechanischen Parametersätzen, die geologischen Modelle der Standorte und die Gefährdungsbilder.

### 4.2 Beurteilung durch den Prüfenieur

Methodik, Vorgehen

Die Integration der Auflistung der Projektierungsgrundlagen (Projektbasis) in einem Arbeitsbericht (NAB 16-45, Kap. 4) ist zweckmässig und stufengerecht.

Nachvollziehbarkeit

Bedingt durch die umfangreiche Dokumentation sind jedoch die Informationen nicht einfach zu finden.

Vollständigkeit

Die Auflistung der Projektierungsgrundlagen ist im Allgemeinen vollständig. Der Inhalt, der von der Norm SIA 260 verlangt wird (betrachtete Gefährdungsbilder, Anforderungen an das Bauwerk, angenommene Baugrundverhältnisse etc.), ist generell vorhanden. Es ist aber zu vermerken, dass lediglich die "Normalprofile" betrachtet werden (NAB 16-45, Kap. 4.5.1). Die Verzweigungsbauwerke, welche bautechnisch am schwierigsten sind, werden nicht behandelt.

Stufengerechtigkeit

Die Projektbasis ist im Wesentlichen stufengerecht. Sie enthält jedoch bereits Schlussfolgerungen (NAB 16-45, Kap. 4), die voreilig und deshalb nicht begründet sind, da sie zur Projektierung gehören (z.B. Aussage über die Eignung von Bauverfahren; NAB 16-45, Kap. 4.1).

Baugrundmodelle und -parameter

Die Baugrundmodelle und -parameter stellen einerseits Projektierungsgrundlagen dar, sind aber auch gleichzeitig Ergebnisse der Projektierungsarbeit (sie resultieren aus der aktuellen Projektierungsarbeit und sind auf Basis weiterführender Erkundungen und Untersuchungen laufend zu überarbeiten und zu aktualisieren). Die von der NAGRA verwendeten Baugrundmodelle und -parameter sind nicht ausreichend belastbar. Zu dieser Schlussfolgerung sind sowohl die Experten der ETH Zürich und der Dr. von Moos AG (siehe dazu [11]) als auch der Prüfenieur gekommen. Die entsprechenden Vermerke des Prüfenieurs sind aus inhaltlichen Gründen im Kap. 6. des vorliegenden Prüfberichtes zu finden.

Empfehlungen

Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:

- \_ Eine getrennte Projektbasis soll als eigenständiges Dokument erarbeitet werden. Diese soll zwecks Übersichtlichkeit und einfacher Nachvollziehbarkeit "schlank" gehalten werden.

- \_ Die Projektbasis soll nur die Projektierungsgrundlagen und keine Schlussfolgerungen aus der Projektarbeit enthalten.
- \_ Alle relevanten Bauwerksquerschnitte sind standortspezifisch zu betrachten.
- \_ In Bezug auf die Baugrundmodelle und -parameter gelten die Empfehlungen, welche im Kap. 6. des vorliegenden Prüfberichts zu finden sind.

## 5. Massgebende Gefährdungsbilder

### 5.1 Vorgehen der NAGRA

Arbeit der NAGRA

Die SIA-Normen 197 und 199 definieren ein Gefährdungsbild als *"eine Beschreibung einer möglichen kritischen Situation oder eines unerwünschten Ereignisses für ein Bauwerk und / oder seine Umgebung in der Bau- und Nutzungsphase"*. Im Einklang mit dieser Definition hat die NAGRA eine ausführliche Liste von projektspezifischen Gefährdungsbildern erarbeitet. Sie leitet die massgebenden Gefährdungsbilder aus den Baugrundmodellen ab.

geologische Gefährdungsbilder

In einem ersten Schritt beschreibt sie sogenannte übergeordnete "geologische Gefährdungsbilder" für die geplanten Bauwerke auf Lagerebene auf Basis des heutigen Erkenntnisstandes zur Geologie ohne Berücksichtigung von jeglichen Massnahmen. Anschliessend werden diese Gefährdungsbilder in Gruppen (Gefährdungsbilder mit vergleichbarer Auswirkung) zusammengefasst und Massnahmen für jedes Referenzprofil unter Berücksichtigung der Nutzungsanforderungen definiert. Daraus werden dann auch weitere sogenannte "bauverfahrensspezifische Gefährdungsbilder" abgeleitet.

bauverfahrensspezifische  
Gefährdungsbilder

Die Beherrschung eines bestimmten Gefährdungsbildes kann die Anordnung von spezifischen Massnahmen erfordern. Durch diese Massnahmen können wiederum bauverfahrensspezifischen Gefährdungsbilder entstehen, welche zusätzlich zu analysieren sind. So kann beispielsweise der Einsatz einer Tunnelbohrmaschine eine Massnahme sein, um das Gebirge schonend auszubrechen und somit die unerwünschte Auflockerung des Gebirges rund um den Hohlraum zu reduzieren. In diesem Fall stellt ein "langer Stillstand infolge maschinentechnischer Probleme" bei druckhaftem Gebirge ein Beispiel eines bauverfahrensspezifischen Gefährdungsbildes dar.

### 5.2 Beurteilung durch den Prüfingenieur

Methodik, Vorgehen

Die NAGRA ist zweckmässig vorgegangen.

Nachvollziehbarkeit

Die Gefährdungsbilder sind grundsätzlich nachvollziehbar behandelt.

Vollständigkeit

Die Gefährdungsbilder sind ausführlich und grundsätzlich vollständig behandelt. Die vorgeschlagene Unterteilung der Gefährdungsbilder (Geologie, Querschnittstyp, Nutzungszustand etc.) ist sinnvoll und deckt das mögliche Spektrum ab.

Stufengerechtigkeit

Die Gefährdungsbilder sind stufengerecht.

Plausibilität Schlussfolgerungen

Die aus den betrachteten Gefährdungsbildern hergeleiteten Schlussfolgerungen sind in der Regel plausibel. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Beurteilung der Relevanz der Gefährdungsbilder (z.B. Abschätzung des Schadensausmass oder der Auftretenswahrscheinlichkeit) in den meisten Fällen unter Berücksichtigung der (aktuellen) Baugrundmodelle erfolgt. Somit sind die Plausibilität und die Robustheit der Schlussfolgerung von der Plausibilität der Baugrundmodelle (das heisst der Projektierungsgrundlagen) direkt abhängig. Diese ist aber nicht lückenlos gegeben, wie

im Kap. 4. bereits erwähnt und im Bericht der Experten der ETH Zürich [11] sowie im Kap. 6. des vorliegenden Prüfberichts näher erläutert ist. Besonders zu erwähnen ist die Einschätzung der NAGRA in Bezug auf die Druckhaftigkeit des Gebirges, welche gemäss NAGRA zu massgebenden bautechnischen Schwierigkeiten im Standortgebiet Nördlich Lägern führen könnte. Der Prüflingenieur schätzt das diesbezügliche Gebirgsverhalten als weniger problematisch ein. Einerseits beruht die Einschätzung der NAGRA auf nicht belastbaren Berechnungsergebnissen (wie später in diesem Bericht erklärt, sind es gewisse Berechnungsannahmen der NAGRA, welche zu einer solchen negativen Einschätzung führen). Andererseits gibt es keine gefestigten Erfahrungen in vergleichbaren Bedingungen mit einem entsprechenden druckhaften Gebirgsverhalten.

