



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 7

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 7: Projektbasis

Oktober 2023

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 7

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 7: Projektbasis

Oktober 2023

STICHWÖRTER

Bautechnisches Dossier, Projektbasis, Standortvergleich,
Lagerprojekt, Baugrund, Tragwerkskonzept, Referenzbericht,
Rahmenbewilligungsgesuch, RBG

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Zusammenfassung

Mit dem Rahmenbewilligungsgesuch für das geologische Tiefenlager reicht die Nagra einen Bericht zur Begründung der Standortwahl ein. Die Nagra dokumentiert die Lagerprojekte für den dafür durchzuführenden Standortvergleich im «Bautechnischen Dossier Standortvergleich», welches neun Bände umfasst.

Die Projektbasis als Band 7 des Bautechnischen Dossiers dokumentiert die grundlegenden Annahmen für die Tunnelstatik und Tragwerksplanung der Lagerprojekte. Die Detaillierung orientiert sich entsprechend den Vorgaben des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats an einem Vorprojekt.

Der Bau von Stollen, Tunneln und Kavernen in Opalinuston in grosser Tiefe ist wegen den erwarteten druckhaften Verhältnissen anspruchsvoll. Die drei zu beurteilenden Standorte liegen in unterschiedlicher Tiefenlage (z. B. Hauptlager für hochaktive Abfälle JO: 530 m, NL: 920 m und ZNO: 760 m) und es werden damit unterschiedliche Ausprägungen der Druckhaftigkeit erwartet. Aus diesen Gründen wird für den Nachweis der bautechnischen Eignung eine detaillierte Tunnelstatik mit Berücksichtigung des echten Gebirgsdrucks für die Bauwerke im Opalinuston an allen Standorten durchgeführt.

Die Projektbasis beschreibt die erwarteten Baugrundverhältnisse im Opalinuston. Die Beschreibung ist standortspezifisch und umfasst Informationen zu dem Umgang mit Trennflächen und Störungszonen in der Tragwerksplanung, den angesetzten Primärspannungszustand sowie Informationen über das verwendete Stoffgesetz und die geotechnischen Kennwerte des Opalinustons. Die Projektbasis legt zudem die Tragwerkskonzepte inklusive den Bauabläufen und die zu führenden Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit fest.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Zweck des vorliegenden Berichts.....	1
1.2 Geltungsbereich und Abgrenzung	1
2 Nutzung und Nutzungsdauer	5
2.1 Nutzung der Bauwerke	5
2.2 Nutzungsdauer	5
3 Baugrundverhältnisse.....	7
3.1 Geologisch-geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse.....	7
3.2 Primärspannungszustand	8
3.3 Geotechnische Kennwerte des Opalinustons.....	9
3.3.1 Geomechanisches Stoffgesetz	9
3.3.2 Steifigkeit.....	10
3.3.3 Festigkeit	12
3.3.4 Hydraulische Eigenschaften	13
3.3.5 Gebirgstemperatur	13
4 Gefährdungsbilder Tunnelstatik.....	15
5 Tragwerkskonzept	17
5.1 Tragsysteme.....	17
5.2 Tragwerksmodell	17
5.2.1 3D-Kontinuumsmodell HAA.....	19
5.2.2 3D-Kontinuumsmodell SMA.....	20
5.2.3 2D-Kontinuumsmodell Schachtbauwerk.....	20
5.3 Baumaterialien.....	21
5.3.1 Fertigteile.....	21
5.3.2 Ortbeton	21
5.3.3 Spritzbeton.....	22
5.3.4 Betonstahl	23
5.3.5 Baustahl	23
5.3.6 Felsanker.....	23
5.3.7 Ringspaltverfüllung	24
5.4 Bauablauf.....	24
5.4.1 Hauptlager HAA.....	24
5.4.2 Betriebstunnel HAA, Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA	24

5.4.3	Hauptlager SMA.....	25
5.4.4	Betriebstunnel SMA, Lagerkavernenabzweiger, Abladebereich SMA und Übernahmebereich SMA	25
5.4.5	Betriebsschacht, Lüftungsschacht.....	25
6	Einwirkungen	27
6.1	Ständige Einwirkungen.....	27
6.1.1	Eigenlasten.....	27
6.1.2	Auflasten.....	27
6.2	Veränderliche Einwirkungen	27
6.2.1	Verkehrslasten	27
6.2.2	Nutzlasten	27
6.3	Einwirkungen aus dem Baugrund.....	27
6.3.1	Gebirge	27
6.3.1.1	Auflockerungsdruck	27
6.3.1.2	Echter Gebirgsdruck	27
6.3.1.3	Quelldruck	28
6.3.1.4	Wasserdruck	28
6.4	Aussergewöhnliche Einwirkungen	28
6.4.1	Thermische Belastung des Ausbaus des HAA-Lagerstollens.....	29
6.5	Spezifische Einwirkungen	29
7	Nachweis der Machbarkeit und Tragsicherheit	31
7.1	Bemessungssituationen.....	31
7.2	Bestimmung des erforderlichen Überschnitts des TBM-Schildes	31
7.3	Nachweis der Tragsicherheit des Ausbaus	31
7.4	Bestimmung des Mehrausbruchs des nachgiebigen Ausbaus.....	32
8	Gebrauchstauglichkeit	33
8.1	Nutzungszustände / Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	33
8.2	Risse.....	33
8.3	Verformungen.....	33
8.4	Dichtigkeit	33
9	Normbezogene Bestimmungen	35
9.1	Gesetze, Verordnungen, Richtlinien des Bundes.....	35
9.2	Normen, Richtlinien und Empfehlungen von Fachverbänden.....	35
10	Literaturverzeichnis	37
Anhang A	Gesteinsparametersätze für den Opalinuston	A-1

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Angaben zu den Referenzwerten für die Trennflächenabstände für den Opalinuston gemäss den ingenieurgeologischen Berichten.....	7
Tab. 3-2:	Angaben zum Referenzspannungszustand für den Opalinuston gemäss den ingenieurgeologischen Berichten.....	8
Tab. 3-3:	Referenzwerte für die Überdeckung und den sich daraus ergebenden totalen und effektiven Primärspannungszustand und Porenwasserdruck an den einzelnen Standorten.....	9
Tab. 3-4:	Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Jura Ost (JO), Tiefe HAA 530 m, SMA 550 m, Schachtfuss 420 m.....	11
Tab. 3-5:	Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Nördlich Lägern (NL), Tiefe HAA 920 m, SMA 900 m	11
Tab. 3-6:	Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Zürich Nordost (ZNO), Tiefe HAA 760 m, SMA 760 m	12
Tab. 3-7:	Festigkeitsparameter Opalinuston, drainiert (tiefenunabhängig).....	13
Tab. 3-8:	Standortspezifische Gebirgstemperatur gemäss ingenieurgeologischen Berichten.....	13
Tab. 4-1:	In der Tunnelstatik berücksichtigte Gefährdungsbilder.....	15
Tab. 5-1:	Tragsysteme der Bauwerke mit Verweis auf die Nummerierung in Fig. 1-1	17
Tab. 5-2:	Zuordnung der Tragwerksmodelle zu den einzelnen Bauwerken im Opalinuston mit Verweis auf die Nummerierung in Fig. 1-1	18
Tab. 5-3:	Bemessungswerte Ortbeton und Spritzbeton.....	22
Tab. 5-4:	Bemessungswerte B500B nach SIA 262 (2013a).....	23
Tab. 5-5:	Bemessungswerte Baustahl nach SIA 263 (2013c)	23
Tab. 5-6:	Bestimmte Tübbingstärke nach Standorten: Hauptlager HAA.....	24
Tab. 5-7:	Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebstunnel HAA, Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA	24
Tab. 5-8:	Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Hauptlager SMA.....	25
Tab. 5-9:	Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebstunnel SMA, Lagerkavernenabzweiger, Abladebereich SMA und Übernahmebereich SMA	25
Tab. 5-10:	Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebsschacht für NL und ZNO, Lüftungsschacht für JO, NL und ZNO	26
Tab. 6-1:	Standortspezifische Referenzwerte für die Temperatur am Übergang zwischen dem Bentonit und dem Ausbau nach 75 Jahren.....	29
Tab. 7-1:	Lastfallkombination und Lastbeiwerte	31
Tab. A-1:	Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert gemäss Nordas et al. (2023a).....	A-1
Tab. A-2:	Residuale Festigkeitsparameter Opalinuston, drainiert (tiefenunabhängig) gemäss Nordas et al. (2023a).....	A-1

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Darstellung der räumlichen Abgrenzung der Projektbasis des geologischen Tiefenlagers anhand der Systemskizze eines Kombilagers	2
Fig. 2-1:	Graphische Darstellung der geforderten Nutzungsdauer	6
Fig. 5-1:	Modellgrösse des 3D-Kontinuumsmodells HAA im Grundriss	19
Fig. 5-2:	Modellgrösse des 3D-Kontinuumsmodells SMA im Grundriss	20
Fig. 5-3:	Modellgrösse des 2D-Kontinuumsmodells Betriebsschacht im Grundriss.....	21

Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
ELB	Endlagerbehälter
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
gTL	Geologisches Tiefenlager
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
KEG	Kernenergiegesetz
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NTB	Nagra Technischer Bericht
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
TBM	Tunnelbohrmaschine
FDM	Finite Differenzen Methode
OPA	Opalinuston
BTRA	Bautechnische Risikoanalyse

1 Einleitung

1.1 Zweck des vorliegenden Berichts

Die Projektbasis ist Band 7 des neunbändigen Bautechnischen Dossiers für den Standortvergleich. Inhalt, Umfang und Zweck des Bautechnischen Dossiers sind in Band 1, «Projektdefinition und Einführung» (Nagra 2023a), detailliert beschrieben.

Die vorliegende Projektbasis dokumentiert die grundlegenden Annahmen für die Tunnelstatik und Tragwerksplanung der Lagerprojekte.

1.2 Geltungsbereich und Abgrenzung

Wie in einem Vorprojekt üblich werden in der Tragwerksplanung nur die wichtigsten, d.h. aus der Tragwerksplanungsperspektive kritischsten Bauwerke betrachtet. Dies sind angesichts der Tiefenlage die Bauwerke im Opalinuston.

Für alle übrigen untertägigen Bauwerke, im Wesentlichen die Schächte in den Homogenbereichen oberhalb des Opalinustons, wurden, stufengerecht, auf Grundlage von Erfahrungswerten oder einfachen Berechnungen plausible Dimensionen bestimmt, die im technischen Beschrieb (Nagra 2023f) zu finden sind. Auf diese Bauwerke wird hier daher nicht weiter eingegangen. Die räumliche Abgrenzung der Projektbasis ist in Fig. 1-1 dargestellt.

