



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 2

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 2: Bautechnisch relevante Auszüge
geologischer Grundlagen Jura Ost

Oktober 2023



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 2

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 2: Bautechnisch relevante Auszüge
geologischer Grundlagen Jura Ost

Oktober 2023

STICHWÖRTER

Bautechnisches Dossier, Jura Ost, Ingenieurgeologische
Berichterstattung, Standortvergleich, Zugangsbauwerke, Bauwerke
auf Lagerebene, 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 des geologischen Tiefenlagers reicht die Nagra einen Bericht zur Begründung der Standortwahl ein. Die Nagra dokumentiert die Lagerprojekte der Untertageanlagen für den dafür durchzuführenden Standortvergleich im «Bautechnischen Dossier Standortvergleich», welches neun Bände umfasst.

Der vorliegende Band 2 des Bautechnischen Dossiers dokumentiert die bautechnisch relevanten Auszüge aus den geologischen Grundlagen für den Standort Jura Ost für den Vergleich der drei Standorte.

Ziel des ingenieurgeologischen Berichts ist die projektstufengerechte Erstellung und Beschreibung eines Baugrundmodells für die Zugangsbauwerke und die Bauwerke auf Lagerebene. Dieses umfasst die Beurteilung der bautechnisch relevanten Verhältnisse sowie die möglichen geologischen Gefährdungen für den Bau, Betrieb und Verschluss des geologischen Tiefenlagers. Der Bericht dient ausschliesslich als ingenieurgeologische Planungsgrundlage für die Bau- und Tragwerksplanung in der Planungsstufe des Vorprojekts. Die geologischen Grundlagen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers werden anderweitig dokumentiert.

Die Beschreibung und die Beurteilung des Baugrunds folgen den Empfehlungen der SIA 199. Die lithologischen, hydrogeologischen und geomechanischen Verhältnisse im Baugrund sowie die Überprägungen durch Tektonik und Verkarstung werden hinsichtlich bautechnischer Fragestellungen prognostiziert und die ingenieurgeologischen Gefährdungsbilder für den Bau und Betrieb der Untertagebauwerke abgeleitet. Gebirgsbereiche mit ähnlichen ingenieurgeologischen Verhältnissen und Gefährdungsbildern werden zu Homogenbereichen zusammengefasst und als Baugrundmodelle beschrieben.

Die ingenieurgeologische Beurteilung erfolgt grösstenteils anhand der Datenerhebung aus den Tiefbohrungen (BOZ1-1 und BOZ2-1) sowie der Interpretation der 3D-Seismik. Die Resultate der erdwissenschaftlichen Untersuchungen stellen eine solide Datengrundlage dar.

Zur Erschliessung der Lagerebene ist sowohl ein Schachtbauwerk, das eine Abfolge von Sedimentgesteinen durchteuft, als auch ein (Betriebs-)Zugangstunnel vorgesehen, der weitgehend im Opalinuston verläuft. Die Bauwerke auf Lagerebene liegen ausschliesslich im Opalinuston.

In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Untertagebauprojekte durch diese Gesteins-einheiten in ähnlichen Tiefenlagen erfolgreich realisiert. Dabei war das Gebirge teilweise deutlich stärker tektonisch überprägt als es im Standortgebiet Jura Ost der Fall ist.

Das Schachtbauwerk weist als wichtigste Gefährdung und Ungewissheit das Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen und damit in Zusammenhang stehende Bergwasserzutritte im Hauptrogenstein auf.

Für die Bauwerke im Opalinuston ((Betriebs-)Zugangstunnel und Bauwerke auf Lagerebene) stellt der «echte Gebirgsdruck» die wichtigste Gefährdung dar.

Die Ungewissheiten bezüglich des Baugrundmodells werden im Bericht systematisch dargelegt. Die grössten Ungewissheiten betreffen das Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen und die Trennflächeneigenschaften. Die Datengrundlage erlaubt eine robuste Planung auf Stufe Vorprojekt, wobei die Ungewissheiten angemessen berücksichtigt werden.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VII
Figurenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
1.1 Zweck des vorliegenden Berichts.....	1
1.2 Aufbau	1
1.3 Projektelemente	2
1.3.1 Zugangsbauwerke.....	4
1.3.2 Bauwerke auf Lagerebene	5
1.3.3 Angenommene Vortriebsmethoden	5
1.4 Ingenieurgeologisches Untersuchungsgebiet.....	5
1.5 Verwendete Datengrundlage	6
1.6 Konzept der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Eigenschaften.....	10
2 Geologische und hydrogeologische Übersicht	13
3 Beschreibung der lithologischen Einheiten	17
3.1 Lithologische Beschreibung	19
3.1.1 Li1 (Wildeggen-Formation)	19
3.1.2 Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation).....	20
3.1.3 Li3 (Passwang-Formation)	21
3.1.4 Li4 (Opalinuston).....	22
3.2 Mineralgehalt der lithologischen Einheiten.....	23
3.3 Tabellarische Zusammenfassung der lithologischen Einheiten.....	26
3.3.1 Li1 (Wildeggen-Formation)	26
3.3.2 Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation).....	27
3.3.3 Li3 (Passwang-Formation)	28
3.3.4 Li4 (Opalinuston).....	29
4 Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Trenn- flächeneigenschaften und der Störungszonen	31
4.1 Beschreibung der Trennflächensysteme	34
4.1.1 Orientierung der Trennflächensysteme.....	35
4.1.2 Trennflächenabstände	35
4.1.3 Öffnungsweite der Trennflächen	36
4.1.4 Persistenz der Trennflächen.....	37
4.1.5 Zustand der Trennflächen	37
4.2 Beschreibung der Trennflächenkörper.....	37
4.2.1 Volumen der Trennflächenkörper.....	38
4.2.2 Grundform der Trennflächenkörper.....	38

4.3	Beschreibung der Störungszonen	40
4.3.1	Eigenschaften der seismisch nicht kartierten Störungszonen	40
4.3.1.1	Seismisch nicht kartierte Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten	40
4.3.1.2	Seismisch nicht kartierte Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten	41
4.3.2	Eigenschaften der kartierten Störungszone	44
4.4	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	45
4.4.1	Te1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	45
4.4.2	Te2 (Opalinuston)	46
5	Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse	47
5.1	Eigenschaften der hydrogeologischen Einheiten	48
5.1.1	Aquiferarten in den hydrogeologischen Einheiten	49
5.1.2	Hydraulisches Potenzial	49
5.1.3	Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges und von Störungszonen	50
5.1.4	Wasser-/Gebirgstemperatur	51
5.1.5	Wasserchemismus	52
5.1.6	Kohlenwasserstoff-Vorkommen	53
5.2	Tabellarische Zusammenfassung der hydrogeologischen Einheiten	54
5.2.1	Hy1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	54
5.2.2	Hy2 (Passwang-Formation)	55
5.2.3	Hy3 (Opalinuston)	56
6	Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften und Spannungsverhältnissen	57
6.1	Ableiten der geomechanischen Gesteinseigenschaften	58
6.1.1	Einaxiale Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Poissonzahl	58
6.1.2	Spitzenkohäsion, Spitzenreibungswinkel, Spaltzugfestigkeit	60
6.1.3	Quelleigenschaften	60
6.2	Geomechanische Eigenschaften von Störungszonen	61
6.3	Spannungsverhältnisse in den geomechanischen Einheiten	61
6.4	Tabellarische Zusammenfassung der geomechanischen Einheiten	65
6.4.1	Gm1 (Wildegge-Formation)	65
6.4.2	Gm2 (Dogger oberhalb Opalinuston)	66
6.4.3	Gm3 (Opalinuston)	67
7	Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungs- eigenschaften	68
7.1	Beurteilung der Verkarstung des Gebirges	69
7.1.1	Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten	70
7.1.2	Verkarstung der verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten	70
7.1.3	Auftretenshäufigkeit von Karsthohlräumen	71
7.2	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	71
7.2.1	Ka1 (Wildegge-Formation)	71

7.2.2	Ka2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation).....	72
7.2.3	Ka3 (Passwang-Formation)	72
7.2.4	Ka4 (Opalinuston)	72
8	Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen.....	73
8.1	Beurteilung der Gefährdungen in Zusammenhang mit dem Gebirgsverhalten.....	74
8.1.1	Ablösungen von Trennflächenkörpern	74
8.1.2	Druckhaftes Gebirge.....	76
8.2	Gefahren in Zusammenhang mit Zutritt von Bergwasser ins Bauwerk.....	78
8.2.1	Wasserzutritt.....	78
8.2.2	Überschreiten der Einleitgrenzwerte	80
8.2.3	Versinterung von Drainageleitungen.....	80
8.2.4	Betonkorrosion	81
8.2.5	Korrosion von metallischen Einbauten.....	81
8.3	Gefahren, die zu gesundheitlichen Auswirkungen führen können	82
8.3.1	Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen.....	82
8.3.2	Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff.....	83
8.3.3	Gesundheitliche Auswirkungen durch Quarzfeinstaubexposition.....	83
8.3.4	Gesundheitliche Auswirkungen durch Asbestfaserexpositionen.....	83
8.3.5	Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	84
8.4	Andere Gefahren.....	85
8.4.1	Gefahren bezüglich Gesteinsabrasivität.....	85
8.4.2	Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	85
8.5	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungsbildern	87
8.5.1	Gb1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation).....	87
8.5.2	Gb2 (Passwang-Formation)	88
8.5.3	Gb3 (Opalinuston)	89
9	Baugrundmodelle.....	91
9.1	Zusammenfassende Beschreibung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche.....	92
9.1.1	Hb1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston).....	92
9.1.1.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung.....	92
9.1.1.2	Hauptgefährdungen.....	93
9.1.1.3	Prognosesicherheit.....	93
9.1.2	Hb2 (Opalinuston)	94
9.1.2.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung.....	94
9.1.2.2	Hauptgefährdungen.....	95
9.1.2.3	Prognosesicherheit.....	95
10	Schlussbetrachtung.....	97
11	Literaturverzeichnis	99

Anhänge

Anhang 1: Tunnelband Zugangsschacht

Anhang 2: Tunnelband Lüftungsschacht

Anhang 3: Tunnelband HAA-Lagerstollen

Anhang 4: Tunnelband SMA-Lagerkaverne

Anmerkung: Nur in der digitalen Version dieses Berichtes (PDF) sind die Anhänge enthalten und unter dem Büroklammersymbol abgelegt.

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1:	Referenzen TBO-Datenberichte	7
Tab. 1-2:	In diesem Bericht verwendete Klassifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeiten (angelehnt an DAUB & ITA-AITES 2022).....	10
Tab. 4-1:	Vergleich der Anzahl der angetroffenen effektiven Trennflächen in den TBO	34
Tab. 4-2:	Erwartete Öffnungsweiten der Trennflächen entlang der geplanten Bauwerksachsen	37
Tab. 4-3:	Erwarteter Trennflächenzustand entlang der geplanten Bauwerksachsen.....	37
Tab. 4-4:	Verteilung der Volumina der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	38
Tab. 4-5:	Verteilung der Grundformen der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	39
Tab. 5-1:	Erwarteter Chemismus von Grund- und Porenwasser (<i>best guess</i>) in den hydrogeologischen Einheiten.....	53
Tab. 6-1:	Tiefenabhängige Werte für die Hauptspannungsmagnituden im Opalinuston.....	63
Tab. 7-1:	Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit der und der Verkarstung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften.....	71
Tab. 8-1:	Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern im Gebirge ausserhalb von Störungszonen.....	75
Tab. 8-2:	Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern in Störungszonen des Typs III	76
Tab. 8-3:	Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges ausserhalb von Störungszonen	77
Tab. 8-4:	Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges in Störungszonen des Typs III	77
Tab. 8-5:	Beurteilung des prognostizierten initialen Wasserzutritts	79
Tab. 8-6:	Beurteilung des prognostizierten permanenten Wasserzutritts.....	79
Tab. 8-7:	Beurteilung der Überschreitung der erwarteten Einleitgrenzwerte.....	80
Tab. 8-8:	Beurteilung des Versinterungspotenzials.....	81
Tab. 8-9:	Beurteilung der Massnahmenstufen zur Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagebauten in Erdgas-führenden Gesteinsschichten	82
Tab. 8-10:	Beurteilung der Quarzfeinstaub-Belastung.....	83
Tab. 8-11:	Beurteilung der Massnahmenstufen bezogen auf die Trockenraumtemperatur, einschliesslich der Gebirgs- resp. Bergwassertemperatur	84
Tab. 8-12:	Bewertung der Gesteinsabrasivität	85
Tab. 8-13:	Beurteilung der geogenen Belastung des Ausbruchmaterials.....	86

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Situation HAA-Lager in Jura Ost	3
Fig. 1-2:	Situation SMA-Lager in Jura Ost	4
Fig. 1-3:	Lage der Tiefbohrungen (TBO), des (Betriebs-)Zugangstunnels, des Stichtunnels, des Standorts des Lüftungsschachts und der Bauwerke auf Lagerebene für ein HAA-Lager.....	6
Fig. 1-4:	Gegenüberstellung der verschiedenen im Bericht verwendeten Darstellungsarten, zur Abbildung der Erwartungswerte.....	9
Fig. 1-5:	Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Eigenschaften am Standort des Lüftungsschachts (Prognoseprofil)	11
Fig. 2-1:	Lithostratigraphischen Einheiten in den TBO und Prognose am Standort des Lüftungsschachts	14
Fig. 2-2:	Geologischer Schnitt entlang des (Betriebs-)Zugangstunnels, der vollständig im Opalinuston verläuft	15
Fig. 2-3:	Geologischer Schnitt entlang des Stichtunnels.....	15
Fig. 2-4:	Aquifere und Aquitarde oberhalb des Opalinustons.....	16
Fig. 3-1:	Gegenüberstellung der lithologischen Einheiten aus ingenieur-geologischer Betrachtung und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts.....	18
Fig. 3-2:	Kernbeispiel der Wildegge-Formation aus BOZ1-1	19
Fig. 3-3:	Kernbeispiele des Hauptrogensteins (links) und der Klingnau-Formation (rechts) aus BOZ1-1	20
Fig. 3-4:	Kernbeispiel der Passwang-Formation aus BOZ1-1	21
Fig. 3-5:	Kernbeispiel des Opalinuston aus BOZ1-1	22
Fig. 3-6:	Vergleich des Tonmineralgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO.....	23
Fig. 3-7:	Vergleich des Quarzgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO	24
Fig. 3-8:	Vergleich des Karbonatgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO	25
Fig. 4-1:	Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	32
Fig. 4-2:	Seismisch kartierte Störungszonen im Bereich der geplanten HAA-Lagerstollen	33
Fig. 4-3:	Zusammenstellung der Trennflächenabstände der effektiven Trennflächen in den TBO sowie der erwarteten Trennflächenabstände am geplanten Schachtstandort	36
Fig. 4-4:	Typen von Störungszonen, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden	41
Fig. 4-5:	Schematische Darstellung des «soft linkage»-Verlaufs von Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten.....	42

Fig. 4-6:	Typen von Störungszonen, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von wenig kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden	42
Fig. 4-7:	Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen des Typ I in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (MAR1-1 Bohrmeter 620.9 – 621.9).....	44
Fig. 5-1:	Gegenüberstellung der hydrogeologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Sicht, der lithostratigraphischen Einteilung sowie der Messbereiche der durchgeführten hydrogeologischen Versuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts.....	48
Fig. 5-2:	Gegenüberstellung der erwarteten hydraulischen Potenziale in den hydrogeologischen Einheiten mit der Höhenlage des Schachtkopfs des Lüftungsschachts (rote Linie).....	50
Fig. 5-3:	Gegenüberstellung der horizontalen, hydraulischen Durchlässigkeiten des Gebirges und von Störungszonen in den hydrogeologischen Einheiten.....	51
Fig. 5-4:	Gemessene Gebirgstemperaturen in den TBO und der Bohrung Riniken.....	52
Fig. 6-1:	Gegenüberstellung der geomechanischen Einheiten mit der lithostratigraphischen Einteilung sowie Angabe der Probeentnahmen für die Laborversuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	57
Fig. 6-2:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten einaxialen Druckfestigkeiten.....	58
Fig. 6-3:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Elastizitätsmodule	59
Fig. 6-4:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Poissonzahlen.....	59
Fig. 6-5:	Spannungsprofile am geplanten Standort des Lüftungsschachts	62
Fig. 6-6:	Überlagerung des Top Opalinuston im Bereich des Lagerprojekts	64
Fig. 7-1:	Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften mit der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	69
Fig. 8-1:	Herleitung der ingenieurgeologischen Gefährdungsbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts).....	74
Fig. 9-1:	Herleitung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts).....	91
Fig. 9-2:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston).....	92
Fig. 9-3:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb2 (Opalinuston).....	94

Abkürzungsverzeichnis

BAC1-1	Tiefbohrung Bachs-1-1
BOZ1-1	Tiefbohrung Bözberg-1-1
BOZ2-1	Tiefbohrung Bözberg-2-1
BUL1-1	Tiefbohrung Bülach-1-1
EUU	Erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag
Fm.	Formation
Gb	Einheit mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungsbildern (Gb1 bis Gb3)
Gm	Geomechanische Einheit (Gm1 bis Gm3)
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
Hb	Ingenieurgeologischer Homogenbereich (Hb1 und Hb2)
Hy	Hydrogeologische Einheit (Hy1 bis Hy3)
Ka	Einheit mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften (Ka1 bis Ka4)
JO	Standortgebiet Jura Ost
Li	Lithologische Einheit (Li1 bis Li4)
MAR1-1	Tiefbohrung Marthalen-1-1
MD	Measured Depth
MHF	Micro-Hydraulic Fracturing
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NTB	Nagra Technischer Bericht
RHE1-1	Tiefbohrung Rheinau-1-1
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SHmax	Maximale horizontale Hauptspannung
Shmin	Minimale horizontale Hauptspannung
SMA	Schwach- und mittelaktive Abfälle
STA2-1	Tiefbohrung Stadel-2-1
STA3-1	Tiefbohrung Stadel-3-1
Sv	Vertikale Spannungsmagnitude, Überlagerungsspannung
TBO	Tiefbohrung
Te	Einheit mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften (Te1 bis Te4)
TRU1-1	Tiefbohrung Trüllikon-1-1
UCS	Einaxiale Druckfestigkeit

1 Einleitung

1.1 Zweck des vorliegenden Berichts

Der Bericht «Bautechnisch relevante Auszüge geologischer Grundlagen Nördlich Lägern» ist ein Band des Bautechnischen Dossiers für den Standortvergleich. Der Zweck des Bautechnischen Dossiers ist in Nagra (2023a) detailliert beschrieben.

Zweck des vorliegenden Bands ist die projektstufengerechte Beurteilung der bautechnisch relevanten geologisch-hydrogeologisch-geotechnischen Verhältnisse zur Ableitung der möglichen ingenurgeologischen Gefährdungen für den Bau, Betrieb und Verschluss der Untertagebauwerke und die Ableitung der entsprechenden Baugrundmodelle. Er dient ausschliesslich als ingenurgeologische Planungsgrundlage für die untertägigen Bauwerke des geologischen Tiefenlagers im Rahmen des Standortvergleichs. Die geologischen Grundlagen für die Beurteilung der Langzeitsicherheit des geologischen Tiefenlagers werden anderweitig dokumentiert.

1.2 Aufbau

Die Beschreibung und die Beurteilung des Baugrunds folgen den Empfehlungen der SIA 199 (SIA 2015), wobei projektspezifische und projektphasengerechte Anpassungen vorgenommen wurden. Das Ableiten und Beschreiben der Baugrundmodelle folgt den Vorgaben der SIA 197 (SIA 2004).

Der Aufbau der einzelnen Kapitel besteht jeweils aus einer kurzen Einführung, in der die themenspezifischen Gebirgseinheiten kurz vorgestellt werden; es folgt eine Diskussion der einzelnen Parameter, wie diese erhoben wurden und wie die Werte zwischen den Einheiten aber auch innerhalb der Einheiten (zwischen den Tiefbohrungen (TBO)) variieren. Am Schluss jedes Kapitels werden die Werte für jede Einheit tabellarisch zusammengefasst.

Die Diskussion zur Erhebung, Modellierung und Auswertung der einzelnen Parameter erfolgt in diesem Bericht in der Regel zusammenfassend. Für Details zur Datengrundlage und zur angewandten Methodik wird auf entsprechende Datenberichte oder wissenschaftliche Publikationen verwiesen.

Der ingenurgeologische Bericht ist in folgende Kapitel unterteilt:

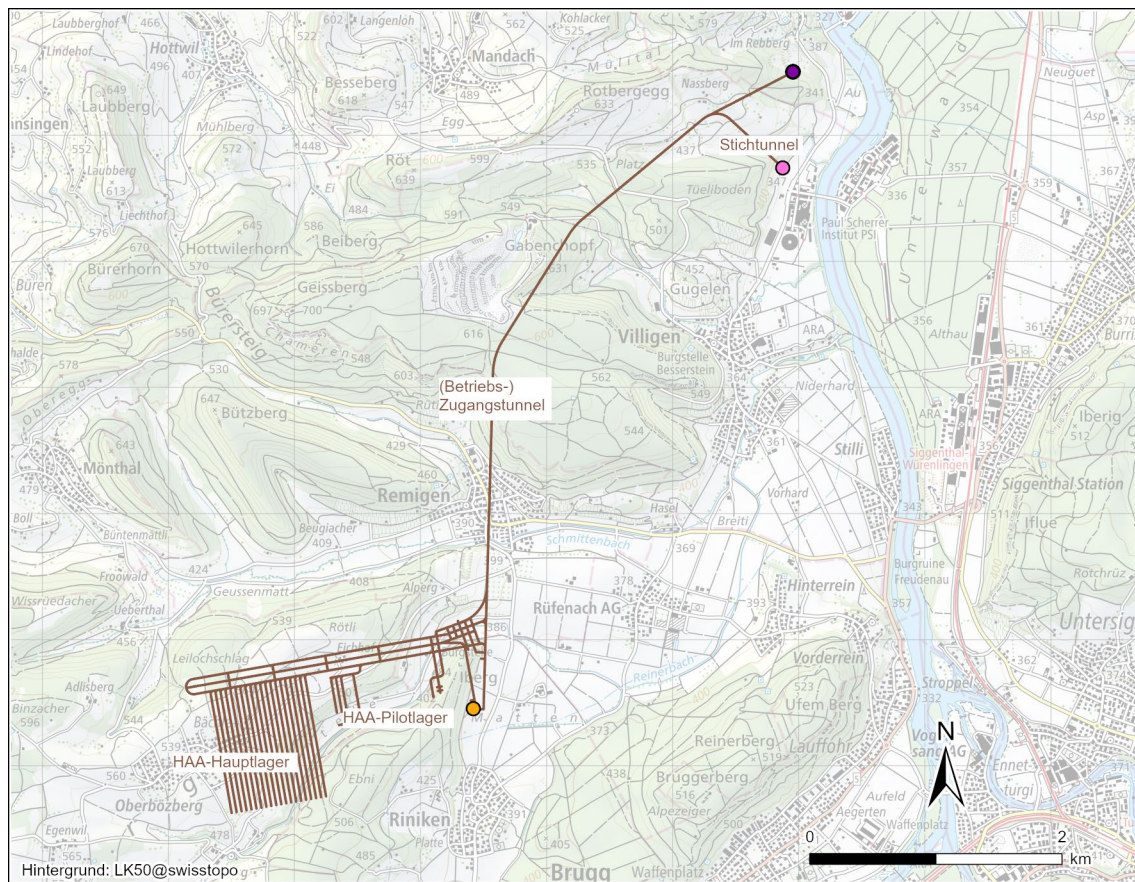
- **Kapitel 1: Einleitung**
Einordnung des Berichts, Angabe der Eckdaten für das Projekt und Lesehinweise.
- **Kapitel 2: Geologische und hydrogeologische Übersicht**
Geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Standortgebiet werden in den regionalen Kontext gesetzt.
- **Kapitel 3: Beschreibung der lithologischen Einheiten**
Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften.
- **Kapitel 4: Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der Störungszonen**
Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen tektonischen Überprägungen.
- **Kapitel 5: Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse**
Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Verhältnissen.

- **Kapitel 6: Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften und Spannungsverhältnissen**
Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften.
- **Kapitel 7: Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften**
Beurteilung, Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften.
- **Kapitel 8: Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen**
Beurteilung, Unterteilung und Beschreibung des Baugrunds in Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungen für den Bau und Betrieb der untertägigen Bauwerke.
- **Kapitel 9: Baugrundmodelle**
Ableiten von Homogenbereichen ähnlicher bautechnischer Bedingungen und Beschreibung der Baugrundmodelle.
- **Kapitel 10: Schlussbetrachtung**
- **Anhänge: Ingenieurgeologische Tunnelbänder**

1.3 Projektelemente

Am Standort Jura Ost wird entweder ein HAA- oder ein SMA-Lager realisiert. Eine Realisierung als Kombilager wie in Nördlich Lägern ist nicht geplant (Nagra 2023a). Im Folgenden werden die Projektelemente eines HAA- (Fig. 1-1) und SMA-Lagers (Fig. 1-2) beschrieben. Die Funktionen der Bauwerke sind in Nagra (2022a) beschrieben.

Bei den Projektelelementen wird zwischen Zugangsbauwerken und Bauwerken auf Lagerebene unterschieden.



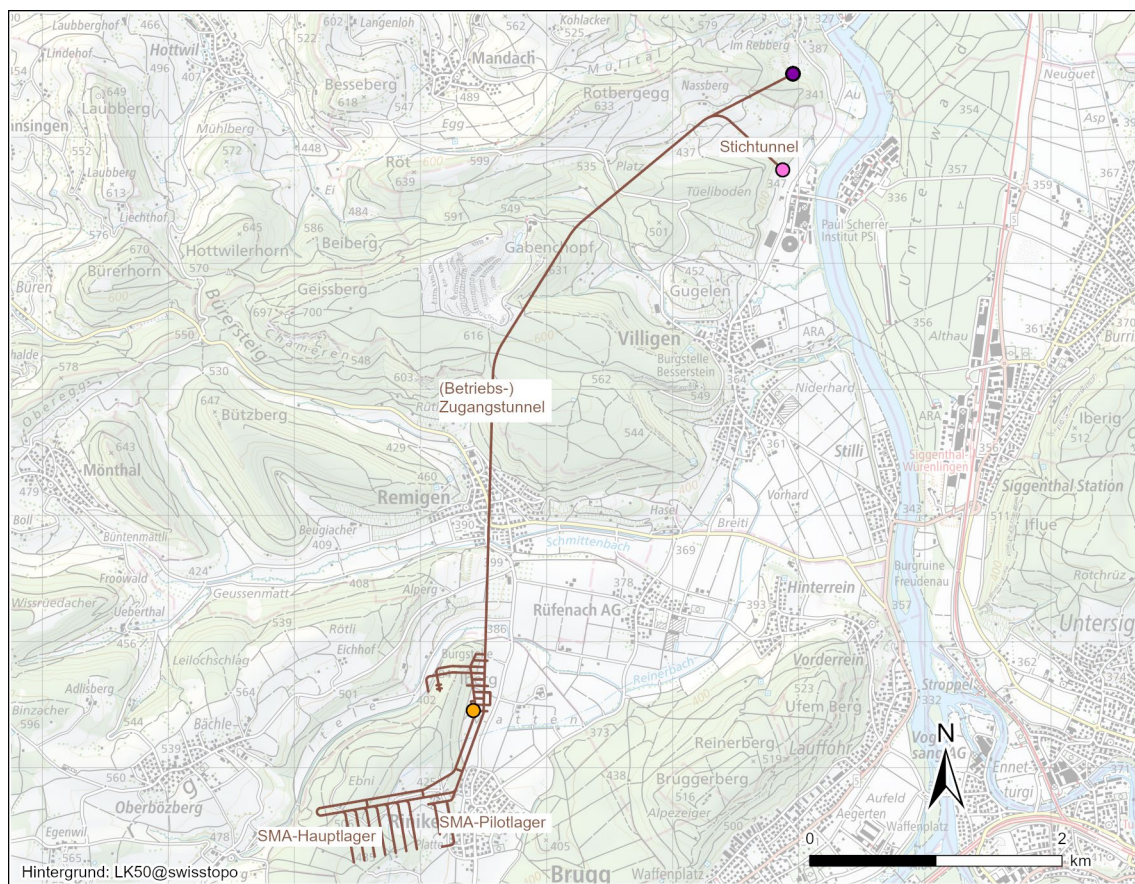
Geologische Tiefenlager

— HAA-Lager Jura Ost

Nebenzugangsanlagen

- Lüftungsschacht
- Portal Stichtunnel
- Portal (Betriebs-)Zugangstunnel

Fig. 1-1: Situation HAA-Lager in Jura Ost



Geologische Tiefenlager

— SMA-Lager Jura Ost

Nebenzugangsanlagen

- Lüftungsschacht
- Portal Stichstunnel
- Portal (Betriebs-)Zugangstunnel

Fig. 1-2: Situation SMA-Lager in Jura Ost

1.3.1 Zugangsbauwerke

Der Zugang zur Lagerebene (für Einlagerungs- und Baubetrieb) erfolgt über einen einröhrigen, geneigten Tunnel den sogenannten (Betriebs-)Zugangstunnel (Nagra 2023b). Der (Betriebs-)Zugangstunnel verfügt über zwei Portale (Betriebs-)Zugangstunnel und Stichstunnel. Als weiterer Zugang ist ein Lüftungsschacht vorgesehen:

- (Betriebs-)Zugangstunnel: Innendurchmesser von ca. 10 m; Länge von ca. 5.7 km
- Stichstunnel: Innendurchmesser von ca. 6.0 m; Länge von ca. 760 m
- Lüftungsschacht: Innendurchmesser von 6.0 m; Tiefe von ca. 420 m

Beim HAA-Lager ist der (Betriebs-)Zugangstunnel durch eine Trennwand in zwei Abteile geteilt.

Der (Betriebs-)Zugangstunnel und der Lüftungsschacht werden bereits für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU) abgeteuft und über die gesamte Betriebsdauer bis zum Gesamtverschluss beansprucht.