#### Empfehlungen

Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:

- \_ Die Baugrundmodelle sind standortspezifisch zu detaillieren (stufengerechte Erhöhung der Planungssicherheit).
- \_ Begriffe wie "unverhältnismässiger Sicherungsaufwand", "unverhältnismässige Erhöhung des Aufwandes für Unterhalt", "unverhältnismässige Behinderung des Vortriebes" sind zu präzisieren respektive zu quantifizieren.

## 6. Tragwerksanalyse

### 6.1 Vorgehen der NAGRA

Arbeit der NAGRA

Die NAGRA führt die Tragwerksanalyse unter Anwendung diverser Berechnungsmodelle und –verfahren durch. Dabei berücksichtigt sie die massgebenden Nutzungszustände (Vortrieb, Betrieb, Verschluss, Rückholung nach Verfüllung bis zum Verschluss, Aufsättigung – NAB 16-45, Kap. 4.4).

Verwendete Berechnungsmodelle

Die verwendeten Berechnungsmodelle können grundsätzlich in zwei Hauptkategorien unterteilt werden:

- \_ Berechnungsmodelle, welche auf geschlossenen Formeln basieren und Berechnungen ermöglichen, welche auch von Hand durchgeführt werden können.
- \_ Berechnungsmodelle, welche nicht auf geschlossenen Formeln basieren und somit die Durchführung von numerischen Berechnungen erfordern (Computer-Berechnung).

Analytische Berechnungsmodelle

Die von der NAGRA durchgeführten Berechnungen mit analytischem Verfahren sind:

- \_ Berechnung der Gebirgskennlinie respektive Anwendung des Kennlinienverfahrens:
  - \_ Mit diesem Berechnungsmodell kann hauptsächlich die Wechselwirkung zwischen Gebirge und Ausbau untersucht werden; die Zeitabhängigkeit des Gebirgsverhaltens (Konsolidation) kann für den kurzfristigen ( $t = 0^+$ ) sowie für den langfristigen Fall ( $t = \infty$ , stationärer Zustand) ebenfalls berücksichtigt werden.
  - \_ Die NAGRA verwendet dieses Berechnungsmodell, um verschiedene Ausbausysteme (Steife und nachgiebige Ausbausysteme mit unterschiedlichen Abständen zwischen Ortsbrust und Ort des Sicherungseinbaus) zu untersuchen und um eine orientierende Vordimensionierung der Ausbruchsicherung bzw. des Ausbaus vorzunehmen.
  - \_ Es geht hier vorwiegend um die Gefährdungsbilder "Unzulässige Verformungen des Hohlraums" und "Überbeanspruchung des Ausbaus" sowie um die Ausdehnung der plastischen Zone (Auflockerung des Gebirges rund um den Hohlraum).
- \_ Grenzgleichgewichtmethode:
  - \_ Diese Methode wird verwendet, um die Stabilität von Bruchkörpern zu untersuchen.
  - \_ Es geht hier vorwiegend um die Gefährdungsbilder "Niederbruch" und "Ablösungen".

Numerische Berechnungsmodelle

Die von der NAGRA angewendeten Berechnungsmodelle mit numerischem Verfahren sind:

- \_ Rotationssymmetrisches Berechnungsmodell (1D):
  - \_ Dieses Berechnungsmodell stellt grundsätzlich eine Erweiterung des oben erwähnten Berechnungsmodells mit der analytisch berechneten Gebirgskennlinie dar.
  - \_ Die NAGRA verwendet dieses Berechnungsmodell für die Untersuchung der Zeitabhängigkeit des Gebirgsverhaltens (Konsolidation), in dem sie gekoppelte Berechnungen (mit Berücksichtigung der Porenwasserdrücke) in effektiven

Spannungen durchführt; anders als beim analytischen Berechnungsmodell ist es hier möglich, beliebige zeitliche Zustände zu untersuchen.

- \_ Axialsymmetrisches Berechnungsmodell (2D):
  - \_ Mit diesem Berechnungsmodell können räumliche Effekte tief liegender Hohlräume besser erfasst werden, da der Effekt des Abstandes zur Ortsbrust und der Ortsbrust selber ohne vereinfachende Annahmen (wie dies beim analytischen Berechnungsmodell und beim numerischen Berechnungsmodell 1D der Fall ist) berücksichtigt werden können.
  - \_ Die NAGRA verwendet dieses Berechnungsmodell, um das Systemverhalten unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Gebirgsverhaltens (Konsolidation) und diverser Ausbausysteme zu untersuchen.
- \_ Scheibenmodell (ebener Verformungszustand, 2D):
  - \_ Mit den oben erwähnten Berechnungsmodellen ist es nur möglich, aufgrund der Rotations- oder der Axialsymmetrie, isotropes Gebirgsverhalten zu untersuchen.
  - \_ Aus diesem Grund verwendet die NAGRA zusätzlich ein Scheibenmodell, das es erlaubt mit einem entsprechenden Stoffgesetz die Anisotropie des Gebirges zu berücksichtigen und deren Einfluss auf das Gebirgsverhalten und den Ausbau zu analysieren.

## 6.2 Generelle Beurteilung durch den Prüferingenieur

Methodik, Vorgehen

Die von der NAGRA angewendeten Berechnungsmethoden und -modelle sind grundsätzlich geeignet. Je nach Fragestellung werden in geeigneter Weise analytische Lösungen oder numerische Berechnungsmodelle verwendet. Es muss jedoch angemerkt werden, dass die statischen Berechnungen vorwiegend auf konservativen Annahmen basieren (siehe dazu den Bericht der Experten der ETH Zürich [11] sowie die nachfolgenden Ausführungen und die Ausführungen in den Kapiteln 6.3 und 6.4) und vorwiegend nur für die angenommenen ungünstigsten Gebirgsverhältnisse durchgeführt wurden (es wurde keine Sensitivitätsanalyse dokumentiert). Einerseits ist das Vorgehen korrekt, wenn es darum geht, die bautechnische Machbarkeit nachzuweisen. Andererseits zeigt die NAGRA mit den gewonnenen Ergebnissen nicht die Auswirkungen der ganzen Bandbreite der möglichen Gebirgseigenschaften auf und beeinflusst somit die Beurteilung der Standorte im Hinblick auf eindeutige Nachteile aufgrund der Tiefenlage.

Nachvollziehbarkeit

Die durchgeführten Betrachtungen und Berechnungen sind nachvollziehbar dokumentiert.

Vollständigkeit

Die von der NAGRA rechnerisch analysierten Nutzungszustände sind grundsätzlich vollständig. Die Versiegelungsstrecken werden dabei wenig detailliert behandelt. Die abgeleiteten Anforderungen an das Tragwerk (NAB 16-45, Kap. 4.6) sowie die vorgesehenen Massnahmen (z.B. Vortriebsverfahren, Sicherungstypen, Ausbautypen) sind ausführlich behandelt.

Stufengerechtigkeit

Die Tragwerksanalysen sind stufengerecht. Die Bearbeitungstiefe der Sicherungstypen (NAB 16-46) ist teilweise bereits auf Stufe Vorprojekt.