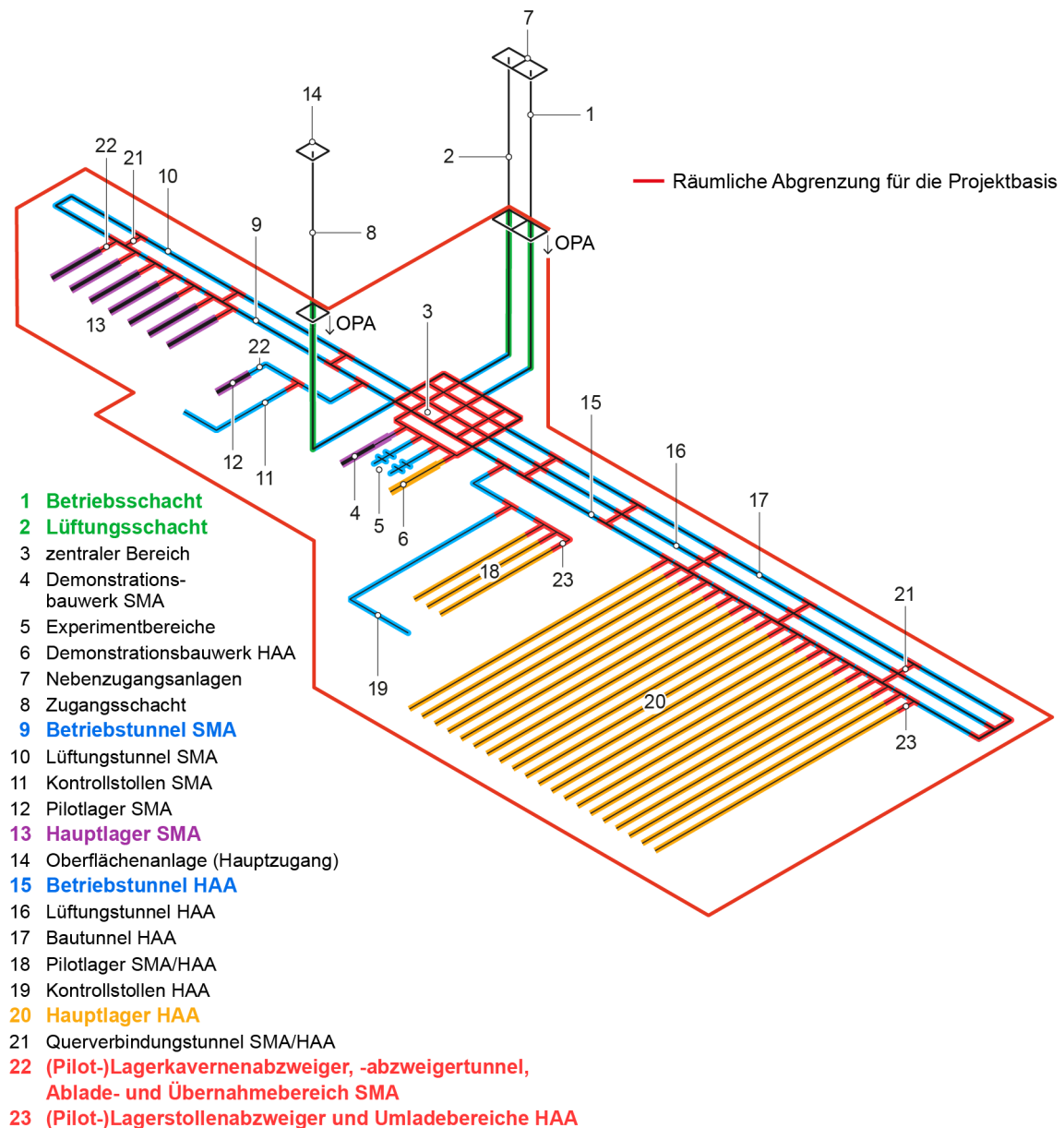


Fig. 1-1: Darstellung der räumlichen Abgrenzung der Projektbasis des geologischen Tiefenlagers anhand der Systemskizze eines Kombilagers

Da sich die Bauwerke auf der Lagerebene hinsichtlich der Geometrie und des Bauverfahrens ähneln, werden in der Tragwerksplanung nur einzelne repräsentative Bauwerke betrachtet, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Lagerstollen des Hauptlagers HAA (Nr. 20 in Fig. 1-1)
- Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA (Nr. 23 in Fig. 1-1)
- Lagerkavernen des Hauptlagers SMA (Nr. 13 in Fig. 1-1)
- Lagerkavernenabzweiger, Abladebereiche SMA und Übernahmebereiche SMA (Nr. 22 in Fig. 1-1)
- Betriebstunnel HAA (Nr. 15 in Fig. 1-1) und SMA (Nr. 9 in Fig. 1-1)

- Betriebsschacht (Nr. 1 in Fig. 1-1)
- Lüftungsschacht (Nr. 2 in Fig. 1-1)

Diese Auswahl umfasst Kreuzungsbauwerke, Tunnel mit grossem Querschnitt, maschinell erstellte Tunnel und Schachtbauwerke. Für alle weiteren Bauwerke auf der Lagerebene werden die Resultate der Tragwerksplanung mit Hilfe von Analogieüberlegungen in Abhängigkeit der Geometrie und des Bauverfahrens für die Vordimensionierung übertragen. In Fig. 1-1 sind die repräsentativen Bauwerke in der Legende farblich hervorgehoben und die ähnlichen Bauwerke in derselben Farbe in der Skizze markiert.

Die Versiegelungsbauwerke werden in der Tragwerksplanung nicht berücksichtigt. Im Rohbau werden keine Massnahmen für den späteren Einbau der Versiegelungsbauwerke getroffen. Die generische Auslegung der Versiegelungsbauwerke ist im Verschlusskonzept (Nagra 2021) zu finden.

Die Projektbasis gilt für alle drei Standorte und alle untersuchten Lagertypen. Die Annahmen und Kenngrössen unterscheiden sich lediglich je nach der standortspezifischen Tiefenlage und sind sonst standortunabhängig bzw. für alle Standorte gleich. Wo Unterschiede bestehen, werden standortspezifische Angaben gemacht.

2 Nutzung und Nutzungsdauer

2.1 Nutzung der Bauwerke

Die Funktionen der Bauwerke und die Nutzungsanforderungen sind in der Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) zu finden.

Unabhängig von der Nutzung gelten in der jetzigen Projektphase für alle betrachteten Bauwerke die gleichen Anforderungen bezüglich Nachweisführung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit während der Nutzungsdauer.

Ein Spezialfall stellen die Lagerstollen des Hauptlagers HAA dar. Gemäss Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) ist zusätzlich zum Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit während der Nutzungsdauer ein Nachweis zu erbringen, dass die Tragsicherheit mit einem Sicherheitsfaktor ≥ 1.0 für eine allfällige Rückholung bis zum Gesamtverschluss gewährleistet ist.

2.2 Nutzungsdauer

Die Nutzungsdauer wird in der Nutzungsvereinbarung hergeleitet und dort für die einzelnen Bauwerke angegeben. Die Nutzungsdauer wird in der Tragwerksplanung für die Bestimmung der Einwirkung durch den zeitabhängigen echten Gebirgsdruck verwendet. In Fig. 2-1 sind die Nutzungsdauern für die Untertagbauwerke graphisch dargestellt.

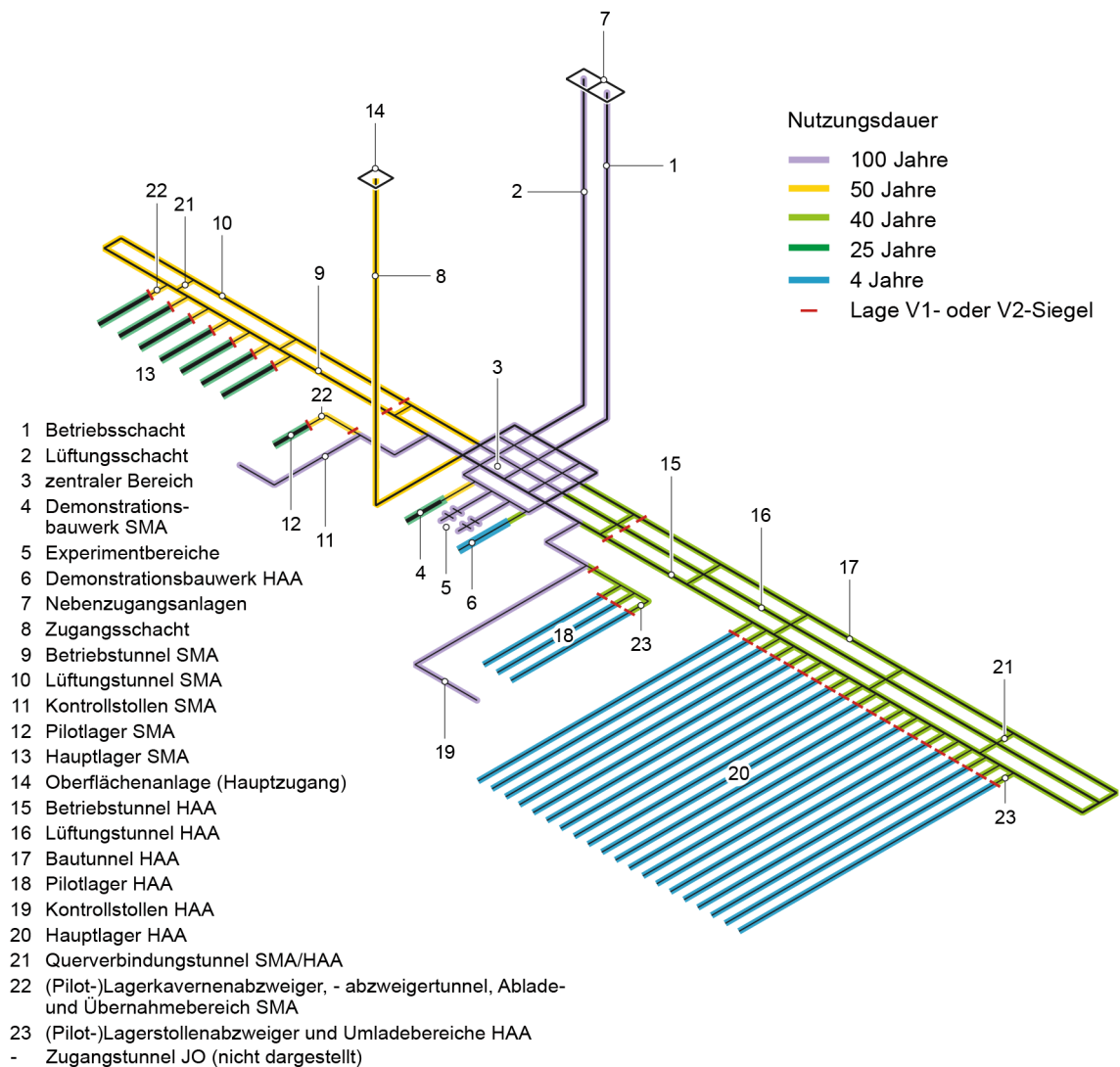


Fig. 2-1: Graphische Darstellung der geforderten Nutzungsdauer
Aus der Nutzungsvereinbarung Nagra (2023e)

3 Baugrundverhältnisse

3.1 Geologisch-geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse

Die detaillierte Beschreibung der Geologie und der Hydrogeologie ist den standortspezifischen ingenieurgeologischen Berichten (Nagra 2023b, Nagra 2023c, Nagra 2023d) zu entnehmen. Wie im Kap. 1.2 festgelegt, beschränken sich Tragwerksplanung und Projektbasis auf die Bauwerke im Opalinuston.