1.3.2 Bauwerke auf Lagerebene

Die Bauwerke der Hauptlager, Pilotlager, Zugänge zu den Hauptlagern, die Bauten für erdwissenschaftliche Untersuchungen untertag und des Zentralen Bereichs stellen die Bauwerke auf Lagerebene dar. Sie weisen nutzungsbedingt unterschiedliche Normalprofile auf, so zum Beispiel:

- HAA-Lagerstollen: Innendurchmesser von 2.8 m
- SMA-Lagerkaverne: Innenspannweite von 11.6 m
- Betriebstunnel: Innendurchmesser von 6.0 m
- Bauwerke des Zentralen Bereichs: Innendurchmesser zwischen 6.0 und 8.0 m

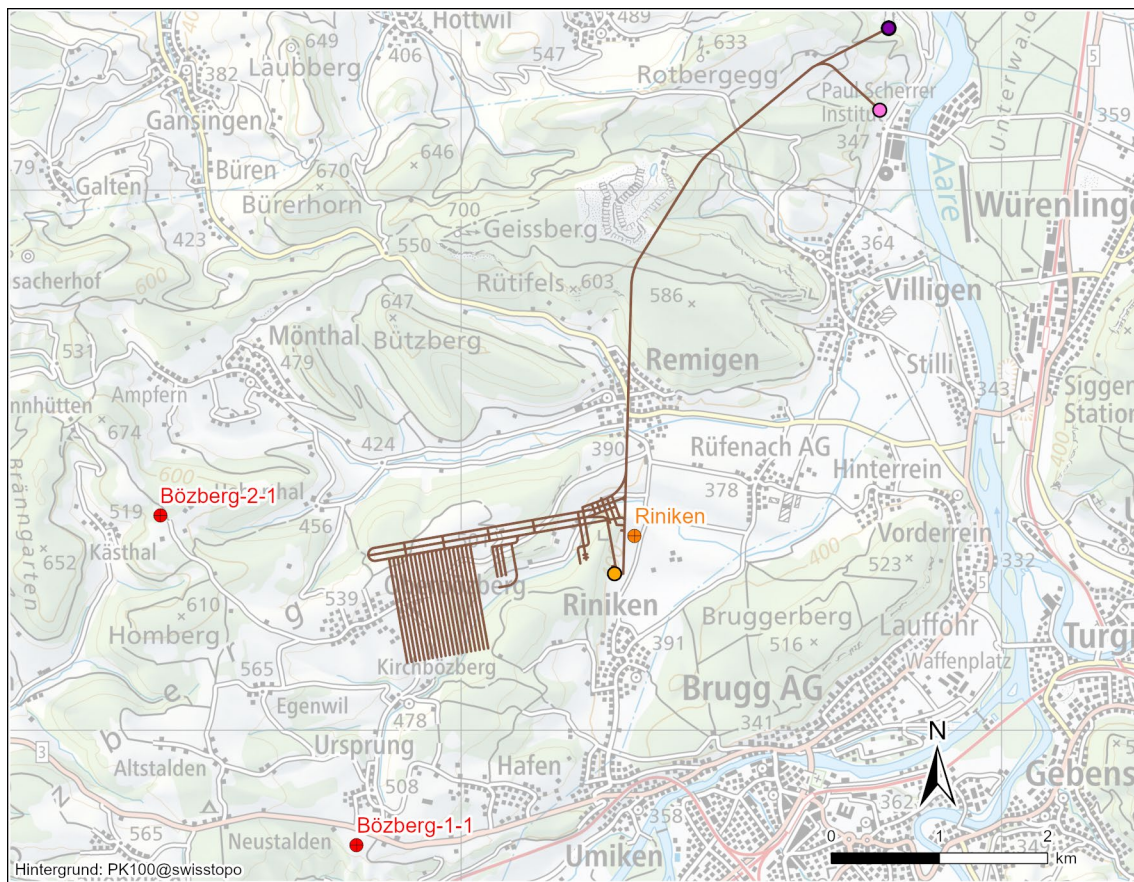
1.3.3 Angenommene Vortriebsmethoden

Für die Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen (Kapitel 8) wird angenommen, dass der (Betriebs-)Zugangstunnel mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren und der Lüftungsschacht im Sprengvortrieb abgeteufte wird (Nagra 2023a). Der Stichtunnel und die Bauwerke auf Lagerebene inklusive SMA-Kavernen werden gemäss Planung im konventionellen Vortrieb erstellt. Eine Ausnahme stellen die HAA-Lagerstollen dar, die mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren werden sollen.

1.4 Ingenieurgeologisches Untersuchungsgebiet

Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf die ingenieurgeologische Beurteilung entlang der geplanten Bauwerksachsen (Fig. 1-3).

Das Quartär wird in diesem Bericht nicht betrachtet. Dafür sei unter anderem auf den Bericht Eisenlohr & Müller (2015) verwiesen.



Erdwissenschaftliche Untersuchung

- Tiefbohrungen SGT-E3
- Alte Nagra Tiefbohrung

Geologische Tiefenlager

— HAA-Lager Jura Ost

Nebenzugangsanlagen

- Lüftungsschacht
- Portal Stichtunnel
- Portal
- (Betriebs-)Zugangstunnel

Fig. 1-3: Lage der Tiefbohrungen (TBO), des (Betriebs-)Zugangstunnels, des Stichtunnels, des Standorts des Lüftungsschachts und der Bauwerke auf Lagerebene für ein HAA-Lager

1.5 Verwendete Datengrundlage

Der ingenieurgeologische Bericht beinhaltet im Wesentlichen lediglich die ingenieurgeologischen Gesteins- und Gebirgsdaten, die für die Bau- und Tragwerksplanung nötig sind. Die Auswahl der Parameter lehnt sich an den Vorschlag der SIA 199 (SIA 2015) an, wobei die Auswahl an die stufengerechten Bedürfnisse der Planung, die geologisch-hydrogeologischen Rahmenbedingungen sowie die Anforderungen des Bauvorhabens angepasst wurde.

Für den Bericht werden primär die Messungen und Beobachtungen der Tiefbohrkampagne der Etappe 3 verwendet. Die Tiefbohrungen (nachfolgend TBO) wurden als Forschungsbohrungen geplant und über weite Strecken gekernt abgeteuft, umfangreich beprobt und getestet. Die umfangreichen Resultate sind in den TBO-Datenberichten zusammengetragen (vgl. Tab. 1-1).

Die TBO wurden nach Möglichkeit bewusst ausserhalb des Lagerbereichs angeordnet, um dieses Gebiet mit möglichst geringen Auswirkungen auf das Platzangebot zu charakterisieren. Die gewählten Bohrstandorte erlauben eine stufengerechte Beurteilung der ingenieurgeologischen Verhältnisse der Zugänge nach Untertag und der Bauwerke auf Lagerebene. Eine detaillierte Charakterisierung des Schachtstandorts war aber nicht Ziel der Untersuchungen. So liegt auch keine TBO direkt am Schachtstandort.

Für die ingenieurgeologische Prognose wird die Bohrung BOZ1-1 stärker gewichtet als die weiter entfernte Bohrung BOZ2-1. Letztere wird weitgehend zur Konsistenzprüfung verwendet resp. dazu, die räumliche Variabilität innerhalb des Standortgebiets abzubilden. Wo keine geeigneten Daten aus den TBO erhoben wurden, wird dies explizit erwähnt. In diesen Fällen wird auf Literaturwerte zurückgegriffen.

Die Daten der älteren Tiefbohrung Riniken (Matter et al. 1987) sind in ingenieurgeologischer Hinsicht nur beschränkt auswertbar (bspw. wurden keine geeigneten felsmechanischen Versuche durchgeführt). Deshalb werden die Informationen aus dieser Bohrung nur zur Konsistenzprüfung verwendet.

Die Umgebung des zu planenden Tiefenlagers wurde mit Hilfe von 3D-Seismik erkundet. Hieraus wurde in verschiedenen Schritten ein Tiefenmodell der geologischen Schichten (Schichtmodell) erarbeitet. Die Prognosen der Tiefenlage und Mächtigkeiten der Gesteinseinheiten in diesem Bericht beruhen auf dem geologischen Schichtmodell Stand Februar 2022 (Schichtmodell v2.1). Hingegen beruht die Beurteilung der Störungszonen im Bereich der Bauwerksachsen auf der Seismikinterpretation Stand August 2023.

Ausserdem werden Daten und Erfahrungen aus Infrastrukturprojekten der Nord- und Nordostschweiz als Vergleichsdaten oder zur Einordnung herangezogen (z.B. Belchen-Strassentunnel, Neuer Bözberg-Eisenbahntunnel, Eppenberg-Eisenbahntunnel).

Tab. 1-1: Referenzen TBO-Datenberichte

TBO	Referenz Datenbericht
<i>Jura Ost</i>	
BOZ1-1	Nagra (Hrsg.) 2022a
BOZ2-1	Nagra (Hrsg.) 2022b
<i>Nördlich Lägern</i>	
BAC1-1	Nagra NAB 22-04 <i>in Bearb.</i>
STA2-1	Nagra 2022b
STA3-1	Nagra (Hrsg.) 2022c
BUL1-1	Nagra (Hrsg.) 2021a
<i>Zürich Nordost</i>	
MAR1-1	Nagra (Hrsg.) 2021b
TRU1-1	Nagra (Hrsg.) 2021c
RHE1-1	Nagra NAB 22-03 <i>in Bearb.</i>

Naturgemäss weisen die verwendeten Daten und Informationen unterschiedliche Qualitäten auf. Es wird zwischen folgenden Datenqualitäten unterschieden:

- **Mod. Datensatz:** Es ist ein statistisch verwertbarer Datensatz vorhanden, welcher durch Modellrechnungen aus einem konkreten Messdatensatz abgeleitet worden ist (z. B. Spannungsdaten).
- **Stat. Datensatz:** Es liegen Messdaten in guter Qualität vor, sodass der Parameter quantitativ beschrieben werden kann (d. h. nachvollziehbare Datenerhebung und Anzahl Messresultate erlauben eine solide statistische Auswertung).
- **Datenspektrum:** Es sind mehrere Messdaten vorhanden, welche eine Einschätzung des zu erwartenden Spektrums erlauben. Die Datenanzahl oder deren Qualität sind für eine statistische Auswertung aber unzureichend.
- **Hinweisdaten:** Es sind nur vereinzelte resp. stichprobenartige Messdaten vorhanden oder vorhandene Daten lassen aufgrund unklarer Datenerhebung nur hinweisende Aussagen zum Parameter zu. Zu dieser Kategorie werden auch Angaben zu Parametern gezählt, welche mit den in dieser Projektphase verfügbaren Methoden nicht gemessen werden können und daher indirekt hergeleitet werden.
- **Abschätzung:** Es sind keine Mess- oder Modelldaten vorhanden oder die vorhandenen Daten lassen aufgrund der Parametereigenschaften oder unklarer Datenerhebungen, bezogen auf den Parameter, keine nachvollziehbaren Aussagen zu. Der Parameter wurde anhand von Erfahrungswerten über Analogien abgeschätzt.

Die Werte der ingenieurgeologischen Parameter werden, sofern möglich und sinnvoll, quantitativ angegeben. Die Erwartungswerte werden nach SIA 267 (SIA 2013) resp. SIA 199 (SIA 2015)) angegeben, wobei für den betrachteten Minimalwert das Perzentil bei 5 % ($P_{0.05}$) und für den Maximalwert $P_{0.95}$ verwendet wird. Wo die Datengrundlage es erlaubt, wird zusätzlich die Werteverteilung durch die Angabe des $P_{0.25}$ und $P_{0.75}$ abgebildet (Fig. 1-4).

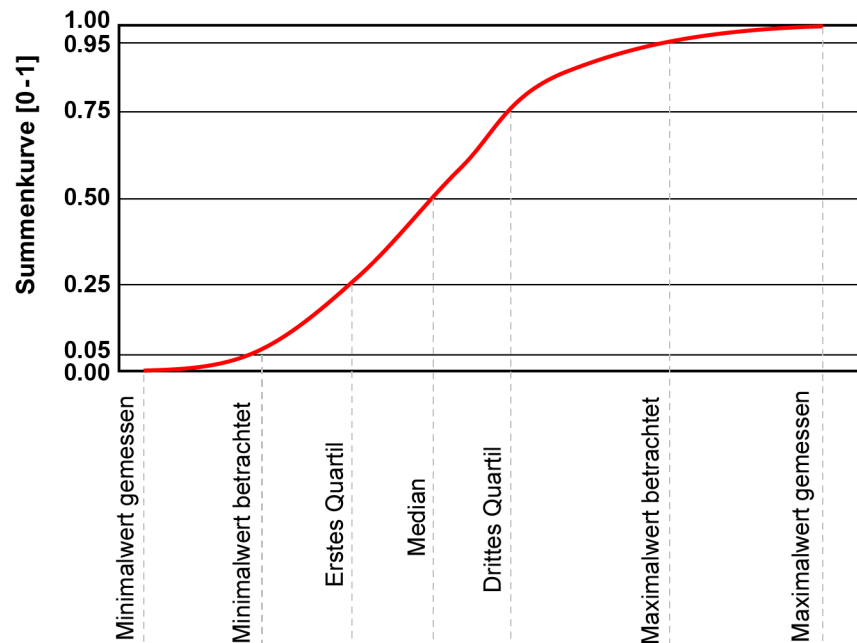
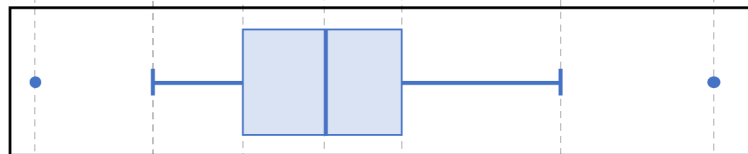
Summenkurve**Boxplot****Wertebereiche**

Fig. 1-4: Gegenüberstellung der verschiedenen im Bericht verwendeten Darstellungsarten, zur Abbildung der Erwartungswerte

Wo möglich, wird die Eintretenswahrscheinlichkeit quantitativ angegeben; ist dies nicht möglich, erfolgt eine qualitative Bewertung nach Tab. 1-2.

Tab. 1-2: In diesem Bericht verwendete Klassifizierung der Eintretenswahrscheinlichkeiten (angelehnt an DAUB & ITA-AITES 2022)

Bezeichnung	Beschreibung Für das Eintreten eines unerwünschten Ereignisses (geologische Gefährdung), bezogen auf die betrachtete Tunnellänge bzw. Schachttiefe (betrachteter Abschnitt)
Extrem unwahrscheinlich	Das Eintreten ist <i>extrem unwahrscheinlich</i> . Denkbar, aber während des betrachteten Zeitraums praktisch auszuschliessen.
Unwahrscheinlich	Das Ereignis ist <i>unwahrscheinlich</i> . Es ist davon auszugehen, dass das Ereignis/die Gefährdung einmal während des betrachteten Zeitraums auftreten kann .
Möglich	Das Ereignis <i>könnte vorkommen</i> . Es ist davon auszugehen, dass das Ereignis/die Gefährdung mehrmals auftreten kann.
Wahrscheinlich	Das Ereignis <i>wird vorkommen</i> . <i>Das Ereignis/die Gefährdung</i> wird mit hoher Wahrscheinlichkeit in grösserer Zahl auftreten .

1.6 Konzept der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Eigenschaften

Der Baugrund wird aus ingenieurgeologischer Sicht in Einheiten mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst (in der SIA 199 (SIA 2015) auch «Homogenbereiche» genannt). Für verschiedene «Gruppen von Eigenschaften» ergeben sich unterschiedliche Einheiten (Fig. 1-5).

Es werden unterschieden:

- Lithologische Einheiten (Kapitel 3)
- Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften (Kapitel 4)
- Hydrogeologische Einheiten (Kapitel 5)
- Geomechanische Einheiten (Kapitel 6)
- Einheiten mit ähnlicher Gebirgsverkarstung (Kapitel 7)

Auf Basis der Informationen in den Kapiteln 3 bis 7 werden die ingenieurgeologischen Gefährdungen abgeleitet (Kapitel 8). Diese werden in Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungen zusammengefasst.

Anhand der Kombination der Gesteins- und Gebirgseigenschaften (Kapitel 3 bis 7) und den ingenieurgeologischen Gefährdungen (Kapitel 8) werden die Baugrundmodelle abgeleitet (Kapitel 9).

Gruppe	Formation	Lithologie	Meter MD	lithologische Einheiten (Kapitel 3)	Trennflächen- Einheiten (Kapitel 4)	hydrogeologische Einheiten (Kapitel 5)	geomechanische Einheiten (Kapitel 6)	Verkarstungs- Einheiten (Kapitel 7)	Gefährdungs- bilder (Kapitel 8)	Baugrund- modelle (Kapitel 9)
Quartär										
Malm	Wildeggen-Fm.		100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1	Hb1
			200							
			300	Li2			Gm2	Ka2		
Dogger	Itenthal-Fm./ Hauptrogenstein/ Klingnau-Fm.									
	Passwang-Fm.			Li3		Hy2		Ka3	Gb2	
	Opalinuston		400	Li4	Te2	Hy3	Gm3	Ka4	Gb3	Hb2
Lias	Staffellegg-Fm.									

Fig. 1-5: Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Eigenschaften am Standort des Lüftungsschachts (Prognoseprofil)

2 Geologische und hydrogeologische Übersicht

Die Lagerebene des geologischen Tiefenlagers liegt vollumfänglich im Opalinuston (Fig. 2-1). Dieser ist im Untersuchungsgebiet rund 120 m mächtig und die Lagerebene liegt zwischen 310 und 470 m unterhalb der Geländeoberfläche Fig. 6-6. Der Opalinuston ist eine sedimentäre Gesteinseinheit, bestehend aus siltigen und sandigen Tonsteinen und Tonmergeln. Er zeichnet sich unter anderem durch seine sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit und seiner Fähigkeit zur Selbstabdichtung aus.

Der zur Erschliessung der Lagerebene geplante (Betriebs-)Zugangstunnel verläuft ebenfalls im Opalinuston (Fig. 2-2). Nur im Portalbereich des Stichtunnels werden noch die Gesteine des Doggers oberhalb des Opalinustons (Hauptrogenstein, Klingnau- und Passwang-Formation) durchfahren (Fig. 2-3). Demgegenüber durchörtert der Lüftungsschacht eine rund 420 m mächtige Abfolge von verschiedenen Sedimentgesteinen. Dies sind von der Oberfläche bis zur Lagerebene:

- rund 17 m Lockergesteine des Quartärs
- eine rund 295 m mächtige Abfolge von Mergel-, Kalkmergel- und Kalksteinen des Malms (Wildeggen-Formation) und der oberen Bereiche des Doggers (Hauptrogenstein, Klingnau-Formation)
- eine rund 30 m mächtige Abfolge von Mergel- und Tonsteinen der Passwang-Formation
- und die Tonsteine des Opalinustons

Die in den TBO ebenfalls zum Teil angebohrten höherliegenden Gesteinseinheiten (Molasse und «Malmkalke») werden durch die Zugangsbauwerke nicht durchfahren.

Die vorgefundene lithostratigraphische Abfolge in den TBO des Standortgebiets ist vergleichbar (Fig. 2-1). Im Standortgebiet verläuft der Faziesübergang zwischen Hauptrogenstein im Westen und Klingnau-Formation im Osten. In diesem Übergangsbereich liegen der Hauptrogenstein und die Klingnau-Formation miteinander verzahnt vor. Dabei ist der Hauptrogenstein, sofern vorhanden, eher geringmächtig resp. als einzelne Bänke ausgebildet (BOZ1-1 vs. BOZ2-1). Der Lüftungsschacht und der Portalbereich des Stichtunnels liegen in diesem Übergangsbereich.

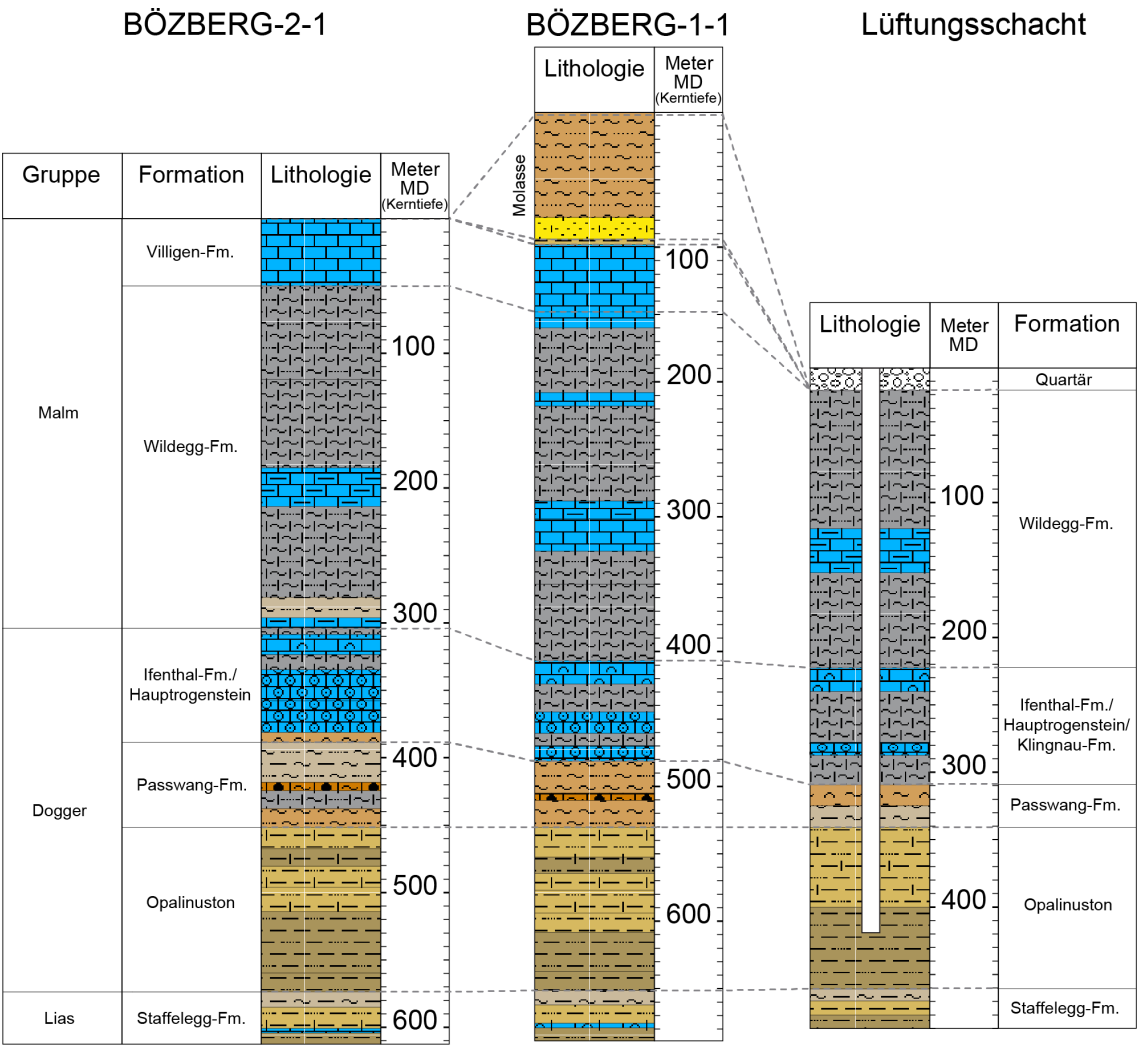


Fig. 2-1: Lithostratigraphischen Einheiten in den TBO und Prognose am Standort des Lüftungsschachts

Die Molasse und die Villigen-Formation werden beim Bau des Tiefenlagers nicht durchörtert
Der (Betriebs-)Zugangstunnel verläuft vollständig im Opalinuston, der Lüftungsschacht beginnt in der Wildeggen-Formation und die Bauwerke auf Lagerebene liegen vollständig im Opalinuston.

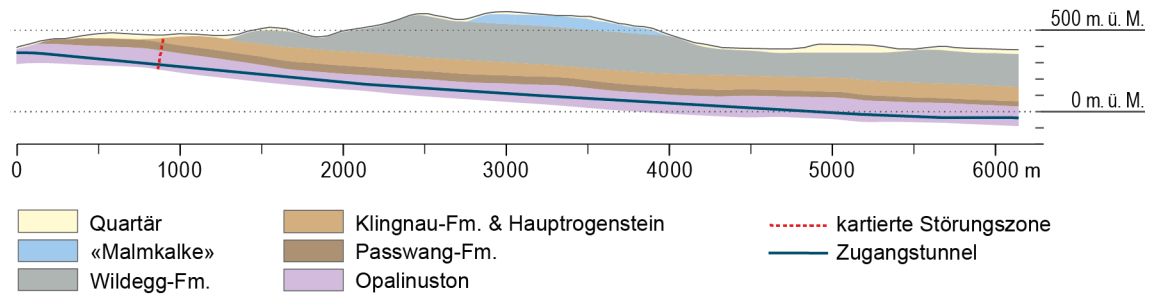


Fig. 2-2: Geologischer Schnitt entlang des (Betriebs-)Zugangstunnels, der vollständig im Opalinuston verläuft

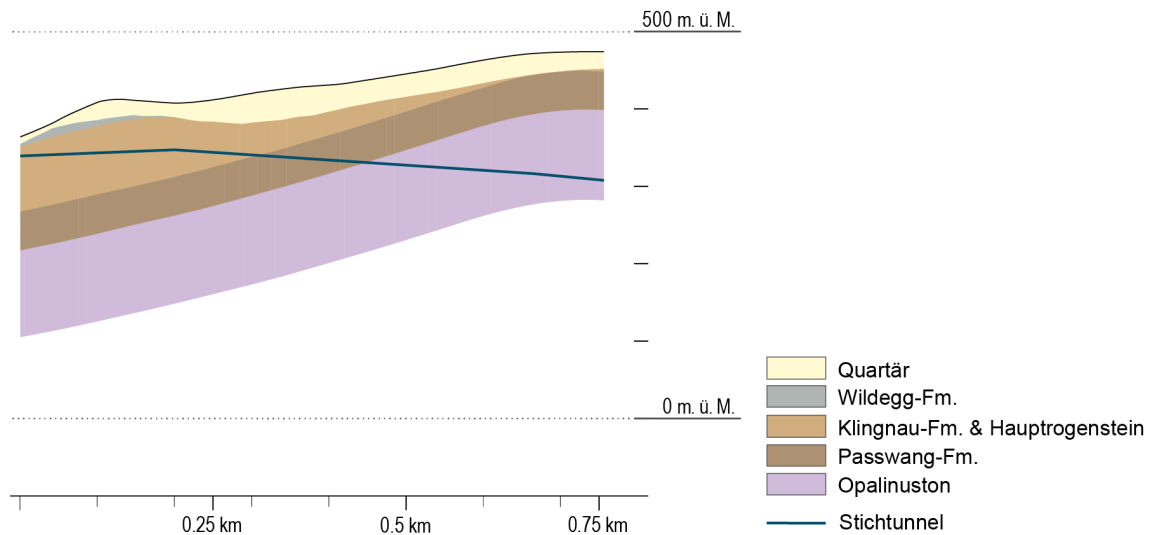


Fig. 2-3: Geologischer Schnitt entlang des Stichtunnels

Aus tektonischer Sicht liegt das Standortgebiet Jura Ost innerhalb der «Vorfallenzzone» des östlichen Tafeljuras zwischen der Jura-Hauptüberschiebung im Süden und der Mandach-Überschiebung im Norden (Nagra 2014a).

Grundsätzlich sind im Untersuchungsgebiet nur wenige, seismisch kartierte Störungszone vorhanden. Im Bereich der Bauwerksachsen durchörtert nur der (Betriebs-)Zugangstunnel eine kartierte Störungszone (Fig. 2-2, Kapitel 4). Diese ist im geologischen Atlas ausgeschieden (Bitterli et al. 2000). Es ist wahrscheinlich, dass weitere, seismisch nicht kartierte Störungszone vorkommen (vgl. Kap. 4.3).

Die Schichten fallen generell sehr flach nach SSE ein.

Aus hydrogeologischer Sicht stellen die Wildegge-Formation und der Dogger oberhalb der Passwang-Formation einen Aquitard mit möglichen Wasserwegsamkeiten entlang von Trennflächen in karbonatreichen Abschnitten über der Lagerebene dar (Fig. 2-4).

Da der Hauptrogenstein im Bereich des Lüftungsschachts eher geringmächtig und mergelig ausgebildet ist, wird eine geringere hydraulische Durchlässigkeit erwartet als beim westlicher vorkommenden, mächtigeren und karbonatreicheren Hauptrogenstein. Im für die Zugänge relevanten Bereich kann der Hauptrogenstein daher nur bedingt als eigentlicher Aquifer bezeichnet werden.

Die karbonatreichen Gesteinsschichten in der Wildegg-Formation (z.B. Gerstenhübel-Bank) sowie der Hauptrogenstein können aus lithologischer Betrachtung mindestens lokal verkarstungsfähig sein. Jedoch gibt es aus den TBO weder Hinweise auf eine Verkarstung dieser Schichten noch ist eine solche anhand speläogenetischer Überlegungen zu erwarten.

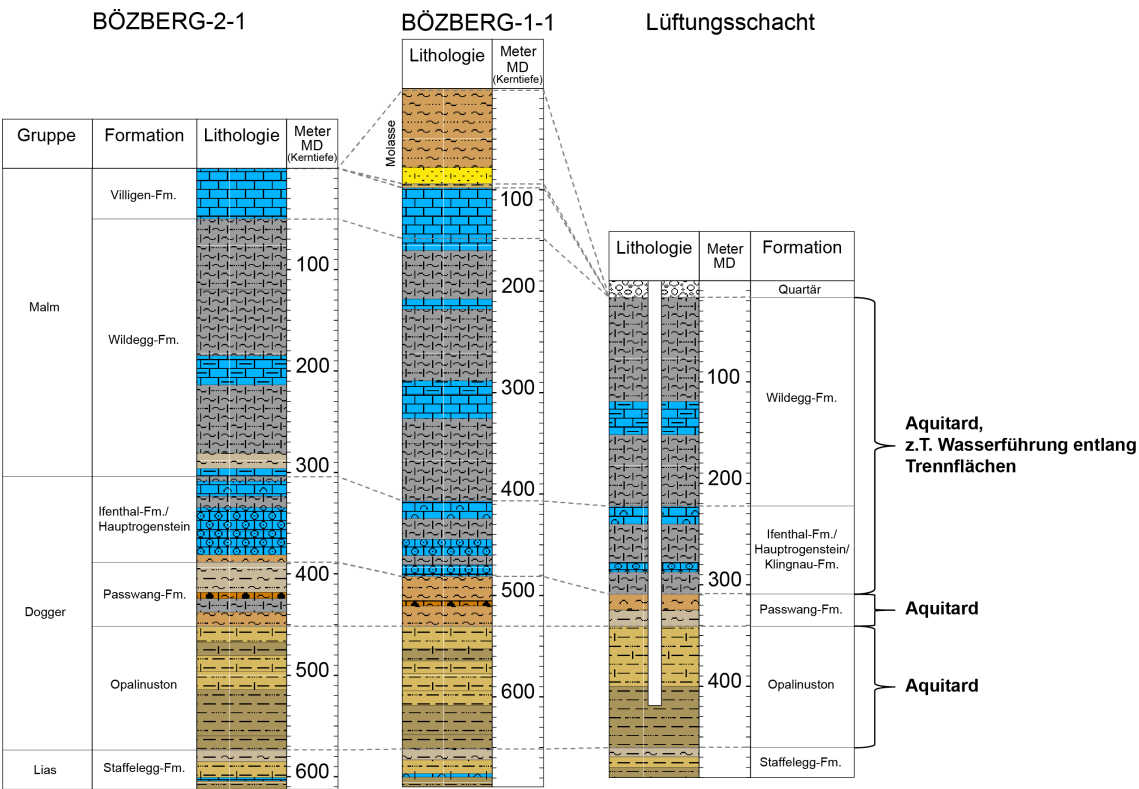


Fig. 2-4: Aquifere und Aquitarde oberhalb des Opalinustons

3 Beschreibung der lithologischen Einheiten

Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteinseinheiten werden aus ingenieurgeologischer Sicht in Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften zusammengefasst. Die Einteilung der Einheiten lehnt sich an die lithostratigraphische Einteilung gemäss (Jordan & Deplazes 2019) an. Wo es als sinnvoll erachtet wird, werden lithostratigraphische Einheiten mit aus ingenieurgeologischer Sicht ähnlichen Gesteinseigenschaften oder geringmächtige Einheiten zusammengefasst. Dadurch ergeben sich folgende lithologischen Einheiten (Fig. 3-1):

- Quartär: Das Quartär hat am Standort des Lüftungsschachtes eine Mächtigkeiten von rund 15 m. Das Quartär wird in den Berichten zu den Oberflächenanlagen behandelt.
- Li1: entspricht der Wildegg-Formation.
- Li2: entspricht dem Hauptrogenstein und der Klingnau-Formation.
- Li3: entspricht der Passwang-Formation.
- Li4: entspricht dem Opalinuston.

Die lithologische Einheit Li1 (Wildegg-Formation) wird nur beim Bau des Lüftungsschachts angetroffen, Während die Einheiten Li2 und Li3 (Dogger oberhalb des Opalinustons) sowohl im Lüftungsschacht als auch im Stichtunnel durchörtert werden. Der Lüftungsschacht und auch der Stichtunnel enden in der Einheit Li4 (Opalinuston). Die Lagerebene und der (Betriebs-)Zugangstunnel liegen beide vollständig in der Einheit Li4.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der lithologischen Einheiten dienen weitgehend die Dossiers III (Lithostratigraphie) und X (Petrophysikalische Log Analyse) der TBO-Datenberichte (BOZ1-1, BOZ2-1).