---

Plausibilität Ergebnisse	Die präsentierten Ergebnisse sind plausibel. In den Arbeitsberichten der NAGRA wird mehrmals betont, dass <i>"die Ergebnisse der numerischen Berechnungen ausgezeichnet übereinstimmen"</i> (z.B. NAB 16-41, Kap. 5.4.1). Die erwähnte Übereinstimmung stellt jedoch kein Qualitätsmerkmal im Sinne der Belastbarkeit der Ergebnisse (respektive der Schlussfolgerungen) dar. Sie bestätigt nur, dass die auf gleichen Modellannahmen beruhenden verglichenen numerischen Berechnungen unterschiedlicher Bearbeiter korrekt durchgeführt wurden.
Plausibilität Schlussfolgerungen	<p>Die abgeleiteten Anforderungen an das Tragwerk und die Tragwerkskonzepte sind ausführlich behandelt und grundsätzlich korrekt. Die vorgesehenen Massnahmen sind geeignet und ausführlich behandelt. Die Schlussfolgerungen aus den statischen Berechnungen sind grundsätzlich korrekt. Allerdings bleibt die Aussagekraft der statischen Berechnungen im Hinblick auf eine Standortbeurteilung beschränkt, da sie nicht die ganze Bandbreite der möglichen Gebirgseigenschaften berücksichtigen und systematisch von konservativen Annahmen ausgehen, zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>_ Im Fall von isotropem Materialverhalten berücksichtigen die statischen Berechnungen nur die Festigkeit der Schichtung (schwächer als die Matrix, daher ungünstig) und nur die Steifigkeit senkrecht zur Schichtung (weicher als parallel zur Schichtung, daher ungünstig).</li><li>_ Im Fall von anisotropem Materialverhalten (Berechnungen mit dem Scheibenmodell) wird der Unterschied in der Gebirgssteifigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung ebenfalls nicht berücksichtigt (nur Steifigkeit senkrecht zur Schichtung, daher ungünstig).</li><li>_ Die statischen Berechnungen berücksichtigen nur den "post-peak"-Wert des Elastizitätsmoduls des Gebirges (tiefer als der "pre-peak"-Wert, daher ungünstig); dies auch in der elastischen Zone, wo per Definition das Material nicht bricht; zudem wird in den statischen Berechnungen der Steifigkeitsabfall im Nachbruchbereich überschätzt (ungünstig).</li></ul>
Empfehlungen	<p>Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>_ Die Projektierungsarbeit und dadurch die Beurteilung der Standorte müssen die ganze Bandbreite der möglichen Gebirgseigenschaften berücksichtigen.</li><li>_ Für die massgebenden Parameter ist eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.</li></ul> <p><b>6.3 Beurteilung der festgelegten geomechanischen Parameter</b></p> <p>Im Kap. 4. wurde vermerkt, dass die von der NAGRA verwendeten Baugrundmodelle und -parameter – welche die wichtigste Grundlage der Tragwerksanalyse darstellen – nicht ausreichend belastbar sind. Diese Aussage wird nachfolgend zusammenfassend begründet. Eine detaillierte Begründung ist im Bericht der ETH [11] dokumentiert. Es wird zudem aufgezeigt, dass die Wahl der geomechanischen Parameter generell sehr konservativ und dass die Berücksichtigung des Einflusses der Tiefenlage auf die geomechanischen Parameter ebenfalls nicht ausreichend belastbar ist.</p>
Gebirgsmodelle	Als Grundlage für die Untersuchung des Einflusses der Tiefenlage führt die NAGRA drei Gebirgsmodelle (GM-max, GM-ref und GM-min) ein. Dadurch wird in sinnvoller Art und Weise die grosse Bandbreite der möglichen geomechanischen Parameter bzw. Gebirgsverhältnisse berücksichtigt (siehe dazu Anhang 1) und die Ungewissheit

aufgrund der geringen belastbaren experimentellen Datenbasis ausgedrückt. Der Prüferingenieur stützt die Vorgehensweise der NAGRA, weist jedoch darauf hin, dass sich daraus höchstens günstige respektive ungünstige Werte der einzelnen geomechanischen Parameter des Opalinustons begründen lassen. Eine Festlegung von Maximal- oder Minimalwerten ist jedoch statistisch nicht möglich.

Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Laborversuchen

Die wenigen zuverlässigen, für den relevanten Tiefenbereich von 600–900 m massgebenden, Triaxial- und Oedometerversuche zeigen ein Materialverhalten, das am besten durch das Gebirgsmodell GM-max beschrieben werden kann. Dies ist ein deutlich günstigeres Materialverhalten als dasjenige, welches durch die Gebirgsmodelle GM-ref oder GM-min beschrieben wird. In Bezug auf die Gebirgsmodelle GM-max und GM-ref ist zudem festzuhalten, dass die NAGRA aus Sicht des Prüferingenieurs von einem deutlich zu starken Abfall des Elastizitätsmoduls im Nachbruchbereich ausgeht.

Tiefenabhängigkeit

Die Überlegungen der NAGRA zur Tiefenabhängigkeit der geomechanischen Parameter sind sehr unsicher. Dies ist durch eine teilweise widersprüchliche theoretische Herleitung und die nur sehr eingeschränkt mögliche experimentelle Prüfung bedingt. Die Aussagen der NAGRA zur Tiefenabhängigkeit der geomechanischen Materialparameter sind somit nicht ausreichend belastbar. Aufgrund der geringen Datenbasis bestehen 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.

#### 6.4 Beurteilung der Anwendung der geomechanischen Parameter

Nachfolgend wird die Anwendung der geomechanischen Parameter und deren Einfluss auf die Aussagekraft der durchgeführten Tragwerksanalyse diskutiert.

Berücksichtigte Gebirgsmodelle

Aus den wenigen, zuverlässigen Triaxial- und Oedometerversuchen (massgebend für den relevanten Tiefenbereich von 600–900 m) geht hervor, dass das Materialverhalten des Opalinustons mit dem Gebirgsmodell GM-max am zutreffendsten zu beschreiben wäre (siehe Bericht der ETH [11]). Somit stellt die Festlegung der NAGRA, wonach das Gebirgsmodell GM-ref den zu erwarteten Fall repräsentiert, eine konservative Annahme dar. Diese Festlegung ist aber nicht nachvollziehbar und nicht ausreichend begründet.

Zuordnung der Gebirgsmodelle zu einer Opalinuston-Fazies

Die NAGRA ordnet das Gebirgsmodell GM-max der sandigen Fazies des Opalinustons zu. Dadurch wird automatisch das Gebirgsmodell GM-max von der NAGRA als nicht relevant eingestuft und in den felsmechanischen Berechnungen der NAGRA nicht betrachtet, da die Lagerebene nach Aussage der NAGRA nicht in der sandigen Fazies liegen wird. Dieser "Ausschluss" ist fragwürdig insbesondere im Hinblick auf die Untersuchungen des Einflusses der Tiefenlage (druckhaftes Gebirgsverhalten). Der Prüferingenieur weist darauf hin, dass eine Festlegung bestimmter geomechanischer Parameter ohne Bandbreite der einzelnen Parameter für bestimmte Ausprägungen respektive je nach mineralogischer Zusammensetzung des Opalinustons (sandige

Fazies, tonige Fazies, tektonisch überprägt) zum heutigen Zeitpunkt in quantitativer Sicht nicht begründbar ist. Dies ist durch die nicht ausreichende Belastbarkeit der geomechanischen Grundlagen bedingt. Zudem widerspricht die NAGRA mit dieser Vorgehensweise dem eigenen Ansatz (NAB 16-41, Seite 94), dass *"die erwarteten wirtgesteinsspezifischen und standortbezogenen Ungewissheiten durch (...) eine entsprechend grosse Parameter-Bandbreite"* berücksichtigt werden sollen.