Intaktes Gebirge

Der Opalinuston besteht gemäss den ingenieurgeologischen Berichten (Nagra 2023b, Nagra 2023c, Nagra 2023d) mehrheitlich aus dünn geschichteten, siltigen und sandigen Tonsteinen. Im Bereich der Schachtanlagen weist der Opalinuston standortübergreifend eine Mächtigkeit von 100 bis 110 m auf. Die Schichtung des Opalinustons verläuft gegenüber den Bauwerken horizontal bis subhorizontal. Für die Tragwerksplanung wird sie vereinfacht als horizontal angenommen.

Trennflächensysteme

Gemäss den ingenieurgeologischen Berichten sind an allen drei Standorten drei Trennflächensysteme mit den in Tab. 3-1 angegebenen Trennflächenabständen vorhanden. Aufgrund der im Verhältnis zu den Bauwerksdurchmessern grossen Trennflächenabstände werden diese Trennflächensysteme in der Tragwerksplanung nicht berücksichtigt.

Tab. 3-1: Angaben zu den Referenzwerten für die Trennflächenabstände für den Opalinuston gemäss den ingenieurgeologischen Berichten

Nagra (2023c) Nagra (2023d) Nagra (2023b)

Beschreibung	Einheit	JO	NL	ZNO
Trennflächenabstände (K1/K2/K3)	m	3.5	10.0	16.5

Störungszonen

Auf der Basis der seismischen Erkundung sind gemäss den ingenieurgeologischen Berichten (Nagra 2023b, Nagra 2023c, Nagra 2023d) in der Formation des Opalinustons im Bereich der Lager keine Störungszonen kartiert worden. Es können jedoch vereinzelt seismisch nicht kartierbare Störungszonen vorkommen. Diese Störungszonen entsprechen in ihrer Ausprägung dem in den ingenieurgeologischen Berichten beschriebenen Typ II. Die Störungszonen sind mehrere Meter mächtig und weisen einen Trennflächenabstand im Dezimeterbereich auf. Da in diesen Störungszonen kein zerrütteter, stark entfestigter Kern vorhanden ist und die Mächtigkeit der Störungszone im Vergleich zu den Bauwerksabmessungen gering ist, werden in der Tragwerksplanung für Störungszonen dieselben Gebirgsparameter wie für das intakte Gebirge angenommen. Auf die erhöhte Trennflächendichte wird mit einer Erhöhung der Intensität der Sicherung begegnet, genauere Angaben dazu sind im technischen Beschrieb (Nagra 2023f) zu finden. Das Antreffen von Störungszonen des Typs III und IV ist unwahrscheinlich bis sehr unwahrscheinlich. Der bautechnische Umgang mit solchen Störungen ist in der bautechnischen Risikoanalyse (BTRA; Nagra 2023h) beschrieben.

3.2 Primärspannungszustand

Der standortabhängige Referenzspannungszustand für den Opalinuston ist in Tab. 3-2 zusammengefasst.

Tab. 3-2: Angaben zum Referenzspannungszustand für den Opalinuston gemäss den ingenieurgeologischen Berichten

Nagra (2023c) Nagra (2023d) Nagra (2023b)

Parameter	Einheit	JO		NL		ZNO	
Referenztiefe	m	450		850		635	
Vertikale Hauptspannung	MPa	11.0		20.4		15.6	
Perzentil	-	P0.25	P0.75	P0.25	P0.75	P0.25	P0.75
Verhältnis der minimalen horizontalen Hauptspannung zur vertikalen Hauptspannung	MPa	0.77	0.82	0.77	0.82	0.77	0.82
Verhältnis der maximalen horizontalen Hauptspannung zur vertikalen Hauptspannung	MPa	0.81	0.95	0.81	0.95	0.81	0.95

Die Mittelwerte der gesättigten Dichte (ρ) und des gesättigten Raumgewichts (γ) des Opalinustons betragen:

$$\rho = 2.54 \text{ g/cm}^3 \text{ und } \gamma = 24.9 \text{ kN/m}^3$$

Für die Berechnung des Primärspannungszustandes wurde vereinfacht von einem Raumgewicht von 25 kN/m^3 ausgegangen. Aufgrund der grossen Tiefenlage gegenüber den Querschnittsgrössen sind die mit der Tiefe zunehmenden Primärspannungen im Tunnelnahfeld vernachlässigbar.

Für die Tragwerksplanung wird für alle Standorte vereinfacht ein isotroper, homogener Spannungszustand angenommen. Dies ist darin begründet, dass der Spannungszustand für alle Standorte im oder knapp über dem erwarteten Bereich liegt und wegen der grossen Tiefenlagen die Anisotropie des Spannungszustands von geringer Bedeutung ist.

In Tab. 3-3 sind die für die Tragwerksplanung verwendeten standortspezifischen Referenzwerte für die Überdeckung der Hauptlager und der Schachtfüsse und die sich daraus ergebenden Primärspannungen und Porenwasserdrücke aufgelistet.

Tab. 3-3: Referenzwerte für die Überdeckung und den sich daraus ergebenden totalen und effektiven Primärspannungszustand und Porenwasserdruck an den einzelnen Standorten

	Überdeckung [m]	Totale Primärspannung [MPa]	Porenwasser- druck [MPa]	Effektive Primärspannung [MPa]
Jura Ost (JO)				
Hauptlager HAA	530	13.3	5.3	8.0
Hauptlager SMA	550	13.8	5.5	8.3
Schachtfuss	420	10.5	4.2	6.3
Nördlich Lägern (NL)				
Hauptlager HAA	920	23.0	9.2	13.8
Hauptlager SMA	900	22.5	9.0	13.5
Schachtfuss	840	21.0	8.4	12.6
Zürich Nordost (ZNO)				
Hauptlager HAA	760	19.0	7.6	11.4
Hauptlager SMA	760	19.0	7.6	11.4
Schachtfuss	620	15.5	6.2	9.3

3.3 Geotechnische Kennwerte des Opalinustons

Die geotechnischen Kennwerte werden auf der Basis von felsmechanischen Laborversuchen, die in Crisci E. et al. (2023) dokumentiert sind, bestimmt.

Die Ergebnisse der Tiefbohrkampagne und der felsmechanischen Laborversuche zeigen ein sehr homogenes Bild des Opalinustons an allen Standorten und in allen Tiefenlagen. Es ist keine relevante Variation der Gebirgsfestigkeiten mit der Tiefe bzw. zwischen den Standorten zu erkennen. Aus diesem Grund können die Nachweise der Bauverfahren und des Ausbaus der Untertagebauwerke auf Lagerebene für alle Standorte und Tiefenlagen mit denselben Gebirgsfestigkeitswerten durchgeführt werden. Die Laborversuche zeigen jedoch eine Spannungs- bzw. Tiefenabhängigkeit der Steifigkeit, sodass mit einem tiefenabhängigen E-Modul gerechnet wird.

Aufgrund des signifikanten Einflusses des Porenwassers auf das zeitabhängige geomechanische Gebirgsverhalten wird für die Tragwerksplanung ein transientes hydraulisch-mechanisch gekoppeltes Berechnungsmodell verwendet. In Kapitel 3.3.1 wird das für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens verwendete Stoffgesetz beschrieben. Die Annahmen für die Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften werden in Kapitel 3.3.4 erläutert.

3.3.1 Geomechanisches Stoffgesetz

Der Opalinuston zeigt folgendes experimentelles Verhalten: ein leicht nicht-lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten, eine Steifigkeitsanisotropie, eine Festigkeitsanisotropie mit einer geringeren Festigkeit bei einem Versagen entlang der Schichtung als in der Matrix, eine spröde Entfestigung in der Matrix und entlang der Schichtung sowie eine mässige Abhängigkeit der Steifigkeit vom Seitendruck.

Für die bautechnische Anwendung wird ein anisotropes linear elastisch perfekt plastisches Stoffgesetz verwendet, welches mit den Ergebnissen der Laborversuche kalibriert wurde. Weitere Angaben zu dem Stoffgesetz und der Kalibrierung der Parametersätze¹ sind in Nordas et al. (2023a) finden. Die Kalibrierung basiert auf Daten aus einem ausführlichen Labortestprogramm an gesättigten Proben, das im Rahmen der Tiefbohrkampagne durchgeführt wurde. Weitere Angaben dazu sind in Crisci E. et al. (2023) zu finden. Für die tunnelstatischen Nachweise wird das in ITASCA FLAC3D implementierte Stoffgesetz «Anisotropic Elasticity Ubiquitous Joint Model» gemäss Itasca Consultants verwendet. Die Steifigkeitsanisotropie wird durch zwei unterschiedliche Elastizitätsmodule orthogonal und parallel zur Schichtung dargestellt. Die Festigkeitsanisotropie wird berücksichtigt, indem zwischen einem durch die Gesteinsmatrix und einem durch die Schichtung bedingten Versagen unterschieden wird. Eine Entfestigung wird nicht berücksichtigt. Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass für die vorherrschenden Bedingungen und Parameter das Gebirgsverhalten genügend gut mit einem ideal plastischen Verhalten mit Berücksichtigung der Restfestigkeiten abgebildet werden kann (Cantieni et al. 2023 und Madaschi et al. 2023). Die Abhängigkeit der Steifigkeit vom Gebirgsdruck wird berücksichtigt, indem der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der In-situ-Spannung bestimmt wird.