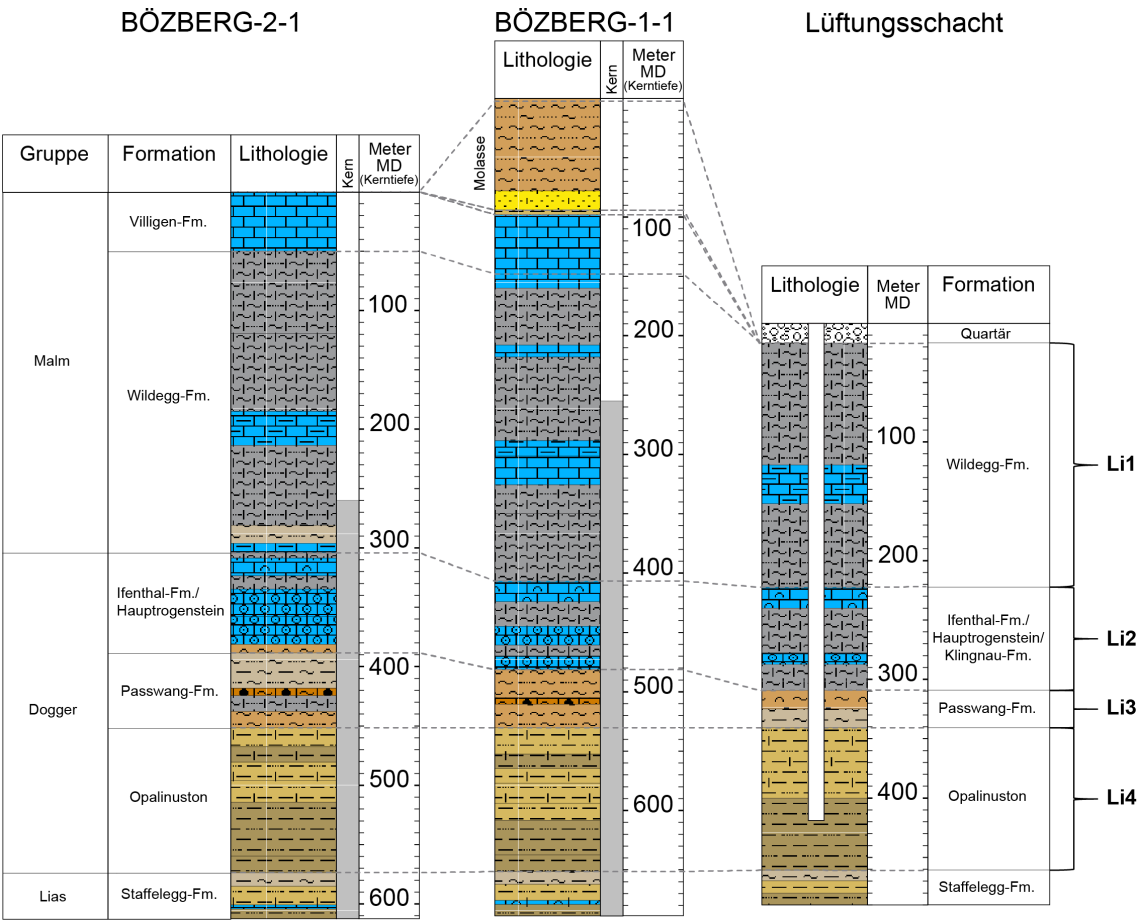


Fig. 3-1: Gegenüberstellung der lithologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Betrachtung und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

3.1 Lithologische Beschreibung

Im Folgenden werden die Gesteinseinheiten zusammenfassend beschrieben. Für Details über die lithologischen Kernbeschreibungen, Kernfotos, Probenahmen und Laborversuche sowie Bohrlochmessungen sei auf die entsprechenden Datenberichte der TBO (Dossiers II, III, VIII und X) verwiesen (BOZ1-1, BOZ2-1).

Die Prognosen der Schichtmächtigkeiten und des Schichteinfallens beruhen auf dem geologischen Schichtmodell (Stand Februar 2022).

3.1.1 Li1 (Wildegg-Formation)

Die lithologische Einheit Li1 entspricht der Wildegg-Formation (Fig. 3-2).

Die dominierende Lithologie der Wildegg-Formation ist ein grauer, dünnbankiger Kalk- und Tonmergel, der mit meist tonigen, an der Basis der Einheit glaukonitischen, mikritischen Kalksteinschichten durchsetzt ist. Vereinzelt werden auch gering mächtige karbonatreiche Lagen angetroffen (z. B. Gerstenhübel-Bank).

Im Bereich des Lüftungsschachts wird die Wildegg-Formation auf einer Strecke von rund 205 m aufgeföhren.



Fig. 3-2: Kernbeispiel der Wildegg-Formation aus BOZ1-1

3.1.2 Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)

Die lithologische Einheit Li2 entspricht den miteinander verzahnt vorliegenden lithostratigraphischen Einheiten des Hauptrogensteins und der Klingnau-Formation (Fig. 3-3).

Im Bereich des Schachtstandorts verläuft der Fazieswechsel vom karbonatreichen Hauptrogenstein zur mergeligen Klingnau-Formation mit entsprechender «Verzahnung» (Fig. 3-1) (z. B. Nagra 2014c, Gonzalez & Wetzel 1996).

Der Hauptrogenstein besteht überwiegend aus grob geschichteten, oolithischen, untergeordnet sparitischen und onkolithischen Plattformsedimenten mit mergeligen Zwischenschichten, letztere mit wenigen oder keinen Ooiden. Im Bereich von BOZ1-1 und des Lüftungsschachts liegt der Hauptrogenstein tonreicher vor; im Gegensatz zu BOZ2-1, wo die Einheit karbonatreicher ist.

Dem gegenüber besteht die Klingnau-Formation aus einem Wechsel von cm- bis dm-mächtigen Mergeln, Tonsteinen und bioturbirten, bioklastischen Kalksteinen mit oolithischen Einschaltungen, die von der Hauptrogenstein-Plattform ausgehen.

Im Bereich des Lüftungsschachts weist die Einheit Li2 eine Mächtigkeit von rund 85 m auf.

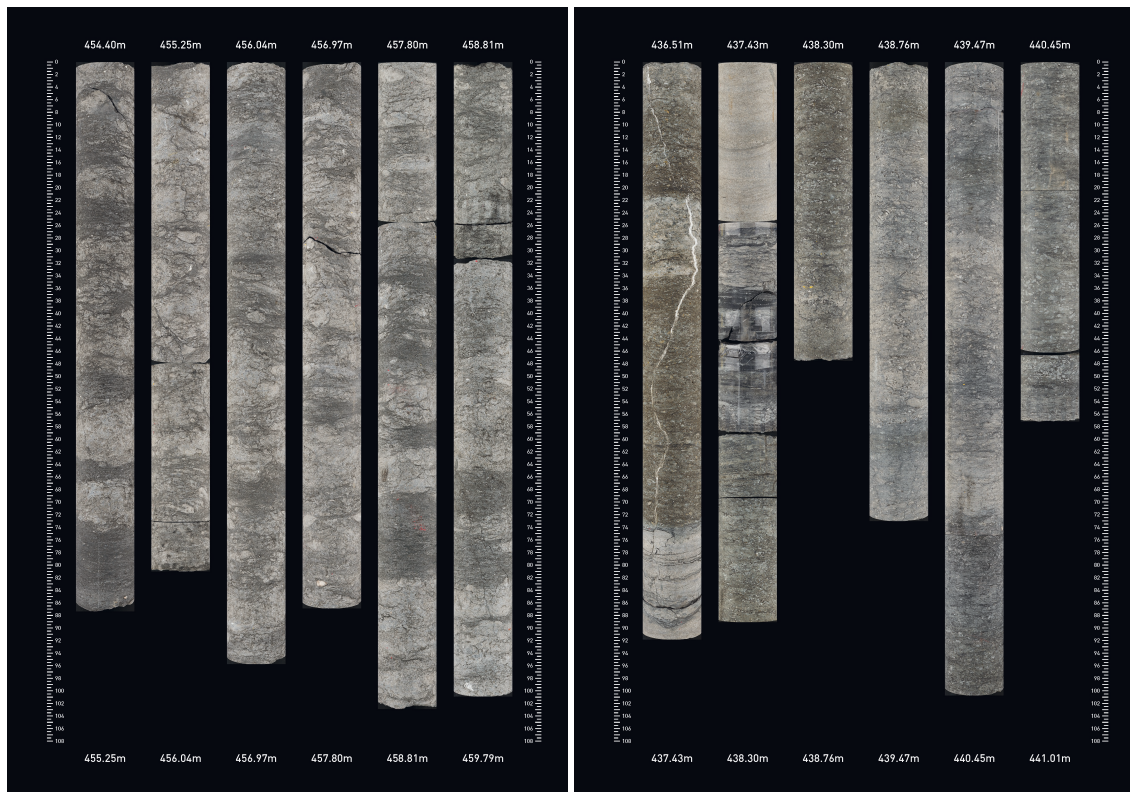


Fig. 3-3: Kernbeispiele des Hauptrogensteins (links) und der Klingnau-Formation (rechts) aus BOZ1-1

3.1.3 Li3 (Passwang-Formation)

Die lithologische Einheit Li3 entspricht der Passwang-Formation (Fig. 3-4).

Bei der Passwang-Formation handelt es sich um eine Abfolge von dünn bis grob geschichteten, hell- bis dunkelgrauen, leicht bräunlich- oder rötlich-grauen siltig-sandigen Mergeln. Vereinzelt sind siltige Tonsteine, (z. T. eisenooide) Kalkmergel und Kalksteinbänke anzutreffen.

Im Bereich des Lüftungsschachts weist die Einheit Li3 eine Mächtigkeit von rund 30 m auf.

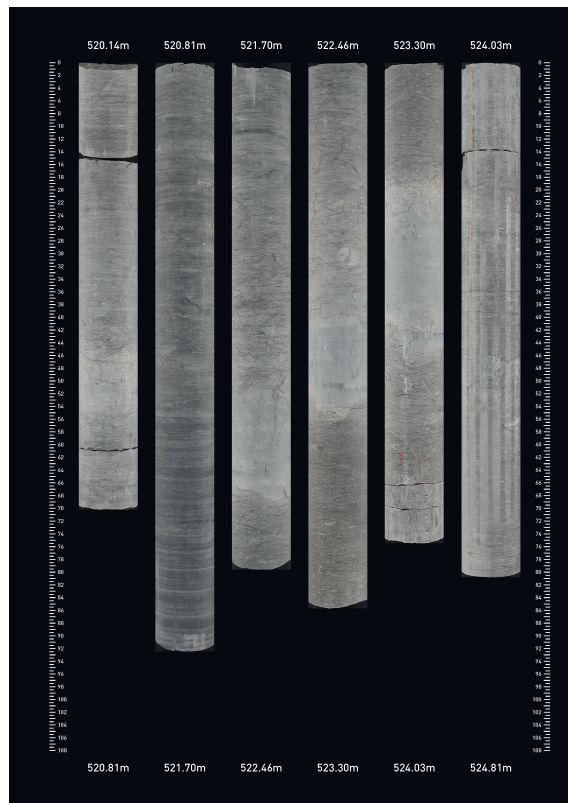


Fig. 3-4: Kernbeispiel der Passwang-Formation aus BOZ1-1

3.1.4 Li4 (Opalinuston)

Die lithologische Einheit Li4 entspricht der stratigraphischen Einheit Opalinuston (Fig. 3-5).

Der Opalinuston setzt sich v.a. aus einer Serie dünn geschichteter, z-T. siltig-sandiger Tonsteine zusammen. Es können mehrere Untereinheiten unterschieden werden, aufgrund ihrer Petrographie und Fazies (z. B. Mazurek & Aschwanden 2020). Im Rahmen dieses Berichts werden diese Untereinheiten nicht differenziert betrachtet.

Die Mächtigkeit der Einheit weist in den TBO Unterschiede von wenigen Metern auf (BOZ1-1 121 m, BOZ2-1 122 m). Im Bereich der geplanten Schachtanlage hat der Opalinuston eine Mächtigkeit von rund 120 m.



Fig. 3-5: Kernbeispiel des Opalinuston aus BOZ1-1

3.2 Mineralgehalt der lithologischen Einheiten

Für die bautechnische Beurteilung sind die Mineralgehalte an Quarz, Karbonaten und Tonmineralen wichtig. Die aus den TBO entnommenen Gesteinsproben (TBO-Datenberichte Dossier VII) zeigen eine gute Korrelation mit den Mineralbestimmungen anhand der MultiMin-Daten (TBO-Datenberichte Dossier X), weshalb letztere für die Auswertung der Mineralgehalte der lithologischen Einheiten verwendet werden.

Die Mineralgehalte der lithologischen Einheiten in den TBO sind weitgehend vergleichbar.

Für die Beurteilung der zu erwartenden Mineralgehalte entlang der Bauwerksachsen werden die Werte aus BOZ1-1 übernommen (Fig. 3-6).

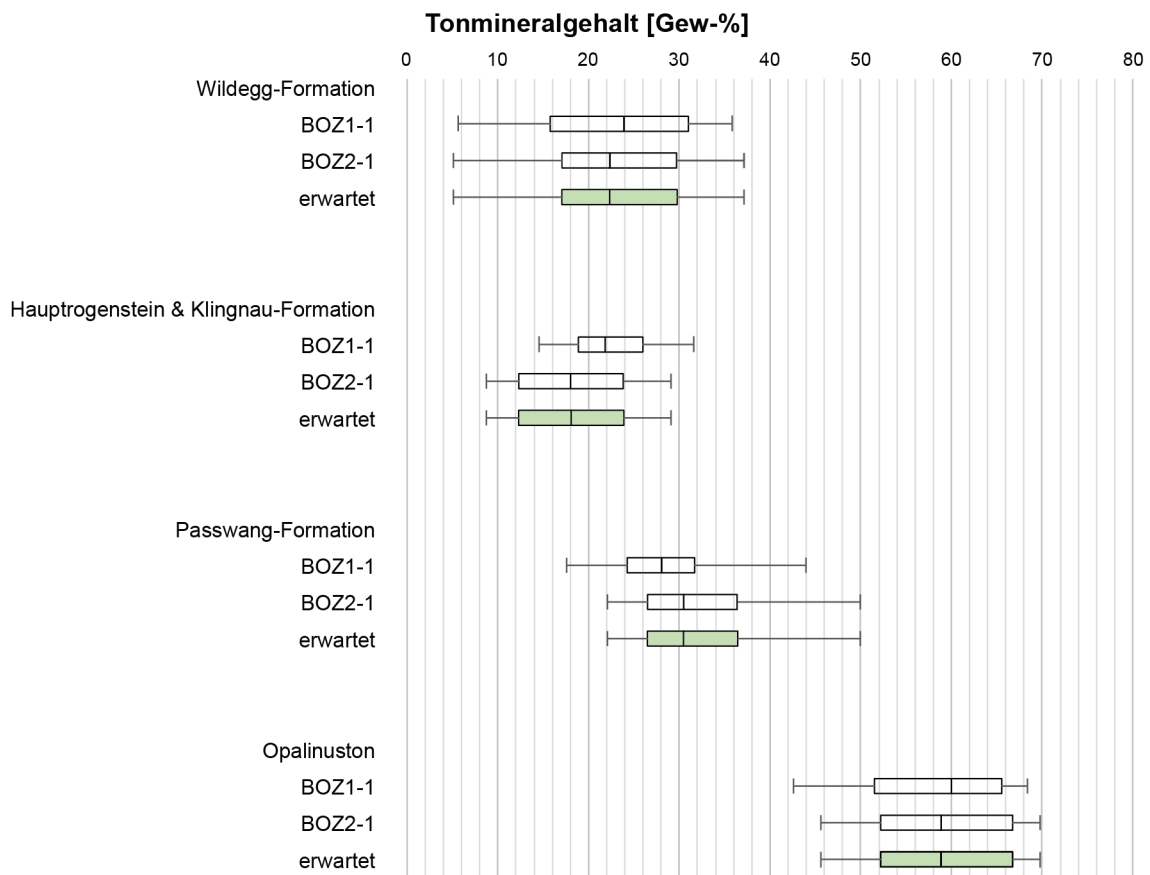


Fig. 3-6: Vergleich des Tonmineralgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO

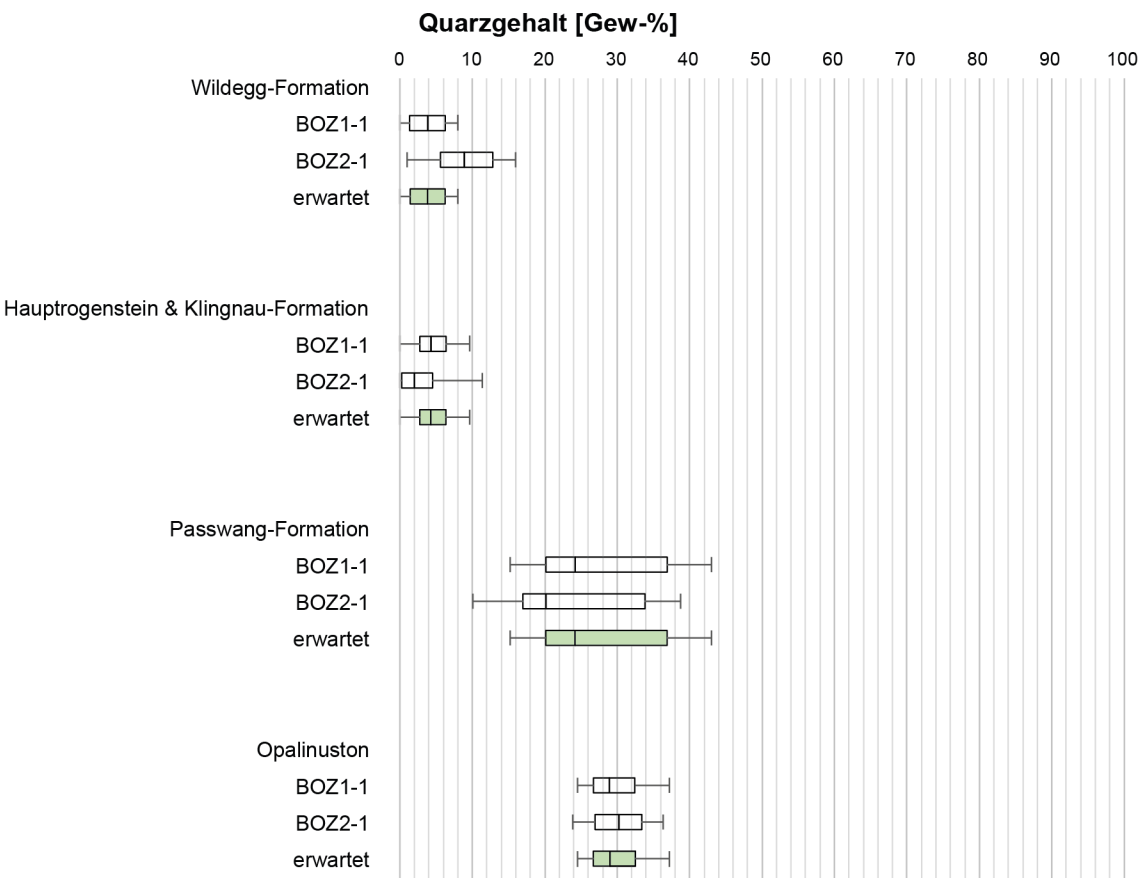


Fig. 3-7: Vergleich des Quarzgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO

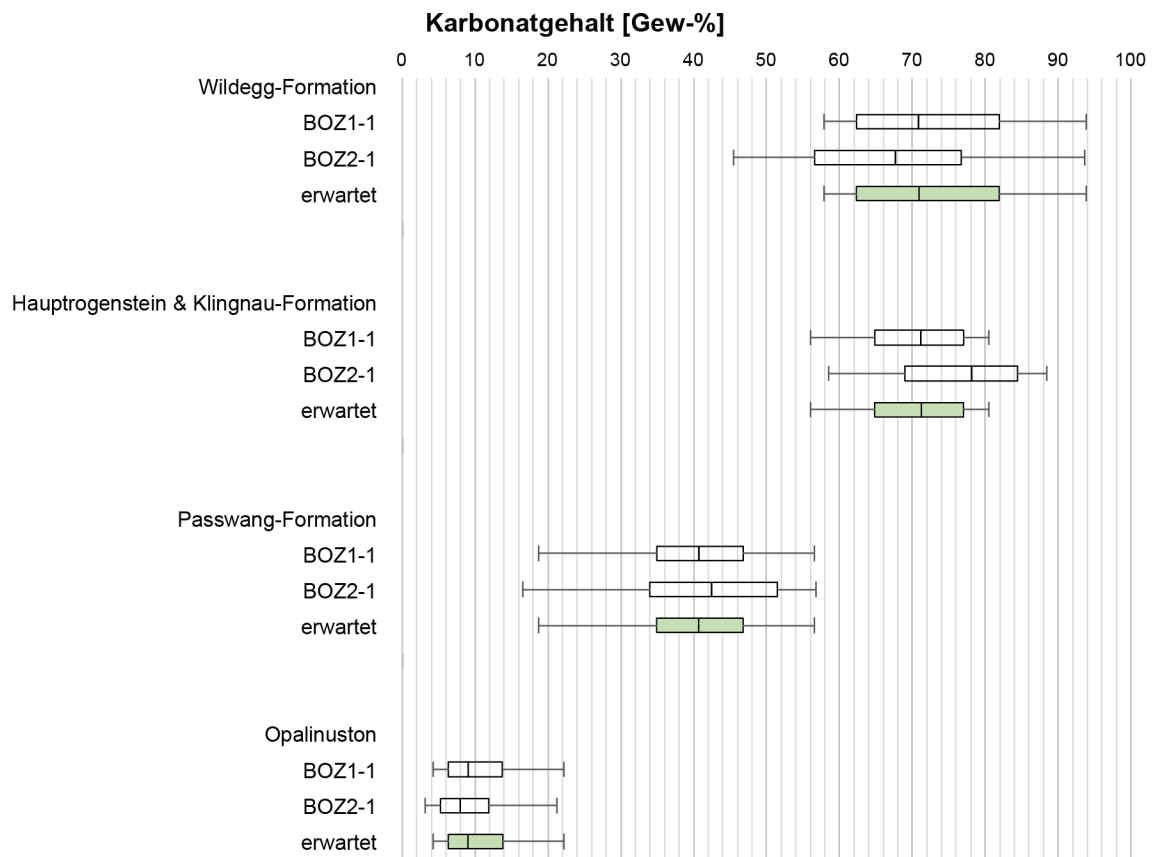


Fig. 3-8: Vergleich des Karbonatgehaltes der lithologischen Einheiten in den TBO

3.3 Tabellarische Zusammenfassung der lithologischen Einheiten

3.3.1 Li1 (Wildegge-Formation)

Li1 (Wildegge-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Mehrheitlich dünn geschichtete Kalk- und Tonmergel mit einzelnen, teilweise mergeligen Kalkbänken					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	206	20				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	58 %	62 %	71 %	82 %	94 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	1 %	4 %	6 %	8 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	6 %	16 %	24 %	31 %	36 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Neben Quarz können als harte Minerale auch Feldspäte vorkommen.					Hinweisdaten

3.3.2 Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)

Li2 (Hauptrogenstein & Klingnau-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Mergel und Kalke, insbesondere in den obersten Partien mit Eisenoolith, im Westen vorwiegend oolithische und bioklastische Kalke und kalkige Mergel (Hauptrogenstein), gegen Osten zunehmend tonige und kalkige Mergel (Klingnau-Fm.)					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	87	10				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	56 %	65 %	71 %	77 %	81 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	3 %	4 %	6 %	10 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	15 %	19 %	22 %	26 %	32 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Neben Quarz können als harte Minerale auch Feldspäte vorkommen.					Hinweisdaten

3.3.3 Li3 (Passwang-Formation)

Li3 (Passwang-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Mehrheitlich dünn geschichtete, siltige, tonige und kalkige Mergel mit einzelnen Zwischenlagen aus z. T. eisenoolithischen Kalken und Mergeln sowie siltigem Tonstein					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert		Ungewissheit [±]			
	32		10			
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	19 %	35 %	41 %	47 %	57 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	15 %	20 %	24 %	37 %	43 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	18 %	24 %	28 %	32 %	44 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Neben Quarz können als harte Minerale auch Feldspäte vorkommen.					Hinweisdaten

3.3.4 Li4 (Opalinuston)

Li4 (Opalinuston)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Dünn geschichtete, siltige und sandige Tonsteine und Tonmergel					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	120	10				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	4 %	6 %	9 %	14 %	22 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	25 %	27 %	29 %	32 %	37 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	43 %	52 %	60 %	66 %	68 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 3 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Neben Quarz können als harte Minerale auch Feldspäte vorkommen.					Hinweisdaten

4 Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der Störungszonen

Im ingenieurgeologischen Kontext wird «Trennfläche» als Sammelbegriff für diskrete Flächen verwendet, welche die hydrogeologische und/oder mechanische Kontinuität eines Gesteinskörpers unterbrechen. Anhand ihrer geomechanischen Bedeutung werden Trennflächen nach SIA 199 (SIA 2015) weiter unterteilt in effektive und potenzielle Trennflächen.

- Als «effektive Trennfläche» wird eine Fläche bezeichnet, in welcher der Zusammenhalt des Gesteins vollständig aufgehoben ist.
- Als «potenzielle Trennfläche» wird eine Fläche bezeichnet, in welcher eine Schwächung im Zusammenhalt des Gesteins vorhanden ist.

In diesem Kapitel werden nur die effektiven Trennflächen behandelt.

Trennflächen mit ähnlichen Orientierungen werden in «Trennflächensysteme» zusammengefasst. Dabei ist es üblich, dass in einem Gebirgsbereich mehrere, sich überlagernde Trennflächensysteme vorkommen.

Bedingt unter anderem durch die geomechanischen Gesteinseigenschaften und die tektonische Geschichte des Gebirges ist die räumliche Verteilung von Trennflächen und ihrer Trennflächeneigenschaften oft heterogen. Dennoch lassen sich üblicherweise Gebirgsbereiche mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften unterscheiden. So werden im Untersuchungsgebiet insbesondere anhand der Trennflächenabstände sowie der Öffnungsweiten zwei Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften unterschieden (Fig. 4-1):

- Te1 fasst die Wildegg-Formation und die Dogger-Einheiten oberhalb des Opalinustons zusammen.
- Te2 entspricht dem Opalinuston.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der Gebirgsdurchtrennung dienen die Dossiers V (Strukturgeologie) der TBO-Datenberichte (BOZ1-1, BOZ2-1) sowie die seismisch kartierten Störungszonen (Stand August 2023), welche in Nagra NAB 23-17 dokumentiert werden.

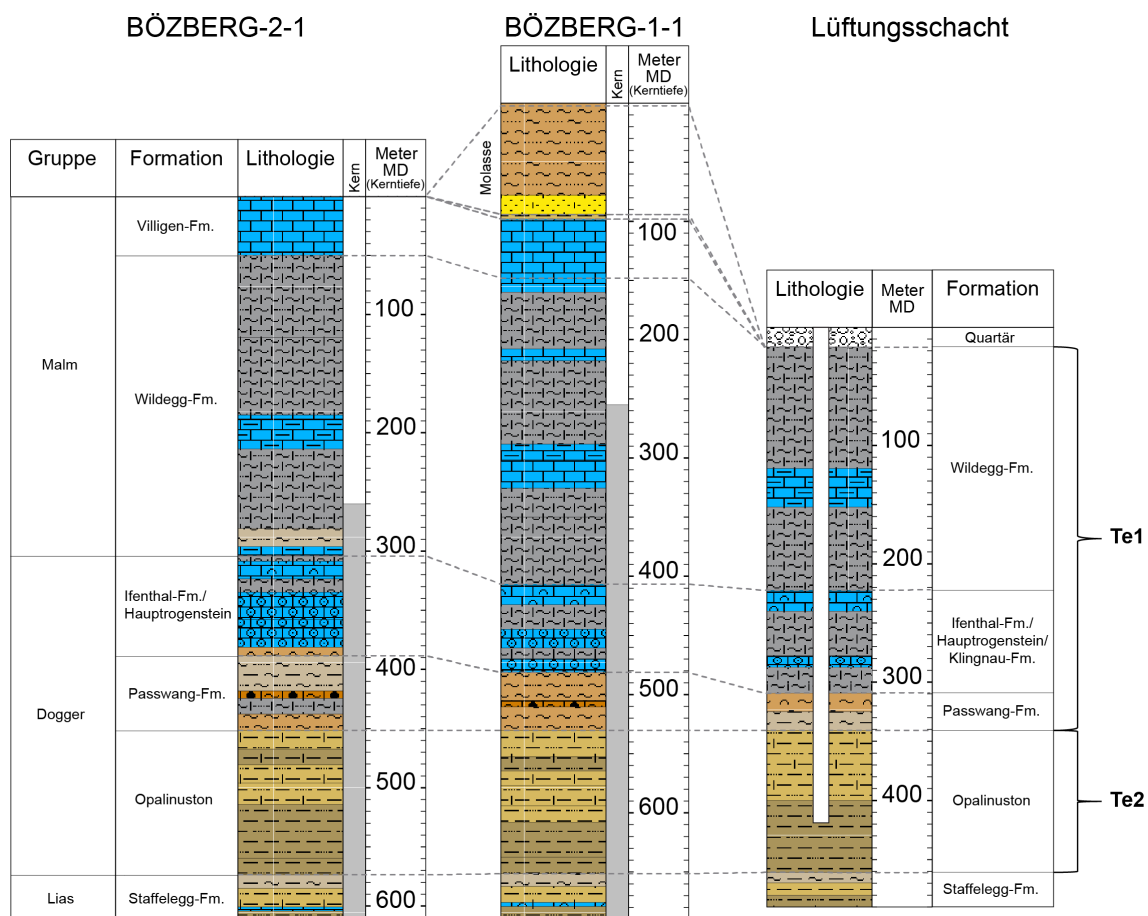


Fig. 4-1: Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

Als «Störungszone» wird in diesem Bericht eine räumlich begrenzte Ansammlung von Trennflächen verstanden, die in Zusammenhang mit lokalisierten tektonischen Relativbewegungen stehen. Während sich grosse, regionale Störungszone über mehrere Gesteinseinheiten erstrecken und Versatzbeträge von mehreren Dekametern aufweisen können, sind Ausdehnung und Versatz von kleinmassstäblichen Störungszone, wie sie z. T. in den Tiefbohrungen beobachtet wurden, deutlich geringer. Bedingt durch die geomechanischen Gesteinseigenschaften und die tektonische Geschichte können einzelne Störungszone zudem einen unterschiedlichen internen Aufbau aufweisen resp. kann sich dieser entlang einer Störungszone verändern.

Störungszone werden in der ingenieurgeologischen Betrachtung als eigene Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften verstanden. Anhand ihrer seismischen Kartierbarkeit wird in diesem Bericht unterschieden zwischen:

- seismisch nicht kartierten Störungszone: Diese Störungszone konnten in der Seismikinterpretation nicht kartiert werden.

Im Rahmen dieses Berichts wird die Lage von seismisch nicht kartierten Störungszone als zufällig betrachtet.

- seismisch kartierte Störungszone: Diese Störungszone sind in der Seismikinterpretation kartiert worden.

Lediglich der geplante (Betriebs-)Zugangstunnel quert eine kartierte Störungszone (Fig. 4-2). Diese ist im geologischen Atlas (Bitterli et al. 2000) ausgewiesen. Der Stichtunnel, der Lüftungsschacht und die Bauwerke auf Lagerebene durchfahren auf dem Niveau des Opalinustons und der darüber liegenden Einheiten keine kartierten Störungszone.

Bei der kartierten Störungszone handelt es sich nicht um eine in der Seismikinterpretation kartierte Störungszone, da die 3D-Seismik den nördlichen Teil des (Betriebs-)Zugangstunnels nicht abdeckt. Die Störungszone wurde aus dem geologischen Atlas (Bitterli et al. 2000) übernommen.

