



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 4

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 4: Bautechnisch relevante Auszüge
geologischer Grundlagen Zürich Nordost

Oktober 2023



ARBEITSBERICHT NAB 23-01 BAND 4

Bautechnisches Dossier Standortvergleich
Band 4: Bautechnisch relevante Auszüge
geologischer Grundlagen Zürich Nordost

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.

Das vorliegende Band 4 des Bautechnischen Dossiers dokumentiert die bautechnisch relevanten Auszüge aus den geologischen Grundlagen für den Standort Zürich Nordost 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 Lager-ebene. 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 (MAR1-1, TRU1-1, RHE1-1) sowie der Interpretation der 3D-Seismik. Die Resultate der erdwissenschaftlichen Untersuchungen stellen eine solide Datengrundlage dar.

Zur Erschliessung der Lagerebene wird eine Abfolge von unterschiedlichen Sedimentgesteinen durchörtert. In der Vergangenheit wurden bereits verschiedene Untertagebauprojekte durch diese Gesteinseinheiten in ähnlichen Tiefenlagen erfolgreich realisiert. Dabei war das Gebirge teilweise deutlich stärker tektonisch überprägt als es im Standortgebiet Zürich Nordost der Fall ist.

In den Zugangsbauwerken stellen Bergwasserzutritte in der Molasse und in den «Malmkalken» die wichtigste Gefährdung und Ungewissheit dar.

Die Bauwerke auf Lagerebene liegen ausschliesslich im Opalinuston. In diesem Bereich stellt der «echte Gebirgsdruck» die wichtigste Gefährdung dar.

Die Ungewissheiten bezüglich des Baugrundmodells werden im Bericht systematisch dargelegt. Die grössten Ungewissheiten betreffen die Baugrundeigenschaften in der Molasse, das Vorkommen von Karsthohlräumen in den «Malmkalken», die Trennflächeneigenschaften und das Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen. 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	XI
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 (Untere Süsswassermolasse)	19
3.1.2 Li2 (Siderolithikum)	20
3.1.3 Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»).....	22
3.1.4 Li4 (Schwarzbach-Formation).....	23
3.1.5 Li5 (Villigen-Formation)	24
3.1.6 Li6 (Wildeggen-Formation)	25
3.1.7 Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston).....	26
3.1.8 Li8 (Opalinuston).....	27
3.2 Mineralgehalt der lithologischen Einheiten.....	28
3.3 Tabellarische Zusammenfassung der lithologischen Einheiten.....	32
3.3.1 Li1 (Untere Süsswassermolasse)	32
3.3.2 Li2 (Siderolithikum)	33
3.3.3 Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»).....	34
3.3.4 Li4 (Schwarzbach-Formation).....	35
3.3.5 Li5 (Villigen-Formation)	36
3.3.6 Li6 (Wildeggen-Formation)	37
3.3.7 Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston).....	38
3.3.8 Li8 (Opalinuston).....	39

4	Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der Störungszonen.....	41
4.1	Beschreibung der Trennflächensysteme	44
4.1.1	Orientierung der Trennflächensysteme.....	45
4.1.2	Trennflächenabstände	46
4.1.3	Öffnungsweite der Trennflächen	47
4.1.4	Persistenz der Trennflächen.....	48
4.1.5	Zustand der Trennflächen	48
4.2	Beschreibung der Trennflächenkörper.....	48
4.2.1	Volumen der Trennflächenkörper.....	49
4.2.2	Grundform der Trennflächenkörper.....	50
4.3	Beschreibung der Störungszonen	51
4.3.1	Eigenschaften der seismisch nicht kartierten Störungszonen	51
4.3.1.1	Seismisch nicht kartierte Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten	51
4.3.1.2	Seismisch nicht kartierte Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten.....	55
4.4	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	58
4.4.1	Te1 (Untere Süßwassermolasse und Siderolithikum).....	58
4.4.2	Te2 («Malmkalke»)	59
4.4.3	Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	60
4.4.4	Te4 (Opalinuston).....	61
5	Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse	62
5.1	Eigenschaften der hydrogeologischen Einheiten	63
5.1.1	Aquiferarten in den hydrogeologischen Einheiten	64
5.1.2	Hydraulisches Potenzial.....	65
5.1.3	Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges und von Störungszonen.....	66
5.1.4	Wasser-/Gebirgstemperatur	68
5.1.5	Wasserchemismus.....	68
5.1.6	Kohlenwasserstoff-Vorkommen.....	69
5.2	Tabellarische Zusammenfassung der hydrogeologischen Einheiten	70
5.2.1	Hy1 (Untere Süßwassermolasse und Siderolithikum)	70
5.2.2	Hy2 («Malmkalke»).....	71
5.2.3	Hy3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston).....	72
5.2.4	Hy4 (Opalinuston)	73
6	Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen geomechanischen Eigenschaften und Spannungsverhältnissen	75
6.1	Ableiten der geomechanischen Gesteinseigenschaften	76
6.1.1	Einaxiale Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul und Poissonzahl.....	77
6.1.2	Spitzenkohäsion, Spitzenreibungswinkel, Spaltzugfestigkeit.....	80
6.1.3	Quelleigenschaften	81
6.2	Geomechanische Eigenschaften von Störungszonen.....	81
6.3	Spannungsverhältnisse in den geomechanischen Einheiten	82

6.4	Tabellarische Zusammenfassung der geomechanischen Einheiten	86
6.4.1	Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum).....	86
6.4.2	Gm2 («Malmkalke»)	87
6.4.3	Gm3 (Wildegge-Formation).....	88
6.4.4	Gm4 (Dogger oberhalb Opalinuston)	89
6.4.5	Gm5 (Opalinuston)	90
7	Beschreibung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	91
7.1	Beurteilung der Verkarstung des Gebirges	92
7.1.1	Verkarstungsfähige Gesteinseinheiten.....	93
7.1.2	Verkarstung der verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten.....	93
7.1.3	Auftretenshäufigkeit von Karsthöhlräumen.....	95
7.1.4	Karsthohlraumgrössen	96
7.1.5	Art der Hohlraumverfüllung	97
7.1.6	Wasserführung der Karsthöhlräume	98
7.2	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	98
7.2.1	Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	98
7.2.2	Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»).....	99
7.2.3	Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	99
7.2.4	Ka4 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston).....	100
7.2.5	Ka5 (Opalinuston)	100
8	Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen	101
8.1	Beurteilung der Gefährdungen in Zusammenhang mit dem Gebirgsverhalten	102
8.1.1	Ablösungen von Trennflächenkörpern	102
8.1.2	Druckhaftes Gebirge.....	105
8.1.3	Instabilität durch rolliges oder fliessendes Gebirge.....	106
8.2	Gefahren in Zusammenhang mit dem Zutritt von Bergwasser ins Bauwerk.....	108
8.2.1	Wasserzutritt.....	108
8.2.2	Überschreiten der Einleitgrenzwerte	111
8.2.3	Versinterung von Drainageleitungen	112
8.2.4	Betonkorrosion	113
8.2.5	Korrosion von metallischen Einbauten.....	113
8.3	Gefahren, die zu gesundheitlichen Auswirkungen führen können	113
8.3.1	Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen.....	113
8.3.2	Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff.....	114
8.3.3	Gesundheitliche Auswirkungen durch Quarzfeinstaubexposition.....	115
8.3.4	Gesundheitliche Auswirkungen durch Asbestfaserexpositionen.....	115
8.3.5	Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	116
8.4	Andere Gefahren.....	117
8.4.1	Gefahren bezüglich Gesteinsabrasivität.....	117
8.4.2	Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	118

8.5	Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungsbildern	119
8.5.1	Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	119
8.5.2	Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	120
8.5.3	Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	121
8.5.4	Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	122
8.5.5	Gb5 (Opalinuston)	123
9	Baugrundmodelle	125
9.1	Zusammenfassende Beschreibung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche	126
9.1.1	Hb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	126
9.1.1.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung	126
9.1.1.2	Hauptgefährdungen	127
9.1.1.3	Prognosesicherheit	127
9.1.2	Hb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	128
9.1.2.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung	128
9.1.2.2	Hauptgefährdungen	129
9.1.2.3	Prognosesicherheit	129
9.1.3	Hb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	130
9.1.3.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung	130
9.1.3.2	Hauptgefährdungen	131
9.1.3.3	Prognosesicherheit	131
9.1.4	Hb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	132
9.1.4.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung	132
9.1.4.2	Hauptgefährdungen	133
9.1.4.3	Prognosesicherheit	133
9.1.5	Hb5 (Opalinuston)	134
9.1.5.1	Allgemeine Gebirgsbeschreibung	134
9.1.5.2	Hauptgefährdungen	135
9.1.5.3	Prognosesicherheit	135
10	Schlussbetrachtung	137
11	Literaturverzeichnis	139