Für das gewählte Stoffgesetz wurden drei Parametersätze (Maximalwerte, Mittelwerte, Minimalwerte) bestimmt, die die Bandbreite des Gesteinsverhaltens abbilden. Im Anhang A sind die Werte für die drei Parametersätze zu finden. Für die tunnelstatischen Berechnungen werden die Mittelwerte der Kalibrierung verwendet. Minimal- und Maximalwerte können lokal in der Opalinuston-Formation in geringmächtiger Ausdehnung vorkommen. Im Massstab der Querschnitte der Bauwerke sind diese jedoch nicht massgebend für das Gebirgsverhalten. Wegen der kleinräumigen Schichtabfolge in der Formation des Opalinustons stellen die Mittelwerte der Gesteinsparameter eine plausible Annahme für die Referenzwerte der Gebirgsparameter dar.

3.3.2 Steifigkeit

Das verwendete Stoffgesetz sieht für den Elastizitätsmodul senkrecht zur Schichtung E_0 und den Elastizitätsmodul parallel zur Schichtung E_p keine Spannungsabhängigkeit der Steifigkeit vor. Die Steifigkeit wird als Anfangswert abhängig von der effektiven Primärspannung mit folgender Gleichung gemäss Nordas et al. (2023a) berechnet:

$$E_0 = 2100 + 180 * \sigma'_r [MPa].$$

Für die radiale effektive Spannung σ'_r wird dabei die kleinste effektive horizontale Primärspannung $\sigma'_{h,min}$ eingesetzt. Dadurch ergibt sich eine von der Tiefe abhängige Steifigkeit senkrecht zur Schichtung des Opalinustons. Der Elastizitätsmodul parallel zur Schichtung E_p wird gemäss Nordas et al. (2023a) mit dem Faktor

$$N = \frac{E_p}{E_0} = 3.0$$

linear an den Elastizitätsmodul senkrecht zur Schichtung E_0 gekoppelt. Die sich daraus ergebenden standortspezifischen Steifigkeitswerte sind in Tab. 3-4, Tab. 3-5 und Tab. 3-6 angegeben.

¹ Die angegebenen Modellparameter unterscheiden sich von den in den ingenieurgeologischen Berichten aufgeführten experimentell bestimmten Parametern (z. B. Steifigkeit). Dies liegt daran, dass die Kalibrierung bereits anwendungsspezifische Kalibrierungsregeln berücksichtigt.

Tab. 3-4: Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Jura Ost (JO), Tiefe HAA 530 m, SMA 550 m, Schachtfuss 420 m

Gemäss Nordas et al. (2023a)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Hauptlager		Schacht
			HAA	SMA	
E-Modul senkrecht zur Schichtung	E_0	MPa	3'531	3'585	3'234
E-Modul parallel zur Schichtung	E_p	MPa	10'593	10'755	9'702
Querdehnung parallel zur Schichtung	ν_{pp}	-	0.15	0.15	0.15
Querdehnung senkrecht zur Schichtung	ν_{0p}	-	0.10	0.10	0.10
Schubmodul parallel zur Schichtrichtung	G	MPa	1'605	1'630	1'470

Tab. 3-5: Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Nördlich Lägern (NL), Tiefe HAA 920 m, SMA 900 m

Gemäss Nordas et al. (2023a)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Hauptlager		Schacht
			HAA	SMA	
E-Modul senkrecht zur Schichtung	E_0	MPa	4'584	4'530	4'368
E-Modul parallel zur Schichtung	E_p	MPa	13'752	13'590	13'104
Querdehnung parallel zur Schichtung	ν_{pp}	-	0.15	0.15	0.15
Querdehnung senkrecht zur Schichtung	ν_{0p}	-	0.10	0.10	0.10
Schubmodul parallel zur Schichtrichtung	G	MPa	2'084	2'059	1'985

Tab. 3-6: Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert, Standort Zürich Nordost (ZNO), Tiefe HAA 760 m, SMA 760 m

Gemäss Nordas et al. (2023a)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Hauptlager		Schacht
			HAA	SMA	
E-Modul senkrecht zur Schichtung	E_0	MPa	4'152	4'152	3'774
E-Modul parallel zur Schichtung	E_p	MPa	12'456	12'456	11'322
Querdehnung parallel zur Schichtung	ν_{pp}	-	0.15	0.15	0.15
Querdehnung senkrecht zur Schichtung	ν_{0p}	-	0.10	0.10	0.10
Schubmodul parallel zur Schichtrichtung	G	MPa	1'887	1'887	1'715

3.3.3 Festigkeit

Die Festigkeitsparameter der Matrix und der Schichtung des Opalinustons sind in Tab. 3-7 gemäss den Mittelwerten und der Restfestigkeit in Nordas et al. (2023a) zusammengestellt.

Das verwendete Stoffgesetz kann keine Entfestigung berücksichtigen. In den Berechnungen werden daher die Werte für die Restfestigkeit verwendet. Untersuchungen haben gezeigt, dass für die projektspezifischen Randbedingungen und Parameter das Gebirgsverhalten für die Tragwerksplanung gut mit dem hier verwendeten, linear elastischen perfekt plastischen Stoffgesetz mit Berücksichtigung der Restfestigkeiten modelliert werden kann (z. B. Madaschi et al. 2023, Cantieni et al. 2023 und Nordas et al. 2023b).

Tab. 3-7: Festigkeitsparameter Opalinuston, drainiert (tiefenunabhängig)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Wert
Kohäsion	c	MPa	1.0
Reibungswinkel	φ	MPa	27.5
Druckfestigkeit	σ_D	MPa	3.2
Dilatanz	ψ	°	4
Kohäsion für die Bettung	c_b	MPa	1.0
Reibungswinkel für die Bettung	φ_b	°	21.5
Druckfestigkeit für die Bettung	σ_{Db}	MPa	1.5
Dilatanz für die Bettung	ψ_b	°	2

3.3.4 Hydraulische Eigenschaften

Die hydraulische Durchlässigkeit k wird isotrop für alle Standorte mit $k = 1\text{E-}13$ m/s gemäss den Mittelwerten aus den ingenieurgeologischen Berichten (Nagra 2023b, Nagra 2023c, Nagra 2023d) angesetzt. Die Porosität n wird gemäss den Mittelwerten der ingenieurgeologischen Berichte für alle Standorte mit $n = 0.11$ angesetzt.

Es wurde mit effektiven Spannungen und einem sogenannten «suction cut-off», welches keine negativen Porenwasserdrücke zulässt, gerechnet. Damit wird berücksichtigt, dass sich beim Vortrieb im Gebirge Risse bilden, die dazu führen, dass sich das Gebirge im Tunnelnahfeld entsättigt (siehe z. B. Boldini & Graziani 2012). Die Annahme des «suction cut-off» stellt eine konservative Annahme für das Kurzzeitverhalten dar. Für längere Betrachtungszeiträume ist sie nicht-konservativ und soll daher in späteren Tragwerksplanungen detaillierter betrachtet werden (siehe dazu z. B. Morosoli et al. 2023).

3.3.5 Gebirgstemperatur

In der Tabelle sind die Referenzwerte für die Gebirgstemperatur auf der Lagerebene gemäss den ingenieurgeologischen Berichten (Nagra 2023b, Nagra 2023c, Nagra 2023d) für alle Standorte angegeben.

Tab. 3-8: Standortspezifische Gebirgstemperatur gemäss ingenieurgeologischen Berichten

Beschreibung	Einheit	JO	NL	ZNO
Gebirgstemperatur	°C	35	48	40

4 Gefährdungsbilder Tunnelstatik

Um die standortspezifischen Lagerprojekte zu entwickeln, wurde eine umfassende Gefährdungsbildanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse im technischen Beschrieb (Nagra 2023f) dokumentiert sind. Hier werden davon nur die Gefährdungsbilder wiedergegeben, die in der Tunnelstatik berücksichtigt werden. In Tab. 4-1 sind die zu berücksichtigenden Gefährdungsbilder und die notwendigen Massnahmen aufgelistet.

Tab. 4-1: In der Tunnelstatik berücksichtigte Gefährdungsbilder

Gefährdungsbild	Beschreibung	Betroffene Bauwerke	Massnahmen
Unzulässige Verformungen oder Überbeanspruchung des Ausbaus aufgrund des druckhaften Gebirges	Der ausgebrochene Querschnitt verengt sich innerhalb von Tagen bis Jahren. Dadurch entstehen unzulässige Verformungen. Bei Behinderung der Verformungen bildet sich ein echter Gebirgsdruck, der zu einem Versagen des Ausbaus führen kann. Hohe Porendruckgradienten verstärken die Gefährdung.	Alle	Trag- und Gebrauchstauglichkeit des Ausbaus, Bestimmung des erforderlichen Mehrausbruchs für den nachgiebigen Ausbau (vgl. Kap. 7.4)
Verklemmen des Schildes und des Bohrkopfs der Tunnelbohrmaschine (TBM) infolge druckhaften Gebirges	Eine rasche Verengung des Ringspalts im Bereich des Schildes oder des Bohrkopfs kann zu einem Verklemmen der TBM während des Vortriebs oder während eines längeren Stillstands führen.	HAA-Lagerstollen	Bestimmung erforderlicher Überschnitt TBM-Schild (vgl. Kap. 7.2)
Unzulässige Sohlhebungen oder Überbeanspruchung des Ausbaus infolge quellfähigen Gebirges	Durch die quellbedingte Volumenzunahme kommt es zu Sohlhebungen (ohne Sohlgewölbe). Bei einer Behinderung der Volumenzunahme bildet sich ein Quelldruck, der zu einer Überbeanspruchung des Ausbaus führen kann.	Alle	Sohlgewölbe, Vermeidung von Wasser, Trag- und Gebrauchstauglichkeit des Ausbaus
Unzulässige Verformungen oder Überbeanspruchung des Ausbaus infolge thermischer Beanspruchung	Die Wärmeabgabe der Endlagerbehälter (ELB) führt zu einer zusätzlichen thermischen Beanspruchung des Ausbaus im Zeitraum der Rückholung.	HAA-Lagerstollen	Trag- und Gebrauchstauglichkeit des Ausbaus

5 Tragwerkskonzept

5.1 Tragsysteme

In Tab. 5-1 sind die Tragsysteme für alle Bauwerke, die sich im Opalinuston befinden, aufgelistet.