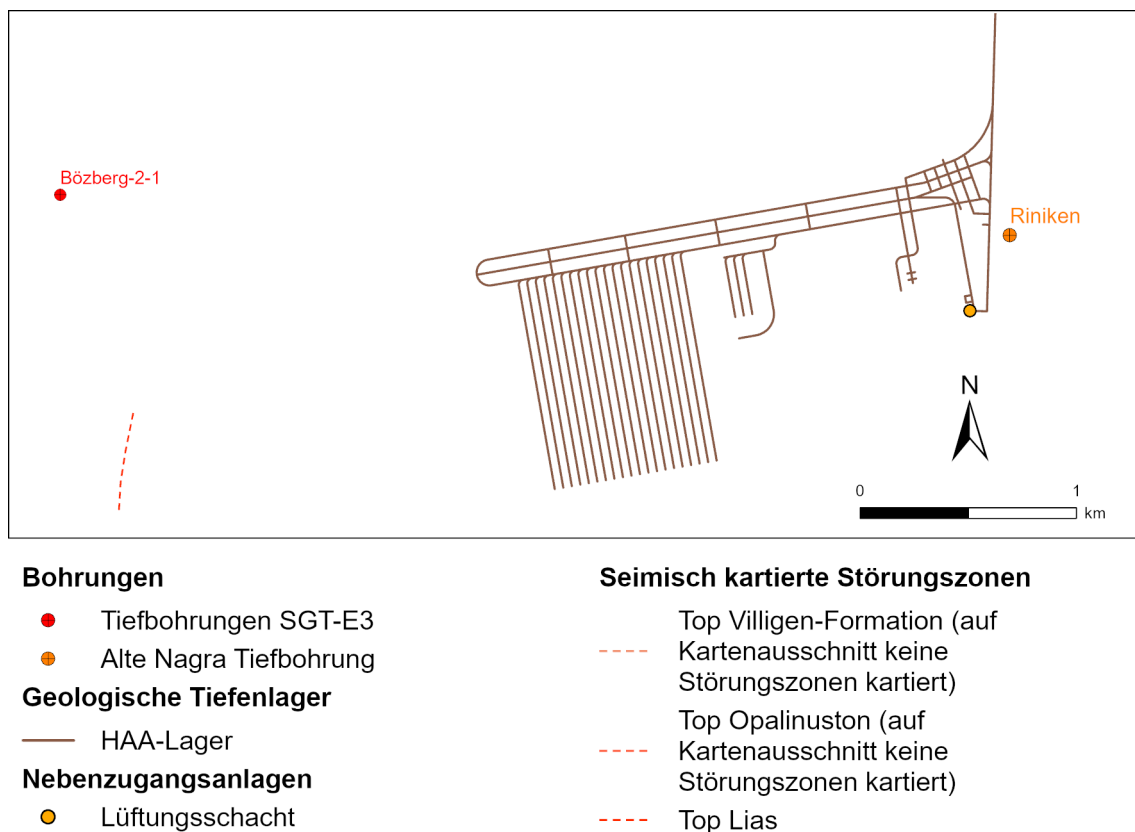


Fig. 4-2: Seismisch kartierte Störungszone im Bereich der geplanten HAA-Lagerstollen

Im Bereich der geplanten Bauwerke auf Lagerebene als auch des Lüftungsschachts konnten keine Störungszone seismisch kartiert werden. Nur der (Betriebs-)Zugangstunnel durchörtert eine kartierte Störungszone (vgl. Fig. 2-2).

4.1 Beschreibung der Trennflächensysteme

Die Beschreibung der Trennflächensysteme in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften (Te1 und Te2) erfolgt anhand der Beobachtungen in den gekernten Bohrabschnitten der TBO (Fig. 4-1) (BOZ1-1, BOZ2-1). Es liegt in der Natur der Trennflächen, dass deren Eigenschaften (insbesondere Trennflächenabstände) räumlich eine grosse Heterogenität aufweisen. Deshalb werden die Beobachtungen in der Bohrung BOZ1-1 bei der Ableitung der zu erwartenden Trennflächeneigenschaften stärker gewichtet, da diese näher am Schachtstandort liegt.

Bezüglich der ingenieurgeologischen Bewertung der Trennflächen ist zu beachten, dass bei den Strukturaufnahmen im Rahmen der TBO-Kampagne die Trennflächen mit einem Detaillierungsgrad erfasst wurden, der bei ingenieurgeologischen Erkundungsarbeiten für Untertagebauten selten angewendet wird. So wurde an den Bohrkernen eine grosse Anzahl von Trennflächen miterfasst, welche aus ingenieurgeologischer Sicht als unbedeutend oder als «potenzielle Trennflächen» zu bewerten sind und die bei der ingenieurgeologischen Trennflächenanalyse nicht berücksichtigt werden (z. B. Stylolithen). Deshalb wurden für die Betrachtungen und Auswertungen in diesem Kapitel, von den durch die detaillierte Strukturaufnahmen dokumentierten Trennflächen, nur die «effektiven Trennflächen» berücksichtigt. Die Unterscheidung zwischen «effektiven Trennflächen» und «potenziellen Trennflächen» erfolgte anhand der Kernaufnahmen, den Image-Logs sowie den Sonic-Logs.

Trennflächen, die zu Störungszonen gehören, werden in Kap. 4.3 berücksichtigt.

Für Trennflächeneigenschaften der detaillierten Strukturaufnahmen sei auf die entsprechenden Berichte der TBO-Kampagne verwiesen (TBO-Datenberichte Dossier V).

Die Trennflächensysteme werden mit dem Buchstaben K (K1, K2 etc.) und einer Indexzahl bezeichnet, wobei das Haupttrennflächensystem "K1" ist (Tab. 4-1).

Tab. 4-1: Vergleich der Anzahl der angetroffenen effektiven Trennflächen in den TBO

BOZ1-1	Anzahl Trennflächen					Länge des Abschnitts [m]
	K1 195/15 (± 20°)	K2 185/85 (± 20°)	K3 010/35 (± 20°)	Keine Zuordnung	Total	
Te1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	41	2	11	24	78	382.3 (Kernstrecke 275.3 m)
Te2 (Opalinuston)	12	5	8	12	37	121.1
Total	12	5	8	12	37	
BOZ2-1	Anzahl Trennflächen					Länge des Abschnitts [m]
	K1 190/60 (± 20°)	K2 195/20 (± 20°)	K3 015/55 (± 20°)	Keine Zuordnung	Total	
Te1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	14	22	11	13	60	401.9 (Kernstrecke 191.4 m)
Te2 (Opalinuston)	10	15	6	7	38	122.0
Total	10	15	6	7	38	

4.1.1 Orientierung der Trennflächensysteme

Die Orientierung der Trennflächensysteme ist in den einzelnen TBO leicht unterschiedlich. Für die Beurteilung der erwarteten Orientierungen wurden die Orientierungen der Bohrung BOZ1-1 stärker gewichtet. Es lassen sich drei Trennflächensysteme unterteilen:

- K1 mittleres Einfallen 195/15 ($\pm 20^\circ$)
- K2 mittleres Einfallen 185/85 ($\pm 20^\circ$)
- K3 mittleres Einfallen 015/35 ($\pm 20^\circ$)

Zur Beurteilung der Häufigkeitsverteilung wurde die Verfälschung der Auftretenshäufigkeit («Sampling-Bias») von steilstehenden Trennflächen (Trennflächen, die im spitzen Winkel zur Bohrachse orientiert sind, werden in Bohrungen seltener erfasst) mit dem Ansatz von Terzaghi korrigiert (Terzaghi 1965, Wathugala et al. 1990).

Zur Bestimmung der Orientierung der Trennflächensysteme wurden die Trennflächen einheitsübergreifend betrachtet. Die Mehrheit der Trennflächen wurde in den «Malmkalken» beobachtet. Die Trennflächenanzahl in den anderen Einheiten ist meist zu gering, um diese sinnvoll auszuwerten (Tab. 4-1). Folglich wird angenommen, dass am geplanten Schachtstandort die Trennflächensysteme in allen Einheiten gleich orientiert sind.

4.1.2 Trennflächenabstände

Zur Bewertung der Trennflächenabstände werden die Abstände zwischen zwei aufeinander folgenden Trennflächen desselben Trennflächensystems entlang des Bohrkerns gemessen. Dabei wird angenommen, dass die benachbarten Trennflächen genügend gross sind, so dass sie sich orthogonal «überlappen». Die im Bohrkern gemessenen «scheinbaren Trennflächenabstände» werden anhand der Orientierung der Trennflächen korrigiert. Es werden nur Trennflächen verwendet, die nicht zu Störungszonen gehören.

Die geringe Anzahl an effektiven Trennflächen in den mergeligen und tonigen Gesteinseinheiten erlaubt es nur bedingt, eine quantitative Verteilung der Trennflächenabstände abzuleiten (Fig. 4-3).

Der Vergleich der Trennflächenabstände zwischen den TBO zeigt eine räumliche Variation. Dabei weisen die Trennflächensysteme in BOZ2-1 leicht kleinere Trennflächenabstände (insbesondere in Te1) auf (Fig. 4-3). Als Referenzbohrung zur Abschätzung der erwarteten Trennflächenabstände entlang der geplanten Bauwerksachsen wird BOZ2-1 verwendet. Dies, weil diese Trennflächenabstände kleiner sind als in BOZ1-1 (Konservativitätsüberlegung).

Da die Bandbreiten der Trennflächenabstände der einzelnen Haupttrennflächensysteme (K1 bis K3) in den einzelnen Einheiten vergleichbar sind (Fig. 4-3), wird für die geplanten Bauwerksachsen für alle drei Trennflächensysteme dieselbe Verteilung angenommen.

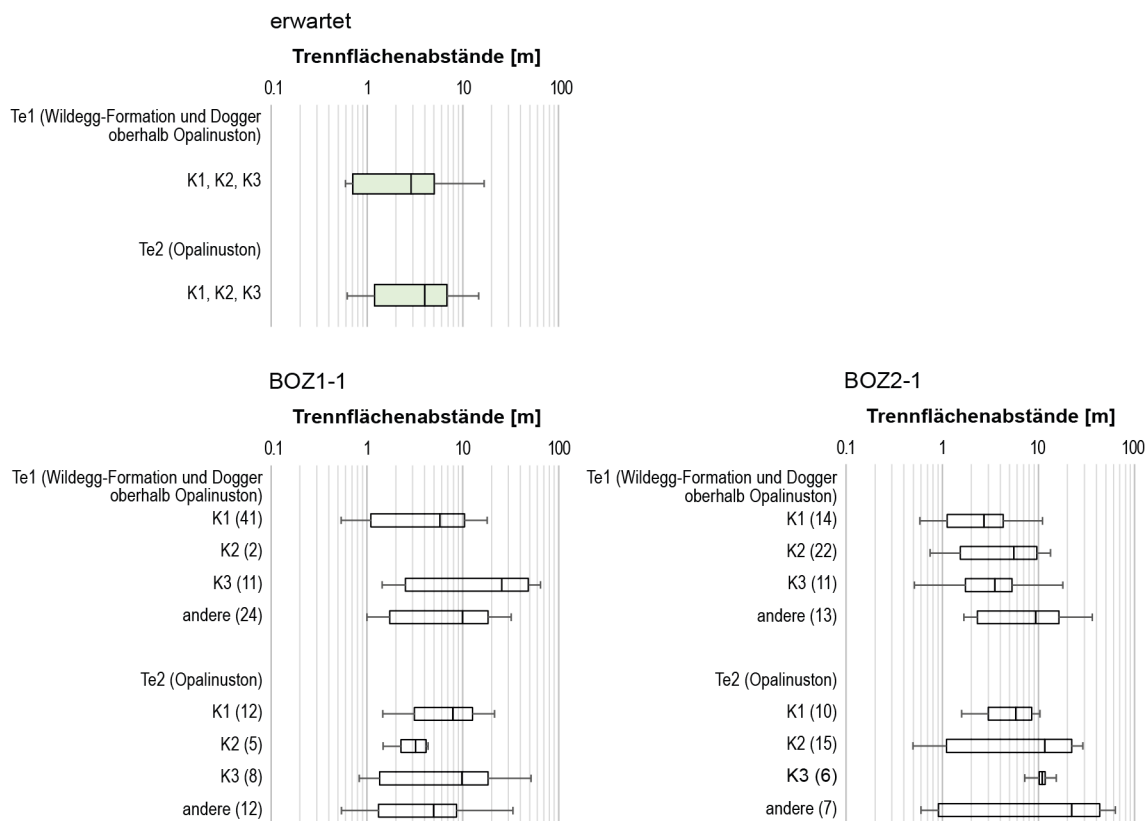


Fig. 4-3: Zusammenstellung der Trennflächenabstände der effektiven Trennflächen in den TBO sowie der erwarteten Trennflächenabstände am geplanten Schachtstandort

In Klammern ist die Anzahl berücksichtigter Trennflächen angegeben.

4.1.3 Öffnungsweite der Trennflächen

Die Öffnungsweite der Trennflächen wurde, wo dies möglich war, an den Bohrkernen direkt oder aus den Image-Log-Aufnahmen heraus gemessen. Zur Abschätzung der Bandbreiten werden die Messungen aus BOZ1-1 und BOZ2-1 gleichermaßen berücksichtigt.

Generell sind die in den Bohrungen angetroffenen Trennflächen geschlossen resp. weisen eine Öffnungsweite < 1 mm auf (Tab. 4-2). Diese Beobachtung passt mit den gemessenen, sehr geringen hydraulischen Durchlässigkeiten zusammen (Kapitel 5). Weiter kann kein Zusammenhang zwischen den Öffnungsweiten und den Hauptspannungsrichtungen abgeleitet werden (Kapitel 6). Deshalb wird in Tab. 4-2 nicht zwischen den einzelnen Trennflächensystemen unterschieden.

Trennflächen in den karbonatreichen Lagen (insbesondere Gerstenhübel-Bank in der Wildeg-Formation und der Haupttrogenstein) können durch Lösungsprozesse aufgeweitet sein.

Tab. 4-2: Erwartete Öffnungsweiten der Trennflächen entlang der geplanten Bauwerksachsen

	Öffnungsweite [mm]		
	P0.05	P0.5	P0.95
Te1 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	0	0	3
Te2 (Opalinuston)	0	0	0

4.1.4 Persistenz der Trennflächen

Aus den TBO können keine Angaben zur Persistenz der Trennflächen abgeleitet werden und Beobachtungen an Oberflächenaufrissen werden als wenig repräsentativ für die Verhältnisse in mehreren hundert Metern Tiefe beurteilt. Deshalb wird ohne Differenzierung nach Trennflächensystem oder lithologischen Gesteinseigenschaften eine Persistenz von 10 m (± 5 m) angenommen.

4.1.5 Zustand der Trennflächen

Der Zustand der Trennflächen wird anhand der Beobachtungen am Bohrkern beschrieben. Dabei wurden die Trennflächen aller beider TBO gleichermassen berücksichtigt (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Erwarteter Trennflächenzustand entlang der geplanten Bauwerksachsen

	Zustand der Trennflächen
Te1 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	Vereinzelt mit Tonverfüllungen
Te2 (Opalinuston)	Vereinzelt mit Tonverfüllungen

4.2 Beschreibung der Trennflächenkörper

Als Trennflächenkörper wird ein allseitig von Trennflächen begrenztes und mechanisch getrenntes Raumelement des Gebirges verstanden.

Zur Bestimmung der Trennflächenkörper werden die geometrischen Eigenschaften der drei dominanten Trennflächensysteme (K1, K2, K3) verwendet (Kap. 4.1.1). Dabei werden die Bandbreiten der Orientierung und der Trennflächenabstände mittels Parameterstudie berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Persistenz der Trennflächen deutlich grösser ist als der Trennflächenabstand.

4.2.1 Volumen der Trennflächenkörper

Die Grösse der Trennflächenkörper wird mittels einer Parameterstudie berechnet. Zur Berechnung des Trennflächenvolumens wird die folgende Formel verwendet (Kim et al. 2007):

$$V_b = \frac{s_1 s_2 s_3}{\sqrt[3]{p_1 p_2 p_3} \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \sin \alpha_3}$$

wobei

s die Trennflächenabstände,

p die Persistenz der Trennflächensysteme und

α die Winkel zwischen den Trennflächensystemen sind.

Dieser einfache geometrische Ansatz erscheint uns für die in diesem Bericht verfolgten Zwecke als ausreichend (Cai et al. 2004).

Bei der Berechnung der Trennflächenvolumina wird nicht berücksichtigt, ob die Trennflächenkörper geometrisch in den Ausbruchshohlraum gleiten können oder ob sie im Gebirge «verkeilt» sind (Goodman & Shi 1985).

Die grossen Trennflächenabstände (Kap. 4.1.2) führen erwartungsgemäss auch zu grossen Trennflächenkörpervolumina (Tab. 4-4).

Tab. 4-4: Verteilung der Volumina der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften

	Volumen der Trennflächenkörper			
	Klein	Mittel	Gross	Sehr gross
	< 0.2 m ³	0.2 – 2 m ³	2 – 10 m ³	> 10 m ³
Te1 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	20 %	35 %	20 %	25 %
Te2 (Opalinuston)	5 %	30 %	30 %	35 %

4.2.2 Grundform der Trennflächenkörper

Die erwartete Verteilung der Grundform der Trennflächenkörper wird mittels einer Parameterstudie beurteilt. Hierfür wird der Formel-Ansatz von (Wang et al. 2003) verwendet:

$$\gamma = \frac{6V_b}{\pi * l_{max}}$$

wobei

V_b dem Trennflächenkörpervolumen (Kap. 4.2.1) und

l_{max} der längsten Kantenlänge des Trennflächenkörpers entspricht.

Der Trennflächenkörper-Grundform-Index (γ) erlaubt nach (Wang et al. 2003) die Klassierung der Trennflächenkörper in fünf Grundformen. Im Rahmen dieser Beurteilung wurde die vorgeschlagene Unterteilung vereinfacht gemäss der angegebenen Indizes γ in die Grundformen balkenartig (< 0.001), plattig ($0.001 - 0.077$) und kubisch (> 0.077) vorgenommen.

Bei der Berechnung der Trennflächenkörper-Grundformen wird nicht berücksichtigt, ob die Trennflächenkörper geometrisch in den Ausbruchshohlraum gleiten können oder ob sie im Gebirge «verkeilt» sind (Goodman & Shi 1985). Eine entsprechende Beurteilung erfolgt in Kapitel 8.

Die Modellierung zeigt, dass in allen Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften plattige Trennflächenkörper die am häufigsten zu erwartende Trennflächenkörper-Grundform sind (Tab. 4-5).

Tab. 4-5: Verteilung der Grundformen der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften

	Balkenartig	Plattig	Kubisch
Te1 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	15 %	60 %	25 %
Te2 (Opalinuston)	5 %	75 %	20 %

4.3 Beschreibung der Störungszonen

Störungszonen werden unterschieden in «seismisch kartierte» und «seismisch nicht kartierte Störungszonen», wobei nur der (Betriebs-)Zugangstunnel eine kartierte Störungszone durchfährt (Fig. 2-2, Fig. 4-2,). Der geplante Lüftungsschacht und auch die Bauwerke auf Lagerebene durchdringen keine kartierten Störungszonen.

4.3.1 Eigenschaften der seismisch nicht kartierten Störungszonen

Seismisch nicht kartierte Störungszonen sind bis zum Zeitpunkt der Untersuchungen entlang der Bauwerksachsen nicht explorierbar und vorab nur schlecht prognostizierbar. Es muss davon ausgegangen werden, dass während des Baus der Zugänge nach Untertag sowie den Bauwerken auf Lagerebene seismisch nicht kartierte Störungszonen angetroffen werden.

Störungszonen können intern unterschiedlich komplex aufgebaut sein (z. B. Fasching & Vanek 2011). Das Spektrum reicht von einer räumlichen begrenzten Ansammlung von Trennflächen bis hin zu einem komplexen Aufbau in Zonen unterschiedlicher tektonischer Überprägung. So können in komplexen Störungszonen tektonisch nicht überprägte neben stark durchtrennten oder gar vollständig zerscherten Bereichen vorkommen. Der interne Aufbau einer Störungszone hängt unter anderem von der erfahrenen tektonischen Relativbewegung und den geomechanischen Gesteinseigenschaften ab. Dabei wird in der Regel mit zunehmendem Versatzbetrag auch der interne Aufbau komplexer (z. B. Bauer et al. 2016, Caine & Forster 1999). Der interne Aufbau sowie die Mächtigkeiten einer Störungszone sind entlang einer Störungszone oft nicht gleich, sondern können eine grosse räumliche Heterogenität aufweisen.

Aufgrund der geomechanischen Gesteinseigenschaften werden in diesem Bericht zwei Gruppen von Störungszonen unterschieden:

- Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten (karbonatreiche Gesteine in Te1 wie z. B. der Haupttrogenstein)
- Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (Te2)

4.3.1.1 Seismisch nicht kartierte Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten

Der interne Aufbau von seismisch nicht kartierten Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten der Einheit Te1 (z. B. Haupttrogenstein oder Gerstenhübel-Bank der Wildegg-Formation) ist vom eher spröden Bruchverhalten des Gesteins geprägt. Sie weisen eine mehr oder weniger ausgeprägte interne Zonierung auf.

Aufgrund dieser Beobachtungen und Analogbeispielen werden für die vorliegende ingenieur-geologische Beschreibung vier Typen von Störungszonen unterschieden (Fig. 4-4). Diese unterscheiden sich sowohl in der Mächtigkeit als auch in der Komplexität des internen Aufbaus der Störungszone. Seismisch nicht kartierte Störungszonen können als alle vier Störungstypen vorkommen, wobei die Ausprägungswahrscheinlichkeit unterschiedlich ist. So wird beispielsweise als wahrscheinlich erachtet, dass eine seismisch nicht kartierte Störungszone als Typ I vorliegt resp. als extrem unwahrscheinlich, dass sie als Typ IV vorliegt.

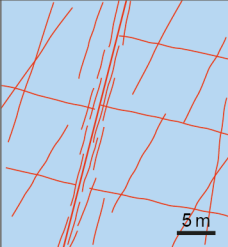
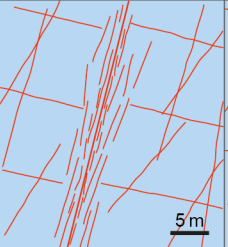
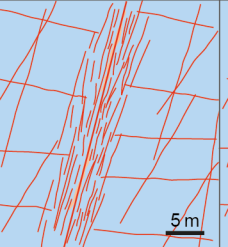
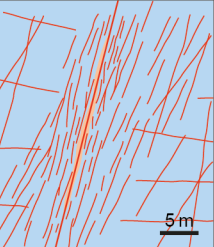
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Beschreibung der Störungszone	Bis zu wenige Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis zu mehreren Dezimetern mächtigen, stark zerrütteten «Kernzone»	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis zu metrigen, stark zerrütteten und zum Teil brekziösen «Kernzone»	Zehner Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis mehrere Meter mächtigen, stark zerrütteten und brekziösen «Kernzone»
Skizze zum Aufbau der Störungszone				
Ausprägungswahrscheinlichkeit seismisch nicht kartierter Störungszone	wahrscheinlich	möglich	unwahrscheinlich	extrem unwahrscheinlich

Fig. 4-4: Typen von Störungszone, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden

In den TBO des Standortgebiets Jura Ost wurden ausschliesslich nicht kartierte Störungszone des Typs I angetroffen.

Störungszone des Typs II, II und IV wurden in den TBO des Standortgebiets nicht angebohrt.

Die erwarteten hydrogeologischen Eigenschaften der Störungszone werden in Kapitel 5 und die erwarteten geomechanischen Eigenschaften in Kapitel 6 diskutiert.

Störungszone in Karbonaten können durch Verkarstungsprozesse überprägt sein. Jedoch wird nicht davon ausgegangen, dass die zu durchfahrenden verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten auch verkarstet sind (vgl. Kapitel 7).

4.3.1.2 Seismisch nicht kartierte Störungszone in wenig kompetenten Gesteinseinheiten

Der Verlauf sowie der interne Aufbau von Störungszone in wenig kompetenten Gesteinseinheiten wie dem Opalinuston (Te2) sind durch sogenannte «weiche Verbindung» («soft-linkage») geprägt (Fig. 4-5). Dabei laufen Trennflächen einer Störungszone in Streichrichtung aus und die spröde Verformung springt «weich versetzt» auf eine neue Trennfläche über (z. B. Walsh et al. 1999). Die mechanische und geometrische Kontinuität wird durch duktile Dehnung des Gesteinsvolumens erreicht und kann bei fortschreitender Verformung auch wieder zu einer «harten Verbindung» führen, wie bei den kompetenteren Gesteinseinheiten. Dieses Verhalten ist in verschiedenen Massstäben zu beobachten. Dies führt zu einem Aufbau von Störungszone, bei denen tektonisch schwach überprägt Bereiche neben stark durchtrennten oder gar vollständig zerscherten Bereichen vorkommen.

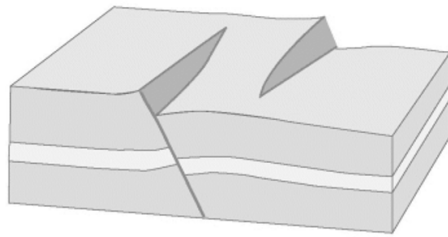


Fig. 4-5: Schematische Darstellung des «soft linkage»-Verlaufs von Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten

Aufgrund der Beobachtungen in den TBO und Analogbeispielen werden für die vorliegende ingenieurgeologische Beschreibung vier Typen von Störungszonen unterschieden (Fig. 4-6). Diese unterscheiden sich bezüglich Mächtigkeit und Komplexität des internen Aufbaus. Seismisch nicht kartierte Störungszonen können als alle vier Störungstypen vorkommen, wobei die Ausprägungswahrscheinlichkeit unterschiedlich ist. So wird beispielsweise als wahrscheinlich betrachtet, dass eine seismisch nicht kartierte Störungszone als Typ I vorliegt resp. als extrem unwahrscheinlich, dass sie als Typ IV vorliegt.

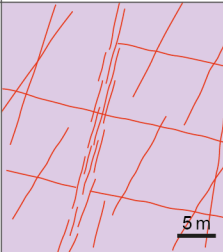
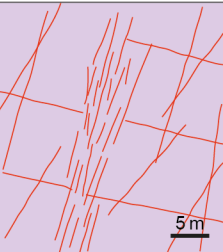
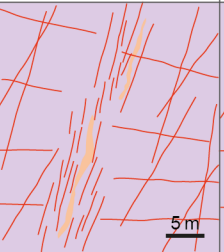
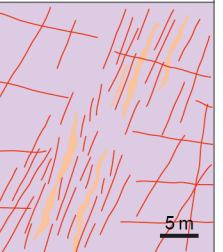
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Beschreibung der Störungszone	Bis zu wenige Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis zu metrigen, stark zerrütteten und brekziösen «Kernzone»	Zehner Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis mehrere Meter mächtigen, stark zerrütteten und brekziösen «Kernzone»
Skizze zum Aufbau der Störungszone				
Ausprägungswahrscheinlichkeit seismisch <u>nicht</u> kartierter Störungszone	wahrscheinlich	möglich	unwahrscheinlich	extrem unwahrscheinlich
Ausprägungswahrscheinlichkeit seismisch kartierter Störungszone	wahrscheinlich	wahrscheinlich	möglich	extrem unwahrscheinlich

Fig. 4-6: Typen von Störungszonen, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von wenig kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden

In den TBO wurden nur nicht kartierte Störungszonen vom Typ I (z. B. Fig. 4-7) angetroffen. Dabei handelt es sich meist um Bereiche mit einer erhöhten Trennflächendichte resp. einem reduzierten Trennflächenabstand im dm-Bereich.

Störungszonen des Typs II, III und IV wurden in keiner TBO angetroffen.

Störungszonen des Typs II entspricht wie der Typ I einem Bereich mit erhöhten Trennflächendichten. Im Gegensatz zum Typ I kann dieser Gebirgsbereich im Typ II bis zu mehreren Metern mächtig sein.

Typ III weist eine mehr oder weniger ausgeprägte interne Zonierung auf, bestehend aus einer zentralen Zone («Störungskern») und einer «Auflockerungszone», welche die zentrale Zone umgibt (z. B. Jaeggi et al. 2017, Faulkner et al. 2010). Der «Störungskern» besteht aus engstehenden Trennflächen die vereinzelt das Gebirge so weit zerschneiden, dass das Gestein als Kataklasit vorliegt. Randlich ist die zentrale Zone von parallelen Scherbahnen begrenzt. Die «Auflockerungszone» besteht aus dem durchtrennten Umgebungsgestein, bei mit der Entfernung abnehmender Auftretenshäufigkeit. Die Mächtigkeit des «Störungskerns» kann bis in den Meterbereich ausgebildet sein, räumlich stark variieren und auch unterbrochen sein.

Typ IV stellt ein zehner Meter mächtiger Gebirgsbereich mit einer ausgeprägten internen Zonierung dar. Die mehrere Meter mächtige «Störungskern» besteht aus engstehenden Trennflächen die vereinzelt das Gebirge so weit zerschneiden, dass das Gestein als Kataklasit vorliegt. Die Mächtigkeit des Störungskerns kann räumlich stark variieren und auch unterbrochen sein. Der «Störungskern» ist von einer «Auflockerungszone» umgeben. Dieser Gebirgsbereich ist durch eine Gebirgsdurchtrennung gekennzeichnet, bei der die Trennflächenhäufigkeit mit dem Abstand vom «Störungskern» tendenziell abnimmt.

Es kann angenommen werden, dass beim Auffahren der Hohlräume auf Lagerebene Störungszonen des Typs I und II durchörtert werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass entlang der Bauwerkachsen auch Störungszonen des Typs III vorkommen, wobei es als extrem unwahrscheinlich betrachtet wird, dass Störungszonen des Typs IV angefahren werden.

Die erwarteten hydrogeologischen Eigenschaften der Störungszonen werden in Kapitel 5 und die erwarteten geomechanischen Eigenschaften in Kapitel 6 diskutiert.



Fig. 4-7: Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen des Typ I in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (MAR1-1 Bohrmeter 620.9 – 621.9)

4.3.2 Eigenschaften der kartierten Störungszone

Nur geplante Zugangstunnels durchörteren eine kartierte Störungszone (Fig. 2-2). Der Stichtunnel, der Lüftungsschacht (Fig. 2-3) und die Bauwerke auf Lagerebene (Fig. 4-2,) durchfahren keine kartierten Störungszone.

Bezüglich der Eigenschaften der kartierten, subvertikalen NW-SE streichenden Störungszone können die gleichen Störungsmuster wie in den seismisch nicht kartierten Störungszonen erwartet werden (Fig. 4-6). Diese unterscheiden sich lediglich in der Ausprägungswahrscheinlichkeit, wobei Störungszonen mit einem komplexeren internen Aufbau eher erwartet werden als bei seismisch nicht kartierten Störungszonen.

4.4 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften

4.4.1 Te1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

Te1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	195/15		20			Hinweisdaten
K2	185/85		20			Hinweisdaten
K3	015/35		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Trennflächen-abstände [m]	0.6	0.7	1.0	3.2	14.8	Hinweisdaten
Öffnungsweite [mm]	0	0	0	0	3	Hinweisdaten
Zustand	Vereinzelt mit Tonverfüllungen					Hinweisdaten
Trennflächenkörper						
Volumen der Trennflächen-körper [%]	Klein [< 0.2 m³]	Mittel [0.2 – 2 m³]	Gross [2 – 10 m³]	Sehr gross [> 10 m³]		
	20 %	35 %	20 %	25 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	15 %	60 %	25 %			Mod. Datensatz

4.4.2 Te2 (Opalinuston)

Te2 (Opalinuston)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	195/15		20			Hinweisdaten
K2	185/85		20			Hinweisdaten
K3	015/35		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
Trennflächen-abstände [m]	0.6	1.2	2.4	5.2	13.1	Hinweisdaten
Öffnungsweite [mm]	0	0	0	0	0	Hinweisdaten
Zustand	Vereinzelt mit Tonverfüllungen					Hinweisdaten
Trennflächenkörper						
Volumen der Trennflächen-körper [%]	Klein [< 0.2 m³]	Mittel [0.2 – 2 m³]	Gross [2 – 10 m³]	Sehr gross [> 10 m³]		
	5 %	30 %	30 %	35 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	5 %	75 %	20 %			Mod. Datensatz

5 Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Zur Beschreibung der Grundwasserverhältnisse kann der Baugrund in Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften unterteilt werden. Dabei wird grundsätzlich zwischen Einheiten unterschieden, die grundwasserleitend sind (Aquifere) und solche, die den Grundwasserfluss in erheblichem Masse unterbinden (Aquitarde). Bei den im vorliegenden Bericht diskutierten Aquiferen handelt es sich um «Tiefenaquifere» in Festgesteinen.