Beurteilung des Einflusses der Tiefenlage

Der Einfluss der grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter wird von der NAGRA unterschätzt. Einerseits bleibt das Gebirgsmodell GM-max unberücksichtigt; andererseits gehen die Unterschiede zwischen den Gebirgsmodellen GM-ref und GM-min bei den statischen Berechnungen der NAGRA aufgrund konservativer respektive nicht plausibler Annahmen verloren (z.B. Festlegung respektive Anwendung des Elastizitätsmoduls im Nachbruchbereich). Dadurch stimmen die zugehörigen Berechnungsergebnisse nahezu überein. Dieser Sachverhalt wird im Bericht der ETH [11] detaillierter beschrieben und ist im Anhang 2 dieses Berichts dargestellt. In den Darstellungen ist einfach erkennbar, dass sich die Gebirgskennlinien unter Berücksichtigung der Annahmen der NAGRA für die drei verschiedenen Gebirgsmodelle kaum unterscheiden. Der Einfluss des Gebirgsmodells auf die Berechnungsergebnisse wird erst deutlich, wenn für die Berechnung der Gebirgskennlinie realistischere Annahmen getroffen und zum Beispiel die Elastizitätsmoduli innerhalb und ausserhalb der plastischen Zone unterschieden werden ("post-peak"-Wert innerhalb und "pre-peak"-Wert ausserhalb). Zusammenfassend stellt der Prüfer fest, dass die NAGRA den Einfluss der grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter unterschätzt und den Einfluss der Tiefenlage überschätzt. Dadurch geht der positive Einfluss der Zunahme der Gebirgsqualität mit der Tiefe verloren und die Druckhaftigkeit des Gebirges wird überschätzt.

## 7. Bauverfahren und Vordimensionierung

### 7.1 Vorgehen der NAGRA

Arbeit der NAGRA

Die NAGRA vergleicht diverse Baumethoden anhand qualitativer und quantitativer Kriterien und definiert darauf basierend ein Referenz-Bauverfahren (z.B: Gripper-TBM-Vortrieb für die Lagerstollen), welches für die weiteren Analysen in Bezug auf die Standortwahl herangezogen wird. Die Vordimensionierung der Ausbruchsicherung und des Ausbruchs erfolgt vorwiegend mit vereinfachten Modellen und anhand der Ergebnisse aus den statischen Berechnungen.

### 7.2 Beurteilung durch den Prüferingenieur

Methodik, Vorgehen

Die Wahl der Baumethode in dieser Projektphase ist verfrüht. Zudem ist sie nicht standortspezifisch. Die Vordimensionierung ist grundsätzlich korrekt. Es ist aber zu vermerken, dass die Aussagekraft der Vordimensionierung mehrheitlich von der Aussagekraft der statischen Berechnungen abhängig ist (siehe dazu die Bemerkungen im Kapitel 6 des vorliegenden Prüfberichts).

Nachvollziehbarkeit

Die Untersuchungen und Schlussfolgerungen der NAGRA sind mehrheitlich nachvollziehbar. Die getroffenen Annahmen sind generell begründet und vorwiegend konservativ (siehe dazu die Bemerkungen im Kapitel 6 des vorliegenden Prüfberichts). Im Arbeitsbericht NAB 16-46, Kap. 2 werden die Fallbeispiele "Felslabor Mont Terri" und "Meuse/Haute-Marne" vorgestellt. Dabei wird auf das Vortriebsverfahren (vorwiegend Schrämkopf respektive Teilschnittmaschine) und auf die Ausbruchsicherung (bis auf einen Fall mit nachgiebigen Elementen mit "klassischer" Ausbruchsicherung mit bewehrtem Spritzbeton und Felsanker oder Stahlbögen) eingegangen. Für das Fallbeispiel "Mont Terri" werden auch die bisherigen Erfahrungen sowie einige Messwerte (Konvergenzen, Porenwasserdrücke) kurz erläutert. Die Motivation respektive die für die NAGRA projektspezifischen Schlussfolgerungen aus diesem Kapitel fehlen. Der Prüferingenieur geht davon aus, dass man damit die Machbarkeit des gewählten Bauverfahrens aufzeigen möchte (die erwähnten Projekte wurden erfolgreich realisiert). Jedoch werden die Tiefenlager deutlich tiefer als die erwähnten Fallbeispiele zu liegen kommen, so dass ein direkter Zusammenhang nicht erkennbar ist respektive die Beweiskraft der Fallbeispiele beschränkt ist.

Vollständigkeit

Die Projektierungsarbeit ist grundsätzlich vollständig. Der Gripper-TBM-Vortrieb wurde von der NAGRA als Referenzverfahren für die Lagerstollen gewählt. Die Demontage nach Vortriebsende ist aber für den Fall eines Blindstollens zu wenig behandelt. Sie ist auch als ein massgebender Zustand anzusehen, insbesondere die Gewährleistung der Stabilität und die Beschränkung der Verformungen der Stollenlaibung im Maschinenbereich (langer Stillstand während der Demontage, beschränkte Interventionsmöglichkeiten). Die Verzweigungsbauwerke (bautechnisch schwierig, insbesondere bei druckhaftem Gebirgsverhalten) wurden nicht betrachtet.

Stufengerechtigkeit

Die Wahl eines Bauverfahrens in der Etappe 2 SGT ist gemäss klassischen Projektierungsabläufen im Tunnelbau verfrüht, also nach Einschätzung des Prüferingenieurs nicht stufengerecht.

## Plausibilität Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vordimensionierung und die Bemessungsgrößen sind (für die getroffenen Annahmen) plausibel. Die Bemessungsgrößen (Lasten) sind nicht nur auf der sicheren Seite, wie beispielsweise im Arbeitsbericht NAB 16-45, Kap. 5.1.7:

- \_ Einerseits werden für die statischen Berechnungen die Gebirgsparameter der Schichtung angenommen (konservativ).
- \_ Andererseits wird eine mögliche Anisotropie der resultierenden Belastung des Ausbaus vernachlässigt (nicht konservativ). Diese Vernachlässigung resultiert aus der grundlegenden Annahme der Rotationssymmetrie (impliziert u.a. isotropes Gebirgsverhalten), welche mehrheitlich für die statischen Berechnungen der NAGRA getroffen wird. Die statischen Berechnungen berücksichtigen somit vorwiegend nur Zustände, bei welchen die Belastungen des Ausbaus homogen und radialgerichtet sind und deshalb nur Normalkräfte im Ausbau hervorrufen (günstig). Die Berücksichtigung von einer nicht homogenen und nicht radial gerichteten Belastung würde zu Biegemomenten im Ausbau führen (ungünstig).
- \_ Eine allfällige Abweichung von der Rotationssymmetrie wird mit einem eher zu knappen Sicherheitsfaktor von 1.35 berücksichtigt (NAB 16-46, Kap. 3.2.1).

## Plausibilität Schlussfolgerungen

Die Angaben und Beurteilungen bezüglich Bauverfahren sind mehrheitlich korrekt. Im Arbeitsbericht NAB 16-41, Kap. 5.4.4.2 wird Folgendes geschrieben: *"Bei Auftreten grosser Konvergenzen (...) lässt sich das Profil nicht im Teilausbruch auffahren und das Profil K09 lässt sich nicht erstellen"*. Die Aussage ist nicht korrekt und führt zu nicht korrekten Schlussfolgerungen. Profile mit einer ähnlichen Abmessungen (110 m<sup>2</sup>) wurden im druckhaften Gebirge bereits realisiert (z.B. Abschnitt Sedrun, Gotthard Basistunnel), jedoch mit einem Kreisprofil und einem nachgiebigen Ausbau.