Tab. 5-1: Tragsysteme der Bauwerke mit Verweis auf die Nummerierung in Fig. 1-1

Tragsystem	Bauwerk
Einschaliger Ausbau Bau- und Betriebszustand: kreisrundes Profil mit starrem Ausbau	Lagerstollen des Hauptlagers HAA (Nr. 20), des Pilotlagers HAA (Nr. 18) und des Demonstrationsbauwerks HAA (Nr. 6)
Zweischaliger Ausbau Bauzustand: Gewölbe/Sohle mit nachgiebigem Ausbau Betriebszustand: Gewölbe/Sohle mit starrem Ausbau	Lagerkaverne des Hauptlagers SMA (Nr. 13), Pilotlager SMA (Nr. 12), Demonstrationsbauwerk SMA (Nr. 4), (Pilot-)Lagerstollenabzweiger HAA (Nr. 23), (Pilot-)Lagerkavernenabzweiger SMA (Nr. 22), (Pilot-)Abladebereich SMA (Nr. 22), (Pilot-)Übernahmebereich SMA (Nr. 22), zentraler Bereich (Nr. 3), Experimentbereiche (Nr. 5), Betriebstunnel HAA (Nr. 15)/SMA (Nr. 9), Bautunnel HAA (Nr. 17), Lüftungstunnel HAA (Nr. 16)/SMA (Nr. 10), Kontrollstollen HAA (Nr. 19)/SMA (Nr. 11), Zugangsschacht (Nr. 8), Lüftungsschacht (Nr. 2), Betriebschacht (Nr. 1), Zugangstunnel

5.2 Tragwerksmodell

Für die Bemessung auf den echten Gebirgsdruck werden zwei 3D-Kontinuumsmodelle, welche alle repräsentativen Bauwerke mit Ausnahme der Schächte abbilden, und ein 2D-Kontinuumsmodell für die zwei Schachtbauwerke in der FDM-Software Flac3D und Flac2D (Itasca Consultants) erstellt. Die Bemessung der weiteren Bauwerke im Opalinuston wird mittels Analogieschlüssen durchgeführt. In Tab. 5-2 sind die Tragwerksmodelle und die zugehörigen Bauwerke aufgelistet. Detailliertere Angaben zu den Modellen und dem Vorgehen bei den Analogieschlüssen sind in der Tunnelstatik (Nagra 2023g) zu finden.

Tab. 5-2: Zuordnung der Tragwerksmodelle zu den einzelnen Bauwerken im Opalinuston mit Verweis auf die Nummerierung in Fig. 1-1

Tragwerksmodell	Bauwerk
3D-Kontinuumsmodell HAA	Lagerstollen des Hauptlagers HAA (Nr. 20), Lagerstollen des Pilotlagers HAA (Nr. 18), Betriebstunnel HAA (Nr. 15), (Pilot-)Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA (Nr. 23)
3D-Kontinuumsmodell SMA	Lagerkavernen des Hauptlagers SMA (Nr. 13), Lagerkavernen des Pilotlagers SMA (Nr. 12), Betriebstunnel SMA (Nr. 9), (Pilot-)Lagerkavernenabzweiger, -abzweigertunnel, Ablade- und Übernahmebereich SMA (Nr. 22)
2D-Kontinuumsmodell des Schachtbauwerks	Betriebsschacht (Nr. 1), Lüftungsschacht (Nr. 2)
Analogieschlüsse von dem 3D-Kontinuumsmodell SMA	Lüftungstunnel SMA (Nr. 10), Querverbindungstunnel SMA (Nr. 21), Kontrollstollen SMA (Nr. 11), Demonstrationsbauwerke SMA (Nr. 4), Zugangstunnel
Analogieschlüsse von dem 3D-Kontinuumsmodell HAA	Bautunnel (Nr. 17), Lüftungstunnel HAA (Nr. 16), Querverbindungstunnel HAA (Nr. 21), Kontrollstollen HAA (Nr. 19), Demonstrationsbauwerke HAA (Nr. 6), Experimentbereich (Nr. 5), Zentraler Bereich (Nr. 3)
Analogieschlüsse von dem 2D-Kontinuumsmodell des Schachtbauwerks	Zugangsschacht (Nr. 8)

5.2.1 3D-Kontinuumsmodell HAA

Um die gegenseitige Beeinflussung der parallelen HAA-Lagerstollen und der Abzweiger zu berücksichtigen, werden zwei benachbarte HAA-Lagerstollen, die Umladebereiche HAA, die Lagerstollenabzweiger HAA und der Betriebstunnel HAA im Modell abgebildet (siehe Fig. 5-1).

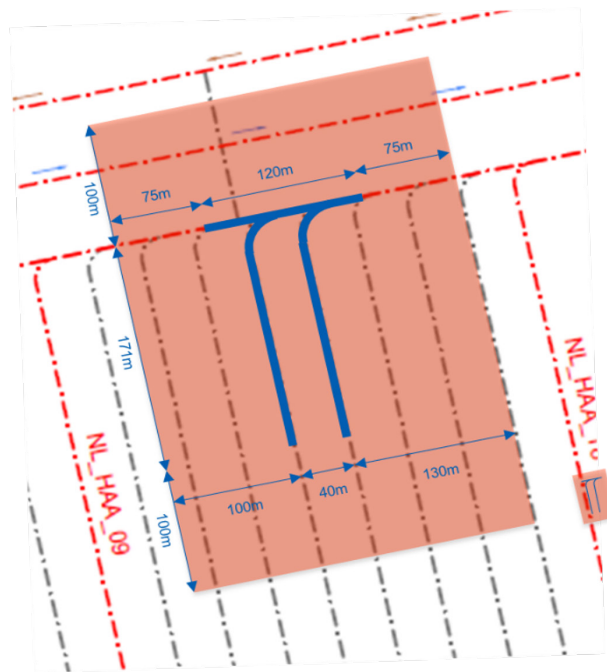


Fig. 5-1: Modellgrösse des 3D-Kontinuumsmodells HAA im Grundriss

Orange: modellierter Opalinuston, blau: modellierte Bauwerke; das Modell ist in der Mitte des Opalinustons angeordnet.

5.2.2 3D-Kontinuumsmodell SMA

Um die gegenseitige Beeinflussung der parallelen SMA-Lagerkavernen und der Abzweiger zu berücksichtigen, werden zwei benachbarte Lagerkavernen, die Lagerkavernenabzweiger, die Umladebereiche SMA und der Betriebsstollen SMA im Modell abgebildet (siehe Fig. 5-2).

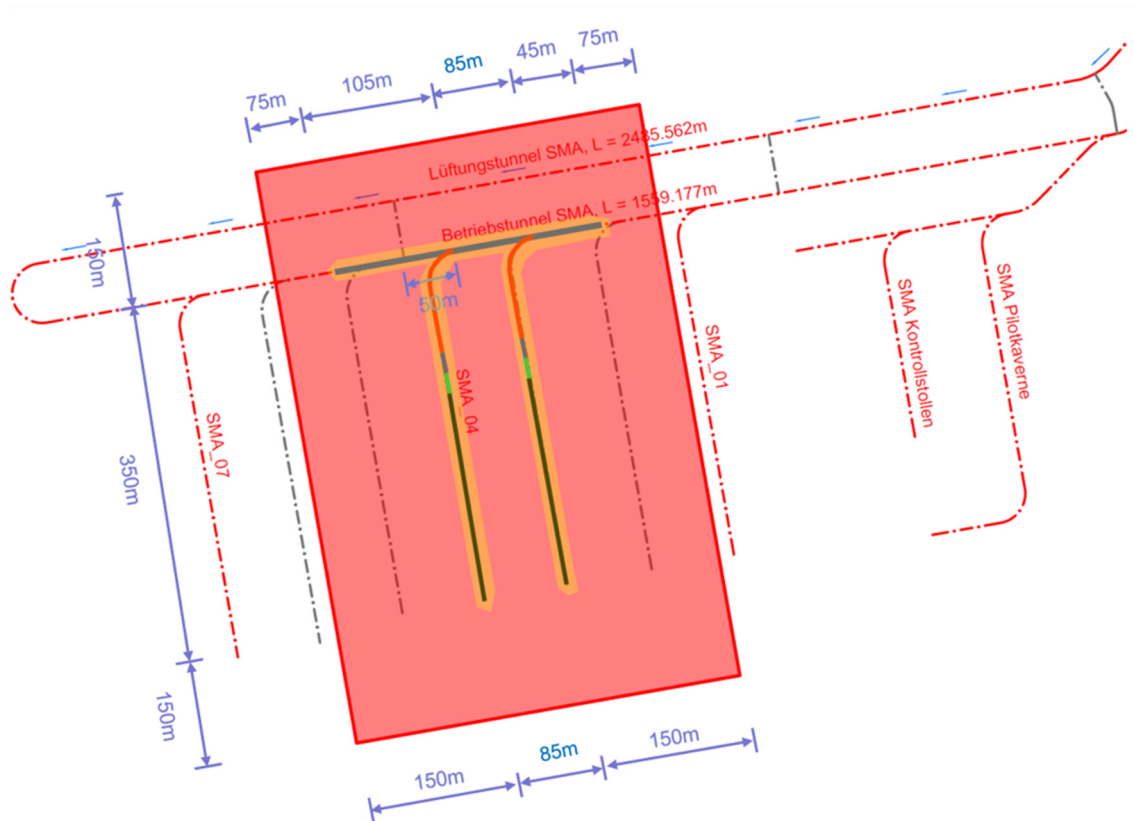


Fig. 5-2: Modellgrösse des 3D-Kontinuumsmodells SMA im Grundriss

Rot: modellierter Opalinuston, gelb: modellierte Bauwerke; das Modell ist in der Mitte des Opalinustons angeordnet.

5.2.3 2D-Kontinuumsmodell Schachtbauwerk

Im 2D-Kontinuumsmodell werden das Schachtbauwerk und der umgebende Opalinuston abgebildet (siehe Fig. 5-3).