Hydrogeologisch wird das Gebirge des ingenieurgeologischen Untersuchungsgebiets in drei Einheiten unterteilt (Fig. 5-1):

- Hy1 entspricht der Wildegge-Formation und den Dogger-Einheiten oberhalb der Passwang-Formation. Insgesamt handelt es sich um einen gering durchlässigen Abschnitt mit möglicher Wasserführung insbesondere entlang von Trennflächen in den karbonatreichen Abschnitten.
- Hy2 entspricht der Passwang-Formation.
- Hy3 entspricht dem äusserst gering durchlässigen Opalinuston.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse dienen weitgehend die Dossiers VI (petrophysikalisches Logging und Hydrofrac-Spannungsmessungen) und VII (hydraulische Packertests) der TBO-Datenberichte (BOZ1-1, BOZ2-1).

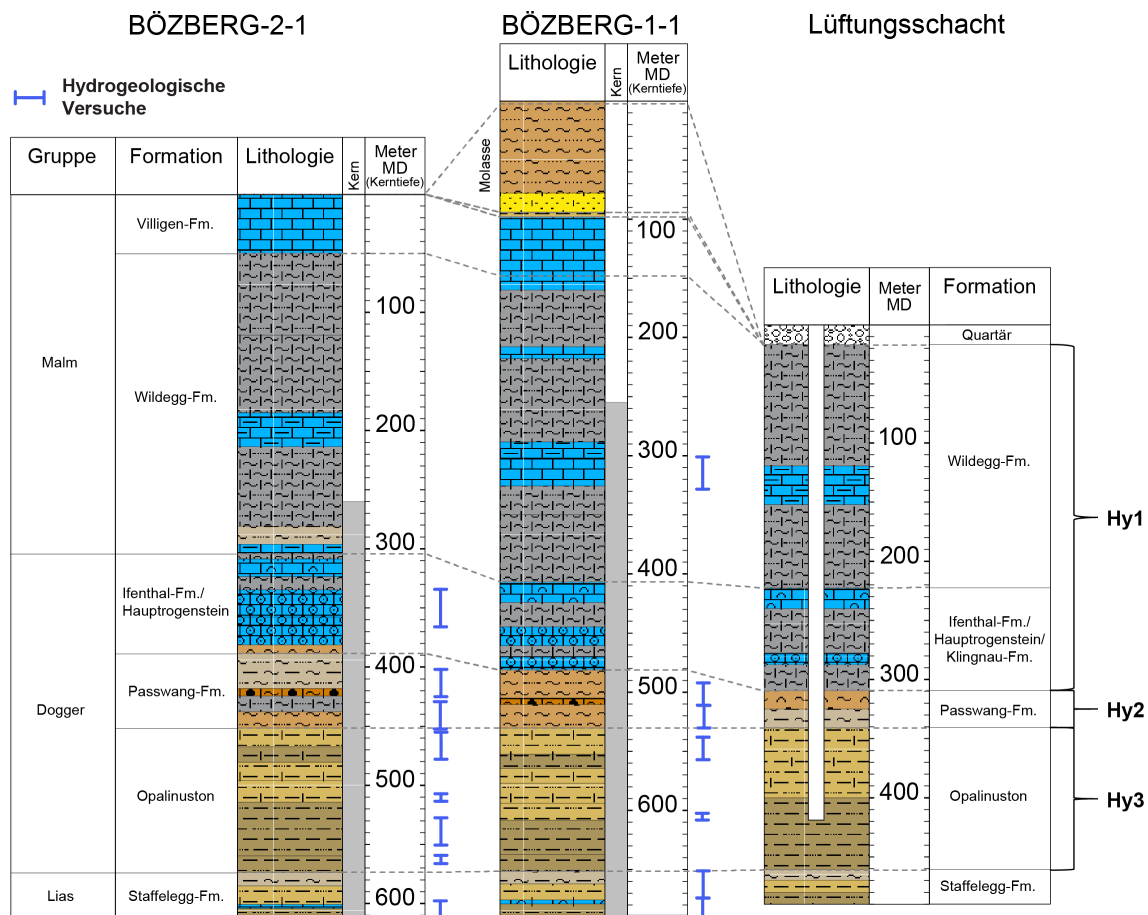


Fig. 5-1: Gegenüberstellung der hydrogeologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Sicht, der lithostratigraphischen Einteilung sowie der Messbereiche der durchgeführten hydrogeologischen Versuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

5.1 Eigenschaften der hydrogeologischen Einheiten

Zur Charakterisierung der hydrogeologischen Einheiten werden primär die Resultate der hydrogeologischen Versuche und Beobachtungen in den TBO (TBO-Datenberichte Dossiers VI und VII) und der Bohrung Rinken (Nagra 1990) berücksichtigt. Bedingt durch die für eine statistische Auswertung relativ geringe Anzahl an hydrogeologischen Versuchen in den einzelnen TBO (Fig. 5-1) werden zur Ableitung der hydrogeologischen Erwartungswerte für den Schachtstandort, den (Betriebs-)Zugangstunnel und die Bauwerke auf Lagerebene ebenfalls andere im regionalen Massstab verfügbare hydrogeologische Daten mit berücksichtigt (Gmünder et al. 2013).

Für Details über die hydrogeologischen Versuchsanordnungen und die einzelnen Testresultate sei auf die entsprechenden Datenberichte der TBO Dossier VII verwiesen.

5.1.1 Aquiferarten in den hydrogeologischen Einheiten

Es werden folgende Arten von Grundwasserkörpern unterschieden: Aquifere und Aquitarde. Dabei werden die Aquifere weiter unterteilt in Poren-, Trennflächen- und Karstaquifere.

Als Aquifer wird ein Gesteinskörper verstanden, der geeignet ist, Grundwasser weiterzuleiten und abzugeben. Entsprechend wird als Aquitard eine hydrogeologische Einheit bezeichnet, welche den Grundwasserfluss in erheblichem Masse unterbindet. Der Übergang zwischen Aquifer und Aquitard ist fließend und vom Betrachtungsmassstab abhängig.

Die hydrogeologischen Einheiten weisen folgende Aquiferarten auf:

- Hy1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation):
Aquitard mit möglicher lokaler Wasserführung entlang Trennflächen in den karbonatreichen Abschnitten.
Die lithologisch sehr heterogene hydrogeologische Einheit weist eine grosse Bandbreite an Gebirgsdurchlässigkeiten auf (Kap. 5.1.3). Im östlichen Teil des Standortgebiets Jura Ost findet der Wechsel vom Hauptrogenstein zur tonreichen Klingnau-Formation statt (Kap. 3.1.2). Der typische mächtige, karbonatreiche Hauptrogenstein mit seinem Aquifer wird am Schachtstandort nicht mehr erwartet. In karbonatreichen Abschnitten sind trotzdem Wasserführungen entlang von Trennflächen nicht auszuschliessen.
In der Wildeggen-Formation können insbesondere die Kalkbänke (z. B. Gerstenhübel-Bank) eine erhöhte trennflächenbedingte Durchlässigkeit aufweisen (z. B. Nagra 2014d).
Im Untersuchungsgebiet ist keine Nutzung bekannt.
- Hy2 (Passwang-Formation):
Aquitard.
Die lithologisch sehr heterogene hydrogeologische Einheit weist im Allgemeinen geringe Gebirgsdurchlässigkeiten auf (Kap. 5.1.3). In tonarmen Abschnitten können lokal auch leicht erhöhte Durchlässigkeiten vorkommen.
Im Untersuchungsgebiet ist keine Nutzung bekannt.
- Hy3 (Opalinuston):
Aquitard.
Die hydrogeologische Einheit ist durch ihre durchgehend sehr geringe Gebirgsdurchlässigkeit gekennzeichnet.
Eine Nutzungsmöglichkeit ist aufgrund der geringen Gebirgsdurchlässigkeit auszuschliessen.

5.1.2 Hydraulisches Potenzial

Das für die ingenieurgeologische Betrachtung verwendete hydraulische Potenzial wird soweit möglich aus den hydrogeologischen Versuchen in den Bohrungen und den Ergebnissen der hydrogeologischen Modellierung abgeschätzt (Gmünder et al. 2014, Luo et al. 2014) (Fig. 5-2). Für die Einheit Hy1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation) wurden ebenfalls Überlegungen zu Ausbissverhältnissen und erste Resultate des hydrogeologischen Langzeitbeobachtungssystems in BOZ1-1 mitberücksichtigt.

In den tonreichen, gering durchlässigen Einheiten Hy2 (Passwang-Formation) und Hy3 (Opalinuston) erlauben die kurzzeitigen Packertests keine belastbare Grundlage für die Abschätzung des hydraulischen Potenzials resp. der Porenwasserdrucke. Für diese Einheiten wird die obere Bandbreite des hydraulischen Potenzials der Einheit Hy1 übernommen. Die untere Bandbreite wird auf Grundlage der ersten Ergebnisse des Langzeitbeobachtungssystems der Bohrung BOZ1-1 festgelegt (Februar 2023).

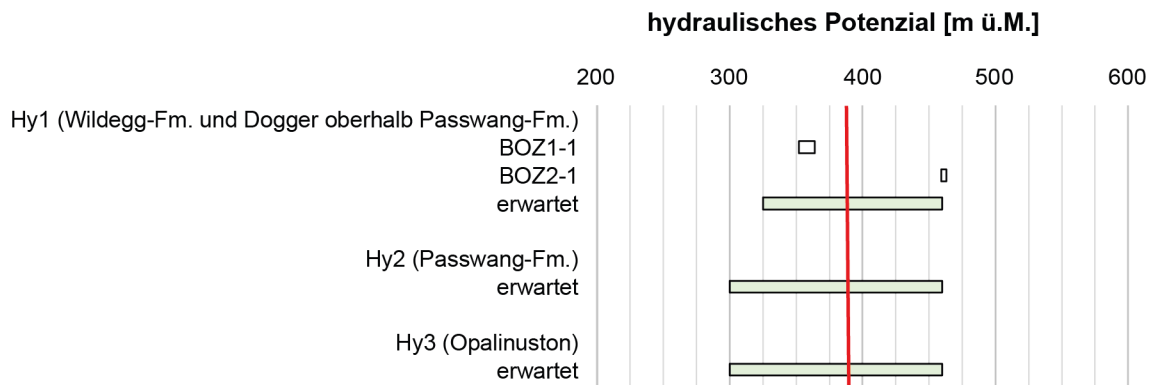


Fig. 5-2: Gegenüberstellung der erwarteten hydraulischen Potenziale in den hydrogeologischen Einheiten mit der Höhenlage des Schachtkopfs des Lüftungsschachts (rote Linie)

5.1.3 Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges und von Störungszonen

Die erwartete hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit wird auf Basis von Bohrlochversuchen in den TBO abgeleitet. Für die Parametrisierung der Einheit Hy1 werden ebenfalls Resultate von anderen Bohrungen der Nordschweiz berücksichtigt (Nagra 2014c, Nagra 2014d). Die hydraulischen Bohrlochversuche wurden so durchgeführt, dass sowohl «normale» Gebirgsbereiche als auch angefahrne Störungszonen getestet wurden (z. B. (Schwarz et al. 2021)).

Bedingt durch die lithologisch heterogene Abfolge innerhalb der Einheiten Hy1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation) und Hy2 (Passwang-Formation) weisen die hydrogeologischen Einheiten Bandbreiten der hydraulischen Durchlässigkeiten von mehreren Grössenordnungen auf (Fig. 5-3). Demgegenüber zeigt die vergleichsweise homogene Einheit Hy3 (Opalinuston) eine geringe Variabilität.

Der Erwartungswert der Einheit Hy1 widerspiegelt die hydraulischen Eigenschaften von karbonatreichen Abschnitten (z. B. Gerstenhübel-Bank). In Oberflächennähe sind erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten möglich (in der Grössenordnung von 10^{-4} m/s) (Nagra 2014d).

Für die Einheit Hy2 (Passwang-Formation) wird die obere erwartete Bandbreite der hydraulischen Durchlässigkeiten höher angegeben als die in den hydrogeologischen Versuchen ermittelten Werte. Dies um den Einfluss von nicht beobachteten, allfällig vorkommenden durchlässigen Trennflächen in den «harten Bänken» mit zu berücksichtigen.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten von Störungszonen wurden basierend auf den Beobachtungen und Analogien mit ähnlichen Gesteinen abgeschätzt (z. B. Fischer et al. 2013, Caine & Forster 1999, Jolley et al. 2007, Bense et al. 2013, Michie et al. 2021). Die Bandbreite umfasst auch hypothetische, nicht im Standortgebiet beobachtete hohe Durchlässigkeiten.

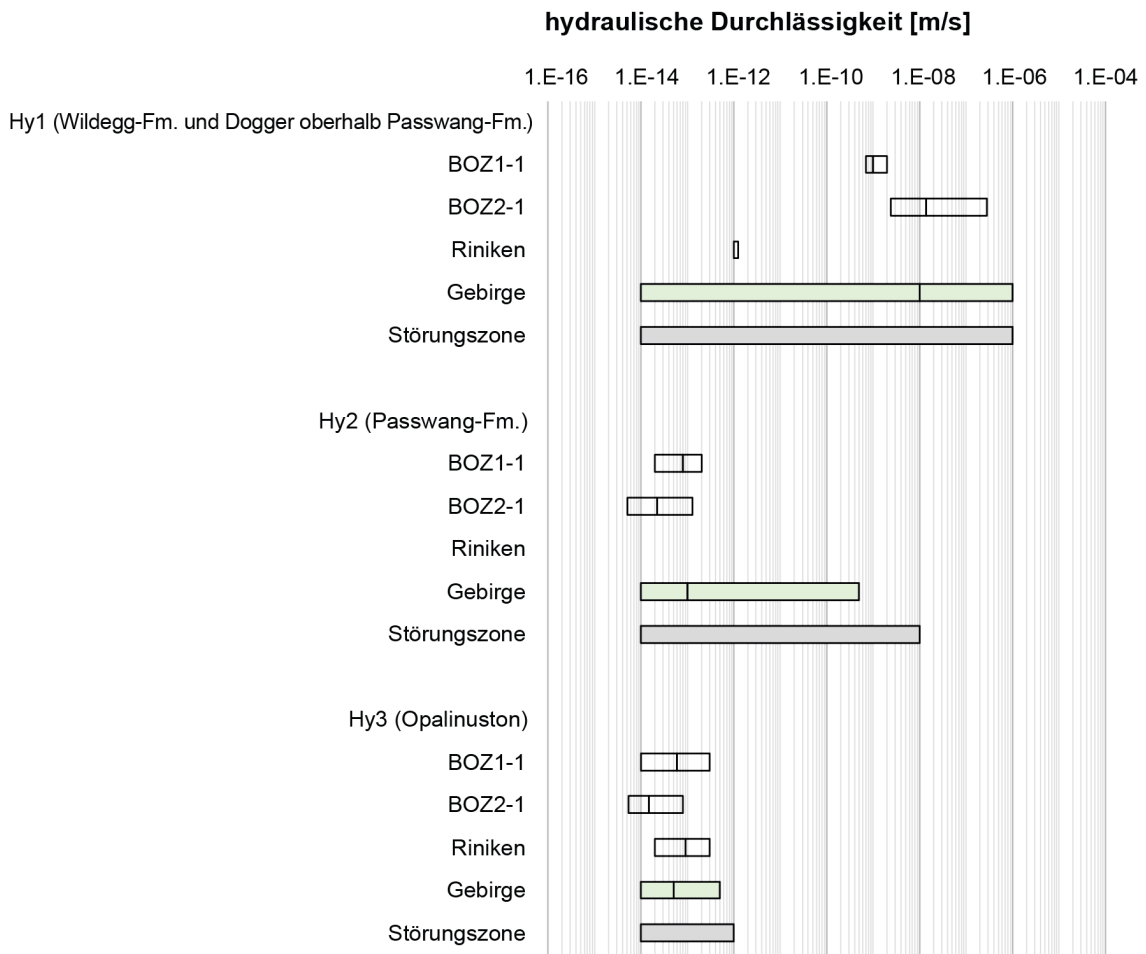


Fig. 5-3: Gegenüberstellung der horizontalen, hydraulischen Durchlässigkeiten des Gebirges und von Störungszone in den hydrogeologischen Einheiten

5.1.4 Wasser-/Gebirgstemperatur

Die Gebirgstemperatur wurde in den TBO BOZ1-1 und BOZ2-1 (TBO-Datenberichte Dossier VI) und der Bohrung Riniken (Schill 2012) gemessen. Die TBO-Messreihen zeigen vergleichbare Temperaturprofile (Fig. 5-4). Hingegen wurden in der Bohrung Riniken um rund 5 °C höhere Temperaturen gemessen.

Die am Schachtstandort erwarteten Wasser-/Gebirgstemperaturen werden anhand der gemessenen Temperaturen in der Bohrung Riniken abgeleitet (Fig. 5-4).

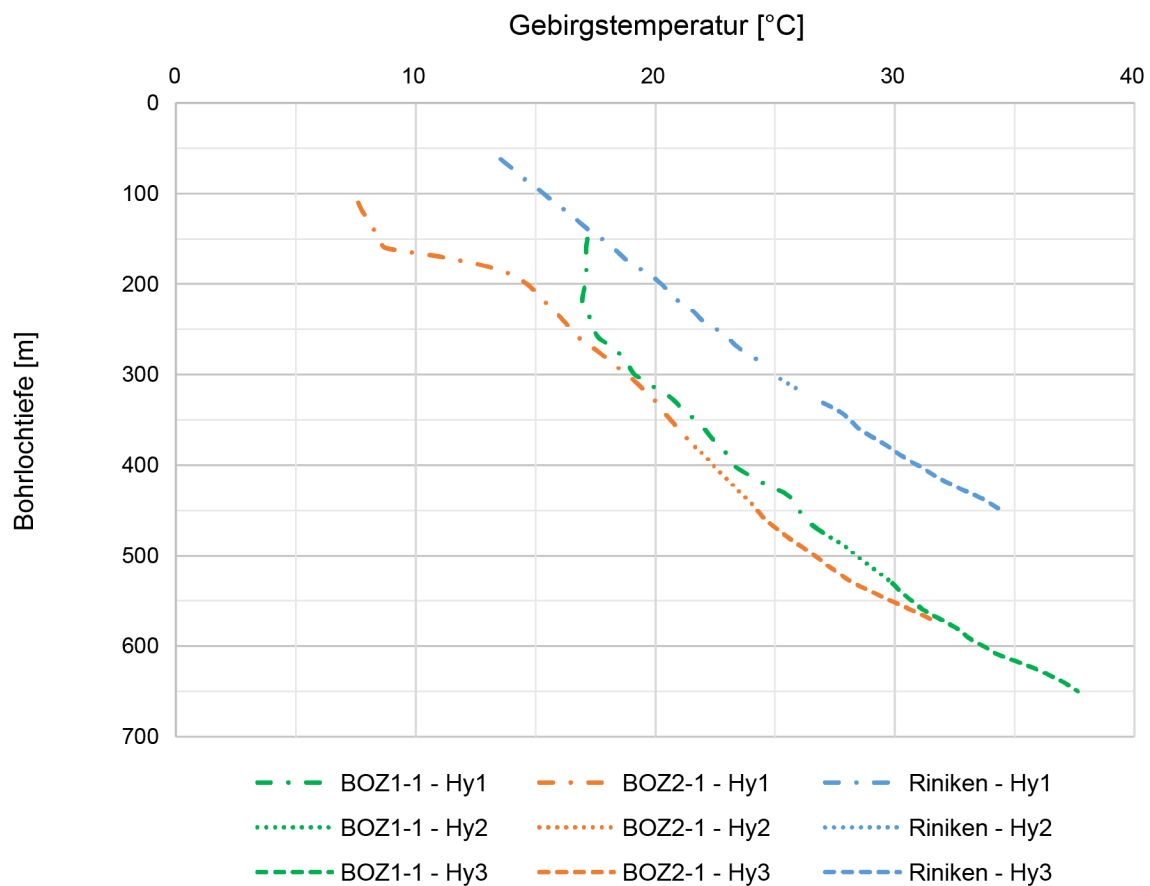


Fig. 5-4: Gemessene Gebirgstemperaturen in den TBO und der Bohrung Riniken

5.1.5 Wasserchemismus

Zur Beurteilung des Wasserchemismus werden die Analytikergebnisse der Grundwasserproben aus der TBO BOZ2-1 verwendet (Lorenz et al. *in prep.*). Zudem kann für die tonreichen Einheiten Hy2 und Hy3 über weite Strecken nur ein Wertebereich basierend auf Porenwasseruntersuchungen (wässrige Auszüge des Gesteins) abgeschätzt werden, der bezüglich Sulfat im Porenwasser eher einer Obergrenze entspricht.

Im Rahmen dieses Berichts wird nur auf die hydrochemischen Parameter eingegangen, die für die Beurteilung der bautechnischen Auswirkungen relevant sind (z. B. Einleitgrenzwerte oder Betonaggressivität). Auf Parameter, die unkritisch sind resp. deren Gehalte unterhalb der Relevanz- oder Einleitgrenzwerte liegen, werden nicht aufgeführt (Arsen, Blei, Cadmium etc.). Für diese Werte sei auf die entsprechenden Datenberichte verwiesen (Lorenz et al. *in prep.*).

Auf einen Vergleich des Chemismus der Wässer der einzelnen TBO wurde verzichtet.

Der Chemismus der Wässer ist durch eine hohe bis sehr hohe Chlorid- und Sulfatkonzentration charakterisiert. Generell ist ein gradueller Übergang der Konzentrationen zwischen den Einheiten zu erwarten.

Tab. 5-1: Erwarteter Chemismus von Grund- und Porenwasser (*best guess*) in den hydrogeologischen Einheiten

Die Sulfatkonzentrationen basieren unter anderem auch auf Porenwasseruntersuchungen, welche methodenbedingt eher Obergrenzen liefern (wässrige Auszüge; s. auch Text). Zwischen den einzelnen Einheiten erfolgt ein gradueller Übergang in den Konzentrationen.

	pH-Wert	Chlorid [mg/L]	Sulfat [mg/L]	Calcium [mg/L]	Schwefel- wasserstoff [mg/L]
Hy1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	7.8 – 8.2	700 – 2'000	1'000 – 2'000	92	< 1
Hy2 (Passwang-Formation)		2'000 – 3'000	2'000 – 3'300 (max 5'200)		
Hy3 (Opalinuston)	7.1 – 7.7	2'500 – 5'000	2'000 – 3'300 (max 5'200)		

5.1.6 Kohlenwasserstoff-Vorkommen

Zur Beurteilung der zu erwartenden Kohlenwasserstoff-Vorkommen in den hydrogeologischen Einheiten werden die Messresultate und Beobachtungen aus allen TBO beurteilt (Spülungsüberwachung, Hydrottests, Grundwasseranalysen, Beschreibung der Bohrkerne). Erfahrungen aus anderen Projekten ausserhalb der Standortgebiete werden ebenfalls mitberücksichtigt (z. B. Bohrung Eglisau II). Es wird zwischen gasförmigen Vorkommen (Erdgas) und flüssigen Vorkommen (Erdöl) unterschieden.

Grundsätzlich wird in allen Einheiten das Vorkommen von gasförmigen Kohlenwasserstoffen in kleinen Mengen als möglich beurteilt, wobei in den TBO lediglich unwesentliche Methangehalte festgestellt wurden.

In den TBO wurden keine Hinweise auf flüssige Vorkommen von Kohlenwasserstoffen gefunden und es wird auch nicht erwartet, dass Erdöl beim Bau der Untertagebauwerke angetroffen wird.

5.2 Tabellarische Zusammenfassung der hydrogeologischen Einheiten

5.2.1 Hy1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)

Hy1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Aquitard mit möglicher lokaler Wasserführung entlang Trennflächen in den karbonatreichen Abschnitten			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Keine Nutzung im Untersuchungsgebiet bekannt			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	325		460	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-14	1E-08	1E-06	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-14		1E-06	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	10	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	25	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite		Obere Bandbreite	
pH-Wert	7.8		8.2	Datenspektrum
Calcium [mg/L]			92	Hinweisdaten
Sulfat [mg/L]	2'000		3'000	Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	700		2'000	Datenspektrum
Schwefelwasserstoff [mg/L]			1	Hinweisdaten
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: durch Migration aus tieferen Einheiten möglich; in den TBO wurden nur unwesentliche Gasgehalte gemessen Flüssig: Keine Vorkommen zu erwarten			Hinweisdaten

5.2.2 Hy2 (Passwang-Formation)

Hy2 (Passwang-Formation)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Aquitard			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Keine Nutzung. Nutzungsmöglichkeiten aufgrund geringer Durchlässigkeit stark eingeschränkt			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	300		460	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-14	1E-13	5E-10	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-14		1E-08	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	25	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	26	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite		Obere Bandbreite	
pH-Wert	7.1		7.7	Datenspektrum
Calcium [mg/L]				
Sulfat [mg/L]	2'000		3'000	Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	2'000		3'000	Datenspektrum
Schwefelwasserstoff [mg/L]				
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: durch Migration aus tieferen Einheiten möglich; in den TBO wurden nur unwesentliche Gasgehalte gemessen Flüssig: Keine Vorkommen zu erwarten			Hinweisdaten

5.2.3 Hy3 (Opalinuston)

Hy3 (Opalinuston)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Aquitard			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Keine Nutzung; Nutzungsmöglichkeiten aufgrund geringer Durchlässigkeit nicht gegeben			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	300		460	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-14	5.E-14	5.E-13	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-14		1.E-12	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	26	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	34	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite		Obere Bandbreite	
pH-Wert	7.1		7.7	Datenspektrum
Calcium [mg/L]				
Sulfat [mg/L]	2'000		3'000	Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	2'500		5'000	Datenspektrum
Schwefelwasserstoff [mg/L]				
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: In den TBO wurden nur unwesentliche Gasgehalte gemessen Flüssig: Keine Vorkommen zu erwarten			Hinweisdaten

6 Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften und Spannungsverhältnissen

Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteinseinheiten werden aus ingenieur-geologischer Sicht in Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften zusammengefasst (Fig. 6-1).

Dadurch ergeben sich folgende geomechanische Einheiten:

- Gm1 entspricht der Wildegg-Formation.
- Gm2 umfasst den Haupttrogenstein, die Klingnau- und die Passwang-Formation (Dogger oberhalb Opalinuston).
- Gm3 entspricht dem Opalinuston.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der Spannungsverhältnisse und geomechanischen Eigenschaften dienen weitgehend die Dossiers VI (petrophysikalisches Logging und Hydrofrac-Spannungsmessungen) und IX (fels- und geomechanische Laborversuche) der TBO-Datenberichte (BOZ1-1, BOZ2-1).

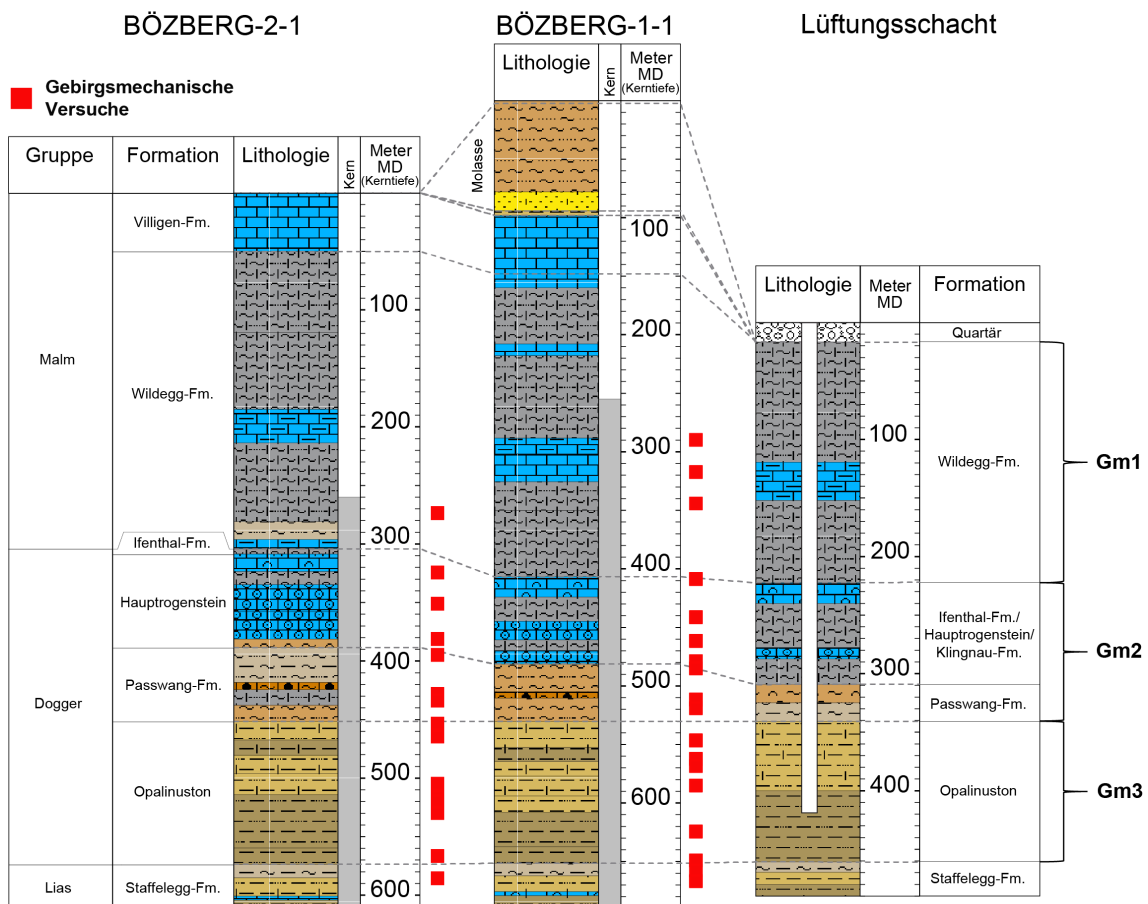


Fig. 6-1: Gegenüberstellung der geomechanischen Einheiten mit der lithostratigraphischen Einteilung sowie Angabe der Probeentnahmen für die Laborversuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

6.1 Ableiten der geomechanischen Gesteinseigenschaften

Die geomechanischen Gesteinseigenschaften werden auf Grundlage der geomechanischen Laborversuche in den TBO abgeleitet (Fig. 6-1). Für Details über die geomechanische Probenahme und die Laborversuche sowie die geophysikalischen Bohrlochaufnahmen sei auf die entsprechenden Datenberichte der TBO verwiesen (Dossiers IX und VI).

6.1.1 Einaxiale Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Poissonzahl

Die einaxiale Druckfestigkeit und elastische Eigenschaften (Elastizitätsmodul und Poissonzahl) der Gesteinseinheiten werden vorwiegend aus Laborproben abgeleitet (TBO-Datenberichte Dossier IX). Zusätzlich werden geophysikalische Logs (TBO-Datenberichte Dossier VI) an den Resultaten der Labortests kalibriert und für die Interpolation resp. die Abschätzung der Verteilungen der Eigenschaften verwendet (modellierter Datensatz Stand Februar 2023).

Dieses semi-empirische Interpolationsverfahren wird für die geomechanischen Einheiten Gm1 und Gm2 (Wildegg-Formation bis Dogger oberhalb Opalinuston) verwendet (Fig. 6-2, Fig. 6-3, Fig. 6-4). Die Verteilung der geomechanischen Eigenschaften der einzelnen Einheiten ist in den verschiedenen TBO vergleichbar. Für die Ableitung der erwarteten Bandbreite am Schachtstandort werden die Modellresultate von BOZ1-1 stärker gewichtet.