Die Aussagekraft der Ergebnisse der statischen Berechnungen hängt von den getroffenen Annahmen bei den Gebirgsmodellen und deren Belastbarkeit ab. Dasselbe gilt für die Vordimensionierung.

## Empfehlungen

Für die Etappe 3 SGT wird Folgendes empfohlen:

- \_ Die Wahl des Bauverfahrens soll standortspezifisch erfolgen.
- \_ Die Thematik "Verzweigungsbauwerke" ist vertieft zu analysieren.

## 8. Schlussfolgerung und Beantwortung der Kernfragen

Generelle Beurteilung der Projektierungsarbeit der NAGRA

Die von der NAGRA gelieferte Dokumentation [1] ist umfangreich, grundsätzlich sehr detailliert und zeugt von einer gründlichen Arbeit. Die detailliert dokumentierte Projektierungsarbeit ist stufengerecht (Stufe Machbarkeitsstudie) und teilweise bereits auf Stufe Vorprojekt. Die geprüften Unterlagen der NAGRA werden als konstruktiven Beitrag zur Beurteilung des Indikators "Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit" beurteilt.

Bautechnischen Bedingungen in grösserer Tiefe ungünstiger gemäss NAGRA

Basierend auf den Ergebnissen der Projektierungsarbeit kommt die NAGRA zu der Einschätzung, dass die bautechnischen Bedingungen im Standortgebiet Nördlich Lägern bedingt durch die grössere Tiefenlage im Vergleich zu Zürich Nordost und Jura Ost als weniger günstig zu beurteilen sind. Diese Einschätzung in Kombination mit dem als eher knapp beurteilten nutzbaren Raum für ein Tiefenlager beurteilt die NAGRA als eindeutigen Nachteil des Gebietes Nördlich Lägern, so dass sie die Rückstellung dieses Gebietes vorschlägt.

Prüfingenieur stimmt der Einschätzung des Indikators Tiefenlage nicht zu

Dieser Beurteilung stimmt der Prüfingenieur aus verschiedenen Gründen mit Bezug zum Indikator Tiefenlage nicht zu. Die wesentlichen Gründe für die abweichende Beurteilung sind in den folgenden Unterkapiteln dargelegt.

Ergebnisse der Projektierungsarbeit nicht belastbar

**8.1 Nicht ausreichende Belastbarkeit der Projektierungsgrundlagen**  
 Obwohl die Projektierungsarbeit der NAGRA korrekt und nach dem üblichen Vorgehen im Untertagbau durchgeführt wurde, sind die Ergebnisse dieser Projektierungsarbeit nicht belastbar, da sie auf nicht ausreichend belastbaren Projektierungsgrundlagen basieren. In Abbildung 2 sind die durch die NAGRA grundsätzlich korrekt durchgeführten Projektierungsschritte grau hinterlegt, welche aber auf nicht ausreichend belastbaren Projektierungsgrundlagen basieren

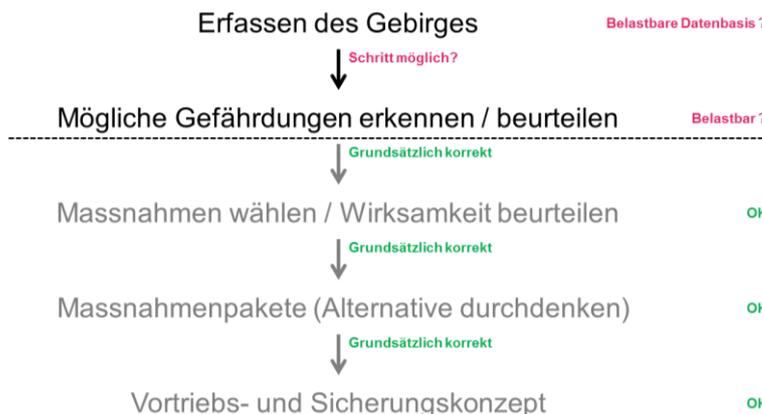


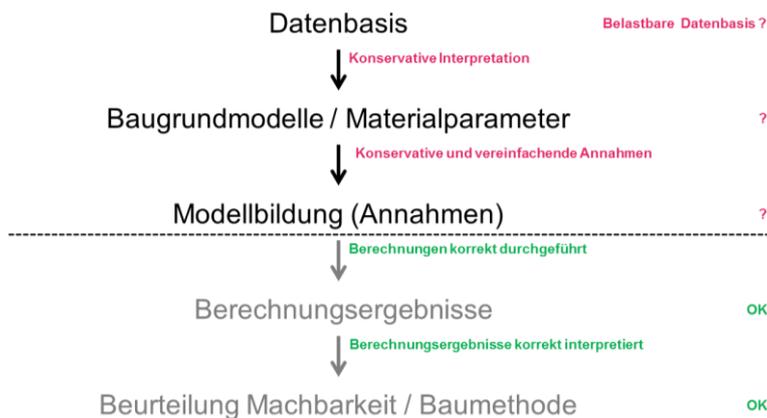
Abbildung 2: Allgemeines Vorgehen für die Projektierung (Entwurf) im Untertagbau

**8.2 Kumulation von konservativen Annahmen**

Die sehr konservative Interpretation der Datenbasis, die mehrheitlich konservativen Modellannahmen und die Vernachlässigung der grossen Bandbreite der geomechanischen Parameter in den statischen Berechnungen führen zu einer Überschätzung des Einflusses der Tiefenlage.

Kumulation von konservativen Annahmen

Generell belastet die Kumulation von konservativen Annahmen die Beurteilung der möglichen Gefährdungsbilder (zweiter Projektierungsschritt in Abbildung 2) zu ungünstig. Der Einfluss der Kumulation von konservativen Annahmen ist noch relevanter in Bezug auf die Aussagekraft von Berechnungsergebnissen und deren Verwendung für die weitere Projektierungsarbeit. Die Belastbarkeit der Ergebnisse wird dadurch stark reduziert und führt so zu einer geringen Aussagekraft von an sich korrekt durchgeführten und korrekt interpretierten Berechnungen – eine Aussagekraft, die bereits durch die nicht ausreichende Belastbarkeit der Datenbasis (Projektierungsgrundlagen) geschwächt ist. In Abbildung 3 sind die durch die NAGRA grundsätzlich korrekt durchgeführten Arbeitsschritte grau hinterlegt, deren Aussagekraft aber aufgrund von vorgelagerten Schwächen im Prozess nicht ausreichend ist.



**Abbildung 3: Allgemeines Vorgehen bei der Durchführung von Berechnungen (Tragwerksanalyse) im Untertagebau**

Die NAGRA erwartet beispielsweise im Standortgebiet Nördlich Lägern schwierige Bedingungen für den Einsatz einer Gripper-TBM bedingt durch druckhaftes Gebirgsverhalten. Basierend auf der Einschätzung der Experten der ETH Zürich und der Dr. von Moos AG zu den geomechanischen Kennwerten und deren Anwendung in analytischen Berechnungsmodellen (siehe dazu Anhang 2) schlussfolgert der Prüflingenieur hingegen, dass sich druckhaftes Gebirgsverhalten nicht im von der NAGRA erwarteten Masse manifestieren wird. Somit sind die durch die NAGRA erwarteten Nachteile für ihr bevorzugtes Bauverfahren nach Ansicht des Prüflingenieurs nicht zu erwarten.