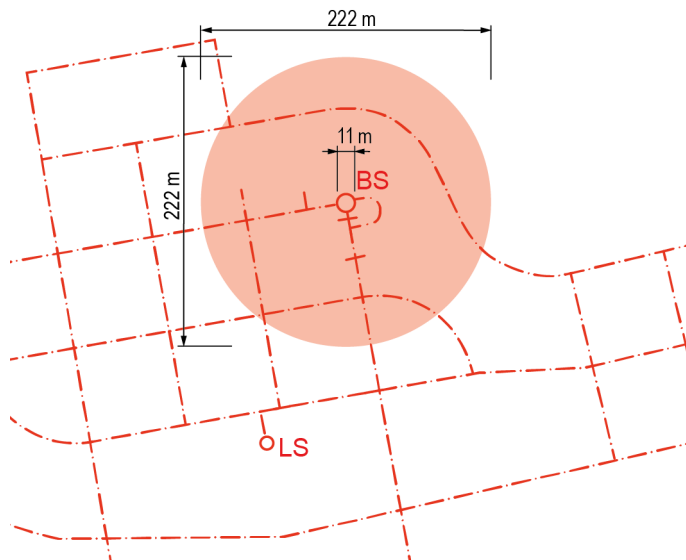


Fig. 5-3: Modellgrösse des 2D-Kontinuumsmodells Betriebsschacht im Grundriss
(rot: modellierter Opalinuston)

Das Berechnungsmodell für die Schachtbauwerke unterscheidet sich von den anderen Berechnungsmodellen hinsichtlich der Orientierung der Schichtung. Die Orientierung verläuft senkrecht zum Tunnelquerschnitt und es gelten die Matrixparameter und die standortspezifischen Steifigkeitsparameter parallel zur Schichtung. Für die Standorte NL und ZNO wurden in den Berechnungen der Durchmesser des Betriebsschachts und der des Lüftungsschachts angesetzt. Da es am Standort JO keinen Betriebsschacht gibt, wird dort ausschliesslich eine Berechnung mit dem Durchmesser des Lüftungsschachts durchgeführt.

5.3 Baumaterialien

5.3.1 Fertigteile

Tübbinge HAA-Lagerstollen: C60/75

Die Betoneigenschaften der Tübbinge auf Bemessungsniveau gemäss SIA 262 (2013a) sind in Tab. 5-3 dokumentiert.

5.3.2 Ort beton

Innenschale (zweischaliger Ausbau): C30/37

Sohle Betriebstunnel: C40/50

Die Ortbetoneigenschaften auf Bemessungsniveau gemäss SIA 262 (2013a) sind in Tab. 5-3 dokumentiert.

Für das vorliegende Projekt wird aufgrund der langfristigen Prozesse (Gebirgsdruck infolge Porenwasserkonsolidation) bei der Bestimmung der Bemessungswerte des Betons der allgemeine Fall gemäss SIA 262 (2013a), Ziffer 4.2.1.3 angenommen, sodass als Umrechnungsfaktor für Betonfestigkeiten zur Berücksichtigung von Einwirkungsdauer und Betonalter $\eta_t = 1.0$ gilt.

5.3.3 Spritzbeton

Innenschale:

- SC 4 (SIA 198 (2004)) mit Stahlfasern
- C30/37 (SIA 262 (2013a))

Ausbruchsicherung:

- SC 2 (SIA 198 (2004)) erste 5 cm als Kopfschutz mit Stahlfasern, weitere 10 bis 20 cm ein bis zwei Abschläge zurückversetzt
- C25/30 (SIA 262 (2013a))

Tab. 5-3: Bemessungswerte Ortbeton und Spritzbeton

Nach SIA 262 (2013a) und SIA 198 (2004)

	Festigkeitsklassen		C25/30	C30/37	C40/50	C60/75
	Spritzbetonklasse		SC 2	SC 4	-	
Parameter	Symbol	Einheit	Werte			
Dichte	ρ_c	kg/m ³	2'500	2'500	2'500	2'500
E-Modul mit Beiwert $k_E = 10'000$	E_{cm}	GPa	32.1	33.6	36.3	40.8
E-Modul mit Partialfaktor $\gamma_{cE} = 1.0$	E_{cd}	GPa	32.1	33.6	36.3	40.8
Querdehnungszahl	ν_c	-	0.2	0.2	0.2	0.2
Bemessungswert Schubspannungsgrenze	τ_{cd}	MPa	1.0	1.1	1.25	1.55
Charakteristischer Wert Zylinderdruckfestigkeit	f_{ck}	MPa	25	30	40	60
Charakteristischer Wert Würfeldruckfestigkeit	$f_{ck,cube}$	MPa	30	37	50	75
Bemessungswert Betondruckfestigkeit	f_{cd}	MPa	16.5	20.0	24	31.6
Mittelwert der Betonzugfestigkeit	f_{ctm}	MPa	2.6	2.9	3.5	4.4

5.3.4 Betonstahl

Bemessungswerte des Betonstahls sind in Tab. 5-4 aufgeführt.

Tab. 5-4: Bemessungswerte B500B nach SIA 262 (2013a)

Betonstahl	Duktilitätsklasse	Fliessgrenze f_{sk}	Fliessgrenze d-Niveau f_{sd}	E-Modul E_s
Einheit	-	MPa	MPa	GPa
B500B	B	500	435	210

5.3.5 Baustahl

Bemessungswerte des Baustahls sind in Tab. 5-5 aufgeführt.

Tab. 5-5: Bemessungswerte Baustahl nach SIA 263 (2013c)

Baustahl	Schubgrenze τ_{yk}	Fliessgrenze f_{yk}	Fliessgrenze d-Niveau f_{yd}	E-Modul E_s
Einheit	MPa	MPa	MPa	GPa
S235	135	235	224	210
S355	155	355	338	210

Nachgiebige Ausbruchsicherung

Die nachgiebige Ausbruchsicherung wird gemäss dem technischen Beschrieb (Nagra 2023f) durch den Einsatz von Stahlbögen mit Gleitschlössern und einer geschlitzten Spritzbetonschale ausgeführt. In der SMA-Kaverne werden die Stahlbögen in dem Berechnungsmodell unter Verwendung der folgenden Parameter als Strukturelemente abgebildet:

- Typ TH 36 verbunden mit Laschen (Gleitschlösser)
- Stahlgüte S355
- Querschnittfläche: $A_s = 45.7 \text{ cm}^2$
- Reibungswert pro Lasche = 300 kN
- Widerstand nachgiebiger Ausbau $N_{\text{yield,d}} = 600 \text{ kN}$ (2 Laschen zu 300 kN pro Stahlbogen im Abstand von 1 m)

Bei den anderen Bauwerken wird die nachgiebige Ausbruchsicherung nicht explizit modelliert, sondern durch einen verzögerten Einbau der Verkleidung abgebildet.

5.3.6 Felsanker

Anker werden im Tragwerksmodell in der gegenwärtigen Projektphase nicht abgebildet. Bei hohen Primärspannungen ist der Einfluss der Anker auf den Ausbauwiderstand vernachlässigbar.

5.3.7 Ringspaltverfüllung

Die Eigenschaften der Ringspaltverfüllung und deren zeitliche Entwicklung werden in den 3D-Kontinuumsmodellen wie folgt berücksichtigt:

- Dicke des Ringspaltes $d = 0.15\text{ m}$
- E-Modul Injektionsgut nach 0.5 Tagen $E_{\text{Hinterfüllung},0.5} = 6'750\text{ Mpa}$
- E-Modul Injektionsgut nach 28 Tagen $E_{\text{Hinterfüllung},28} = 13'500\text{ MPa}$

5.4 Bauablauf

Bauablauf und Schalenstärken sind in der Tunnelstatik iterativ bestimmt worden. Der endgültige Bauablauf ist detailliert im technischen Beschrieb (Nagra 2023f) beschrieben. An dieser Stelle werden die in den Kontinuumsmodellen abgebildeten Bauabläufe und Schalenstärken beschrieben.

5.4.1 Hauptlager HAA

Der Ausbruch der Lagerstollen erfolgt mittels einer Schild-TBM im Vollausbuch. Der Schild wird nicht modelliert. Die Tübbinge werden 7 m hinter der Ortsbrust aktiviert. Die Schildlänge entspricht somit 7 m. Der Ringspalt zwischen Tübbing und Gebirge wird mit Injektionen vollständig vermörtelt. Die standortspezifische Tübbingstärke ist Tab. 5-6 zu entnehmen.

Tab. 5-6: Bestimmte Tübbingstärke nach Standorten: Hauptlager HAA

Bauwerk	JO	NL	ZNO
Hauptlager HAA (Lagerstollen)	25 cm	40 cm	35 cm

5.4.2 Betriebstunnel HAA, Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA

Der Ausbruch erfolgt in Abschlügen von 3 m im Vollausbuch. Nach dem Einbau der nachgiebigen Ausbruchsicherung folgt eine zwölfmonatige Konsolidierungsphase. Anschliessend wird die Verkleidung eingebaut. Die standortspezifische Stärke der Verkleidung im Betriebstunnel HAA, Lagerstollenabzweiger und Umladebereich HAA kann der Tab. 5-7 entnommen werden.

Tab. 5-7: Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebstunnel HAA, Lagerstollenabzweiger und Umladebereiche HAA

Bauwerk	JO	NL	ZNO
Betriebstunnel HAA	35 cm	50 cm	45 cm
Lagerstollenabzweiger	35 cm	50 cm	45 cm
Umladebereiche HAA	35 cm	50 cm	45 cm

5.4.3 Hauptlager SMA

Die Lagerkavernen werden im Sprengvortrieb aufgeföhren und mit einer nachgiebigen Ausbruchsicherung gesichert. Der Vortrieb erfolgt in Abschlügen von 2 m im Vollausbuch. In einem Abstand von 1 m hinter der Ortsbrust erfolgt der Einbau der nachgiebigen Ausbruchsicherung (Kap. 5.3.5). Anschliessend wird eine viermonatige Konsolidierungsphase berücksichtigt, nach welcher die Verkleidung eingebaut wird. Die standortspezifische Stärke der Verkleidung in der Lagerkaverne kann Tab. 5-8 entnommen werden.

Tab. 5-8: Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Hauptlager SMA

Bauwerk	JO	NL	ZNO
Hauptlager SMA (Lagerkavernen)	40 cm	40 cm	40 cm

5.4.4 Betriebstunnel SMA, Lagerkavernenabzweiger, Abladebereich SMA und Übernahmebereich SMA

Der Ausbruch erfolgt in Abschlügen von 3 m im Vollausbuch. Nach dem Einbau der nachgiebigen Ausbruchsicherung folgt eine kurze Konsolidationsphase. Anschliessend wird die Verkleidung eingebaut. Die standortspezifische Stärke der Verkleidung des Betriebstunnels SMA, der Lagerkavernenabzweiger, der Ablade- und Übernahmebereiche kann der Tab. 5-9 entnommen werden.