Für die Einheit Gm3 (Opalinuston) sind die erwarteten Werteverteilungen direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

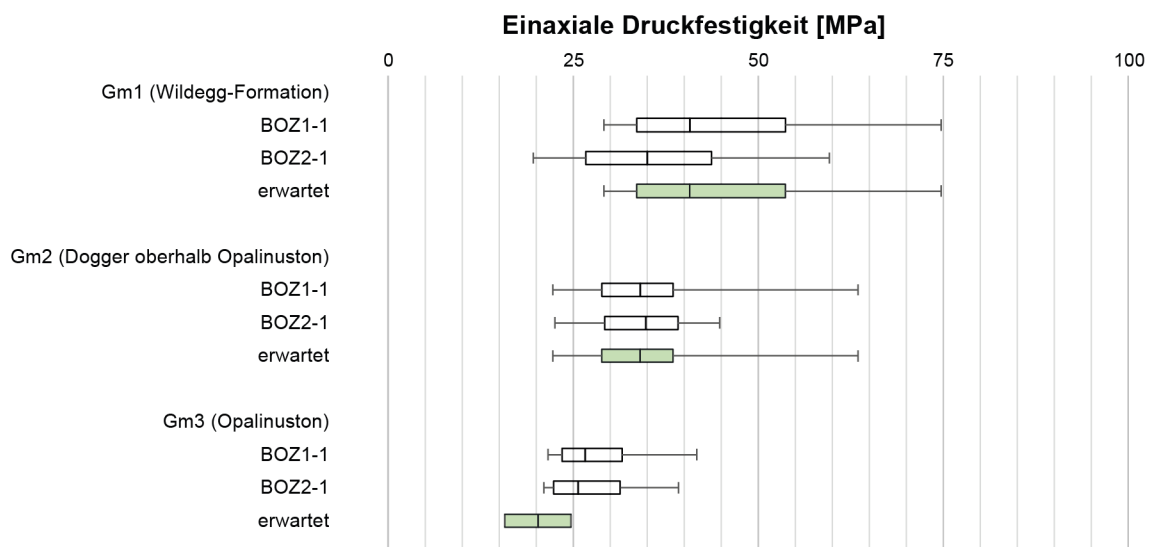


Fig. 6-2: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten einaxialen Druckfestigkeiten

Für die Einheit Gm3 (Opalinuston) ist die erwartete Werteverteilung direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

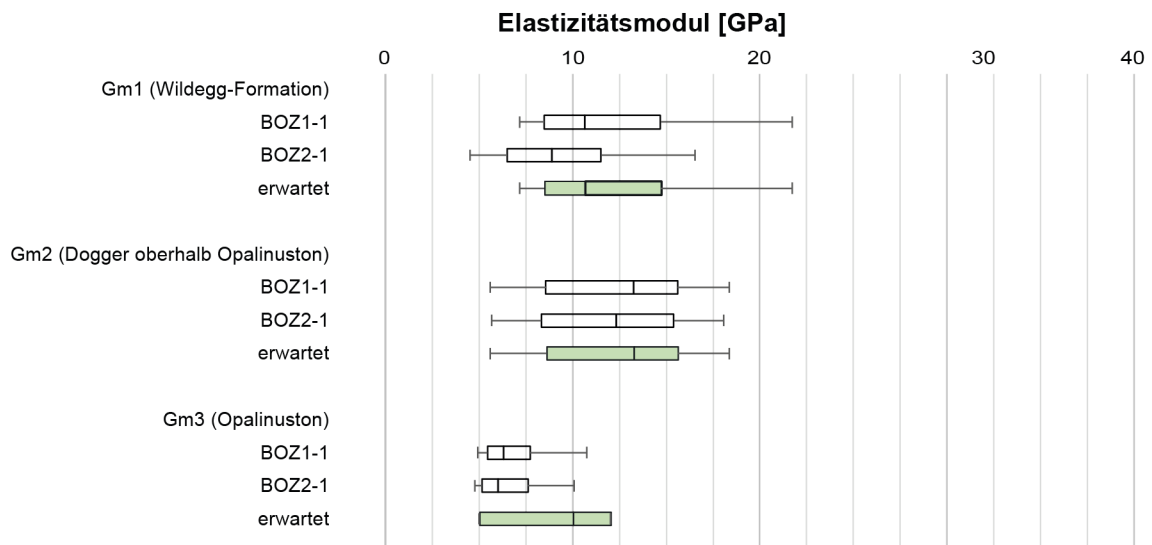


Fig. 6-3: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Elastizitätsmodule
Für die Einheit Gm3 (Opalinuston) ist die erwartete Werteverteilung direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

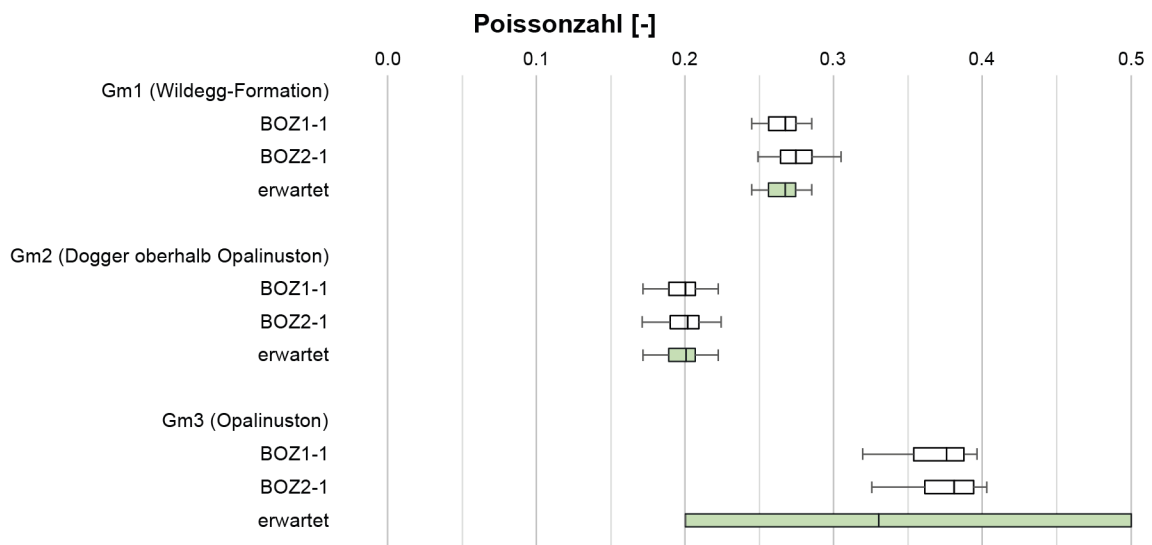


Fig. 6-4: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Poissonzahlen
Für die Einheit Gm3 (Opalinuston) ist die erwartete Werteverteilung direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

6.1.2 Spitzenkohäsion, Spitzenreibungswinkel, Spaltzugfestigkeit

Die Bewertung der erwarteten Verteilungen der Spitzenkohäsion, des Spitzenreibungswinkels und der Spaltzugfestigkeit in den geomechanischen Einheiten am Schachtstandort erfolgt anhand der Resultate der geomechanischen Laborversuche (TBO-Datenberichte Dossier IX). Das oben beschriebene Interpolationsverfahren für die einaxiale Druckfestigkeit, das Elastizitätsmodul und die Poissonzahl (Kap. 6.1.1) kommt nicht zur Anwendung.

Die zum Teil geringe Anzahl an Testversuchen in einzelnen Einheiten und Bohrungen ermöglicht keine TBO-spezifische Auswertung. Stattdessen werden alle Resultate aus dem Standortgebiet zusammen und ungewichtet verwendet.

Das Vorgehen wird dadurch gestützt, dass, wie in Kap. 6.1.1 gezeigt werden konnte, die Verteilung der geomechanischen Eigenschaften in den einzelnen TBO vergleichbar ist. Da trotz «Datenzusammenlegung» die Anzahl der durchgeführten Laborversuche zu gering ist, um eine robuste statistische Werteverteilung ableiten zu können, werden für diese Parameter nur die Perzentile P0.05, P0.5 und P0.95 angegeben.

6.1.3 Quelleigenschaften

Ein gewisses Quellpotenzial ist grundsätzlich bei allen betrachteten Gesteinseinheiten vorhanden. Das Quellmass wird grundsätzlich durch das Vorhandensein quellfähiger Tonminerale und Anhydrit kontrolliert, der Quelldruck hingegen stark durch die Überlagerung resp. die Entnahmetiefe der Proben. Von den betrachteten Einheiten dürften die mergel- und tonreichen Einheiten (Gm1 – Gm3) aufgrund der Gehalte, der Zusammensetzung und der Verteilung der Tonminerale das grösste Quellpotenzial aufweisen (vgl. Kapitel 3).

Die Erwartungswerte für das Quellvermögen (Quelldruck, Quellmass) der geomechanischen Einheiten werden nicht mit dem oben beschriebenen Interpolationsverfahren bestimmt (Kap. 6.1.1). Entsprechende Laborversuche (Oedometer) wurden nur für den Opalinuston und vereinzelt auch dessen Rahmengesteine durchgeführt (TBO-Datenberichte Dossier IX). Beim unbehinderten Quellen erreicht das Quellmass Werte von < 1 % bis ca. 6 %. Bei behinderter Ausdehnung werden im Oedometerversuch Quelldrucke von < 1 MPa bis zu ca. 15 MPa gemessen, im Triaxialversuch sogar bis über 30 MPa. Die hohen Maximalwerte ergeben sich aufgrund der grossen Entnahmetiefe resp. der damit verbundenen stärkeren Verdichtung der Tonminerale (Madsen & Müller-Vonmoos 1985) und sind Ausdruck der sehr guten Probenqualität. Auch allfällige Wasserverluste bei der Probenpräparation können die Werte zusätzlich erhöhen (Madsen & Müller-Vonmoos 1989). Allerdings zeigen Resultate aus lastabhängiger Quellung eine sehr starke (logarithmische) Reduktion des Quelldrucks bei sehr kleinen Ausdehnungen. Dies sind im Nahbereich von Untertagestrukturen auch die relevanten Randbedingungen. Vergleiche mit Messungen im Untertagebau (Steiner 1993, Madsen & Müller-Vonmoos 1989, Ziegler et al. 2022) zeigen auch deutlich geringere Quelldrucke als im Labor gemessene, was mit geringen Ausdehnungen vor Einbau der Stützmittel erklärt werden kann.

Für den Opalinuston werden deshalb in Kap. 6.4.3 gegenüber den gemessenen Werten abgeminderte Quellwerte angegeben, welche konsistent sind mit den Literaturwerten von Opalinuston (Nagra 2014b) und welche hauptsächlich als durch die Mineralogie kontrolliert angesehen werden können. Für alle anderen tonreichen Gesteinseinheiten werden auf Grundlage von Konservativitätsüberlegungen die gleichen Bandbreiten angenommen (Quellmass 1 – 5 %, Quelldruck 1 – 3 MPa).

6.2 Geomechanische Eigenschaften von Störungszonen

Aufgrund seiner Bedeutung als Wirtgestein werden Eigenschaften von Störungszonen nur für den Opalinuston abgeschätzt. Die Werte können in erster Näherung auch auf andere tonmineralreiche Gesteinseinheiten übertragen werden. Für Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten kann mit höheren geomechanischen Werten gerechnet werden.

Der Opalinuston wurde unter kontrollierten Laborbedingungen bei unterschiedlicher Entfestigung detailliert untersucht (TBO-Datenberichte Dossier IX). Diese Versuche zeigen, dass beim Abscheren der Proben, also beim Übergang vom ungestörten Zustand zu einer durchgehenden Verschiebungsfläche, im Wesentlichen die Kohäsion stark reduziert wird. Der effektive Reibungswinkel bleibt auch bei der Regression der geringsten Werte bei rund 20° . Diese Werte können als massgebend für tektonische Trennflächen («effektive Trennflächen») mit geringem Versatz angesehen werden.

Da die Verschiebungen im Triaxialversuch auf einige Millimeter limitiert sind, wurde zusätzlich auch das Scherverhalten von Gesteinsmehl, wie es in grösseren Störungszonen zu erwarten ist (vgl. Kap. 4.3), untersucht. Dazu wurden Opalinuston-Proben aufgemahlen und mechanisch wieder verdichtet. Die Resultate von Triaxial-, Scher- und Direktscherversuchen bestätigen den praktisch gänzlichen Verlust an Kohäsion sowie näherungsweise auch die aus den Triaxialversuchen gemessenen Restreibungswinkel (Ferrari et al. 2020).

6.3 Spannungsverhältnisse in den geomechanischen Einheiten

In Abhängigkeit der tektonischen Verhältnisse, der geomechanischen Gebirgseigenschaften sowie der Tiefenlage der geomechanischen Einheiten ergeben sich unterschiedliche Spannungsverhältnisse. Diese werden grundsätzlich charakterisiert durch die Orientierung und Magnitude der maximalen horizontalen Hauptspannung (SHmax), der Überlagerungsspannung (Sv) und der minimalen horizontalen Hauptspannung (Shmin).

In den TBO wurden die lokalen Spannungsverhältnisse durch «micro-hydraulic fracturing»-Messungen (MHF) und Spannungsindikatoren am Bohrloch bestimmt. Diese Resultate wurden in ein regionales Spannungsmodell integriert (Nagra NAB 24-19 *in Bearb.*). Dieses Spannungsmodell stellt die Grundlage für die Beschreibung der zu erwartenden Spannungsverhältnisse am Schachtstandort resp. an den Bauwerken auf Lagerebene dar.

SHmax ist im Standortgebiet in NNW – SSE-Richtung orientiert. Die dominante Richtung aus den Bohrungen im Standortgebiet ergibt $163^\circ (\pm 8^\circ)$ und ist in den geomechanischen Einheiten relativ konstant, nur in geringer Tiefe muss mit einer Verzerrung der Hauptspannungsrichtungen aufgrund topographischer Effekte gerechnet werden.

Auch für die Spannungsmagnituden muss in geringer Tiefe mit höheren Verhältnissen von Shmin/Sv resp. SHmax/Sv gerechnet werden als bei grösserer Überdeckung. Allerdings sollten die Absolutwerte von Shmin und SHmax in den obersten 100 m auf < 8 resp. < 12 MPa begrenzt sein.

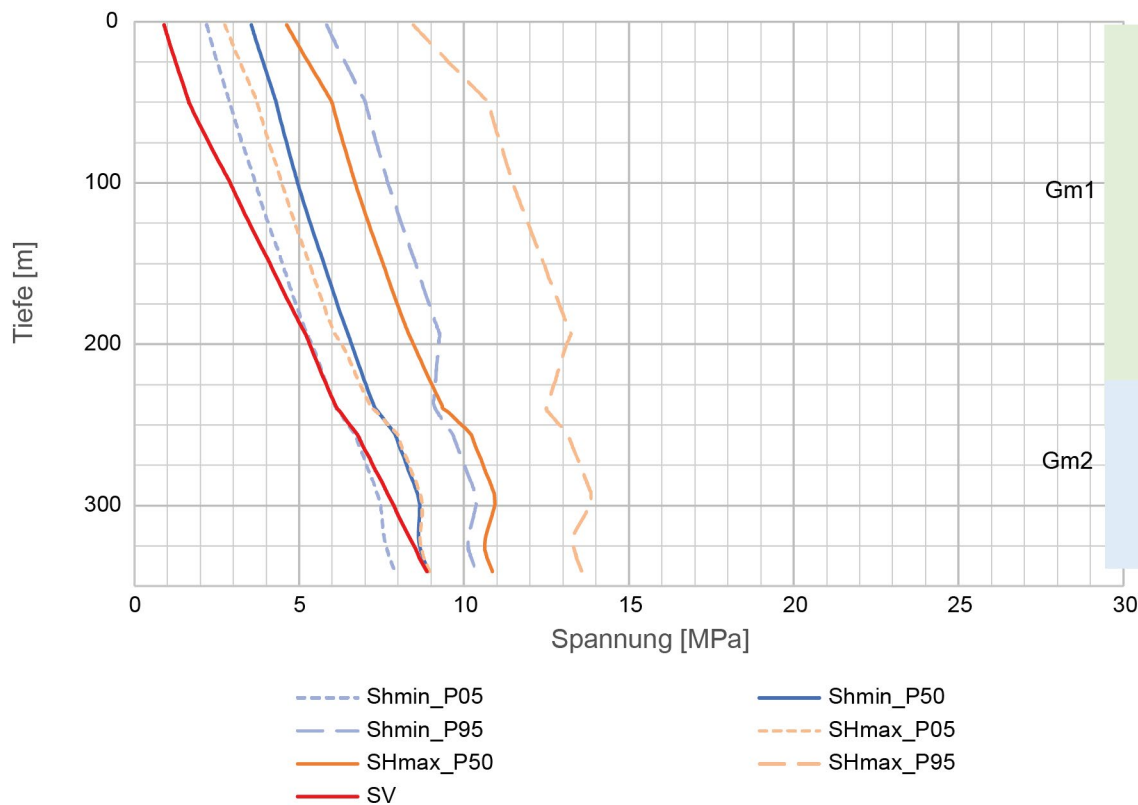


Fig. 6-5: Spannungsprofile am geplanten Standort des Lüftungsschachts

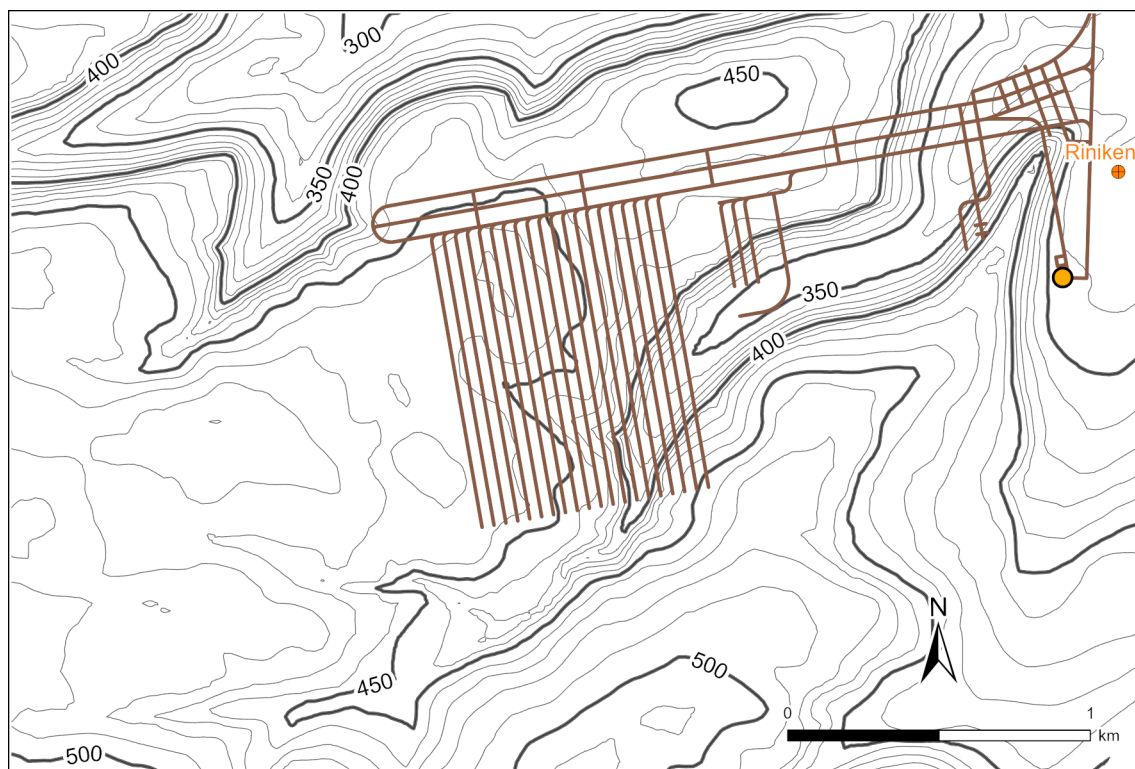
Die aus dem Spannungsmodell abgeleiteten Bandbreiten der Spannungsmagnituden entlang des geplanten Lüftungsschachts sind in Fig. 6-5 dargestellt. Für den Opalinuston ist die Anzahl durchgeführter MHF-Versuche deutlich grösser als in anderen geomechanischen Einheiten. Die Messungen zeigen einen konsistenten Trend mit der Tiefe, unabhängig vom Standortgebiet. Die erwartete Bandbreite für die geomechanische Einheit Gm3 (Opalinuston) wird deshalb direkt aus den MHF-Versuchen abgeleitet, und die Spannungsmodellierungen werden zur Konsistenzprüfung verwendet (Tab. 6-1) (Nagra NAB 24-19 *in Bearb.*).

Bei den in Tab. 6-1 wiedergegebenen Werten ist zu beachten:

- Aufgrund der Tiefenunterschiede innerhalb des Lagerbereichs werden Werte für ein breiteres Tiefenspektrum angegeben als in der Prognose für den Lüftungsschacht.
- Unterer und oberer Erwartungswert decken die erwartete Bandbreite ab.
- Minimal- und Maximalwert bedeuten, dass diese Werte nicht ausgeschlossen werden können, aber generell eher nicht erwartet werden.

Tab. 6-1: Tiefenabhängige Werte für die Hauptspannungsmagnituden im Opalinuston

Tiefe [m]	Shmin [MPa]				SHmax [MPa]				Sv [MPa]
	Minimalwert	Unterer Erwartungswert	Oberer Erwartungswert	Maximalwert	Minimalwert	Unterer Erwartungswert	Oberer Erwartungswert	Maximalwert	Erwartungswert (rho = 2'450 kg/m ³)
400	6.8	7.4	7.9	8.5	7.0	7.8	9.1	10.4	9.6
450	7.7	8.3	8.8	9.5	7.9	8.8	10.3	11.7	10.8
500	8.5	9.2	9.8	10.6	8.7	9.7	11.4	13.0	12.0
550	9.4	10.1	10.8	11.7	9.6	10.7	12.6	14.2	13.2



**Erdwissenschaftliche
Untersuchung**

- Alte Nagra Tiefbohrung

Geologische Tiefenlager

- HAA-Lager

Nebenzugangsanlagen

- Lüftungsschacht

Überlagerung Opalinuston

- Überlagerung Top Opalinuston

Fig. 6-6: Überlagerung des Top Opalinuston im Bereich des Lagerprojekts

6.4 Tabellarische Zusammenfassung der geomechanischen Einheiten

6.4.1 Gm1 (Wildegge-Formation)

Gm1 (Wildegge-Formation)						
Geomechanische Gesteinseigenschaften						
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]	26		26		27	Datenspektrum
E_i Modul [GPa]	7.2	8.5	10.6	14.7	21.7	Mod. Datensatz
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	29.1	33.6	40.7	53.6	74.6	Mod. Datensatz
Poissonzahl [-]	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	Mod. Datensatz
Spitzenkohäsion [MPa]	10.0		13.0		18.0	Mod. Datensatz
Spitzenreibungswinkel [°]	10.0		17.0		55.0	Mod. Datensatz
Spaltzugfestigkeit [MPa]	2.6	3.0	3.6	4.7	6.6	Mod. Datensatz
Quelldruck [MPa]	1.0				3.0	Hinweisdaten
Quellmass [%]	1.0				5.0	Hinweisdaten
Gebirgsspannungen						
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert			
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	5.1	6.4	9.2	Mod. Datensatz		
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	6.0	8.2	13.1	Mod. Datensatz		
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		5.0		Mod. Datensatz		

6.4.2 Gm2 (Dogger oberhalb Opalinuston)

Gm2 (Dogger oberhalb Opalinuston)						
Geomechanische Gesteinseigenschaften						
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]	24		25		26	Datenspektrum
E_i Modul [GPa]	5.6	8.6	13.2	15.6	18.4	Mod. Datensatz
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	22.3	28.9	34.1	38.4	63.4	Mod. Datensatz
Poissonzahl [-]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	Mod. Datensatz
Spitzenkohäsion [MPa]	7.0		10.0		18.0	Mod. Datensatz
Spitzenreibungswinkel [°]	10.0		32.0		40.0	Mod. Datensatz
Spaltzugfestigkeit [MPa]	2.2	2.8	3.2	3.6	6.2	Mod. Datensatz
Quelldruck [MPa]	1.0				3.0	Hinweisdaten
Quellmass [%]	1.0				5.0	Hinweisdaten
Gebirgsspannungen						
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert			
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	7.5	8.7	10.4	Mod. Datensatz		
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	8.7	10.9	13.8	Mod. Datensatz		
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		7.9		Mod. Datensatz		

6.4.3 Gm3 (Opalinuston)

Gm3 (Opalinuston)					
Geomechanische Gesteinseigenschaften					
		P0.05	P0.5	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]		25	25	26	Datenspektrum
E _L Modul [GPa] (undrainiert)	$5 \leq p' \leq 10$ MPa	5	8	11	Datenspektrum
	$10 > p' \leq 15$ MPa	7	10	12	Datenspektrum
E// Modul [GPa] (undrainiert)	$5 \leq p' \leq 10$ MPa	10	16	22	Datenspektrum
	$10 > p' \leq 15$ MPa	14	19	24	Datenspektrum
p' = mittlerer effektiver Spannungsbereich					
UCS [MPa]	⊥	15.7	20.2	24.7	Datenspektrum
	//	16.5	24.2	27.4	Datenspektrum
Poissonzahl [-] (undrainiert)	⊥	0.2	0.33	0.5	Datenspektrum
	//	0.12	0.27	0.55	Datenspektrum
Spitzenkohäsion [MPa]	⊥	5.2	6.4	7.4	Datenspektrum
	//	5	7	7.9	Datenspektrum
Spitzen- reibungswinkel [°]	⊥	23	25.4	28.1	Datenspektrum
	//	27.6	30	30.1	Datenspektrum
Quelldruck [MPa]		1.0		3.0	Datenspektrum
Quellmass [%]		1.0		5.0	Datenspektrum
Gebirgsspannungen					
Spannungsmagnituden		siehe Tab. 6-1			Mod. Datensatz

7 Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften

Als Verkarstung wird eine Überprägung des Gebirges durch physiko-chemische Prozesse verstanden, die zur Entwicklung einer Karstlandschaft und/oder unterirdisch zur Entwicklung eines Karstaquifers resp. zur Entwicklung von Karsthohlräumen führt (z. B. Filipponi et al. 2022).

Ein Karsthohlraum ist ein Lösungshohlraum, der in Zusammenhang mit der Entwicklung eines Karstaquifers erweitert wurde und gross genug ist, um turbulentes Fliessen zuzulassen (Filipponi et al. 2022). Karsthohlräume sind nicht als isolierte Hohlräume im Gebirge zu betrachten, sondern als ein verbundenes System von Karsthohlräumen unterschiedlicher Grösse zu verstehen (z. B. Klimchouk et al. 2000).

Karsthohlräume stellen per se keine Gefährdung dar. Die Gefährdung, welche beim Bau von untertägigen Bauwerken von Karsthohlräumen ausgeht, hängt unter anderem von den Hohlraumeigenschaften (Geometrie und Grösse, Wasserführung, Sedimentfüllung), von der Geometrie und Orientierung der Bauwerke und den angewandten Baumethoden ab (z. B. Filipponi et al. 2012, Marinos 2001, Milanovic 2004, Milanović 2000). Dabei sind Vorkommen und Eigenschaften von Karsthohlräumen im Raum heterogen verteilt.

Damit ein Gebirgsbereich verkarstet resp. sich ein Karstaquifer entwickeln kann, müssen vier Voraussetzungen erfüllt sein (z. B. Klimchouk et al. 2000, de Waele & Gutiérrez 2023):

1. das Vorhandensein einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit
2. das Vorhandensein eines signifikanten Grundwasserflusses
3. das Wasser muss ein Lösungspotenzial bezüglich der zu lösenden Minerale aufweisen
4. die hydraulischen (2) und hydrochemischen (3) Bedingungen müssen über eine hinreichend lange Zeit bestehen

Deshalb bedeutet das alleinige Vorkommen einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit nicht zwangsläufig, dass diese auch verkarstet ist. Ausserdem erklären die vierfach notwendigen Voraussetzungen, weshalb eine Verkarstung nicht zwangsläufig die ganze verkarstungsfähige Gesteinseinheit erfassen muss.

Die Prozesse der Verkarstung des Gebirges können unter heutigen hydrogeologischen Verhältnissen aktiv oder in erdgeschichtlicher Vergangenheit abgeschlossen worden sein («Paläo-Verkarstung»). Das Vorhandensein einer Paläo-Verkarstung bedeutet nicht zwingend, dass die verkarstete Gesteinseinheit aus hydrogeologischer Sicht noch heute als Karstaquifer zu betrachten ist.

Der Baugrund wird im Rahmen dieses Berichts in Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften zusammengefasst (Fig. 7-1). Es ergeben sich folgende Einheiten:

- Ka1 entspricht der weitgehend nicht verkarstungsfähigen Wildeggen-Formation mit der verkarstungsfähigen Zwischenschicht der Gerstenhübel-Bank.
- Ka2 entspricht dem verzahnten Bereich des zum Teil verkarstungsfähigen Haupttrogensteins mit der nicht verkarstungsfähigen Klingnau-Formation.
- Ka3 entspricht der nicht verkarstungsfähigen Passwang-Formation.
- Ka4 entspricht dem nicht verkarstungsfähigen Opalinuston.

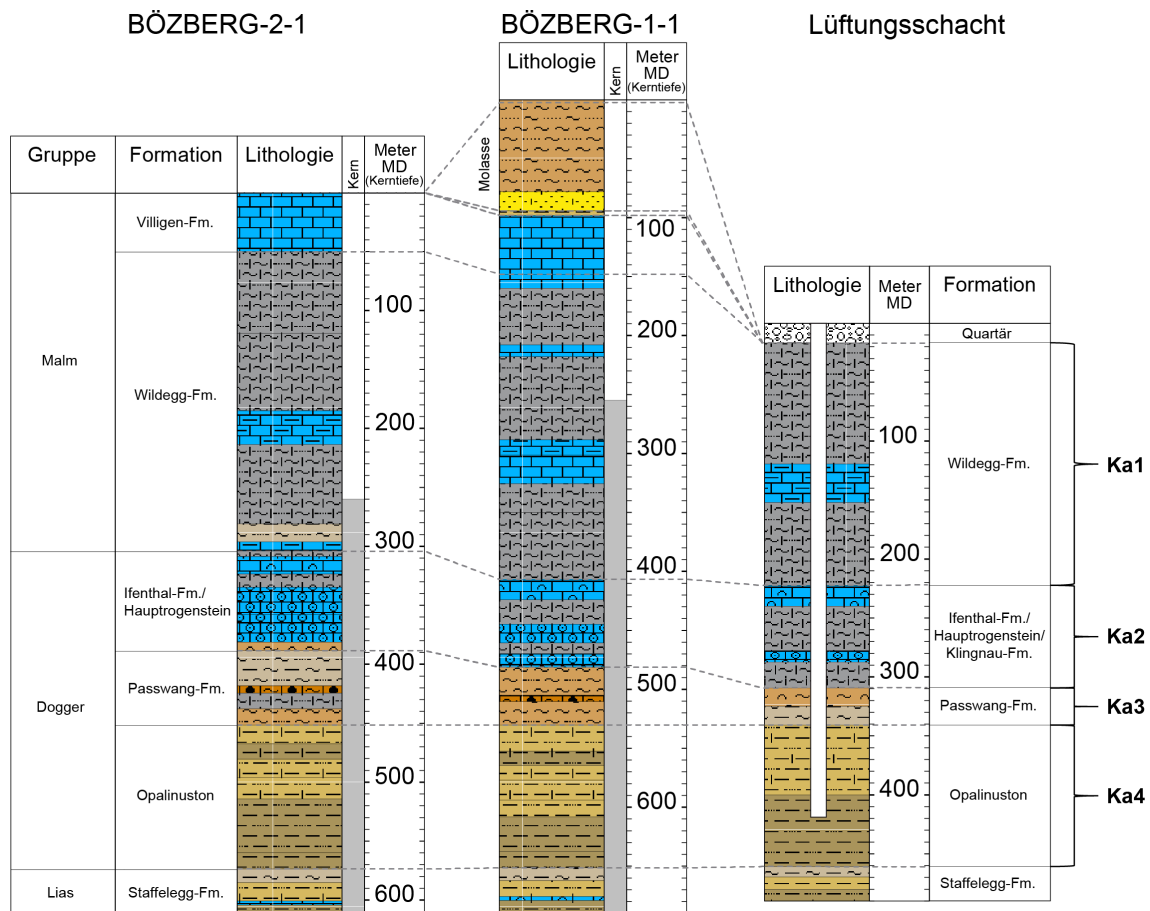


Fig. 7-1: Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften mit der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

7.1 Beurteilung der Verkarstung des Gebirges

Für die ingenieurgeologische Beurteilung der Verkarstung wird die KarstALEA-Methode angewendet (Filipponi et al. 2012). Die Methode wird dabei an die stufengerechten Bedürfnisse sowie an die speläologischen und hydrogeologischen Bedingungen im Standortgebiet angepasst.