Anhänge

Anhang 1: Tunnelband Zugangsschacht

Anhang 2: Tunnelband Lüftungsschacht

Anhang 3: Tunnelband Betriebsschacht

Anhang 4: Tunnelband HAA-Lagerstollen

Anhang 5: 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	10
Tab. 4-1:	Vergleich der Anzahl der angetroffenen effektiven Trennflächen in den TBO	45
Tab. 4-2:	Erwartete Öffnungsweiten der Trennflächen an den Schachtstandorten	48
Tab. 4-3:	Erwarteter Trennflächenzustand an den Schachtstandorten	48
Tab. 4-4:	Verteilung der Volumina der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	49
Tab. 4-5:	Verteilung der Grundformen der erwarteten Trennflächenkörper in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	50
Tab. 5-1:	Erwarteter Chemismus von Grund- und Porenwasser (<i>best guess</i>) in den hydrogeologischen Einheiten.....	69
Tab. 6-1:	Tiefenabhängige Werte für die Hauptspannungsmagnituden im Opalinuston.....	84
Tab. 7-1:	Beurteilung der Verkarstungsfähigkeit und der Verkarstung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften.....	95
Tab. 8-1:	Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern im Gebirge ausserhalb von Störungszonen.....	103
Tab. 8-2:	Beurteilung der Ablösung von Trennflächenkörpern in Störungszonen des Typs III	104
Tab. 8-3:	Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges ausserhalb von Störungszonen	105
Tab. 8-4:	Beurteilung der Druckhaftigkeit des Gebirges in Störungszonen des Typs III	106
Tab. 8-5:	Beurteilung der Gefährdung durch Instabilitäten durch rolliges oder fliessendes Gebirge.....	107
Tab. 8-6:	Beurteilung des prognostizierten initialen Wasserzutritts	109
Tab. 8-7:	Beurteilung des prognostizierten permanenten Wasserzutritts.....	110
Tab. 8-8:	Beurteilung der Überschreitung der erwarteten Einleitgrenzwerte.....	111
Tab. 8-9:	Beurteilung des Versinterungspotenzials.....	112
Tab. 8-10:	Beurteilung der Massnahmenstufen zur Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagebauten in Erdgas-führenden Gesteinsschichten	114
Tab. 8-11:	Beurteilung der Quarzfeinstaub-Belastung.....	115
Tab. 8-12:	Beurteilung der Massnahmenstufen bezogen auf die Trockenraumtemperatur einschliesslich der Gebirgs- resp. Bergwassertemperatur	116
Tab. 8-13:	Bewertung der Gesteinsabrasivität	117
Tab. 8-14:	Beurteilung der geogenen Belastung des Ausbruchmaterials.....	118

Figurenverzeichnis

Fig. 1-1:	Situation HAA-Lager in Zürich Nordost.....	3
Fig. 1-2:	Situation SMA-Lager in Zürich Nordost.....	4
Fig. 1-3:	Lage der Tiefbohrungen (TBO), Schachtstandorte und 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:	Verlauf der lithostratigraphischen Einheiten in den TBO Zürich Nordost und Prognose am aktuell geplanten Standort des Lüftungs- schachts.....	14
Fig. 2-2:	Aquifere und Aquitarde oberhalb des Opalinustons.....	15
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:	Gegenüberstellung der prognostizierten lithologischen Einheiten in den aktuell geplanten Zugangsbauwerken.....	19
Fig. 3-3:	Zusammenstellung der Mächtigkeiten des Siderolithikums in den TBO der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost	21
Fig. 3-4:	Kernbeispiele der «Felsenkalk» + «Massenkalk» aus TRU1-1	22
Fig. 3-5:	Kernbeispiel der Schwarzbach-Formation aus TRU1-1	23
Fig. 3-6:	Kernbeispiel der Villigen-Formation aus MAR1-1	24
Fig. 3-7:	Kernbeispiel der Wildeggen-Formation aus MAR1-1	25
Fig. 3-8:	Kernbeispiel des Doggers oberhalb des Opalinustons aus MAR1-1	26
Fig. 3-9:	Kernbeispiel des Opalinustons aus MAR1-1	27
Fig. 3-10:	Vergleich des Tonmineralgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO	29
Fig. 3-11:	Vergleich des Quarzgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO	30
Fig. 3-12:	Vergleich des Karbonatgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO	31
Fig. 4-1:	Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächen- eigenschaften und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	42
Fig. 4-2:	Seismisch kartierte Störungszonen im Bereich der geplanten Bauwerke.....	43
Fig. 4-3:	Zusammenstellung der Trennflächenabstände der effektiven Trenn- flächen in den TBO sowie der erwarteten Trennflächenabstände an den geplanten Schachtstandorten.....	47

Fig. 4-4:	Typen von Störungszonen, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden	52
Fig. 4-5:	Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten.....	53
Fig. 4-6:	Beispiel einer durch Verkarstungsprozesse überprägten Störungszone des Typs III aus BUL1-1	54
Fig. 4-7:	Schematische Darstellung des «soft linkage»-Verlaufs von Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten.....	55
Fig. 4-8:	Typen von Störungszonen, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von wenig kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden	56
Fig. 4-9:	Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen des Typs I in wenig kompetenten Gesteinseinheiten	57
Fig. 5-1:	Gegenüberstellung der hydrogeologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Betrachtung und der lithostratigraphischen Einteilung sowie der Messbereiche der durchgeführten hydrogeologischen Versuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	63
Fig. 5-2:	Gegenüberstellung der erwarteten hydraulischen Potenziale in den hydrogeologischen Einheiten mit der Höhenlage der Schachtköpfe der Zugangsschächte (rote Linie)	65
Fig. 5-3:	Gegenüberstellung der horizontalen, hydraulischen Durchlässigkeiten des Gebirges und von Störungszonen in den hydrogeologischen Einheiten.....	67
Fig. 5-4:	Gemessene Gebirgstemperaturen in den TBO und der Bohrung Benken	68
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	76
Fig. 6-2:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten einaxialen Druckfestigkeiten.....	78
Fig. 6-3:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Elastizitätsmodule	79
Fig. 6-4:	Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Poissonzahlen.....	80
Fig. 6-5:	Prognostiziertes Spannungsprofil am Standort des Betriebsschachts.....	83
Fig. 6-6:	Überlagerung des Tops Opalinuston im Bereich des Lagerprojekts	85
Fig. 7-1:	Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften mit der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts	92
Fig. 7-2:	Beobachtete Lösungshohlräume in den TBO der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost	94
Fig. 7-3:	Verteilung der beobachteten Öffnungsweiten der Karsthohlräume in den Bohrkernen der TBO	97
Fig. 7-4:	Beispiel eines sedimentverfüllten Karsthohlraums.....	98

Fig. 8-1:	Herleitung der ingenieurgeologischen Gefährdungsbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts)	102
Fig. 9-1:	Herleitung der ingenieurgeologischen Homogenbereiche (lithostratigraphisches Prognoseprofil am Standort des Lüftungsschachts)	125
Fig. 9-2:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	126
Fig. 9-3:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	128
Fig. 9-4:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	130
Fig. 9-5:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	132
Fig. 9-6:	Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb5 (Opalinuston)	134

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 Gb5)
Gm	Geomechanische Einheit (Gm1 bis Gm5)
HAA	Hochaktive Abfälle (abgebrannte Brennelemente und hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung)
Hb	Ingenieurgeologischer Homogenbereich (Hb1 bis Hb5)
Hy	Hydrogeologische Einheit (Hy1 bis Hy4)
Ka	Einheit mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften (Ka1 bis Ka5)
Li	Lithologische Einheit (Li1 bis Li8)
MAR1-1	Tiefbohrung Marthalen-1-1
MD	Measured Depth
MHF	Micro-Hydraulic Fracturing
NAB	Nagra Arbeitsbericht
NL	Standortgebiet Nördlich Lägern
NTB	Nagra Technischer Bericht
RHE1-1	Tiefbohrung Rheinau-1-1
Sch.	Schichten
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 Zürich Nordost» 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. Eine anderweitige Verwendung der Inhalte des vorliegenden Berichts ist nicht vorgesehen. 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:

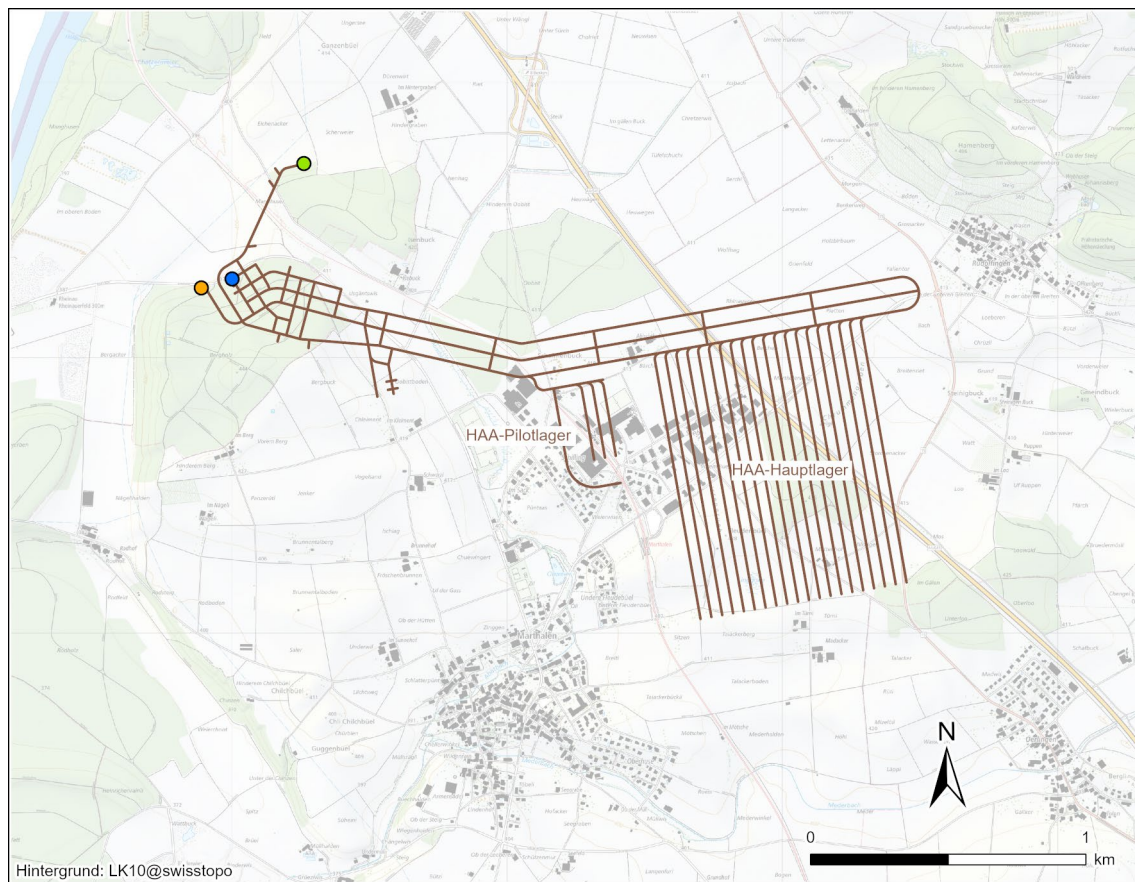
- **Kapitel 1: Einleitung**
Einordnung des Berichts, Angabe der Eckdaten des Projekts und Lesehinweise.
- **Kapitel 2: Geologische und hydrogeologische Übersicht**
Geologische und hydrogeologische Verhältnisse im Standortgebiet werden in den regionalen Kontext gesetzt.
- **Kapitel 3: Beschreibung der 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 Zürich Nordost wird entweder ein HAA- oder ein SMA-Lager realisiert. Eine Realisierung als Kombilagers wie in Nördlich Lägern ist nicht geplant (Nagra 2023a). Im Folgenden werden die Projektelemente des HAA- (Fig. 1-1) und SMA-Lagers (Fig. 1-2) beschrieben. Die Funktionen der Bauwerke sind in Nagra (2022b) beschrieben.

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



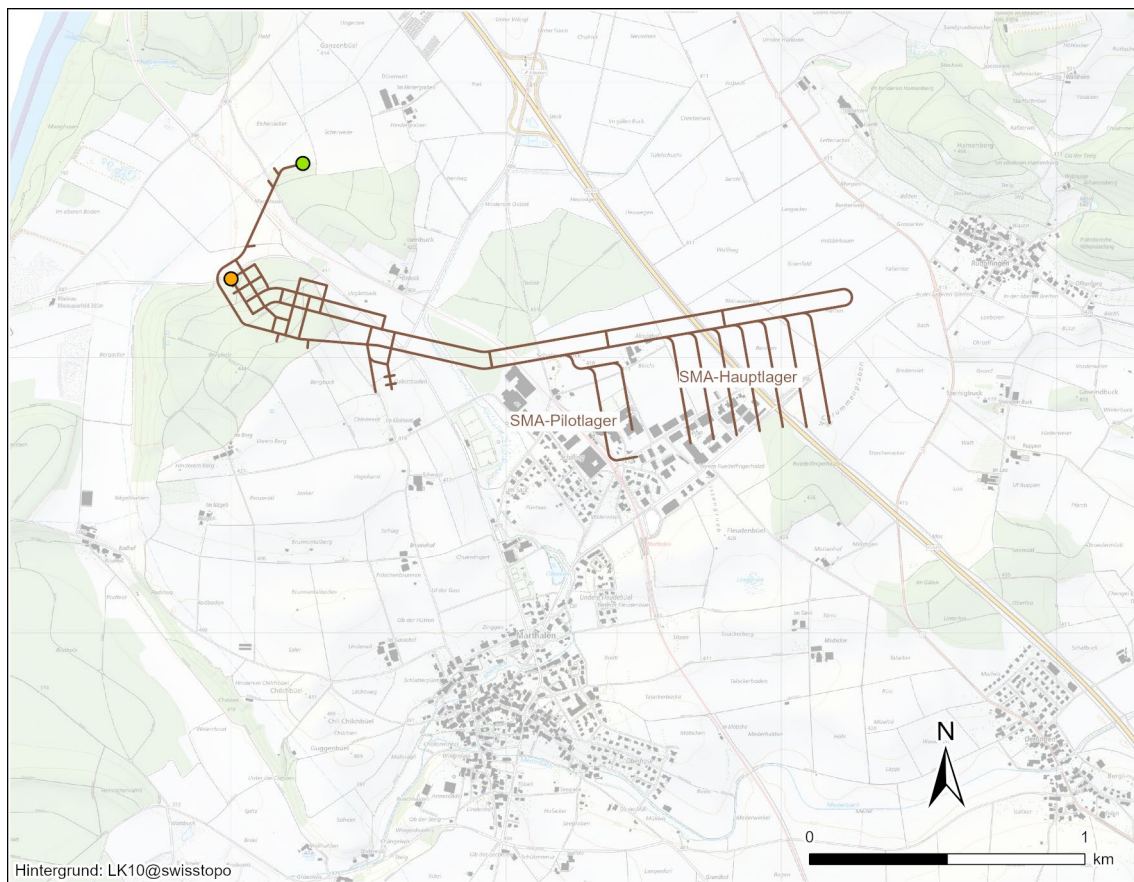
Geologische Tiefenlager

— HAA-Lager Zürich Nordost

Nebenzugangsanlagen

- Betriebsschacht
- Lüftungsschacht
- Zugangsschacht

Fig. 1-1: Situation HAA-Lager in Zürich Nordost



Geologische Tiefenlager

— SMA-Lager Zürich Nordost

Nebenzugangsanlagen

● Lüftungsschacht

● Zugangsschacht

Fig. 1-2: Situation SMA-Lager in Zürich Nordost

1.3.1 Zugangsbauwerke

Die Erschliessung der Lagerebene erfolgt mit drei Schächten (Fig. 1-3). Aus baulichen, betrieblichen und betriebssicherheitstechnischen Gründen sind mehrere, funktional getrennte Zugänge erforderlich (Nagra 2023b):

- Betriebsschacht: Innendurchmesser von 9.5 m; Tiefe von ca. 607 m
- Lüftungsschacht: Innendurchmesser von 6.0 m (HAA-Lager) resp. 9.5 m (SMA-Lager); Tiefe von ca. 605 m (HAA-Lager), resp. ca. 607 m (SMA-Lager)
- Zugangsschacht: Innendurchmesser von 8.5 m; Tiefe von ca. 621 m

Der Betriebs- und der Lüftungsschacht werden bereits für die erdwissenschaftlichen Untersuchungen untertag (EUU) abgeteuft und über die gesamte Betriebsdauer bis zum Gesamtverschluss beansprucht. Hingegen wird der Zugangsschacht erst für den Einlagerungsbetrieb fertiggestellt und mit dem Verschluss der Hauptlager wieder verfüllt.