Tab. 5-9: Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebstunnel SMA, Lagerkavernenabzweiger, Abladebereich SMA und Übernahmebereich SMA

Bauwerk	JO	NL	ZNO
Betriebstunnel SMA	35 cm	50 cm	45 cm
Lagerkavernenabzweiger	35 cm	50 cm	45 cm
Abladebereiche SMA	35 cm	50 cm	45 cm
Übernahmebereiche SMA	35 cm	50 cm	45 cm

5.4.5 Betriebsschacht, Lüftungsschacht

Der Betriebsschacht und der Lüftungsschacht werden im Opalinuston im Sprengvortrieb abgeteuft und mit einer nachgiebigen Ausbruchsicherung gesichert. Der Ausbruch erfolgt im Vollausbuch. Die nachgiebige Ausbruchsicherung wird berücksichtigt, indem die kurzzeitige Entlastung auf den Ausbauwiderstand des nachgiebigen Ausbaus reduziert wird. Es wird keine Konsolidationsphase berücksichtigt, sondern nach dem kompletten Abteufen direkt die Verkleidung eingebaut. Die standortspezifische Stärke der Verkleidung im Betriebsschacht und im Lüftungsschacht im Opalinuston kann der Tab. 5-10 entnommen werden.

Tab. 5-10: Schalenstärke der Verkleidung nach Standorten: Betriebsschacht für NL und ZNO, Lüftungsschacht für JO, NL und ZNO

Bauwerk	JO	NL	ZNO
Betriebsschacht	-	120 cm	100 cm
Lüftungsschacht	40 cm	80 cm	65 cm

6 Einwirkungen

6.1 Ständige Einwirkungen

6.1.1 Eigenlasten

Die Eigenlasten der Baumaterialien (Stahlbeton, Beton, Baustahl) werden als nicht massgebend für die Bemessung der Bauteile betrachtet und nicht berücksichtigt. Die Eigenlast des Gebirges wird gemäss den Werten im Kap. 3.1 und einem der Tiefenlage entsprechenden Überlagerungsdruck berücksichtigt.

6.1.2 Auflasten

Auflasten aus Belag, Schüttungen, Kieskoffer, Abdichtungen werden in der gegenwärtigen Projektphase als nicht massgebend für die Bemessung der Bauteile betrachtet und vernachlässigt.

6.2 Veränderliche Einwirkungen

6.2.1 Verkehrslasten

Die Verkehrslasten sind aufgrund der massiven Bauteilabmessungen der Sohle, die dem technischen Beschrieb (Nagra 2023f) entnommen werden können, nicht massgebend und werden nicht berücksichtigt.

6.2.2 Nutzlasten

Für die Bemessung des Tunnelrohbaus sind Nutzlasten nicht massgebend und werden nicht berücksichtigt.

6.3 Einwirkungen aus dem Baugrund

6.3.1 Gebirge

6.3.1.1 Auflockerungsdruck

Der Auflockerungsdruck wird in der gegenwärtigen Projektphase nicht berücksichtigt, da der echte Gebirgsdruck für die Bemessung als massgebend angesehen wird.

6.3.1.2 Echter Gebirgsdruck

Die Einwirkung durch den echten Gebirgsdruck wird mittels 3D-Kontinuumsmodellen (vgl. Kap. 5.2) abgebildet. Die Grösse des Gebirgsdrucks wird dabei nicht explizit vorgegeben, sondern stellt sich aufgrund der Gleichgewichtsbedingungen und der zugelassenen Verformungen ein.

6.3.1.3 Quelldruck

Der Quelldruck wird bei der Bemessung des Ausbaus nicht explizit, wie im Verkehrstunnelbau üblich, als Lastfall durch eine Ersatzlast im Sohlbereich berücksichtigt.

Für ein Quellen der Sohle beim Tunnelbau im quellfähigen Gebirge muss nebst der Spannungsänderung durch den Vortrieb auch Wasser im Sohlbereich zur Verfügung stehen. Bei Bau und Betrieb des gTLs ist der Eintrag von Wasser in die Bauwerke auf der Lagerebene gemäss der Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) zu verhindern. Entsprechende Massnahmen wie eine Vollabdichtung des Gebirges oberhalb des Opalinustons vor dem weiteren Abteufen der Schächte sowie Vortriebsarbeiten im Opalinuston ohne Wasser sind vorgesehen. Lokale wasserführende, geologische Strukturen, die Wasser aus dem umliegenden Gebirge in den Hohlraum leiten können, können ausgeschlossen werden. Die Randbedingungen der Lagerprojekte sind somit nicht vergleichbar mit denen vieler Verkehrstunnelprojekte, so dass die Annahme einer asymmetrischen Belastung des Ausbaus infolge Quellens nicht sinnvoll ist.

Das mit dem Konsolidationsprozess verbundene allseitige Zusickern von Wasser durch den Opalinuston in Richtung des geschaffenen Hohlraums kann zu einem Quellen des Gebirges führen. Die daraus resultierende Belastung des Ausbaus beschränkt sich jedoch nicht auf den Sohlbereich, sondern wirkt allseitig auf den Ausbau. Das im Rahmen der Tunnelstatik verwendete Berechnungsmodell (siehe Kapitel 5.2) berücksichtigt die vortriebsbedingten Spannungsänderungen und die Sickerströmung infolge des Abbaus der Porenwasserüber- und -unterdrücke. Die daraus resultierenden Gebirgsdrücke können bis zu 20 MPa innerhalb von 100 Jahren betragen und sind damit mindestens eine Grössenordnung höher als die zu erwartenden Quelldrücke.

Im Fall, dass es während des Baus wider Erwarten und trotz der genannten Massnahmen zu einem Eintrag von Wasser auf der Lagerebene kommt, werden Sohlhebungen durch die nachgiebige Ausbruchssicherung zugelassen. Durch die zugelassenen Verformungen reduziert sich der Bemessungsquelldruck für den Ausbau stark. Allfällige unzulässige Sohlhebungen müssten bei Bedarf vor dem Einbau des Ausbaus reprofiliert werden. Die für das Quellen im Tunnelbau charakteristische Anisotropie der Verformungen muss wegen der anisotropen mechanischen Eigenschaften des Opalinustons ohnehin in der konstruktiven Ausbildung der nachgiebigen Ausbruchssicherung berücksichtigt werden.

6.3.1.4 Wasserdruck

Die Porenwasserdrücke im Opalinuston werden in der Berechnung des echten Gebirgsdrucks nach dem Prinzip der effektiven Spannungen berücksichtigt. Die Ausbruchssicherung und die Verkleidung im Opalinuston sind durchlässiger als der Opalinuston. Es wirkt dadurch auf keinen von beiden ein Wasserdruck.

6.4 Aussergewöhnliche Einwirkungen

Aussergewöhnliche Einwirkungen werden gemäss Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) in der aktuellen Phase in der Tragwerksplanung nicht berücksichtigt, sondern konstruktive Massnahmen vorgesehen oder entsprechende Risiken akzeptiert:

Erdbeben: Erschütterungen sind durch die Auslegung der Untertagbauwerke auf den Überlagerungsdruck abgedeckt und gelten daher als akzeptiertes Risiko.

Brand: Bei den untersuchten Bauwerken wird eine Beschädigung des Bauwerks durch Brand zugelassen (keine statische Brandbemessung, siehe Kap. 7.1).

Auf eine Bemessung auf Fahrzeuganprall und Explosion wird in dieser Projektphase aufgrund der vergleichsweisen geringen Kräfte verzichtet (Nagra 2023e Kap. 6.7).

6.4.1 Thermische Belastung des Ausbaus des HAA-Lagerstollens

Gemäss der Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) muss im Lagerstollen des Hauptlagers HAA die Tragsicherheit im Zeitraum einer allfälligen Rückholung für eine Zeitspanne von 75 Jahren mit einem Sicherheitsfaktor grösser 1.0 nachgewiesen werden. Während dieser Zeit führt die Wärmeabgabe der Endlagerbehälter zu einer thermischen Beanspruchung des Ausbaus. Diese Einwirkung ist zusätzlich zur Einwirkung durch das druckhafte Gebirge im Tragsicherheitsnachweis zu berücksichtigen.

In Tab. 6-1 sind die standortspezifischen Werte für die Temperatur nach 75 Jahren am Übergang zwischen Bentonit und Ausbau gemäss Modellierungen nach Papafotiou et al. (2016) angegeben.

Tab. 6-1: Standortspezifische Referenzwerte für die Temperatur am Übergang zwischen dem Bentonit und dem Ausbau nach 75 Jahren

Beschreibung	Einheit	JO	NL	ZNO
Temperatur am Übergang zwischen Ausbau und Bentonit (75 Jahre)	°C	87	110	95
Gebirgstemperatur	°C	35	48	40
Temperaturgradient	°C	52	62	55

Die Beanspruchung des Ausbaus durch die thermische Einwirkung wird über einen analytischen Ansatz berechnet. Dabei wird berücksichtigt, dass der Ausbau im Gebirge elastisch gebettet ist. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Beton beträgt $1 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$.

6.5 Spezifische Einwirkungen

In dieser Projektphase werden keine spezifischen Einwirkungen (wie örtliche Einzellasten) oder zusätzliche Lasten auf die Tübbinge, wie die Vorschubkraft der TBM oder Einwirkungen durch das Handling, berücksichtigt.

7 Nachweis der Machbarkeit und Tragsicherheit

7.1 Bemessungssituationen

Gemäss Kap. 4 werden folgende Bemessungssituationen berücksichtigt:

- Bestimmung des erforderlichen Überschnitts des TBM-Schildes (Kap. 7.2)
- Bemessung des Ausbaus auf den echten Gebirgsdruck (Kap. 7.3)
- Bestimmung des erforderlichen Mehrausbruchs für die nachgiebige Ausbruchsicherung (Kap. 7.4)

Die Tragsicherheit der Ausbruchsicherung wird in der aktuellen Projektphase nicht betrachtet.

7.2 Bestimmung des erforderlichen Überschnitts des TBM-Schildes

Die Bestimmung des erforderlichen Überschnitts des TBM-Schildes erfolgt auf charakteristischem Niveau. Der Schild wird nicht explizit modelliert und die Bestimmung erfolgt unter den Annahmen, dass kein Kontakt zwischen dem Gebirge und dem Schild bestehen darf und kein längerer Stillstand vorkommt.

7.3 Nachweis der Tragsicherheit des Ausbaus

Der Nachweis der Tragsicherheit entspricht dem Grenzzustand der Tragsicherheit gemäss SIA 260 (2013b). Der Nachweis erfolgt gemäss der Lastkombination in Tab. 7-1.