Als Datengrundlage dienen die Beobachtungen aus den TBO. Naturgemäss weisen Verkarstungseigenschaften eine grosse räumliche Heterogenität auf.

7.1.1 Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten

Eine verkarstungsfähige Gesteinseinheit ist eine Gesteinseinheit, die bezüglich Wasser oder schwachen Säuren (z. B. kohlensäurehaltiges Wasser) eine gute Löslichkeit aufweist (z. B. de Waele & Gutiérrez 2023). Der Übergang von einer nicht verkarstungsfähigen zu einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit ist fließend. Die Abgrenzung ist grundsätzlich projektspezifisch zu definieren und erfolgt anhand der örtlichen lithologischen und klimatischen Bedingungen (z. B. Filipponi et al. 2022). Im Rahmen der vorliegenden Beurteilung wird unterschieden zwischen:

- nicht verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten (Karbonatanteil < 80 Vol.-%)
- verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten (Karbonatanteil > 80 Vol.-%)

Dabei werden aus sedimentologischen, hydrogeologischen und speläogenetischen Überlegungen Gesteinseinheiten mit einer Mächtigkeit < 10 m nicht berücksichtigt.

Im Standortgebiet können insbesondere die Gerstenhübel-Bank (Wildegge-Formation resp. Ka1) und der Hauptrogenstein (Bereich innerhalb Ka2) als verkarstungsfähige Gesteinseinheiten betrachtet werden (Fig. 7-1). Die mergligen und tonigen Gesteine, wie die Klingnau-Formation (Bereich innerhalb Ka2), die Passwang-Formation (Ka3) und insbesondere der Opalinuston (Ka4) sind nicht verkarstungsfähig und können daher auch keine Verkarstung aufweisen.

Bei der Gerstenhübel-Bank handelt es sich um eine rund 30 m mächtige karbonatreiche Gesteinseinheit der kalkmergelig dominierten Wildegge-Formation (Bläsi et al. 2013). Sie hat einen hohen Karbonatgehalt (> 80 Vol.-%) und wird deshalb als verkarstungsfähig betrachtet.

Im östlichen Teil des Standortgebiets, wo sich auch der geplante Standort des Lüftungsschachts befindet, verläuft der Fazieswechsel vom karbonatreichen Hauptrogenstein zur mergeligen Fazies der Klingnau-Formation (vgl. Kap. 3.1.2). Damit verbunden ist eine generell geringe Verkarstungsfähigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit resp. ein geringes Verkarstungspotenzial (Karbonatanteil < 80 Vol.-%). Aus Konservativitätsüberlegungen wird der Hauptrogenstein im Rahmen dieses Berichts dennoch als verkarstungsfähig betrachtet.

7.1.2 Verkarstung der verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten

Wie einleitend beschrieben, ist das Vorhandensein einer verkarstungsfähigen Gesteinseinheit nicht gleichzusetzen mit dem effektiven Vorkommen von Karsterscheinungen.

Da das Vorhandensein von verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten eine Grundvoraussetzung für eine Verkarstung ist, werden in diesem Abschnitt nur noch die Einheiten Ka1 und Ka2, die verkarstungsfähige Gesteinseinheiten enthalten, diskutiert (vgl. Kap. 7.1.1).

Die Gerstenhübel-Bank in der Einheit Ka1 und auch der Hauptrogenstein in Ka2 wurden in der BOZ1-1 gekernt durchbohrt (Fig. 7-1). Dabei wurden keine Hinweise auf eine aktuelle oder Paläo-Verkarstung dieser Gesteinseinheiten beobachtet (vgl. TBO-Datenberichte Dossiers II, III). Eine Verkarstung der Gesteinseinheiten kann auch unter speläogenetischen Gesichtspunkten als unwahrscheinlich angesehen werden. Dafür spricht unter anderem ihre Lage mehrere Hundert Meter unter dem Vorfluterniveau oder ihre Einbettung in wenig durchlässige Gesteinseinheiten). Deshalb werden diese verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten und somit auch die Einheit Ka1 und Ka2 als nicht verkarstet betrachtet.

Tab. 7-1: Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit der und der Verkarstung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften

Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Verkarstung des Gebirges
Ka1 (Wildeg-Formation)	Nur Gerstenhübel-Bank verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)	Nur Hauptrogenstein verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka3 (Passwang-Formation)	Nicht verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka4 Opalinuston	Nicht verkarstungsfähig	Nicht verkarstet

7.1.3 Auftretenshäufigkeit von Karsthohlräumen

Da die geplanten Bauwerksachsen durch keine verkarsteten Gesteinseinheiten führen (vgl. Kap. 7.1.2), sind auch keine Karsthohlräume zu erwarten.

Dies schliesst nicht aus, dass in karbonatreichen Gesteinseinheiten lokal (isolierte) Lösungshohlräume vorkommen können. Diese werden im Kontext dieses Berichts jedoch als erweiterte Trennflächen und nicht als Karsthohlräume betrachtet.

7.2 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften

7.2.1 Ka1 (Wildeg-Formation)

Ka1 (Wildeg-Formation)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nur Gerstenhübel-Bank verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.2 Ka2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)

Ka2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nur Hauptrogenstein verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.3 Ka3 (Passwang-Formation)

Ka3 (Passwang-Formation)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nicht verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.4 Ka4 (Opalinuston)

Ka4 (Opalinuston)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nicht verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

8 Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen

Eine Gefahr ist ein Zustand oder ein Vorgang, welcher sich negativ auf die Erfüllung einer Projektanforderung auswirken kann (SIA 2001). Eine Gefahr liegt vor, wenn eine Sachlage oder ein Verhalten bei ungehindertem Ablauf des objektiv zu erwartenden Geschehens in absehbarer Zeit und mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ein Schutzgut schädigen wird.

Die Identifikation der Gefährdungen erfolgt aus ingenieurgeologischer Sicht bezogen auf die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse, die Lage der geplanten Bauwerke, die Bauphase und die Nutzungsart. Die Beurteilungen erfolgen ohne die Berücksichtigung von risikomindernden Massnahmen, wie z. B. vorausseilende Erkundungsmassnahmen oder der Einbau von Sicherungsmitteln SIA 199 (SIA 2015).

Es werden Gefährdungen bewertet, die in Zusammenhang stehen mit:

- dem Gebirgsverhalten (Kap. 8.1)
- dem Zutritt von Bergwasser ins Bauwerk (Kap. 8.2)
- mit gesundheitlichen Auswirkungen (Kap. 8.2.2)
- anderen negativen Eigenschaften des Baugrunds (Kap. 8.4)

Die Gefährdungen werden so weit als möglich und sinnvoll quantitativ beschrieben. Die Beurteilung der Eintretenswahrscheinlichkeit der Gefährdungen erfolgt qualitativ nach Tab. 1-2. Es sei darauf hingewiesen, dass die ausgewiesene Eintretenswahrscheinlichkeit keine Aussage zum möglichen Schadensausmass zulässt.

Die Beurteilung der Gefährdungen erfolgt primär für die Bauphase. Auf methodenbedingte Gefährdungen durch spezifische Bauphase wird nicht eingegangen (z. B. Abbaubarkeit des Gebirges). Es wird auch auf eine umfassende Beschreibung der bautechnischen Konsequenzen (z. B. Überprofil) verzichtet, da dies im Rahmen der Gefährdungsbildanalyse im technischen Beschrieb (Nagra 2023b) und der bautechnischen Risikoanalyse (Nagra 2023c) berücksichtigt wird.

Die Gefährdungen werden aus den Einheiten mit ähnlichen Baugrundeigenschaften der Kapitel 3 bis 7 abgeleitet und bewertet. Die abgeleiteten Gefährdungen werden in Einheiten mit ähnlichen Gefährdungsbildern zusammengefasst. Es werden drei Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften unterschieden (Fig. 8-1):

- Gb1 fasst die Wildeggen-Formation und den Dogger oberhalb der Passwang-Formation zusammen.
- Gb2 entspricht der Passwang-Formation.
- Gb3 entspricht dem Opalinuston.

Wo als sinnvoll erachtet, wird unterschieden zwischen:

- Gb3_S: Opalinuston im Lüftungsschacht
- GB3_R: Opalinuston entlang des (Betriebs-)Zugangstunnels
- Gb3_L: Opalinuston auf Lagerebene

Gruppe	Formation	Lithologie	Meter MD	lithologische Einheiten	Trennflächen-Einheiten	hydrogeologische Einheiten	geomechanische Einheiten	Verkarstungs-Einheiten	Gefährdungs-bilder
Quartär									
Malm	Wildeggen-Fm.		100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1
			200						
			300	Li2			Gm2	Ka2	
Dogger	Hentthal-Fm./ Hauptrogenstein/ Klingnau-Fm.			Li3		Hy2		Ka3	Gb2
	Passwang-Fm.								
	Opalinuston		400	Li4	Te2	Hy3	Gm3	Ka4	Gb3
Lias	Staffellegg-Fm.								

Fig. 8-1: Herleitung der ingenieurgeologischen Gefährdungsbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts)

8.1 Beurteilung der Gefährdungen in Zusammenhang mit dem Gebirgsverhalten

Das Gebirgsverhalten und die damit verbundenen Gefahren werden qualitativ beschrieben, wobei das Gebirgsverhalten ohne Stützmitteleinbau berücksichtigt wird.

Es wird unterschieden zwischen:

- Gebirge ohne Störungszonen
- Störungszonen

8.1.1 Ablösungen von Trennflächenkörpern

Die Beurteilung der Gefahr der Ablösung von Trennflächenkörpern im Vortriebsbereich erfolgt für das Gebirge ohne Störungszonen anhand der Orientierung der Trennflächen relativ zur Vortriebsrichtung (Kap. 4.1.1) sowie der Grösse und Form der Trennflächenkörper (Kap. 4.2). Für die Störungszonen werden entsprechende Trennflächenkörper angenommen; es werden die Ausprägungen der Störungszonen betrachtet, die als «möglich» beurteilt werden (Störungszonen Typ III, Kap. 4.3), resp. relevant sind für das Lagerprojekt (Nagra 2023b). Entsprechend wird unterschieden zwischen (Tab. 8-1, Tab. 8-2):

- horizontalen Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich («Sargdeckel»)
- Ablösungen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung
- Blockgleiten aus den Paramenten

Tab. 8-1: Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern im Gebirge ausserhalb von Störungszonen

Gebirge ausserhalb Störungszonen					
Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	Ablösen von Trennflächenkörpern			
		Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich	Ablösungen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Te1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Wahrscheinlich (Stichtunnel) Extrem unwahrscheinlich (Lüftungsschacht)	Wahrscheinlich (Stichtunnel) Extrem unwahrscheinlich (Lüftungsschacht)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Gb2 (Passwang-Formation)					
Gb3s (Opalinuston – Schachtbauwerk)	Te2 (Opalinuston)	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich		
Gb3R (Opalinuston – (Betriebs-) Zugangstunnel)					
Gb3L (Opalinuston – Lagerebene)					

Tab. 8-2: Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern in Störungszonen des Typs III

Störungszonen Typ III					
Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	Ablösen von Trennflächenkörpern			
		Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich	Ablösungen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Te1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Wahrscheinlich (Stichtunnel) Extrem unwahrscheinlich (Lüftungsschacht)	Wahrscheinlich (Stichtunnel) Extrem unwahrscheinlich (Lüftungsschacht)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Gb2 (Passwang-Formation)					
Gb3s (Opalinuston – Schachtbauwerk)	Te2 (Opalinuston)	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich		
Gb3R (Opalinuston – (Betriebs-) Zugangstunnel)					
Gb3L (Opalinuston – Lagerebene)					

8.1.2 Druckhaftes Gebirge

Als druckhaftes Gebirge wird ein Gebirge bezeichnet, bei dem der Ausbruch eines Hohlraums unter bestimmten Bedingungen grosse langanhaltende Gebirgsverformungen auslöst, die zu dessen fortschreitender Verengung führen (Kovári 1998). Bei voller Ausbildung des Phänomens dringt das Gebirge von allen Seiten in den Hohlraum ein und umfasst somit auch die Sohle. Diese Prozesse klingen mit der Zeit ab, bis ein neuer Gleichgewichtszustand erreicht ist. Im Extremfall tritt ein Stillstand der Gebirgsdeformationen resp. ein Spannungsgleichgewicht erst dann ein, wenn der Hohlraum komplett geschlossen wurde. Dieses Gebirgsverhalten hängt unter anderem ab von der Gebirgsfestigkeit (vgl. Kap. 6.1.1), dem Verformungsverhalten, der Gebirgsspannung (vgl. Kap. 6.3) und der Grösse und Orientierung der Ausbruchshohlräume und wird im Rahmen dieses Berichts qualitativ bewertet (Tab. 8-3, Tab. 8-4).

Tab. 8-3: Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges ausserhalb von Störungszonen

Gebirge ausserhalb Störungszonen		
Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften	Gebirgsspannungsbedingtes druckhaftes Gebirge
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Gm1 (Wildeg-Formation)	Möglich
Gb2 (Passwang-Formation)	Gm2 (Dogger oberhalb Opalinuston)	Möglich
Gb3s (Opalinuston – Schachtbauwerk)	Gm5 (Opalinuston)	Möglich bis wahrscheinlich
Gb3R (Opalinuston – (Betriebs-) Zugangstunnel)		Wahrscheinlich
Gb3L (Opalinuston – Lagerebene)		

Tab. 8-4: Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges in Störungszonen des Typs III

Störungszonen Typ III		
Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften	Gebirgsspannungsbedingtes druckhaftes Gebirge
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Gm1 (Wildeg-Formation)	Wahrscheinlich
Gb2 (Passwang-Formation)	Gm2 (Dogger oberhalb Opalinuston)	Wahrscheinlich
Gb3s (Opalinuston – Schachtbauwerk)	Gm5 (Opalinuston)	Wahrscheinlich
Gb3R (Opalinuston – (Betriebs-) Zugangstunnel)		
Gb3L (Opalinuston - Lagerebene)		

8.2 Gefahren in Zusammenhang mit Zutritt von Bergwasser ins Bauwerk

Die von Bergwasser ausgehenden Gefahren stehen in Zusammenhang mit Wasserzutritten in das Untertagebauwerk (z. B. Unterwassersetzen des Vortriebsbereichs, Versinterung von Drainageleitungen) oder durch chemische Einwirkungen des Bergwassers auf die Bausubstanz (bspw. Betonkorrosion, Korrosion metallischer Einbauten).

Die Einwirkung einer potenziellen Entwässerung des Gebirges auf die Grundwasserverhältnisse, die Schüttung von Quellen oder den sich verändernden Wasserhaushalt von Feuchtgebieten wird nicht diskutiert. Ebenfalls nicht bewertet werden allfällige Gefährdungen des Grundwassers durch den Bau oder Betrieb der Bauwerke (z. B. Verschmutzung des Grundwassers durch Schmiermittel).

8.2.1 Wasserzutritt

Als (Berg-)Wasserzutritt wird Wasser verstanden, welches während der Bau- und/oder Betriebsphase kurzzeitig oder dauerhaft an einer Stelle, z. B. aus einer Trennfläche oder einem Karsthohlraum, aus dem Gebirge in das Untertagebauwerk eintritt. Es wird zwischen initialem und permanentem Wasserzutritt unterschieden.

Der initiale Wasserzutritt wird für die Beurteilung der Gefahr eines Wassereinbruchs verwendet. Als Wassereinbruch wird ein Wasserzutritt mit auslegungsüberschreitender Schüttung (Wasservolumen/Zeit) verstanden und führt zu einer temporären Einstellung des Vortriebs resp. des Betriebs. Es müssen dann zusätzliche Massnahmen getroffen werden, um die Situation zu beherrschen resp. die Gefährdung zu beheben.

Der permanente Wasserzutritt resp. der Bergwasseranfall wird beurteilt, um die Bergwasserhaltung resp. deren Aufbereitung zu dimensionieren. Hingegen wird der Bergwasseranfall als Summe der Wassermenge pro Zeiteinheit und Tunnelabschnitt nicht beurteilt, da davon ausgegangen wird, dass Wasserzutritte vor oder unmittelbar nach dem Auffahren versiegelt werden.

Die Berechnung der initialen Wasserzutrittsmenge erfolgt anhand der Darcy-Weisbach-Gleichung (Tab. 8-5), während für den permanenten Wasserzutritt der Ansatz von El Tani (2003) verwendet wird (Tab. 8-6).

Eine allfällige Sedimentfracht der Bergwässer wird in diesem Bericht nicht bewertet.

Tab. 8-5: Beurteilung des prognostizierten initialen Wasserzutritts

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften		Initialer Wasserzutritt [L/min m]						
			< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 1	1 – 10	10 – 100	100 – 1'000	> 1'000
Gb1 (Wildeg- Formation und Dogger oberhalb Passwang- Formation)	Hy1	Gebirge	Wahrscheinlich				Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
		Störungszone	Wahrscheinlich				Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gb2 (Passwang- Formation)	Hy3	Gebirge	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich			
		Störungszone	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich		
Gb3 (Opalinuston)	Hy4	Gebirge	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich					
		Störungszone	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich					

Tab. 8-6: Beurteilung des prognostizierten permanenten Wasserzutritts

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften	Permanenter Wasserzutritt [L/min m]						
		< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 1	1 – 10	10 – 100	100 – 1'000	> 1'000
Gb1 (Wildeg- Formation und Dogger oberhalb Passwang- Formation)	Hy1	Gebirge	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
		Störungszone	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Gb2 (Passwang- Formation)	Hy2	Gebirge	Wahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich			
		Störungszone	Wahrscheinlich	Möglich	Extrem unwahrscheinlich			
Gb3 (Opalinuston)	Hy3	Gebirge	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich				
		Störungszone	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich				

8.2.2 Überschreiten der Einleitgrenzwerte

Anfallendes Bergwasser wird im Bauwerk gefasst und an die Oberfläche transportiert, wo es in die Kanalisation oder in einen Vorfluter eingeleitet oder auch versickert wird. Damit Bergwasser eingeleitet werden darf, muss es Einleitgrenzwerte einhalten, die in der Gewässerschutzverordnung (GSchV 1998) festgelegt sind.

Das anfallende Bergwasser (vgl. Kap. 8.2.1) überschreitet die vorgegebenen Grenzwerte der Gewässerschutzverordnung bezüglich des Einleitens in ein Fliessgewässer nicht (vgl. Kap. 5.1.5). Jedoch sind in dieser Verordnung keine Grenzwerte für Sulfat und Chlorid vorgegeben. In der Annahme, dass diesbezüglich die Grenzwerte für Trinkwasserqualität (jeweils 40 mg/L) eingehalten werden sollen, ist eine notwendige Aufbereitung der anfallenden Bergwässer bezüglich Sulfat und Chlorid wahrscheinlich.

Tab. 8-7: Beurteilung der Überschreitung der erwarteten Einleitgrenzwerte

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen hydro-geologischen Eigenschaften	Überschreiten der Einleitgrenzwerte in Gewässer nach Gewässerschutzverordnung		Überschreiten der Grenzwerte bei der Trinkwasserqualität bezüglich	
		pH-Wert	Chemische Grenzwerte	Sulfat (SO ₄)	Chlorid
		6.5 – 9.0		40 mg/L	40.0 mg/L
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
Gb2 (Passwang-Formation)	Hy2 (Passwang-Formation)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
Gb3 (Opalinuston)	Hy3 (Opalinuston)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich

8.2.3 Versinterung von Drainageleitungen

Durch das Eindringen von mineralisierten Bergwässern in die Bauwerke resp. Drainageleitungen kann es zu Ausfällungen kommen (Versinterung), die Verminderungen des Abflussquerschnitts aller natürlichen und technischen wasserführenden Elemente zur Folge haben. Dies kann dazu führen, dass die anfallenden Bergwasservolumina nicht mehr abgeleitet werden können. Dadurch staut sich das Bergwasser auf und verursacht Schäden oder ebnet den Weg für andere Schadensmechanismen.

Es werden nur die Sinterausfällungen in Zusammenhang mit Mineralen betrachtet, die im Bergwasser mitgeführt werden und im Tunnel ausfallen. Neben den physiko-chemischen Eigenschaften des Bergwassers (vgl. Kap. 5.1.5) wird auch der effektive Bergwasseranfall (vgl. Kap. 8.2.1) berücksichtigt.

Die hydrochemische Zusammensetzung der anfallenden Bergwässer (vgl. Kap. 5.1.5) deutet auf eine Calcitsättigung hin. Damit besteht grundsätzlich ein Potenzial zur Mineralausfällung. Die Bergwässer neigen insbesondere beim Austritt in eine Entwässerung oder Drainage zu Ausfällungen und Versinterungen. Bergwasserzutritte werden jedoch allenfalls in den karbonatreichen Gesteinseinheiten der aufzufahrenden Strecken der hydrogeologischen Einheit Hy1 erwartet (Tab. 8-8).

Tab. 8-8: Beurteilung des Versinterungspotenzials

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften	Versinterungspotenzial
Gb1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Hy1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Möglich
Gb2 (Passwang-Formation)	Hy2 (Passwang-Formation)	Unwahrscheinlich
Gb3 (Opalinuston)	Hy3 (Opalinuston)	Extrem unwahrscheinlich

8.2.4 Betonkorrosion

Beton, welcher mit Bergwasser in Kontakt steht, kann sich durch chemische Reaktionen mit Wasserinhaltsstoffen verändern. Dabei können Zementbestandteile mit gelösten Wasserinhaltsstoffen reagieren und Reaktionsprodukte mit grösserem Volumen bilden. Der grössere Volumenbedarf resp. «Kristallisationsdruck» führt dann zur «Sprengung» des Betons von innen heraus.

Insbesondere die hohen Sulfat- und Chloridgehalte der Bergwässer (vgl. Kap. 5.1.5) verlangen eine höhere Beton-Expositionsklasse (SIA 2021).

8.2.5 Korrosion von metallischen Einbauten

Im Untertagebau werden metallische Werkstoffe in Form von Bewehrungen und Ankern zur Stabilisation der Ummantelung verbaut. Sie können mit Bergwasser in Berührung kommen. Zudem kommen metallische Werkstoffe zum Beispiel in Pumpen und Aufhängungen ebenfalls mit Bergwasser in Berührung. Abhängig vom pH-Wert, dem Redoxpotenzial und der chemischen Zusammensetzung der Wässer können diese korrosiv auf die metallischen Werkstoffe wirken.

Die hohen Sulfat- und Chloridgehalte der Bergwässer (vgl. Kap. 5.1.5) stellen ein erhöhtes Korrosionspotenzial von metallischen Einbauten dar (DIN 2005).

8.3 Gefahren, die zu gesundheitlichen Auswirkungen führen können

Geogene Belastungen können eine gesundheitliche Gefährdung für die Arbeiter darstellen. Darunter zählen unter anderem:

- geogene Gase, die in Untertagebauwerke eindringen, können eine gesundheitliche Gefährdung für die Arbeiter und eine Gefährdung des Betriebs (z. B. Erstickungs- und Explosionsgefahr) darstellen (Kap. 8.3.1 und 8.3.2)
- der Abbau von gesundheitsschädlichen Mineralen (Kap. 8.3.3 und 8.3.4)
- die Auswirkung von hohen Gebirgs-/Wassertemperaturen (Kap. 8.3.5)

8.3.1 Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen

Methan und höhere, kurzkettinge Kohlenwasserstoffe sind die Hauptbestandteile von Erdgas. Treten diese in ein Untertagebauwerk ein, können sie eine gesundheitliche Gefährdung für die Arbeiter (Vergiftung durch Gas oder Erstickung) und eine Gefährdung des Betriebs (z. B. Explosionsgefahr) darstellen (Wyss et al. 2002). Die Anreicherung der geogenen Gase in Untertagebauwerken kann durch Migration der Gase oder durch Ausgasungen von Gebirgswässern infolge Druckentlastung erfolgen. Bei atmosphärischem Druck besteht eine akute Zünd- resp. Explosionsgefahr, wenn die Methankonzentration in der Luft zwischen 5 und 14 Vol.-% liegt (Wyss et al. 2002).

Die Beurteilung der Gefährdung durch Methan und höhere Kohlenwasserstoffe erfolgt anhand der Massnahmenstufen der SUVA (Suva 2022) (Tab. 8-9).

Tab. 8-9: Beurteilung der Massnahmenstufen zur Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagebauten in Erdgas-führenden Gesteinsschichten

Massnahmenstufen Definition nach Suva (2022)		0	1	2	3	4
Beurteilung						
Möglichkeit eines Gasvorkommens		Nicht gegeben	Gasvorkommen möglich oder sicher			
Mögliche Gaskonzentration bei einer Lüftungsgeschwindigkeit von 0.5 m/s		-	< 1.5 Vol.-% Methan		> 1.5 Vol.-% Methan	
Zu erwartendes Ausgasungsverhalten		-	Ausgasung während kurzer Zeit	Ausgasung während langer Zeit	Ausgasung während kurzer Zeit	Ausgasung während langer Zeit
Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Hy1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Wahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Gb2 (Passwang-Formation)	Hy2 (Passwang-Formation)					
Gb3 (Opalinuston)	Hy3 (Opalinuston)					

8.3.2 Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff kann schon bei geringer Konzentration (> 0.002 Vol.-%) zu gesundheitlichen Schädigungen führen und Gehalte ab 0.1 Vol.-% können tödlich sein. Der Wert für die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) liegt bei 5 ppm (Suva 2021).

Schwefelwasserstoff ist zudem brennbar, wobei sein Explosionsbereich zwischen 4.5 und 45.5 Vol.-% liegt (Wyss et al. 2002). Bei einer Mischung aus Schwefelwasserstoff mit Kohlenwasserstoff-Gasen wird deren Zündtemperatur herabgesetzt.

Die Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen durch H_2S erfolgt anhand der Angaben in Kap. 5.1.5. Es wird als unwahrscheinlich beurteilt, dass kritische Schwefelwasserstoffkonzentrationen bei einer Lüftungsgeschwindigkeit von 0.5 m/s angetroffen werden (Suva 2022).

8.3.3 Gesundheitliche Auswirkungen durch Quarzfeinstaubexposition

Quarzfeinstaub gilt als krebserzeugender Staub, der zu Silikose führen und damit auch Lungenkrebs verursachen kann.

Die Beurteilung der Quarzfeinstaub-Belastung erfolgt anhand der SIA Norm 2054 (SIA 2018) (Tab. 8-10). Als Grundlage dienen die Quarzgehalte in Kap. 3.2.

Tab. 8-10: Beurteilung der Quarzfeinstaub-Belastung

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Quarzfeinstaub-Belastung		
		Klein	Mittel	Gross
Gb1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Li1 (Wildeggen-Formation)	100 %	-	-
	Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)	100 %	-	-
Gb2 (Passwang-Formation)	Li3 (Passwang-Formation)	15 %	85 %	
Gb3 (Opalinuston)	Li4 (Opalinuston)	-	100 %	-

8.3.4 Gesundheitliche Auswirkungen durch Asbestfaserexpositionen

Wenn asbesthaltige Gesteinsschichten aufgefahren werden, kann es im Untertagebau zu Asbestfaserexpositionen der Arbeitnehmenden mit gesundheitlichen Auswirkungen kommen.

Da beim Bau der Bauwerke das Anfahren von asbesthaltigen Gesteinseinheiten ausgeschlossen werden kann (vgl. Kap. 3.2) besteht diesbezüglich keine Gefährdung (Gefährdungsstufe 0 für Asbestfaserexpositionen nach EKAS (2008)).

8.3.5 Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur

Der Klimagrenzwert für Arbeiten im Untertagebau beträgt 28 °C Trockentemperatur (Rast et al. 2003). Dieser Grenzwert ist in allen Hauptarbeitsbereichen, d. h. Bereichen, in denen Arbeitnehmende über längere Zeit arbeiten, einzuhalten.

Zur Beurteilung der gesundheitlichen Auswirkungen durch die Temperatur (Tab. 8-11) wird vereinfacht angenommen, dass die Gebirgs- resp. Bergwassertemperatur der Trockentemperatur im unbelüfteten Bauwerk entspricht. Als Datengrundlage dienen die Angaben in Kap. 5.1.4.

Tab. 8-11: Beurteilung der Massnahmenstufen bezogen auf die Trockenraumtemperatur, einschliesslich der Gebirgs- resp. Bergwassertemperatur

Massnahmenstufen Definition nach Rast et al. (2003)		0	1	2	3	4
Beurteilung						
Trockentemperatur am Hauptarbeitsplatz ohne Lüftung		< 23 °C	23 – 25 °C	25 – 28 °C	28 – 32 °C	> 32 °C
Gb1 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Hy1 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Wahrscheinlich		Möglich		Unwahrscheinlich
Gb2 (Passwang-Formation)	Hy2 (Passwang-Formation)	Möglich		Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich
Gb3_R (Opalinuston – Zugangstunnel)	Hy3 (Opalinuston)	Wahrscheinlich				
Gb3_s (Opalinuston – Lüftungsschacht)		Möglich			Wahrscheinlich	
Gb3_L (Opalinuston – Lagerebene)		Möglich			Wahrscheinlich	

8.4 Andere Gefahren

8.4.1 Gefahren bezüglich Gesteinsabrasivität

Die Gesteinsabrasivität ist die Eigenschaft eines Gesteins, andere Materialien durch Abrieb zu zerstören (z. B. Verschleiss von Abbaugeräten). Sie ist ein Mass für die Härte und Widerstandsfähigkeit des Gesteins gegenüber Abrieb oder Schleifen.

Die Gesteinsabrasivität wird nach SIA 199 (SIA 2015) anhand des Cerchar-Abrasivitäts-Index (CAI) beurteilt (Tab. 8-12). Da im Rahmen der geomechanischen Versuche der CAI nicht gemessen wurde (Kapitel 6), wird dieser anhand des Quarzgehalts nach dem Ansatz in SIA 2054 (SIA 2018) abgeleitet.

Tab. 8-12: Bewertung der Gesteinsabrasivität

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Gesteinsabrasivität			
		Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
Gb1 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)	Li1 (Wildeggen-Formation)	100 %	-	-	-
	Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau-Formation)	100 %	-	-	-
Gb2 (Passwang-Formation)	Li3 (Passwang-Formation)	15 %	85 %	-	-
Gb3 (Opalinuston)	Li4 (Opalinuston)	-	100 %	-	-

8.4.2 Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials

Das Ausbruchmaterial kann zum Beispiel durch im Gebirge natürlich vorkommende Schwermetalle oder Kohlenwasserstoffe geogen verunreinigt sein. Die Verunreinigungen können die Wiederverwendung oder Deponierung des Ausbruchmaterials einschränken. Als Beurteilungsgrundlagen gelten die Grenzwerte der Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA 2015).

Die Beurteilung der geogenen Belastungen des Ausbruchmaterials erfolgt gemäss VVEA anhand von Eluattests. Im Rahmen der Untersuchungen zur Standortwahl wurden jedoch keine Eluattests an den beprobten Gesteinseinheiten durchgeführt. Die Abschätzung der möglichen geogenen Verunreinigungen erfolgt anhand der mineralogischen Gesteinszusammensetzung (vgl. Kap. 3.2) und Erfahrungen von anderen Tunnelbauprojekten (z. B. Belchen-Strassentunnel, Neuer Bözberg-Eisenbahntunnel, Eppenbergtunnel).

Eine geogene Belastung des Ausbruchmaterials durch im Gebirge natürlich vorkommende Schwermetalle ist möglich, insbesondere in den den Opalinuston überlagernden, mergelreichen Gesteinseinheiten (Tab. 8-13). Es wird als unwahrscheinlich erachtet, dass der Opalinuston geogen belastet ist.