Nachteile basierend auf Projektierungsergebnissen nicht berücksichtigen für Standortvergleich

Die resultierende geringe Aussagekraft der Projektierungsergebnisse führt dazu, dass nachteilige Einschätzungen von Standortgebieten, welche auf der Interpretation von Projektierungsergebnissen beruhen, ebenfalls nicht ausreichend belegt und belastbar sind. Entsprechend identifizierte Nachteile oder Rückschlüsse, zum Beispiel auf mögliche Veränderungen des konturnahen Wirtgesteins, sind daher aus Sicht des

Prüfingenieurs nicht ausreichend belastbar und robust und daher für den Vergleich der Standortgebiete nicht geeignet.

Optimierungsanforderung  
maximale Tiefe nicht belastbar

Als Konsequenz der geringen Aussagekraft der Projektierungsergebnisse kann nach Einschätzung des Prüfingenieurs auch keine Optimierungsanforderung an die maximale Tiefe der Lagerebene für die SMA- und HAA-Lager belastbar und robust begründet werden.

### 8.3 Gebirgseigenschaften

3 Baugrundmodelle beschrieben

Die Eigenschaften des Wirtgesteins (Opalinuston) werden durch die NAGRA für alle Standorte einheitlich mit drei Baugrundmodellen (BGM) beschrieben. Vereinfacht werden "günstige" (BGM 1, Kennwerte GM-max), "von der NAGRA erwartete" (BGM 2, Kennwerte GM-ref) und "ungünstige" (BGM 3, Kennwerte GM-min) Gebirgseigenschaften definiert.

Vorgehen der NAGRA für  
Standortvergleich nicht geeignet

Die Projektierungsarbeit berücksichtigt mehrheitlich nur die ungünstigen Gebirgseigenschaften (BGM 3) und nicht die von der NAGRA erwarteten und von ihr für die Lagerebene als repräsentativ eingestuften Gebirgseigenschaften (BGM 2). Ein solches Vorgehen ist korrekt für den Nachweis der bautechnischen Machbarkeit (Grenzbetrachtung = das Bauwerk muss auch beim Auftreten der schlechtesten Gebirgseigenschaften noch realisierbar sein). Jedoch widerspricht die NAGRA dadurch ihren eigenen Aussage, dass das Baugrundmodell 2 als repräsentativ für die Lagerebene einzustufen ist (NAB 16-45, Kap. 4.2.6).

realistische Gebirgseigenschaften  
für Standortvergleich notwendig

Für einen Standortvergleich ist von einer realistischen Betrachtung der möglichen Gebirgseigenschaften auszugehen. Ansonsten kann ein tiefer liegendes Standortgebiet durch genügend pessimistische Annahmen respektive Interpretation von Grundlagendaten beliebig ausgeschlossen werden. Zur oben erwähnten mehrheitlich alleinigen Betrachtung der ungünstigen Gebirgseigenschaften kommt hinzu, dass selbst die Einschätzung der NAGRA, wonach das Gebirgsmodell GM-ref (respektive BGM 2) den erwarteten Fall darstellt, nicht belastbar ist [11]. Das durch die NAGRA gewählte Vorgehen ist daher nach Ansicht des Prüfingenieurs nicht geeignet als Grundlage für den Vergleich verschiedener Standortgebiete respektive für die Identifikation von eindeutigen Nachteilen eines Standorts.

Bandbreite und Verteilung der  
Gebirgseigenschaften nicht  
berücksichtigt

Die vorhandene Datenbasis der Gebirgseigenschaften liefert keine Informationen zur Häufigkeit des zu erwartenden Auftretens der Parameter innerhalb der prognostizierten Bandbreite. Diese Informationen wären jedoch insbesondere in Bezug auf die ungünstigen Gebirgseigenschaften (BGM 3) aus folgenden Gründen relevant:

- \_ Sind die Eigenschaften des Gebirges nur lokal "ungünstig" stellt sich die Frage, ob diese Bereiche überwindbar sind und, wenn ja, mit welchen Massnahmen (Nachweis der bautechnischen Machbarkeit). Für den Standortvergleich ist aber auch wichtig, wo diese vereinzelt "ungünstigen" Bereiche anzutreffen sind. Wenn sie zum Beispiel am Ende eines Lagerstollens zu finden wären, wäre deren Einfluss nicht entscheidend, da ein Lagerstollen kürzer als geplant sein oder gesamthaft aufgegeben werden könnte.

- \_ Sind die Gebirgseigenschaften mehrheitlich "ungünstig", ist das Vermeiden von "ungünstigen" Bereichen mit einer standortspezifischen Anordnung der unterirdischen Bauwerke kaum möglich, so dass zum Beispiel auch die bautechnisch komplexen Verzweigungsbauwerke in solchen Gebirgsverhältnissen erstellt werden müssten.

Die NAGRA trifft die sehr konservative Annahme, dass die Gebirgseigenschaften im gesamten Lagerperimeter "ungünstig" sind (verwendetes Baugrundmodell 3) und beeinflusst damit massgebend das Resultat des Standortvergleichs respektive die Beurteilung, ob für ein Standortgebiet eindeutige Nachteile aufgrund der Tiefenlage der Lagerebene zu erwarten sind. Diese Annahme ist jedoch weder ausreichend begründet noch ausreichend belastbar und damit aus Sicht des Prüfenieurs nicht angebracht.

#### 8.4 Tragwerksanalysen

Die durchgeführten Tragwerksanalysen sind nicht standortspezifisch. Sie berücksichtigen weder differenzierte Gebirgseigenschaften noch differenzierte Bauverfahren (das Bauverfahren beeinflusst die Art der möglichen Sicherungsmittel und wo diese eingebaut werden können und spielt somit eine wichtige Rolle für die Tragwerksanalyse). In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass eine standortspezifische Tragwerksanalyse sowie Wahl des Bauverfahrens mit der vorhandenen Datenbasis der Gebirgseigenschaften nicht möglich ist.

#### 8.5 Beantwortung der Kernfragen des ENSI

Kernfrage 1

##### **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- und SMA/LMA-Lager in den Standortgebieten dar?**

Im Sinne der Projektierung (Nachweis der bautechnischen Machbarkeit): **Ja**. Die NAGRA hat die Projektierungsarbeit korrekt und nach dem üblichen Vorgehen im Untertagebau durchgeführt. Generell wurde bestätigt, dass die bautechnische Machbarkeit an allen diskutierten Standortgebieten gegeben ist.

Für die Rückstellung eines Standortes respektive für die Erkennung eindeutiger Nachteile aufgrund der Tiefenlage (Vergleich der Standortgebiete): **Nein**. Die Projektierungsgrundlagen sind nicht ausreichend belastbar. Deren Interpretation respektive Verwendung ist auch zu hinterfragen:

- \_ Interpretation (Beispiel): Die Schlussfolgerung der NAGRA, dass das Gebirgsmodell GM-ref repräsentativ ist, ist nicht ausreichend begründet und wird von den Experten der ETH Zürich nicht geteilt [11].
- \_ Verwendung (Beispiel): Es werden mehrheitlich nur die ungünstigen und nicht die von der NAGRA erwarteten und von ihr für die Lagerebene als repräsentativ eingestuft Gebirgseigenschaften (GM-ref) analysiert (NAB 16-45, Kap 4.2.6), was für einen Standortvergleich nicht zielführend ist.