Die Berechnung der Auswirkungen mit den numerischen Modellen erfolgt mit den charakteristischen Werten. Eine Berücksichtigung von Partialfaktoren auf die Baugrundkennwerte könnte bei den Tunnelanalysen zu günstigeren Auswirkungen führen und wird deshalb verworfen. Die Auswirkungen (Schnittkräfte in der Tragstruktur) werden jedoch, wie im Untertagbau üblich, mit einem Partialfaktor $\gamma_M = 1.35$ erhöht.

Tab. 7-1: Lastfallkombination und Lastbeiwerte

Einwirkungen/Gefährdungsbilder	Lastbeiwert
Ständige Einwirkungen	
• Eigenlasten	1.0
• Auflasten	1.0
Veränderliche Einwirkung	
• im Allgemeinen	1.0
Einwirkungen aus dem Baugrund	
• Auflockerungsdruck	0
• echter Gebirgsdruck	1.0
• Quelldruck	0 ²

² Wie in Kapitel 6.3.1.3 begründet, wird das Quellen indirekt in den Modellierungen berücksichtigt.

Für die Lagerstollen des Hauptlagers HAA ist die Tragsicherheit des Ausbaus nach 75 Jahren mit einem Sicherheitsfaktor ≥ 1.0 nachzuweisen.

7.4 Bestimmung des Mehrausbruchs des nachgiebigen Ausbaus

Die Bestimmung des Mehrausbruchs des nachgiebigen Ausbaus erfolgt auf charakteristischem Niveau. Hierfür wird für die entsprechenden Bauwerke die Differenz zwischen den Maximalwerten der vertikalen Verformungen in Firste und Sohle an der Ortsbrust und vor dem Einbau der Verkleidung bestimmt.

Für alle Bauwerke auf der Lagerebene, die konventionell ausgebrochen werden, wird, mit Ausnahme der Lagerkavernen des Hauptlagers SMA die Verformung nach dem Ausbruch und vor den Einbau der Verkleidung vereinfacht am ungestützten Querschnitt bestimmt. Bei der Lagerkaverne SMA wird die Verformung des durch den TH-Stahlbogen gestützten Ausbruchs nach dem Ausbruch und vor dem Einbau der Verkleidung berücksichtigt.

Für die Schachtbauwerke wird die Verformung nach dem Ausbruch und vor dem Einbau des starren Ausbaus bestimmt, dabei wird die Stützung durch die TH-Stahlbögen mittels eines Innendrucks berücksichtigt.

8 Gebrauchstauglichkeit

8.1 Nutzungszustände / Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit

Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit wird nach SIA 260 (2013b) durchgeführt. Der Nachweis erfolgt gemäss der Lastkombination in Tab. 7-1 auf charakteristischem Niveau. Die Lastfälle Schwinden und Kriechen werden in der aktuellen Projektphase nicht berücksichtigt.

8.2 Risse

Die Spannungsnachweise erfolgen gem. SIA 262 (2013a) Ziffer 4.4.2, unter Ansatz einer Spannungsbegrenzung zur Begrenzung der Rissweiten.

8.3 Verformungen

Die Gebrauchstauglichkeit ist durch den gemäss Kap. 7.4 bestimmten Mehrausbruch und den nachträglichen Einbau einer Innenschale gewährleistet.

8.4 Dichtigkeit

Die Anforderungen an die Dichtigkeitsklasse richten sich nach SIA 198 (2004), Ziffer 8.6.2.3:

- Elektrozentrale: Dichtigkeitsklasse 1
- alle anderen Untertagbauwerke: Dichtigkeitsklasse 2

Aufgrund des dichten Wirtgesteins sind für alle Bauwerke im Opalinuston die obigen Anforderungen an die Dichtigkeitsklasse erfüllt. Für die Bauwerke auf Lagerebene sind somit gemäss der Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) keine baulichen Massnahmen zur Erfüllung der Dichtigkeitsanforderungen erforderlich.

9 Normbezogene Bestimmungen

9.1 Gesetze, Verordnungen, Richtlinien des Bundes

Grundsätzlich sind die aktuellen Gesetze und Verordnungen des Bundes sowie die unten aufgeführten Vorgaben, soweit sie damit nicht im Widerspruch stehen, anzuwenden. Abweichungen davon sind in der Nutzungsvereinbarung (Nagra 2023e) erwähnt und in der vorliegenden Projektbasis definiert.

9.2 Normen, Richtlinien und Empfehlungen von Fachverbänden

Es gelten die aktuell (Stand 1.1.2023) gültigen Normen, Richtlinien und Empfehlungen von Fachverbänden.

Nachfolgend sind die ausgewählten Normen des Untertagbaus und des Betonbaus sowie weitere relevante Vorgaben des Untertagbaus aufgeführt.

ENSI G03 B	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen G03/d, Ausgabe 2020
SIA 197	Projektierung Tunnel – Grundlagen, Ausgabe 2004
SIA 198	Untertagbau Ausführung, Ausgabe 2004
SIA 260	Grundlagen der Projektierung von Tragwerken, Ausgabe 2013
SIA 262	Betonbau, Ausgabe 2013
SIA 262/1	Betonbau – Ergänzende Festlegungen, Ausgabe 2019
SIA 263	Stahlbau, Ausgabe 2013

10 Literaturverzeichnis

- Boldini, D. & Graziani, A. (2012): Remarks on axisymmetric modelling of deep tunnels in argillaceous formations. II: Fissured argillites. *Tunnelling and Underground Space Technology* 28, 80-89.
- Cantieni, L., Nordas, A., Morosoli, D. & Anagnostou, G. (2023): On the short-term response of Opalinus Clay to tunnelling. *In: Proceedings of the 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium. 15th ISRM Congress 2023 & 72nd Geomechanics Colloquium.*
- Crisci E., Giger S. B., Laloui L., Ferrari A., Ewy R., Stankovic R., Stenebråten J., Halvorsen K. & Soldal M. (2023): Insights from an extensive triaxial testing campaign on a shale for comparative site characterization of a deep geological repository. (in preparation). *Geomech Energy Environ. Journal.*
- Itasca Consultants: Fast Lagrangian Analysis of Continua (FLAC) 3D. 7.0, Release 148, online verfügbar unter <https://docs.itascacg.com/flac3d700/flac3d/docproject/source/flac3dhome.html>, Stand am 08. Februar 2023.
- Madaschi, A., Leuthold, J., Cantieni, L. & Laloui, L. (2023): Comparative numerical calculations in the context of tunnel design for nuclear waste repositories in Opalinus Clay. *In: Proceedings 10th NUMGE. 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. London.*
- Morosoli, D., Anagnostou, G. & Cantieni, L. (2023): Design considerations for deep caverns in Opalinus Clay. *In: World Tunnel Congress 2023. CRC Press, Balkema, 2114-2121.*
- Nagra (2021): Verschlusskonzept für ein geologisches Tiefenlager. Nagra Arbeitsbericht NAB 21- 12.
- Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier - Band 1: Einführung und Projektdefinition. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 1.
- Nagra (2023b): Bautechnisches Dossier - Band 2: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 2.
- Nagra (2023c): Bautechnisches Dossier - Band 3: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 3.
- Nagra (2023d): Bautechnisches Dossier - Band 4: Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 4.
- Nagra (2023e): Bautechnisches Dossier - Band 5: Nutzungsvereinbarung. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 5.
- Nagra (2023f): Bautechnisches Dossier - Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 6.
- Nagra (2023g): Bautechnisches Dossier - Band 8: Tunnelstatik. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 8.

- Nagra (2023h): Bautechnisches Dossier - Band 9: Bautechnische Risikoanalyse. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 9.
- Nordas, A., Brauchart, A., Anthi, M. & Anagnostou, G. (2023a): Calibration method and material constants of an anisotropic, linearly elastic and perfectly plastic Mohr-Coulomb constitutive model for Opalinus clay Accepted. *Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Nordas, A., Cantieni, L., Natale, M. & Anagnostou, G. (2023b): Study on TBM jamming hazard in Opalinus clay. *World Tunnel Congress. In: World Tunnel Congress 2023*. CRC Press, Balkema, 2146-2153.
- Papafotiou, A., Namhata, A., Singh, A., Williams, M., Jigmond, M. & Marschall, P. (2016): Parametric sensitivity analysis of heat and gas release for a geological repository for SF/HLW in Northern Switzerland. Nagra Arbeitsbericht NAB 17-05.
- SIA (2004): Untertagbau : Ausführung. Schweizer Norm SIA 198, SN 531 198. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2013a): Betonbau. Schweizer Norm SIA 262, SN 505 262. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2013b): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. Schweizer Norm SIA 260, SN 505 260. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2013c): Stahlbau. Schweizer Norm SIA 263, SN 505 263. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

Anhang A Gesteinsparametersätze für den Opalinuston

Für das gewählte Stoffgesetz wurden gemäss Nordas et al. (2023a) drei Parametersätze (Maximalwerte, Mittelwerte, Minimalwerte) bestimmt, die die Bandbreite des Gesteinsverhaltens abbilden. Die Werte für die Steifigkeitsparameter sind in Tab. A-1 und für die residuale Festigkeit in Tab. A-2 angegeben. Für die tunnelstatischen Berechnungen werden die Mittelwerte der Kalibrierung verwendet. Um den Einfluss von Abweichungen des Gebirgsverhaltens zu berücksichtigen wurden zusätzliche tunnelstatische Berechnungen des HAA Lagerstollens mit den Minimalwerten durchgeführt, die in der BTRA (Nagra 2023h) dokumentiert sind.

Tab. A-1: Steifigkeitsparameter Opalinuston drainiert gemäss Nordas et al. (2023a)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Min.	Mit.	Max.
E-Modul senkrecht zur Schichtung	E_0	MPa	$400 + 180 \sigma_r'$	$2100 + 180 \sigma_r'$	$4200 + 180 \sigma_r'$
Umrechnungsfaktor E-Modul parallel zur Schichtung	n	-	1.4	3.0	3.1
Querdehnung parallel zur Schichtung	ν_{pp}	-	0.15	0.15	0.15
Querdehnung senkrecht zur Schichtung	ν_{0p}	-	0.10	0.10	0.10

Tab. A-2: Residuale Festigkeitsparameter Opalinuston, drainiert (tiefenunabhängig) gemäss Nordas et al. (2023a)

Beschreibung	Parameter	Einheit	Min.	Mit.	Max.
Kohäsion	c	MPa	0.2	1	3
Reibungswinkel	φ	MPa	24	27.5	29
Dilatanz	ψ	°	1	4	19
Kohäsion für die Bettung	c_b	MPa	0.2	1.0	1.8
Reibungswinkel für die Bettung	φ_b	°	20	21.5	24
Dilatanz für die Bettung	ψ_b	°	0	2	3