Tab. 8-13: Beurteilung der geogenen Belastung des Ausbruchmaterials

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	Radioaktivität
Gb1 (Wildeg- Formation und Dogger oberhalb Passwang- Formation)	Li1 (Wildeg- Formation)	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
	Li2 (Hauptrogenstein und Klingnau- Formation)				
Gb2 (Passwang- Formation)	Li3 (Passwang- Formation)				
iGb3 (Opalinuston)	Li4 (Opalinuston)	Unwahrscheinlich			

8.5 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungsbildern

8.5.1 Gb1 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)

Gb1 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)				
Beschreibung der ingenieurgeologischen Gefährdungen				
Gebirgsverhalten				
Ablösung von Trennflächenkörper	Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich ("Sargdeckel")	Ablösen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gebirge ohne Störungszonen	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Möglich		Druckhaftes Gebirge Störungszonen des Typs iii	Wahrscheinlich
Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge	Möglich (Störungszonen)			
Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt				
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 10	10 – 100	100 – 1'000	> 1'000
Störungszone	< 10	10 – 100	100 – 1'000	> 1'000
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.1	0.1 – 1	1 – 10	10 – 100
Störungszone	< 0.1	0.1 – 1	1 – 10	10 – 100
Überschreiten der Einleitgrenzwerte	Wahrscheinlich (hoher Sulfat- und Chloridgehalt)			
Versintern von Drainageleitungen	Möglich			
Betonexpositionsklasse	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Gesundheitliche Auswirkungen				
	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaubbelastung	100 %	0 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 4	
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3

Gb1 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Passwang-Formation)

Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Unwahrscheinlich			
Asbestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	100 %	0 %	0 %	0 %

8.5.2 Gb2 (Passwang-Formation)**Gb2 (Passwang-Formation)****Beschreibung der ingenieurgeologischen Gefährdungen****Gebirgsverhalten**

Ablösung von Trennflächenkörper	Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich ("Sargdeckel")	Ablösen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gebirge ohne Störungzonen	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Störungzonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Möglich		Druckhaftes Gebirge Störungzonen des Typs iii	Wahrscheinlich
Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge	Möglich (Störungzonen)			

Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt

	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 1	1 – 10
Störungszone	< 0.1	0.1 – 1	1 – 10	10 – 100
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01		0.01 – 0.1	0.1 – 1
Störungszone	< 0.01	0.01 – 0.1		0.1 – 1
Überschreiten der Einleitgrenzwerte	Wahrscheinlich (hoher Sulfat- und Chloridgehalt)			
Versintern von Drainageleitungen	Unwahrscheinlich			
Betonexpositions-kategorie	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	Erhöhtes Korrosionspotenzial			

Gesundheitliche Auswirkungen

Gb2 (Passwang-Formation)

	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaubbelastung	100 %	0 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 4	
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Unwahrscheinlich			
Asbestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	100 %	0 %	0 %	0 %

8.5.3 Gb3 (Opalinuston)**Gb3 (Opalinuston)****Beschreibung der ingenieurgeologischen Gefährdungen****Gebirgsverhalten**

Ablösung von Trennflächenkörper	Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich ("Sargdeckel")	Ablösen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächenorientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gebirge ohne Störungzonen	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Zugangstunnel und Bauten auf Lagerebene)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Zugangstunnel und Bauten auf Lagerebene)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Störungzonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Zugangstunnel und Bauten auf Lagerebene)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Zugangstunnel und Bauten auf Lagerebene)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Wahrscheinlich		Druckhaftes Gebirge Störungzonen des Typs iii	Wahrscheinlich
Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge	Möglich (Störungzonen)			

Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt

	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01			0.01 – 0.1

Gb3 (Opalinuston)				
Störungszone	< 0.01			0.01 – 0.1
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01			0.01 – 0.1
Störungszone	< 0.01			0.01 – 0.1
Überschreiten der Einleitgrenzwerte	Wahrscheinlich (hoher Sulfat- und Chloridgehalt)			
Versintern von Drainageleitungen	Extrem unwahrscheinlich			
Betonexpositions-klasse	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Gesundheitliche Auswirkungen				
	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaub-belastung	0 %	100 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahr-scheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 4	Klasse 1		
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasser-stoffen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Extrem unwahrscheinlich			
Asbestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreini-gung des Ausbruch-materials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	0 %	100 %	0 %	0 %

9 Baugrundmodelle

Das Baugrundmodell beschreibt die für die betrachtete Bemessungssituation wesentlichen Eigenschaften und Gefährdungen des Gebirges einschliesslich aller Inhaltsstoffe (z. B. Grundwasser oder geogene Belastung), in die das Bauwerk eingebettet ist oder das durch Baumassnahmen beeinflusst wird.

Nachfolgend werden Baugrundmodelle für die ingenieurgeologischen Homogenbereiche beschrieben. Als ingenieurgeologische Homogenbereiche werden Gebirgsbereiche mit bautechnisch vergleichbaren Merkmalen und Eigenschaften sowie vergleichbaren Gefährdungen verstanden. Hierfür werden, wenn als sinnvoll erachtet, auch Einheiten mit ähnlichen Eigenschaften (Kapitel 3 bis 8) zusammengefasst oder unterteilt.

Es werden zwei ingenieurgeologische Homogenbereiche unterschieden:

- Hb1 umschliesst die Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinuston.
- Hb2 entspricht dem Opalinuston.

Gruppe	Formation	Lithologie	Meter MD	lithologische Einheiten	Trennflächen-Einheiten	hydrogeologische Einheiten	geomechanische Einheiten	Verkarstungs-Einheiten	Gefährdungs-bilder	Baugrundmodelle
Quartär										
Malm	Wildegg-Fm.		100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1	Hb1
			200							
	Ifenthal-Fm./ Hauptrogenstein/ Klingnau-Fm.		300	Li2			Gm2	Ka2		
Dogger	Passwang-Fm.			Li3		Hy2		Ka3	Gb2	
	Opalinuston		400	Li4	Te2	Hy3	Gm3	Ka4	Gb3	Hb2
Lias	Staffellegg-Fm.									

Fig. 9-1: Herleitung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts)

9.1 Zusammenfassende Beschreibung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche

9.1.1 Hb1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

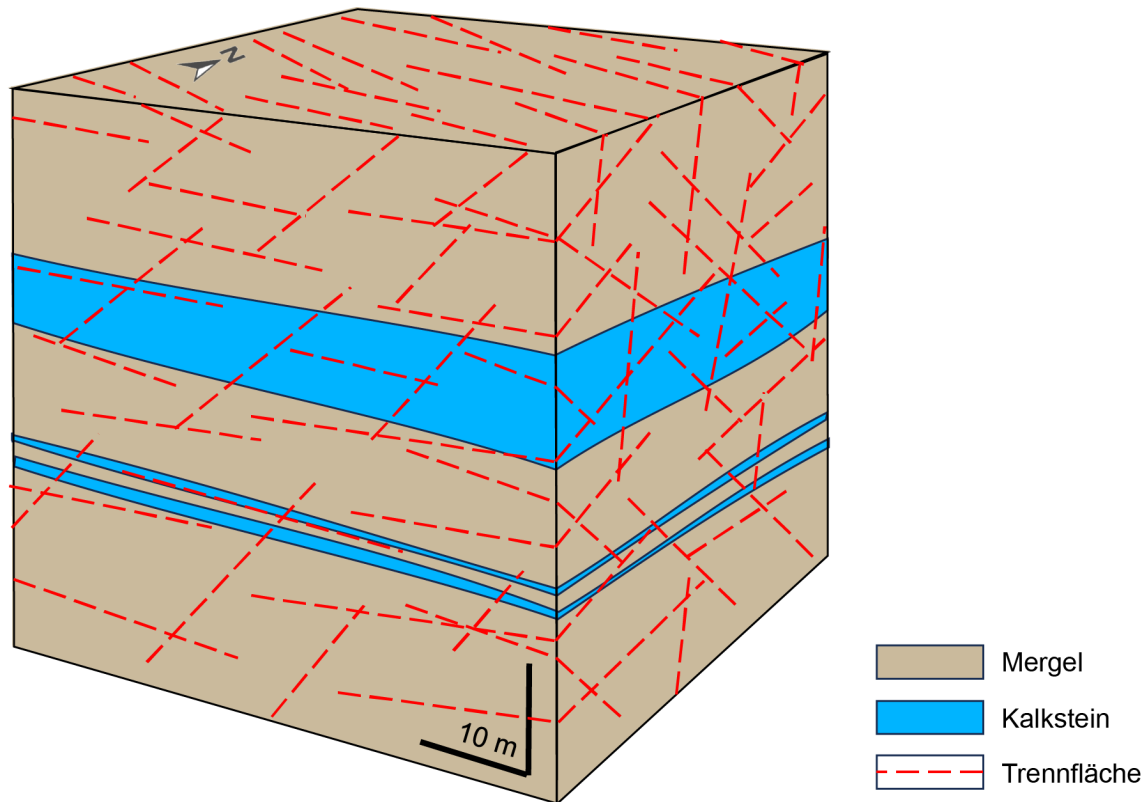


Fig. 9-2: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb1 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

9.1.1.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb1 fasst die Wildegge-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinustons zusammen. Der Bereich wird beim Bau des Lüftungsschachts auf einer Länge von rund 295 m durchfahren (Abschnitt -17 bis -341 m), während der Stichtunnel auf einer Länge von rund 450 m darin verläuft.

Der Homogenbereich besteht aus dünn bis grob geschichteten Kalk- und Tonmergeln (Kapitel 3). Vereinzelt können bis zehn Meter mächtige karbonatreiche Schichten vorkommen (z. B. Gerstenhübel-Bank oder Hauptrogenstein). Die Gesteine des Homogenbereichs werden weitgehend als nicht verkarstet betrachtet, obschon die Kalksteinlagen gegebenenfalls einen Karbonatanteil aufweisen können, der eine Verkarstung erlauben würde. Es gibt jedoch aus den TBO keine Hinweise auf eine rezente oder Paläo-Verkarstung dieser Schichten (Kapitel 7). Durch Lösungsprozesse lokal erweiterte Trennflächen können vorkommen, diese werden jedoch nicht als Karsthohlräume verstanden.

Der Homogenbereich weist eine mittel- bis weitständige Gebirgsdurchtrennung auf (Kapitel 4). Im Bereich der geplanten Untertagebauwerke wurden seismisch keine Störungzonen kartiert. Dies schliesst nicht aus, dass seismisch nicht kartierte Störungzonen angetroffen werden können. Die erwarteten Eigenschaften dieser Gebirgsbereiche entsprechen weitgehend den Störungzonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (Kap. 4.3.1).

Aus hydrogeologischer Sicht ist der Homogenbereich als Aquitard («Grundwassergeringleiter») zu verstehen (Kapitel 5). In den karbonatreichen, kompetenteren Lagen sind trennflächenbedingte erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten vorstellbar. Es wird nicht erwartet, dass allfällig vorkommende, nicht kartierte Störungzonen die hydraulische Durchlässigkeit in den kompetenten Lagen erhöhen können. Für Störungzonen in den wenig kompetenten Lagen wird keine signifikante Erhöhung der Durchlässigkeit erwartet.

In den TBO wurde der Homogenbereich Hb1 für geomechanische Versuche beprobt. Erwartungsgemäss widerspiegeln die Messresultate das grosse lithologische Spektrum. Dennoch sind die gemessenen Bandbreiten in den verschiedenen Bohrungen vergleichbar und weisen mittlere Gesteinsfestigkeiten auf (vgl. Kapitel 6).

9.1.1.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

- Druckhaftes Gebirge möglich, in Störungen wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.1.2).
- Wasserzutritte möglich (vgl. Kap. 8.2.1).

9.1.1.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb1 wurde in den TBO vollständig gekernt und geloggt. Die aus den TBO gewonnenen Erkenntnisse sind aus heutiger Sicht auch für den geplanten Schachtstandort übertragbar. Die grösste Ungewissheit besteht in Bezug auf das mögliche Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungzonen.

Die Prognosesicherheit wird als ausreichend beurteilt für eine stufengerechte Beurteilung der ingenieurgeologischen Gebirgsverhältnisse. Es ist zu erwarten, dass verbleibende Ungewissheiten mittels Erkundungsmassnahmen an den Schachtstandorten weiter reduziert werden könnten.

9.1.2 Hb2 (Opalinuston)

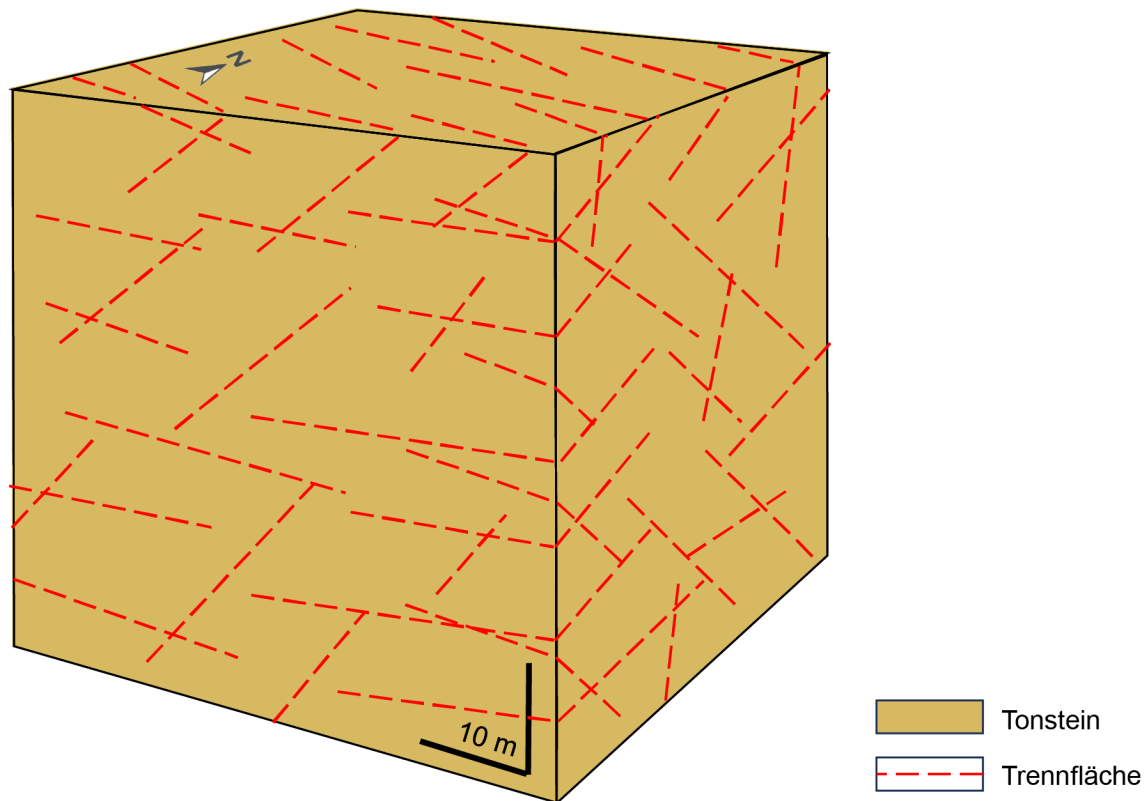


Fig. 9-3: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb2 (Opalinuston)

9.1.2.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb2 entspricht dem Opalinuston. Der Bereich wird beim Bau der Zugangsbauwerke durchfahren. Der (Betriebs-)Zugangstunnel liegt vollständig im Opalinuston. Der Stichtunnel verläuft auf einer Länge von rund 310 m und der Lüftungsschacht auf einer von rund 80 m im Opalinuston. Die Bauwerke auf Lagerebene liegen ausschliesslich in diesem Gebirgsbereich.

Der Homogenbereich besteht mehrheitlich aus dünn geschichteten, siltigen und sandigen Tonsteinen und Tonmergeln (Kapitel 3). Der Opalinuston ist nicht verkarstungsfähig (Kapitel 7).

Der Homogenbereich weist eine mittel- bis weitständige Gebirgsdurchtrennung auf (Kapitel 4). Im Bereich der geplanten Untertagebauwerke wurden seismisch keine Störungszonen kartiert. Dies schliesst nicht aus, dass seismisch nicht kartierte Störungszonen angetroffen werden können. Die erwarteten Eigenschaften dieser Gebirgsbereiche entsprechen weitgehend den Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (Kap. 4.3.1.2).

Aus hydrogeologischer Sicht handelt es sich beim Homogenbereich Hb2 um eine sehr gering durchlässige Einheit (Kapitel 5), weshalb keine Wasserzutritte zu erwarten sind. Es wird nicht erwartet, dass allfällig vorkommende, nicht kartierte Störungszonen die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen.

In den TBO wurde der Homogenbereich Hb2 intensiv für geomechanische Versuche beprobt. Die Messresultate in den verschiedenen Bohrungen sind vergleichbar und weisen eine geringe Gesteinsfestigkeit auf (vgl. Kapitel 6).

9.1.2.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

- Druckhaftes Gebirge wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.1.2).
- Erhöhte Gebirgstemperatur und Überschreiten der Arbeitsschutzgrenzwerte wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.3.5).

9.1.2.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb2 wurde in den TBO vollständig gekernt, geloggt und als Wirtgestein, in welchem das Lager gebaut wird, intensiv beprobt. Die aus den TBO gewonnenen Erkenntnisse weisen eine nur geringe räumliche Variabilität zwischen den Bohrungen auf. Deshalb werden diese als repräsentativ für die Verhältnisse im Bereich der Zugänge nach Untertag als auch im Bereich der Bauwerke auf Lagerebene betrachtet.

Die grösste Ungewissheit besteht in Bezug auf das mögliche Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen.

Die Prognosesicherheit wird als ausreichend beurteilt für eine stufengerechte Beurteilung der ingenieurgeologischen Gebirgsverhältnisse. Es ist zu erwarten, dass verbleibende Ungewissheiten mittels Erkundungsmassnahmen am Schachtstandort weiter reduziert werden könnten.

10 Schlussbetrachtung

Der ingenieurgeologische Bericht stellt eine projektstufengerechte Beurteilung der bautechnisch relevanten geologisch-hydrogeologisch-geotechnischen Verhältnisse des Baugrunds dar, in dem die geplanten Zugangsbauwerke sowie die Bauwerke auf Lagerebene geplant werden. Der Bericht leitet die möglichen ingenieurgeologischen Gefährdungen für den Bau und Betrieb der Untertagebauwerke ab.

Die aktuell geplanten Bauwerke durchörtern verschiedene Gesteinseinheiten, die in den TBO erdwissenschaftlich untersucht wurden. Die Resultate dieser Untersuchungen zusammen mit der Interpretation der 3D-Seismik stellen eine solide und stufengerechte Datengrundlage für die ingenieurgeologische Beurteilung in diesem Bericht dar.

Die im Bericht hergeleiteten Baugrundmodelle erlauben eine robuste Planung auf Stufe Vorprojekt, wobei Prognoseungewissheiten angemessen berücksichtigt werden können. Die größten Ungewissheiten betreffen die Planung der Zugangsbauwerke und das Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen. Die für die Prognose hergeleiteten Werte erlauben dennoch eine angemessene und robuste Planung auf Planungsstufe des Vorprojekts.

Die Bauwerke auf Lagerebene liegen vollumfänglich im Opalinuston. Dieser konnte anhand der Beobachtungen und Messungen in den TBO aus ingenieurgeologischer Sicht bereits sehr gut charakterisiert werden. Der Opalinuston wurde im Verhältnis zu anderen Gesteinseinheiten intensiver beprobt. Die Einheit weist eine sehr geringe räumliche Heterogenität auf. In diesem Bereich stellt der «echte Gebirgsdruck» die wichtigste ingenieurgeologische Gefährdung dar. Die für die Prognose hergeleiteten Baugrundwerte erlauben auch für die Bauwerke auf Lagerebene eine angemessene und robuste Planung auf Planungsstufe des Vorprojekts.

11 Literaturverzeichnis

- Abfallverordnung, VVEA (2015): Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen (Abfallverordnung, VVEA), vom 04. Dezember 2015, Stand am 01. April 2022. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.600, Schweiz.
- Bauer, H., Schröckenfuchs, T.C. & Decker, K. (2016): Hydrogeological properties of fault zones in a karstified carbonate aquifer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Hydrogeol J* 24/5, 1147-1170. DOI: 10.1007/s10040-016-1388-9.
- Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O. & Scibek, J. (2013): Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews* 127, 171-192. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.09.008.
- Bitterli, T., Graf, H.R., Matousek, F. & Wanner, M. (2000): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1050 Zurzach. Erläuterungen. Schweizerische geologische Kommission.
- Bläsi, H.R., Deplazes, G., Schnellmann, M. & Traber, D. (2013): Sedimentologie und Stratigraphie der Effinger Schichten. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-16.
- Cai, M., Kaiser, P.K., Uno, H., Tasaka, Y. & Minami, M. (2004): Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41/1, 3-19. DOI: 10.1016/S1365-1609(03)00025-X.
- Caine, J.S. & Forster, C.B. (1999): Fault Zone Architecture and Fluid Flow - Insights From Field Data and Numerical Modeling. *Geophysical Monograph Series* 113, 101-127.
- DAUB & ITA-AITES (2022): Empfehlungen für das Projektrisikomanagement im Untertagebau. DAUB-Arbeitskreis. Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB), Köln.
- de Waele, J. & Gutiérrez, F. (2023): Karst hydrogeology, geomorphology, and caves. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- DIN (2005): Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen - Teil 1: Allgemeines; Deutsche Fassung EN 12502-1:2004. Beuth Verlag GmbH.
- Eisenlohr, T. & Müller, P. (2015): Standortareal JO-3+-SMA-HAA-Kombi Jäckli AG, Zürich Geologisch-geotechnischer Bericht: Baugrundbeschreibung und geotechnische Beschreibung der oberflächennahen Abschnitte der Zugangsbauwerke (Rampe, Schächte). Nagra Arbeitsbericht NAB 15-52.
- EKAS (2008): Asbest. EKAS Richtlinie Nr. 6503. Ausgabe Dezember 2008. Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit EKAS, Luzern.
- El Tani, M. (2003): Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18/1, 49-55. DOI: 10.1016/S0886-7798(02)00102-5.
- Fasching, F. & Vanek, R. (2011): Engineering geological characterisation of fault rocks and fault zones / Ingenieurgeologische Charakterisierung von Störungsgesteinen und Störungszonen. *Geomechanik Tunnelbau* 4/3, 181-194. DOI: 10.1002/geot.201100013.

- Faulkner, D.R., Jackson, C., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C. & Withjack, M.O. (2010): A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology* 32/11, 1557-1575. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.06.009.
- Ferrari, A., Rosone, M., Zicarelli, M. & Giger, S.B. (2020): The shear strength of Opalinus Clay shale in the remoulded state. *Geomechanics for Energy and the Environment* 21, 100142. DOI: 10.1016/j.gete.2019.100142.
- Filipponi, M., Bauer, S., Höfer-Öllinger, G. & Jörin, U. (2022): *Karstnomenklatur für Ingenieur-geologen und Bauingenieure*. 1. Auflage. Buchschmiede; Buchschmiede von Dataform Media GmbH, Wien.
- Filipponi, M., Parriaux, A., Schmassmann, S. & Jeannin, P.-Y. (2012): *KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau*. Forschung im Strassenwesen Bericht 1395. UVEK, ASTRA, Bern.
- Fischer, Q., Kets, F. & Crook, A. (2013): Self-sealing of faults and fractures in argillaceous formations: Evidence from the petroleum industry. *Nagra Arbeitsbericht NAB 13-06*.
- Gmünder, C., Malaguerra, F., Nusch, S. & Traber, D. (2014): Regional Hydrogeological Model of Northern Switzerland. *Nagra Arbeitsbericht NAB 13-23*.
- Gmünder, C., Traber, D. & Nusch, S. (2013): Hydrogeologische Daten der Tiefenaquifere als Grundlage für die hydrogeologischen Modelle SGT Etappe 2. *Nagra Arbeitsbericht NAB 13-43*.
- Gonzalez, R. & Wetzel, A. (1996): Stratigraphy and paleogeography of the Hauptrogenstein and Klingnau Formations (middle Bajocian to late Bathonian), northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helveticae* 89/1, 695-720.
- Goodman, R.E. & Shi, G. (1985): *Block theory and its applications to rock engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- GSchV (1998): Gewässerschutzverordnung (GSchV) vom 28. Oktober 1998, Stand am 1. Januar 2021. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 814.201, Schweiz.
- Jaeggi, D., Laurich, B., Nussbaum, C., Schuster, K. & Connolly, P. (2017): Tectonic structure of the “Main Fault” in the Opalinus Clay, Mont Terri rock laboratory (Switzerland). *Swiss J Geosci* 110/1, 67-84. DOI: 10.1007/s00015-016-0243-2.
- Jolley, S.J., Dijk, H. & Lamens, J.H. (2007): Faulting and fault sealing in production simulation models: Brent Province, northern North Sea. *Petroleum Geoscience* 13, 321-340.
- Jordan, P. & Deplazes, G. (2019): Lithostratigraphy of consolidated rocks expected in the Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost Regions. *Nagra Arbeitsbericht NAB 19-14*.
- Kim, B.H., Cai, M., Kaiser, P.K. & Yang, H.S. (2007): Estimation of Block Sizes for Rock Masses with Non-persistent Joints. *Rock Mech. Rock Engng.* 40/2, 169-192. DOI: 10.1007/s00603-006-0093-8.
- Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N. & Dreybrodt, W. (Hrsg.) (2000): *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Inc, Huntsville (Alabama).

- Kovári, K. (1998): Tunnelbau in druckhaftem Gebirge = Tunneling in squeezing rock. Tunnel/5, 11658.
- Lorenz, G.D., Pechstein, A. & Stopelli, E. (*in prep.*): Borehole BOZ2-1 (Bözberg2-1): Fluid sampling and analytical hydrochemical data report. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-22.
- Luo, J., Monninkhoff, B. & Becker, J. (2014): Hydrogeological model Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-26.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. (1985): Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a Jurassic opalinum shale, Switzerland. Clays and Clay Minerals 33/6, 501-509.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. (1989): The swelling behaviour of clays. Applied Clay Science 4, 143-156.
- Marinos, P.G. (2001): Tunnelling and mining in karstic terrain: an engineering challenge. *In*: Beck, B. F. & Herring, J. (Hrsg.): Geotechnical and environmental applications of karst geology and hydrology. Proceedings of the 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Louisville, Kentucky, USA, 1-4 April 2001: Balkema. Lisse, 3-16.
- Matter, A., Peters, T., Isenschmid, C., Bläsi, H. & Ziegler, H.J. (1987): Sondierbohrung Riniken, Geologie: Textband. Nagra Technischer Bericht NTB 86-02.
- Mazurek, M. & Aschwanden, L. (2020): Multi-scale petrographic and structural characterisation of the Opalinus Clay. Nagra Arbeitsbericht NAB 19-44.
- Michie, E.A.H., Cooke, A.P., Kaminskaite, I., Stead, J.C., Plenderleith, G.E., Tobiss, S.D., Fisher, Q.J., Yielding, G. & Freeman, B. (2021): Key controls on the hydraulic properties of fault rocks in carbonates. Petroleum Geoscience 27/2. DOI: 10.1144/petgeo2020-034.
- Milanović, P.T. (2000): Geological engineering in karst. Dams, reservoirs, grouting, groundwater protection, water tapping, tunneling. Zebra series in technical research publications. Zebra Publ., Belgrade.
- Milanovic, P.T. (2004): Water resources in engineering in karst. CRC Press, Boca Ratón (Florida).
- Nagra (1990): Sondierbohrung Riniken Untersuchungsbericht: Textband. Nagra Technischer Bericht NTB 88-09 A & B.
- Nagra (2014a): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen Dossier II Sedimentologische und tektonische Verhältnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02 Dossier II.
- Nagra (2014b): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen Dossier IV Geomechanische Unterlagen. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02 Dossier IV.

Nagra (2014c): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen Dossier V Hydrogeologische Verhältnisse. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02 Dossier V.

Nagra (2014d): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage: Geologische Grundlagen Dossier VI Barriereneigenschaften der Wirt- und Rahmengesteine. Nagra Technischer Bericht NTB 14-02 Dossier VI.

Nagra (2022a): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.

Nagra (2022b): TBO Stadel-2-1: Data Report Summary Plot. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-02 SP.

Nagra (2023a): Bautechnisches Dossier – Band 1: Einführung und Projektdefinition. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 1.

Nagra (2023b): Bautechnisches Dossier – Band 6: Technischer Beschrieb und Pläne Lagerprojekte. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 6.

Nagra (2023c): Bautechnisches Dossier – Band 9: Bautechnische Risikoanalyse. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-01 Band 9.

Nagra (Hrsg.) (2021a): TBO Bülach-1-1: Data Report Dossier I-XI. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08.

Nagra (Hrsg.) (2021b): TBO Marthalen-1-1: Data Report Dossier I-X. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-20.

Nagra (Hrsg.) (2021c): TBO Trüllikon-1-1: Data Report Dossier I-X. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-09.

Nagra (Hrsg.) (2022a): TBO Bözberg-1-1: Data Report Dossier I-X. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-21.

Nagra (Hrsg.) (2022b): TBO Bözberg-2-1: Data Report Dossier I-X. Nagra Arbeitsbericht NAB 21-22.

Nagra (Hrsg.) (2022c): TBO Stadel-3-1: Data Report Dossier I-X. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-01.

Nagra NAB 22-03 (*in Bearb.*): Rheinau 1-1 Borehole Data report. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-03.

Nagra NAB 22-04 (*in Bearb.*): Bachs 1-1 Borehole Data report. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-04.

Nagra NAB 23-17 (*in Bearb.*): Interpretation 3D Seismic Survey Jura Ost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-17.

Nagra NAB 24-19 (*in Bearb.*): Stress field in the siting regions Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-19.

- Rast, H., Hofer, L., Jost, M. & Kunz, I. (2003): Arbeitsmedizinische Prophylaxe bei Arbeiten im Untertagebau im feucht-warmen Klima. 4. Aufl. (2869/26.d). Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva), Luzern.
- Schill, E. (2012): Kompilation und Archivierung der geothermischen Daten. Nagra Arbeitsbericht NAB 12-61.
- Schwarz, R., Schlickerrieder, L. & Vogt, T. (2021): TBO Bülach-1-1 Data Report: Dossier VII Hydraulic Packer Testing. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08 VII.
- SIA (2001): Qualität im Bauwesen: Aufbau und Anwendung von Managementsystemen. SIA Merkblatt 2007. Ausgabe 2001. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2004): Projektierung Tunnel: Grundlagen. Schweizer Norm SIA 197, SN 505 197. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2013): Geotechnik. Schweizer Norm SIA 267, SN 505 267. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2015): Erfassen des Gebirges im Untertagebau. Schweizer Norm SIA 199:2015, SN 531:199. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2018): Quarzstaub im Untergrund. Schweizer Norm SIA 2054:2018. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- SIA (2021): Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Schweizer Norm SIA 262.051+A2, SN EN 206+A2. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- Steiner, W. (1993): Swelling rock in tunnels: Rock characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 30/4, 361-380. DOI: 10.1016/0148-9062(93)91720-4.
- Suva (2021): Grenzwerte am Arbeitsplatz. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva), Luzern.
- Suva (2022): Erdgas bei Untertagarbeiten: Verhütung von Bränden und Explosionen. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (Suva), Luzern.
- Terzaghi, R.D. (1965): Sources of Error in Joint Surveys. Géotechnique 15/3, 287-304. DOI: 10.1680/geot.1965.15.3.287.
- Walsh, J.J., Watterson, J., Bailey, W. & Childs, C. (1999): Fault Relays, Bends and Branchlines. Journal of Structural Geology 21, 1019-1026.
- Wang, L.G., Yamashita, S., Sugimoto, F., Pan, C. & Tan, G. (2003): A Methodology for Predicting the In Situ Size and Shape Distribution of Rock Blocks. Rock Mech. Rock Engng. 36/2, 121-142. DOI: 10.1007/s00603-002-0039-8.
- Wathugala, D.N., Kulatilake, P.H., Wathugala, G.W. & Stephansson, O. (1990): A general procedure to correct sampling bias on joint orientation using a vector approach. Computers and Geotechnics 10/1, 1-31. DOI: 10.1016/0266-352X(90)90006-H.

- Wyss, R., Jäckli, H. & Greber, E. (2002): Grundlagen zur Charakterisierung der Erdgasgefährdung bei Untertagebauten. DOI: 10.5169/seals-223645.
- Ziegler, M., Alimardani Lavasan, A. & Loew, S. (2022): Stress evolution around a TBM tunnel in swelling clay shale over four years after excavation. Tunnelling and Underground Space Technology 128, 104649. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104649.