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

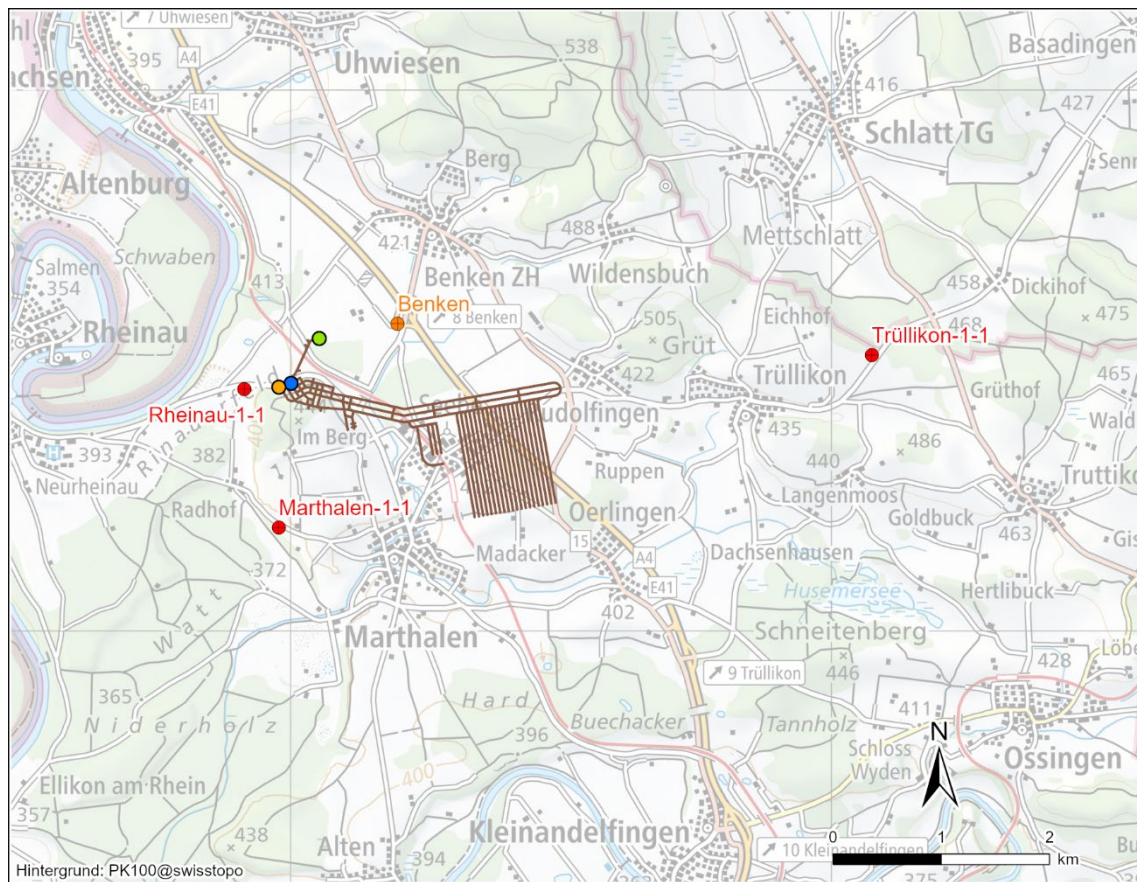
1.3.3 Angenommene Vortriebsmethoden

Für die Beurteilung der ingenieurgeologischen Gefährdungen (Kapitel 8) wird angenommen, dass sowohl die Zugangsbauwerke als auch die Bauwerke auf Lagerebene inklusive SMA-Kavernen gemäss aktueller Planung im konventionellen Vortrieb (Sprengvortrieb) erstellt werden (Nagra 2023a). Die HAA-Lagerstollen werden gemäss Planung mit einer Tunnelbohrmaschine aufgeföhren.

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 Zürich Nordost

Nebenzugangsanlagen

- Betriebsschacht
- Lüftungsschacht
- Zugangsschacht

Fig. 1-3: Lage der Tiefbohrungen (TBO), Schachtstandorte und 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).

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 2022c
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>

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 an den geplanten Schachtstandorte sowie für die Bauwerke auf Lagerebene. Eine detaillierte Charakterisierung der Schachtstandorte war aber nicht Ziel der Untersuchungen. So liegt auch keine TBO direkt an einem Schachtstandort.

Für die ingenieurgeologische Prognose wird die Bohrung MAR1-1 stärker gewichtet als die von den Schachtstandorten weiter entfernt liegende Bohrung TRU1-1. Letztere wurde weitgehend zur Konsistenzprüfung verwendet resp. dazu verwendet 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 Bohrung RHE1-1 wurde als Schrägbohrung ausgeführt. Die Bohrung wurde nur ab der Wedelsandstein-Formation gekernt. Desweiteren wurden an den Bohrkernen keine geomechanischen Laborversuche durchgeführt. Deshalb wird die Bohrung in diesem Bericht weitgehend zur Konsistenzprüfung herangezogen.

Die Daten der älteren Tiefbohrung Benken (Nagra 2001) 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, Galgenbuck-Strassentunnel).

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 % (P0.05) und für den Maximalwert P0.95 verwendet wird. Wo die Datengrundlage es erlaubt, wird zusätzlich die Werteverteilung durch die Angabe des P0.25 und P0.75 abgebildet (Fig. 1-4).

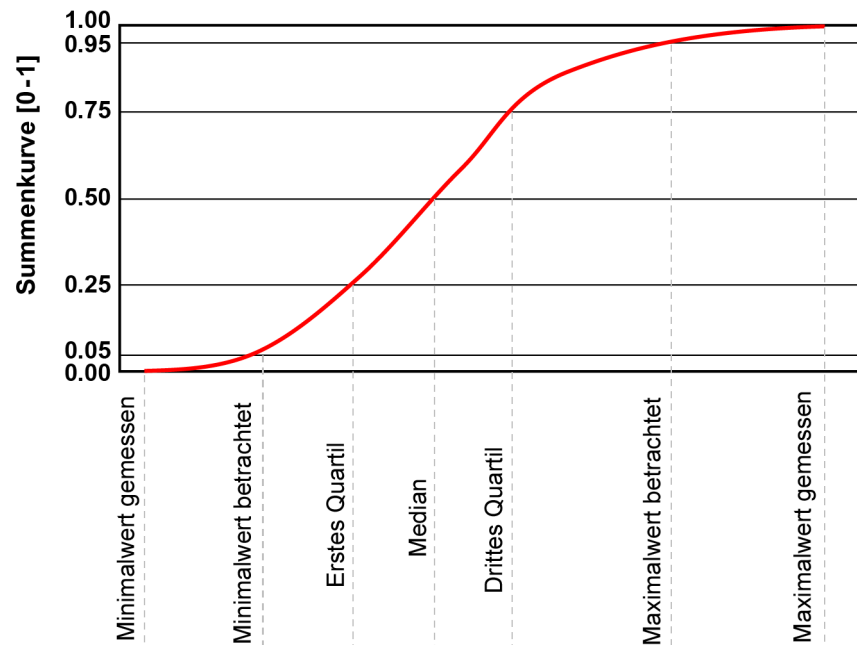
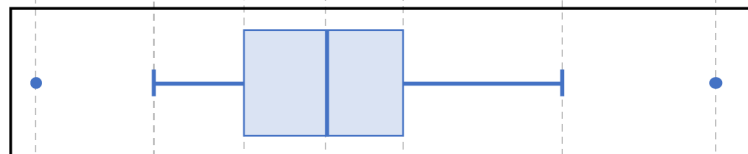
Summenkurve**Boxplot****Wertebereiche**

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										
Untere Süsswasser-molasse			100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1	Hb1
Siderolithikum			200	Li2						
Malm	«Felsenkalk» + «Massenkalk»		300	Li3	Te2	Hy2	Gm2	Ka2	Gb2	Hb2
	Schwarzbach-Fm.			Li4						
	Villigen-Fm.		400	Li5				Ka3	Gb3	Hb3
	Wildeggen-Fm.			Li6			Gm3			
Dogger	Wutach-Fm. bis «Murchisonae-Oolith-Fm.»		500	Li7	Te3	Hy3	Gm4	Ka4	Gb4	Hb4
	Opalinuston		600	Li8	Te4	Hy4	Gm5	Ka5	Gb5	Hb5
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 115 m mächtig und liegt zwischen 510 und 710 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.

Zur Erschliessung der Lagerebene wird eine Abfolge von verschiedenen Sedimentgesteinen durchfahren. Dies sind von der Oberfläche bis zur Lagerebene:

- die Lockergesteine des Quartärs haben je nach Schachtstandort eine Mächtigkeit von bis zu einigen zehner Metern
- eine rund 160 m mächtige Abfolge von Sandsteinen und Mergeln der Molasse
- eine rund 225 m mächtige Kalkstein-Abfolge des Malms
- eine rund 95 m mächtige Abfolge von Kalk-, Mergel- und Tonsteinen des Malms und des Doggers
- und die Tonsteine des Opalinustons

Die vorgefundene lithostratigraphische Abfolge in den TBO des Standortgebiets ist vergleichbar (Fig. 2-1).