Kernfrage 2

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

Die Argumentation der NAGRA ist vom Vorgehen her nachvollziehbar. Die Schlussfolgerungen mit einer Beschränkung der Lagertiefen gelten aber nur für bestimmte Projektierungsannahmen, welche die NAGRA getroffen hat. In Anbetracht der Einschätzung, dass die Projektierungsgrundlagen und somit die darauf basierenden Projektierungsannahmen der NAGRA als nicht robust zu bezeichnen sind, ist daraus jedoch zu folgern, dass die Beschränkung der Lagertiefen nicht ausreichend begründet und nicht robust argumentiert wurde.

Kernfrage 3

**3. Ist die Argumentation der NAGRA basierend auf dem geplanten Ausbaukonzept für die Versiegelungsstrecken der BE/HAA-Lagerstollen und den bevorzugten Vortriebsmethoden für den Bau eines BE/HAA-Lagerstollens nachvollziehbar? Wären Alternativen zu dem geplanten Ausbaukonzept für die Versiegelungsstrecken der HAA-Lagerstollen bis in einer Tiefe von 900 m u.T. denkbar?**

Die Argumentation der NAGRA ist bedingt durch die in den geprüften Unterlagen nur ansatzweise behandelten Versiegelungsstrecken nicht nachvollziehbar. Ebenfalls ist die Wahl einer Vortriebsmethode verfrüht. Diese sollte im Rahmen des Vorprojekts standortspezifisch erfolgen.

Um eine Beschränkung der Lagertiefe für das BE/HAA-Lager basierend auf dem geplanten Ausbaukonzept zu begründen, bedürfte es im Rahmen des beschriebenen Lagerkonzeptes einer detaillierten Diskussion der Teilaspekte Versiegelung, Verfüllung und möglicher Ausbauvarianten und deren Konsequenzen auf das Gesamtsystem (Tiefenlager und Wirtgestein). In den Unterlagen ist eine solche Diskussion jedoch nicht dokumentiert.

Alternativen zum geplanten Ausbaukonzept für die Versiegelungsstrecken sind denkbar, z.B. durch die Verwendung von bereichsweise demontierbaren Stahlübungen (vergleichbar mit Lösungen zum Vortrieb von Querschlägen aus Hauptröhren mit Tübbingausbau im Tunnelbau) anstelle der Spritzbetonsicherung mit Stahlbögen.

**8.6 Fazit**

Die NAGRA kommt zum Schluss, "dass es insbesondere die grosse Tiefenlage ist, die für das Standortgebiet Nördlich Lägern von Nachteil ist" (NAB 16-41, S. 211). Ein eindeutiger Nachteil aufgrund der Tiefenlage der Lagerebene ist aber nicht ausreichend belastbar und robust belegt. Folgende Gründe lassen nach Einschätzung des Prüflingenieurs diese Schlussfolgerung nicht zu:

- \_ Die nicht ausreichend belastbare felsmechanische Datenbasis;
- \_ Deren zu hinterfragende Interpretation (u.a. die nicht ausreichend begründete Zuweisung von "repräsentativen" Gebirgseigenschaften);

Belegung eines eindeutigen Nachteils bezogen auf die Tiefenlage nicht ausreichend begründet

- \_ Deren zu hinterfragende Anwendung (u.a. die undifferenzierte Betrachtung von generell ungünstigen Gebirgseigenschaften und nicht den von der NAGRA erwarteten und von ihr für die Lagerebene als repräsentativ eingestuft Gebirgseigenschaften);
- \_ Die Kumulation von nicht vollumfänglich begründbaren konservativen Annahmen.



# Anhang 1

---

## Gebirgsmodelle: Geomechanische Parameter

---

- \_ Zusammenstellung der geomechanischen Parameter der von der NAGRA vorgeschlagenen Gebirgsmodelle (GM-max, GM-ref und GM-min)
- \_ Bandbreite und Tiefenabhängigkeit der Festigkeits- und Verformbarkeitsparameter im Bereich 600–900 m

## Festlegung der geomechanischen Parameter:

>> Bandbreite und Tiefenabhängigkeit im Bereich von 600 m bis 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	$v_d$	[-]	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	$\varphi'_{mp}$	[Grad]	20		20		20	
Restfestigkeit, Matrix:								
- Kohäsion	$c'_{mr}$	[MPa]	2.2 - 2.5		2.2 - 2.5		2.2 - 2.5	
- Reibungswinkel	$\varphi'_{mr}$	[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	$\varphi'_{bp}$	[Grad]	20		20		20	
Restfestigkeit, Schichtung								
- Kohäsion	$c'_{br}$	[MPa]	1.7 - 1.9		1.7 - 1.9		1.7 - 1.9	
- Reibungswinkel	$\varphi'_{br}$	[Grad]	20		20		20	
Dilatanzwinkel, Schichtung	$\psi'_b$	[Grad]	0		0		0	

# Anhang 2

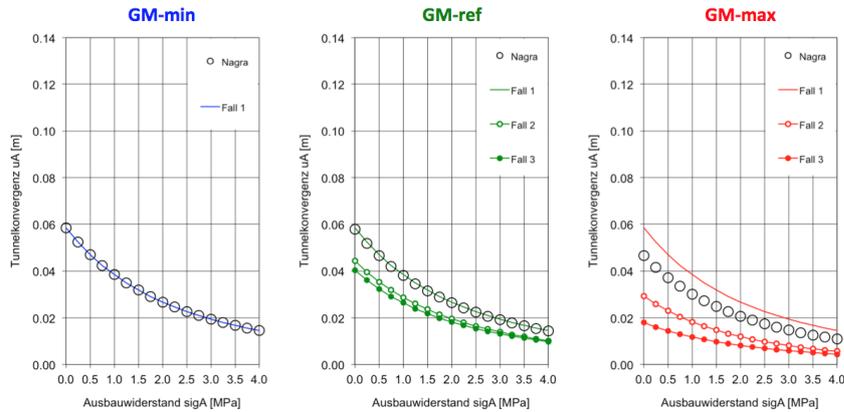
---

## Anwendung der geomechanische Parameter

---

- \_ Einfluss der "pre-peak"- und "post-peak"-Werte des Elastizitätsmoduls auf die Gebirgskennlinie in 600m Tiefe (Annahmen: Rotationssymmetrie, isotropes Materialverhalten, isotrope initiale Spannungen)
- \_ Einfluss der "pre-peak"- und "post-peak"-Werte des Elastizitätsmoduls auf die Gebirgskennlinie in 900m Tiefe (Annahmen: Rotationssymmetrie, isotropes Materialverhalten, isotrope initiale Spannungen)

## Anwendung der geomechanischen Parameter: >> Gebirgskennlinie in 600 m Tiefe unter verschiedenen Voraussetzungen



Totalspannungsanalyse

Initialer Zustand:  
Spannung  $\sigma_0 = 15.2$  MPa

Materialparameter:  
E-Modul E = siehe unten  
Poissonzahl  $\nu = 0.20$   
Kohäsion c = siehe unten  
Reibungswinkel  $\phi = 20^\circ$   
Dilatanzwinkel  $\psi = 0^\circ$