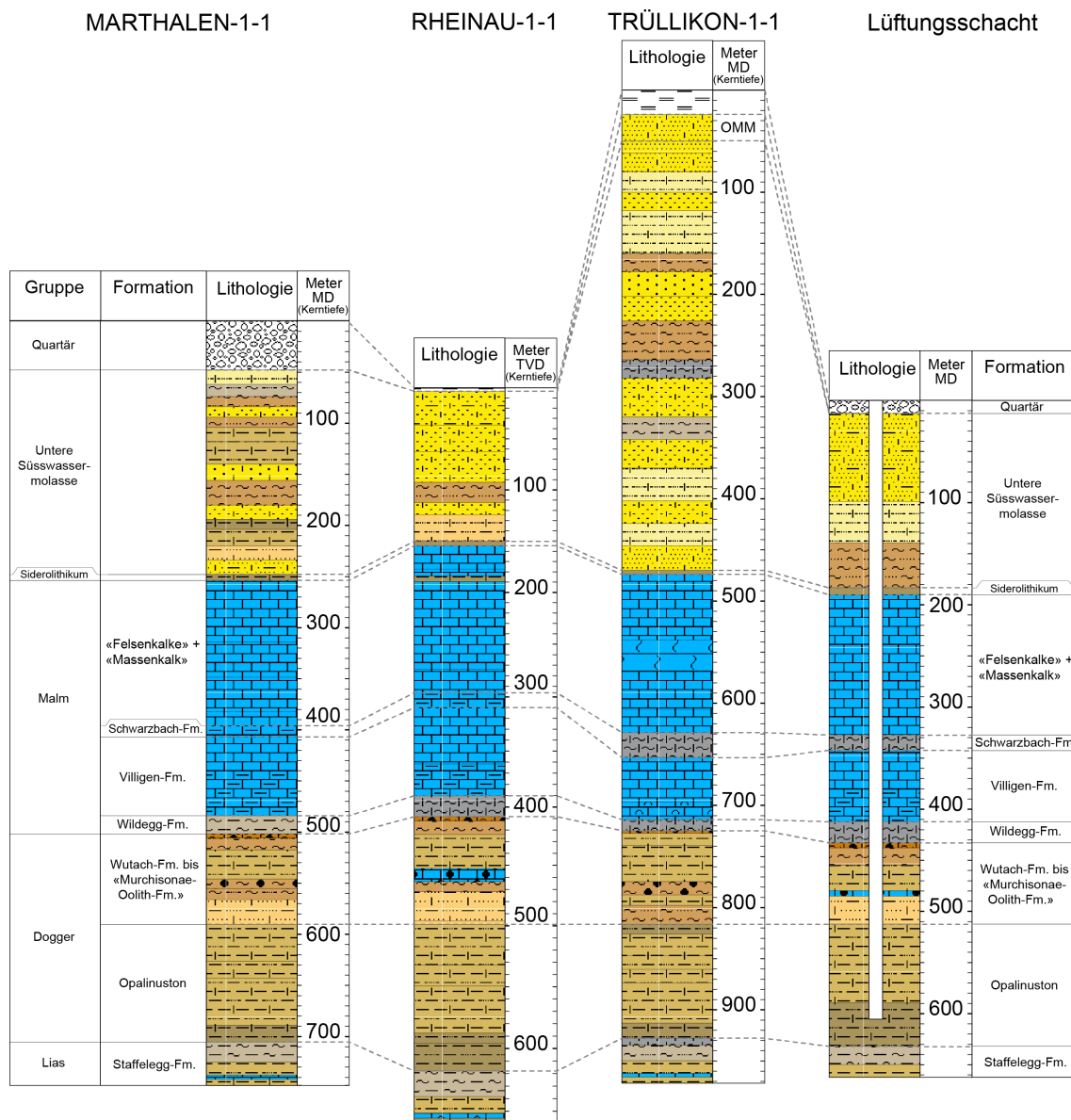


Fig. 2-1: Verlauf der lithostratigraphischen Einheiten in den TBO Zürich Nordost und Prognose am aktuell geplanten Standort des Lüftungsschachts

Aus tektonischer Sicht liegt das Standortgebiet Zürich Nordost im Übergangsbereich zwischen der "Vorfallenzzone" im Süden und dem östlichen Tafeljura im Norden (Nagra 2014a). Er wird im Nordosten durch die von Nordwesten nach Südosten verlaufende Neuhausen-Störung begrenzt, welche mit dem Hegau – Bodensee-Graben in Verbindung steht. Im für die Bautechnik relevanten Untersuchungsgebiet wurden auf dem Niveau des Opalinustons und der darüber liegenden Schichten anhand der 3D-Seismik nur wenige tektonische Störungszonen kartiert. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass weitere, seismisch nicht kartierte Störungszonen im Gebiet vorkommen (vgl. Kap. 4.3).

Die Schichten fallen generell flach nach SE ein.

Aus hydrogeologischer Sicht stellen die sandigen Abschnitte der Unteren Süsswassermolasse und die «Malmkalk» Aquifere über der Lagerebene dar (Fig. 2-2).

Als Besonderheit des Standortgebiets ist die Paläo-Verkarstung der «Malmkalke», im Besonderen die der «Felsenkalke» + «Massenkalk», zu erwähnen (vgl. Kapitel 7). Die Hohlräume dieser Paläo-Verkarstung wurden in den TBO weitgehend als mit Sedimenten verfüllt angetroffen. In den hydrogeologischen Bohrlochversuchen erwiesen sich diese verfüllten Karsthohlräume als «dicht» (z. B. Schwarz et al. 2021a). Es gibt keine Hinweise darauf, dass die Karsthohlräume im regionalen Massstab für die Dynamik im Aquifer von Bedeutung sind. Auch deshalb wird dieser paläo-verkarstete Gebirgsbereich als Trennflächenaquifer und nicht als Karstaquifer betrachtet.

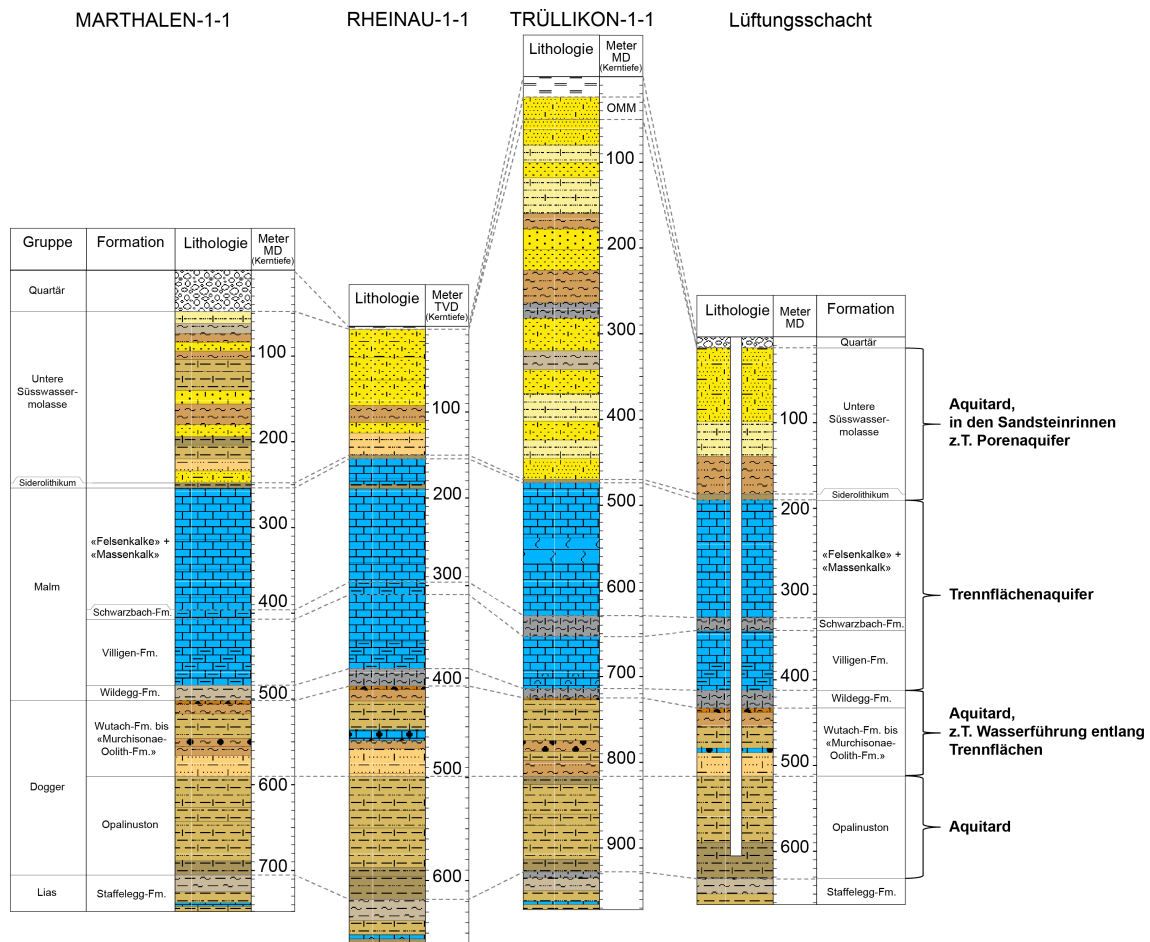


Fig. 2-2: Aquifere und Aquitarde oberhalb des Opalinustons

3 Beschreibung der lithologischen Einheiten

Die im Untersuchungsgebiet vorkommenden Gesteinseinheiten werden aus ingenieur-geologischer 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 ingenieur-geologischer Sicht ähnlichen Gesteinseigenschaften oder geringmächtige Einheiten zusammengefasst. Dadurch ergeben sich folgende lithologischen Einheiten (Fig. 3-1):

- Quartär: Die Mächtigkeit des Quartärs beträgt am Standort des Betriebsschachts rund 20 m, am Lüftungsschacht rund 13 m und am Zugangsschacht rund 52 m. Das Quartär wird im Bericht Eisenlohr & Müller (2015) behandelt.
- Li1: entspricht der Unteren Süsswassermolasse.
- Li2: entspricht dem Siderolithikum.
- Li3: entspricht den «Felsenkalken» + «Massenkalk».
- Li4: entspricht der Schwarzbach-Formation.
- Li5: entspricht der Villigen-Formation.
- Li6: entspricht der Wildeggen-Formation.
- Li7: entspricht dem Dogger oberhalb des Opalinustons.
- Li8: entspricht dem Opalinuston.

Die lithologischen Einheiten Li1 bis Li7 werden nur beim Bau der Zugangsbauwerke angetroffen. Diese Einheiten sind nicht in der Lagerebene vertreten. Die Einheit Li8 (Opalinuston) ist an der Basis der Zugangsbauwerke und auf der Lagerebene zu durchhörern.

Die Einheiten Li3 bis Li5 («Felsenkalke» + «Massenkalk», Schwarzbach- und Villigen-Formation werden in diesem Bericht als «Malmkalke» zusammengefasst.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der lithologischen Einheiten dienen weitgehend die Dossiers III (Lithostratigraphie) und X (Petrophysikalische Log Analyse) der TBO-Datenberichte (MAR1-1, TRU1-1).

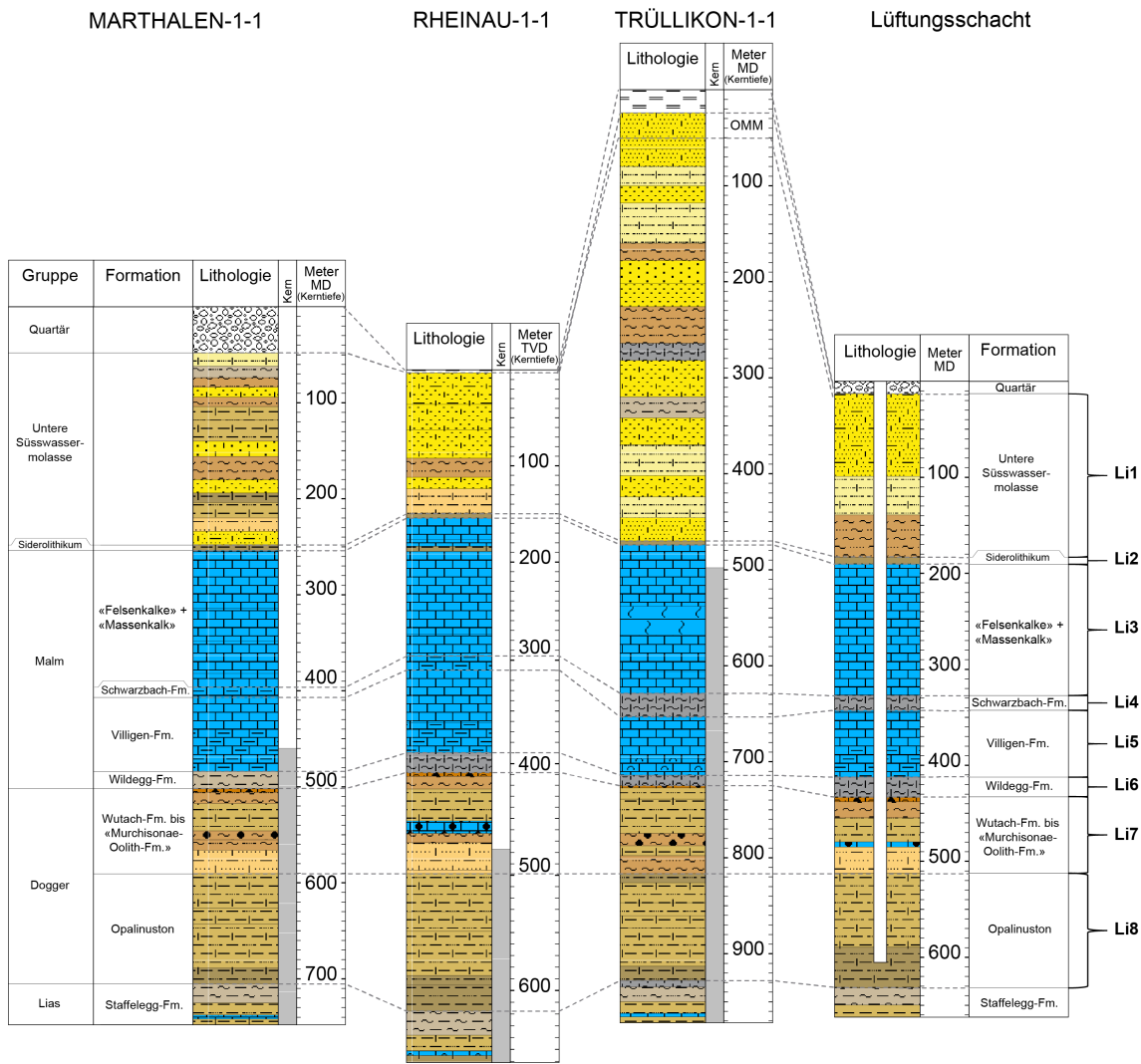


Fig. 3-1: Gegenüberstellung der lithologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Betrachtung und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

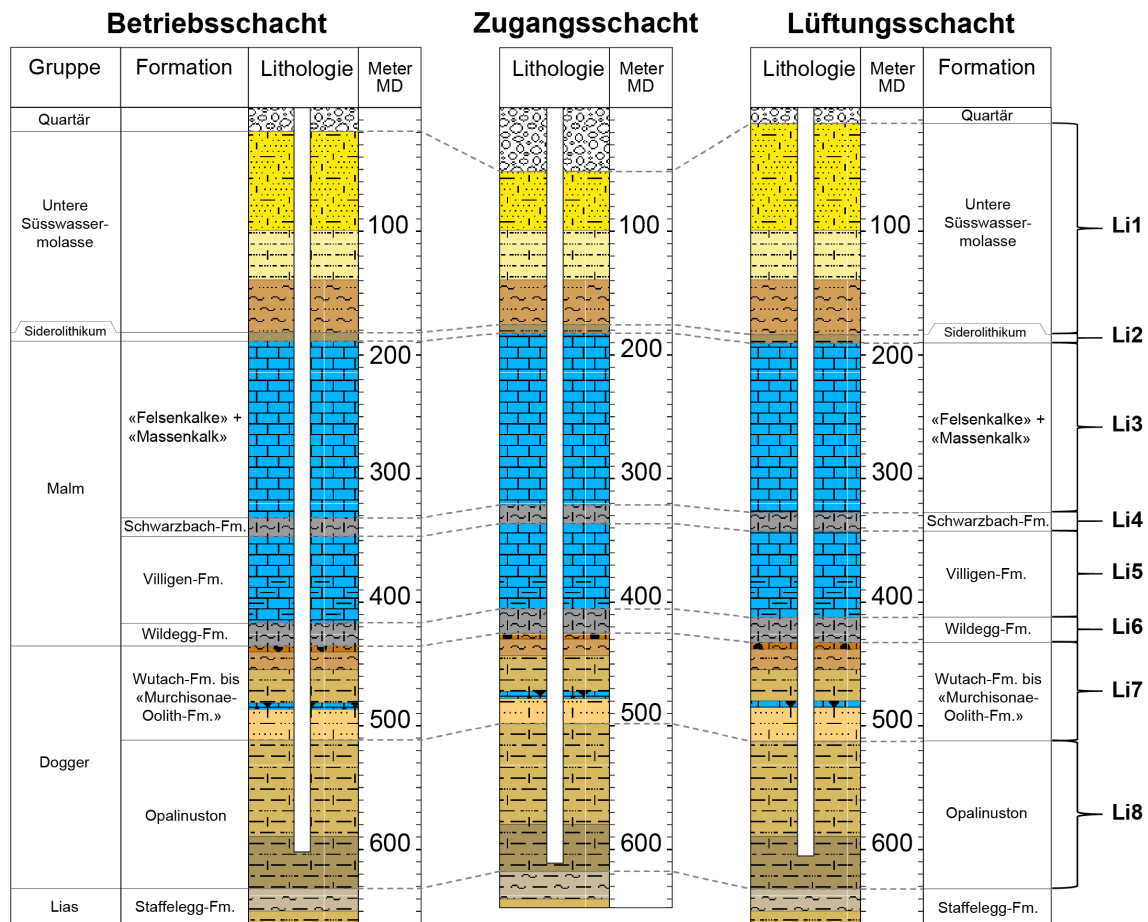


Fig. 3-2: Gegenüberstellung der prognostizierten lithologischen Einheiten in den aktuell geplanten Zugangsbauwerken

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, VII und X) verwiesen.

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

3.1.1 Li1 (Untere Süsswassermolasse)

Die lithologische Einheit Li1 entspricht stratigraphisch der Unteren Süsswassermolasse. Diese wurde in den TBO nur zerstörend durchbohrt, weshalb die lithologische Beschreibung auf der Auswertung des Bohrkleins (MAR1-1, TRU1-1, RHE1-1) sowie der lithologischen Beschreibungen in Jordan & Deplazes (2019a) und Haldimann et al. (2017) basiert.

Die in der Bohrung TRU1-1 angebohrte Obere Meeresmolasse (Fig. 3-1) ist in der Region der Bohrungen MAR1-1 und RHE1-1 sowie auch im Bereich der Schachtstandorte bereits durch Erosionsprozesse abgetragen und wird daher im Rahmen dieses Berichts nicht weiter diskutiert.