2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.7 / 1.7 ("peak"/"residual")	2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 2.5/1.7 ("peak"/"residual")	2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 5.6/1.7 ("peak"/"residual")
2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)	2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)	2.3 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)
---	3.5/2.3 ("pre-peak"/"post-peak") 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)	7.9/2.3 ("pre-peak"/"post-peak") 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)
---	3.5/3.0 ("pre-peak"/"post-peak" erhöht) 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)	7.9/6.7 ("pre-peak"/"post-peak" erhöht) 1.7 (nur "residual" berücksichtigt)

Nagra:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

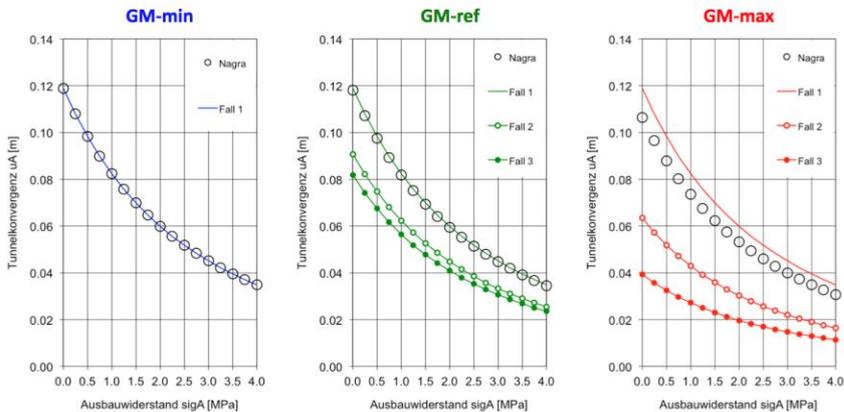
Fall 1:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Fall 2:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Fall 3:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Abbildung 4: Einfluss der "pre-peak"- und "post-peak"-Werte des Elastizitätsmoduls auf die Gebirgskennlinie in 600 m Tiefe (Annahmen: Rotationssymmetrie, isotropes Materialverhalten, isotrope initiale Spannungen).

## Anwendung der geomechanischen Parameter: >> Gebirgskennlinie in 900 m Tiefe unter verschiedenen Voraussetzungen



Totalspannungsanalyse

Initialer Zustand:  
Spannung  $\sigma_0 = 22.9$  MPa

Materialparameter:  
E-Modul E = siehe unten  
Poissonzahl  $\nu = 0.20$   
Kohäsion c = siehe unten  
Reibungswinkel  $\phi = 20^\circ$   
Dilatanzwinkel  $\psi = 0^\circ$

2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.9 / 1.9 ("peak"/"residual")	2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 2.9/1.9 ("peak"/"residual")	2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 5.8/1.9 ("peak"/"residual")
2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)	2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)	2.6 ("post-peak" auch in elast. Zone) 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)
---	4.0/2.6 ("pre-peak"/"post-peak") 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)	8.3/2.6 ("pre-peak"/"post-peak") 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)
---	4.0/3.4 ("pre-peak"/"post-peak" erhöht) 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)	8.3/7.1 ("pre-peak"/"post-peak" erhöht) 1.9 (nur "residual" berücksichtigt)

Nagra:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

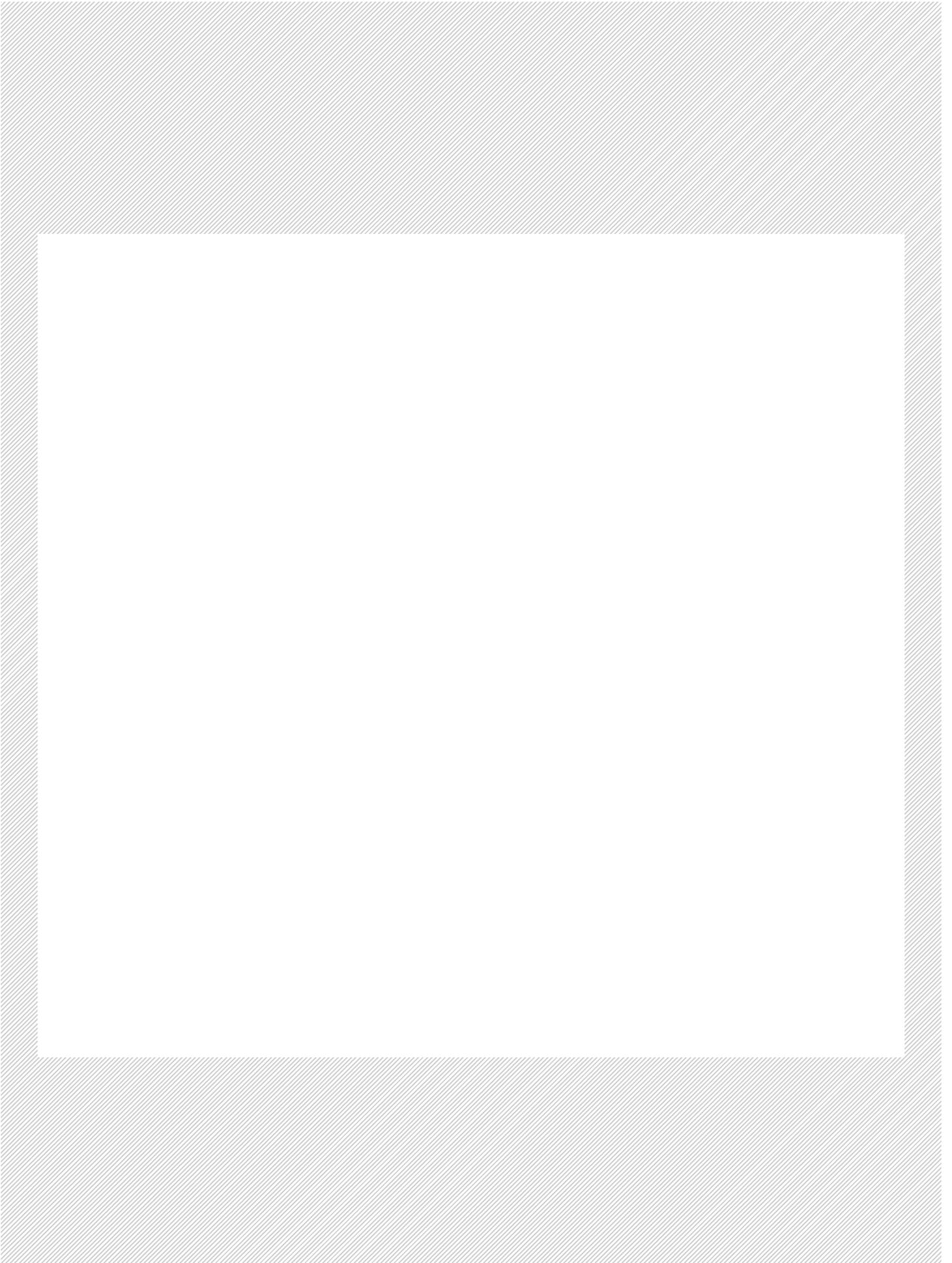
Fall 1:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Fall 2:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Fall 3:  
E-Modul E [GPa]  
Kohäsion c [MPa]

Abbildung 5: Einfluss der "pre-peak"- und "post-peak"-Werte des Elastizitätsmoduls auf die Gebirgskennlinie in 900 m Tiefe (Annahmen: Rotationssymmetrie, isotropes Materialverhalten, isotrope initiale Spannungen).







ENSI 33/530

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)