Bei der Unteren Süsswassermolasse handelt es sich um Sedimentgesteine, die in einem terrestrischen Flussrinnensystem abgelagert wurden. Sie besteht aus einer Sequenz von meist grob geschichteten, zum Teil schlecht verfestigten, meist Mittel- bis Grobsandsteinen der Flussrinnen und meist eher besser verfestigten, vorwiegend Feinsandsteinen der «Überschwemmungsebenen» in Wechsellagerungen mit geringmächtigen, plattigen bis dünnplattigen Mergel- und Siltsteinlagen sowie z. T. Kalksteinknollen. Vereinzelt kommen lokal Holzreste und bituminöse Einlagerungen vor.

Die Untere Süsswassermolasse weist in den TBO erosionsbedingt grosse Mächtigkeitsunterschiede auf (MAR1-1 200 m, TRU1-1 420 m, RHE1-1 147 m). Im Bereich der geplanten Schachtanlagen hat sie eine Mächtigkeit von rund 150 m (Betriebsschacht 162 m, Lüftungsschacht 171 m, Zugangsschacht 124 m).

3.1.2 Li2 (Siderolithikum)

Die lithologische Einheit Li2 entspricht der stratigraphischen Einheit Siderolithikum.

Das Siderolithikum wird aufgrund seiner besonderen Gesteinseigenschaften trotz seiner geringen Mächtigkeit als eigene Einheit beschrieben.

Das Siderolithikum umfasst verschiedene, meist schlecht verfestigte Residualsedimente wie pisolithisches Eisen («Bohnerz»), Quarzsande, Ton (Boluston), Brekzien, Silexknötchen oder lakustrische Sedimente. Die Sedimente weisen meist eine typisch rote bis bräunliche, an manchen Stellen auch grünliche Farbe auf.

Das Siderolithikum wurde in den TBO nur zerstörend durchbohrt, weshalb die lithologische Beschreibung auf der Auswertung des Bohrkleins aus den TBO und der Beschreibungen in Jordan & Deplazes (2019) beruht. Die Mächtigkeit des Siderolithikums ist unter anderem abhängig von der kleinräumigen Paläo-Topographie der Malmkalkoberfläche (Paläo-Karstlandschaft). Die Residualsedimente können lokal nicht vorhanden sein oder eine Mächtigkeit bis zu mehreren Metern aufweisen (Fig. 3-3). Da die seismische Erkundung im Standortgebiet das Siderolithikum nicht auflöst, wird für die Schachtstandorte eine erwartete Mächtigkeit von 4.5 m angenommen (Median der TBO), wobei paläotopographisch bedingt eine Bandbreite von keinem Vorkommen bis zu einer Mächtigkeit von rund 15 m möglich ist. Lokal können auch grössere Mächtigkeiten aufgeschlossen werden.

Als Siderolithikum wird nur das Residualsediment verstanden, das oberhalb der Paläo-Oberfläche liegt. Residualsedimente, die in Karsthohlräume transportiert und abgelagert wurden, werden als Hohlraumverfüllungen bezeichnet. Gegebenenfalls können sie als siderolithisch beschrieben werden. Die siderolithischen Hohlraumverfüllungen werden nicht zur lithologischen Einheit Li2 resp. zum Siderolithikum gezählt.

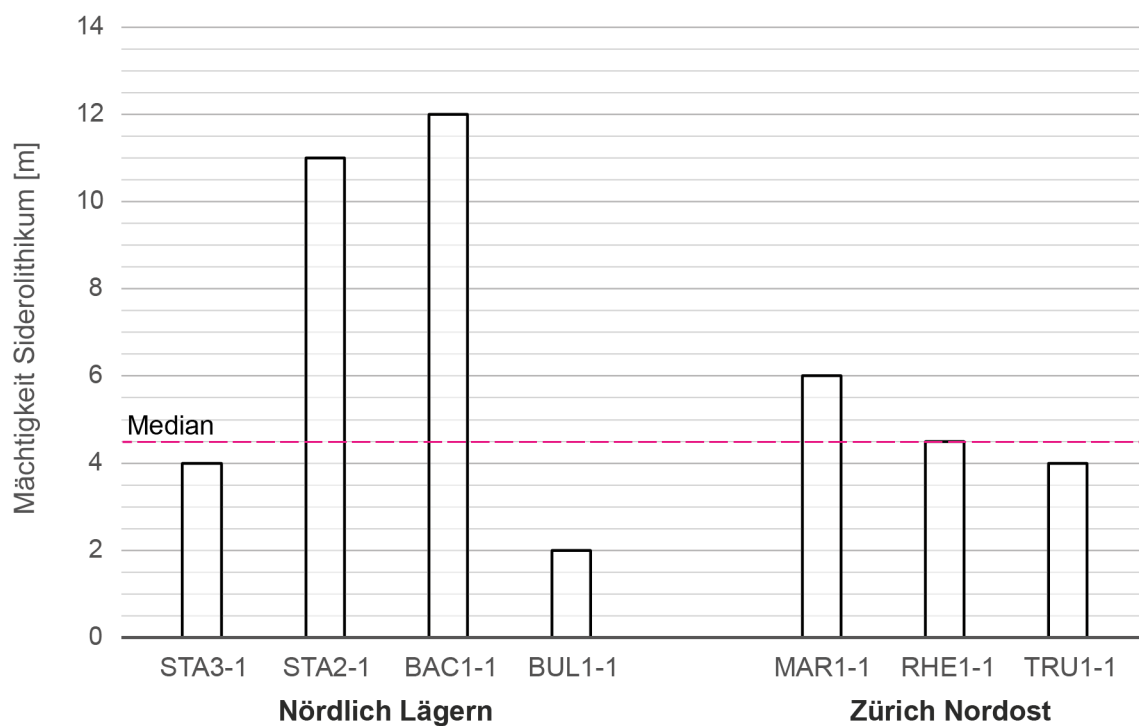


Fig. 3-3: Zusammenstellung der Mächtigkeiten des Siderolithikums in den TBO der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost

3.1.3 Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

Die lithologische Einheit Li3 entspricht den «Felsenkalke» + «Massenkalk» (Fig. 3-4), die im Standortgebiet Zürich Nordost mit entsprechender Verzahnung nebeneinander auftreten.

Die oberen Meter der «Felsenkalke» + «Massenkalk» wurden in den TBO nur zerstörend gebohrt (Fig. 3-1), weshalb die lithologische Beschreibung im oberen Bereich auf der Auswertung des Bohrkleins und die restliche Strecke auf den Beobachtungen am Bohrkern beruhen.

Bei den «**Felsenkalke**» handelt es sich um dünn bis grob geschichtete, hellbraune bis gelblich-weiße, überwiegend rein mikritische bis spätige Kalksteine. Vereinzelt können mergelige, pyritreiche oder glaukonitreiche Lagen angetroffen werden. Demgegenüber handelt es sich beim «**Massenkalk**» um einen massigen Kalkstein, bei dem praktisch keine Bankung zu erkennen ist. Er zeichnet sich durch die Dominanz von Kieselchwämmen und der diagenetischen Verkieselung weiterer Fossilien sowie durch das Auftreten von Kieselknötchen aus. An einigen Stellen sind die Schwämme durch Dolomitisierung und Dedolomitisierung nicht mehr sichtbar, was lokal zu einem charakteristischen «löchrigen» Erscheinungsbild führt.

Die Oberkante der «Felsenkalke» + «Massenkalk» ist erosiv entstanden (Paläo-Karstlandschaft). Die Untergrenze resp. der Übergang zur Schwarzbach-Formation ist durch eine allmähliche Zunahme des Tonmineralgehalts gekennzeichnet.

Die Mächtigkeit der «Felsenkalke» + «Massenkalk» weist in den TBO Unterschiede von einigen Zehnermetern auf (MAR1-1 142 m, TRU1-1 155 m, RHE1-1 141 m). Im Bereich der geplanten Schachtanlagen hat die Einheit Li3 eine Mächtigkeit von rund 140 m (Betriebsschacht 143 m, Lüftungsschacht 137 m, Zugangsschacht 139 m).



Fig. 3-4: Kernbeispiele der «Felsenkalke» + «Massenkalk» aus TRU1-1

3.1.4 Li4 (Schwarzbach-Formation)

Die lithologische Einheit Li4 entspricht der Schwarzbach-Formation.

Bei der Schwarzbach-Formation handelt es sich um einen grob geschichteten, grauen, glaukonitischen Kalkmergel bis Kalkstein (Fig. 3-5). Die Untergrenze zur Villigen-Formation ist gekennzeichnet durch eine allmähliche Abnahme des Tonmineralgehalts.

Die Gesteinsformation weist in MAR1-1 eine Mächtigkeit von 11 m resp. in RHE1-1 14 m und in TRU1-1 24 m auf (Betriebsschacht 15 m, Lüftungsschacht 15 m, Zugangsschacht 15 m).



Fig. 3-5: Kernbeispiel der Schwarzbach-Formation aus TRU1-1

3.1.5 Li5 (Villigen-Formation)

Die lithologische Einheit Li5 entspricht der Villigen-Formation.

Die Villigen-Formation besteht aus einer Abfolge meist mikritischer Kalkbänke, die im unteren Bereich der Einheit von dünnen Mergellagen voneinander getrennt sind (Fig. 3-6). Untergeordnet treten knollige und glaukonitische Abfolgen auf. Die Untergrenze zur Wildeggen-Formation ist graduell durch einen zunehmenden Tonmineralgehalt gekennzeichnet.

Die Einheit weist in MAR1-1 eine Mächtigkeit von rund 77 m resp. in TRU1-1 61 m und in RHE1-1 80 m auf (Betriebsschacht 70 m, Lüftungsschacht 70 m, Zugangsschacht 70 m).



Fig. 3-6: Kernbeispiel der Villigen-Formation aus MAR1-1

3.1.6 Li6 (Wildeg-Formation)

Die lithologische Einheit Li6 entspricht der Wildeg-Formation.

Die dominierende Lithologie der Wildeg-Formation ist ein grauer Kalkmergel, der mit meist tonigen, an der Basis der Einheit glaukonitischen, mikritischen Kalksteinbänken resp. Kalkbankabfolgen durchsetzt ist(Fig. 3-7).

Die Wildeg-Formation weist in den TBO eine Mächtigkeit von rund 10 – 20 m auf (MAR1-1 18 m, TRU1-1 11 m, RHE1-1 18 m). Im Bereich der Schachtstandorte hat die Einheit eine Mächtigkeit von rund 20 m (Betriebsschacht 19 m, Lüftungsschacht 20 m, Zugangsschacht 20 m).



Fig. 3-7: Kernbeispiel der Wildeg-Formation aus MAR1-1

3.1.7 Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)

Die lithologische Einheit Li7 umfasst die Einheiten des Doggers oberhalb des Opalinustons (Fig. 3-8).

Die Einheit besteht aus einer Abfolge von wenigen Metern bis wenigen Zehnermetern mächtigen Gesteinsschichten aus mehrheitlich Tonmergel und sandigen Mergeln mit vereinzelt, teils sandigen Kalkstein-, Kalkmergel- und Tonsteinlagen sowie Eisenoolithen.

Die Mächtigkeit der Einheit zeigt in den TBO Unterschiede von bis zu 17 m (MAR1-1 89 m, TRU1-1 92 m, RHE1-1 90 m). Im Bereich der geplanten Schachtstandorte weist sie eine Mächtigkeit von rund 75 m auf (Betriebsschacht 76 m, Lüftungsschacht 80 m, Zugangsschacht 73 m).



Fig. 3-8: Kernbeispiel des Doggers oberhalb des Opalinustons aus MAR1-1

3.1.8 Li8 (Opalinuston)

Die lithologische Einheit Li8 entspricht der stratigraphischen Einheit Opalinuston.

Der Opalinuston setzt sich v.a. aus einer Serie dünn geschichteter, z. T. siltig-sandiger Tonsteine zusammen (Fig. 3-9). 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 (MAR1-1 115 m, TRU1-1 111 m, RHE1-1 119 m). Im Bereich der geplanten Schachtanlagen hat der Opalinuston eine Mächtigkeit von rund 120 m.

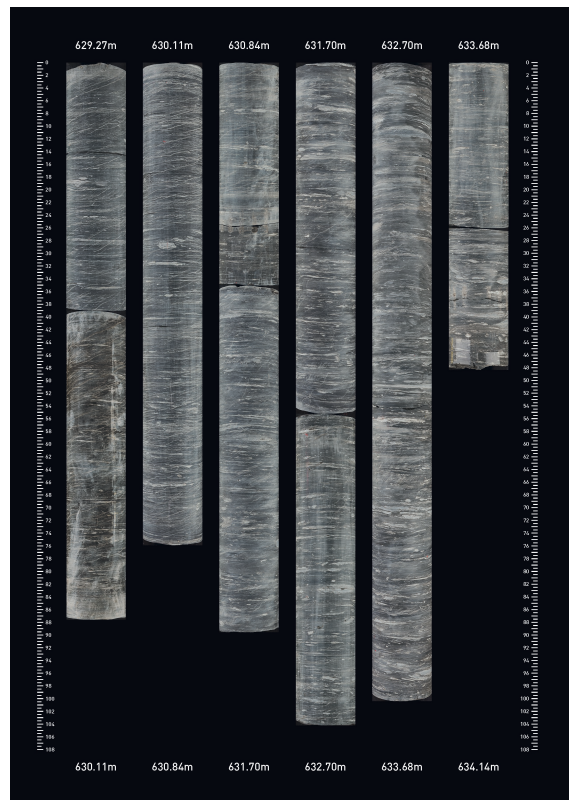


Fig. 3-9: Kernbeispiel des Opalinustons aus MAR1-1

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 sind in den TBO weitgehend vergleichbar (Fig. 3-10, Fig. 3-11, Fig. 3-12).

Für die Beurteilung der zu erwartenden Mineralgehalte an den Schachtstandorten werden die Werte aus MAR1-1 verwendet.

Die MultiMin-Daten sind nur für die gekernteten Gesteinseinheiten verfügbar («Felsenkalke» + «Massenkalk» und tieferliegende Gesteinseinheiten) (Fig. 3-1). Für die Molasse und das Siderolithikum werden Literaturdaten verwendet (z. B. Hänni & Ris 2017).

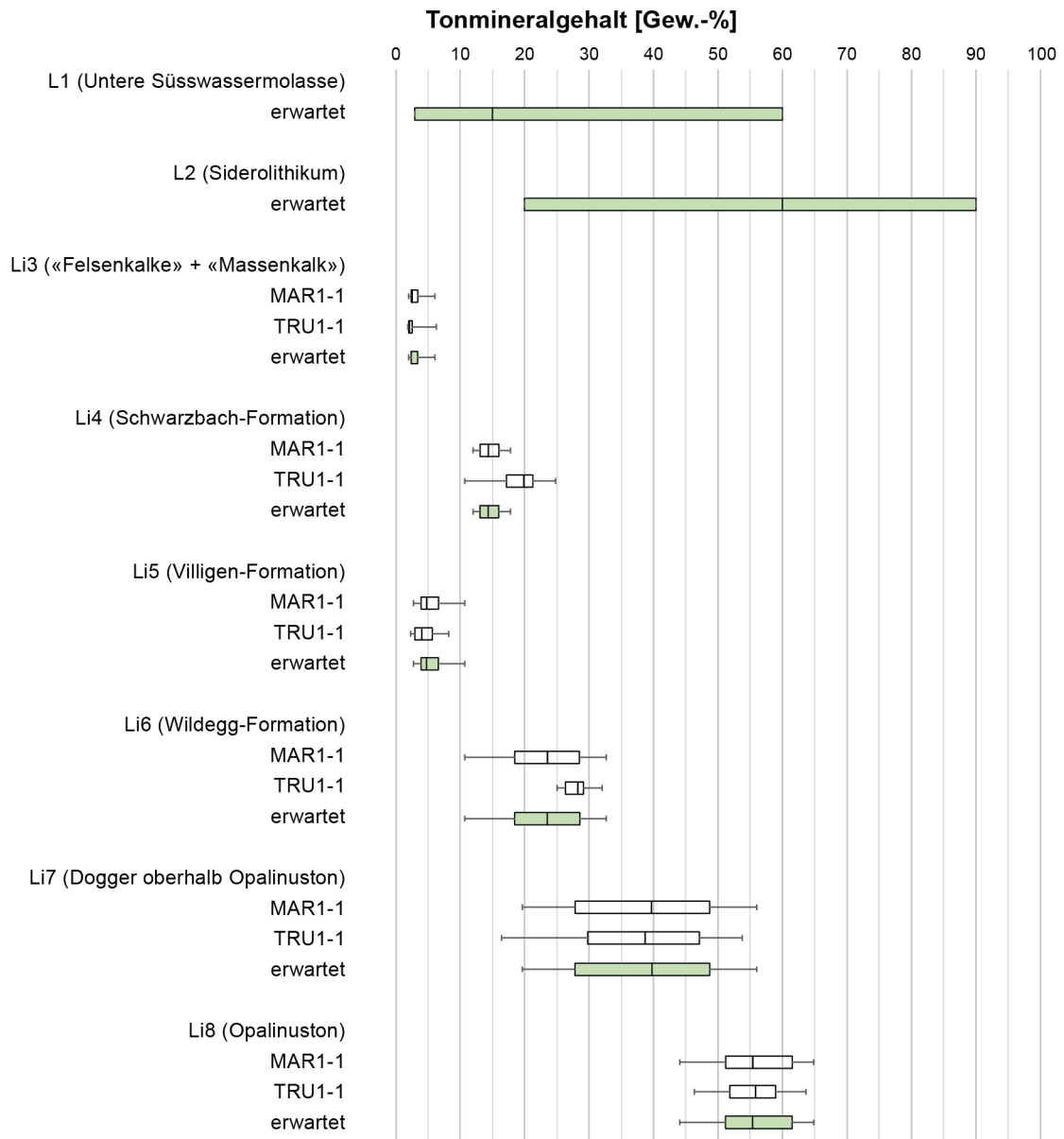


Fig. 3-10: Vergleich des Tonmineralgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO

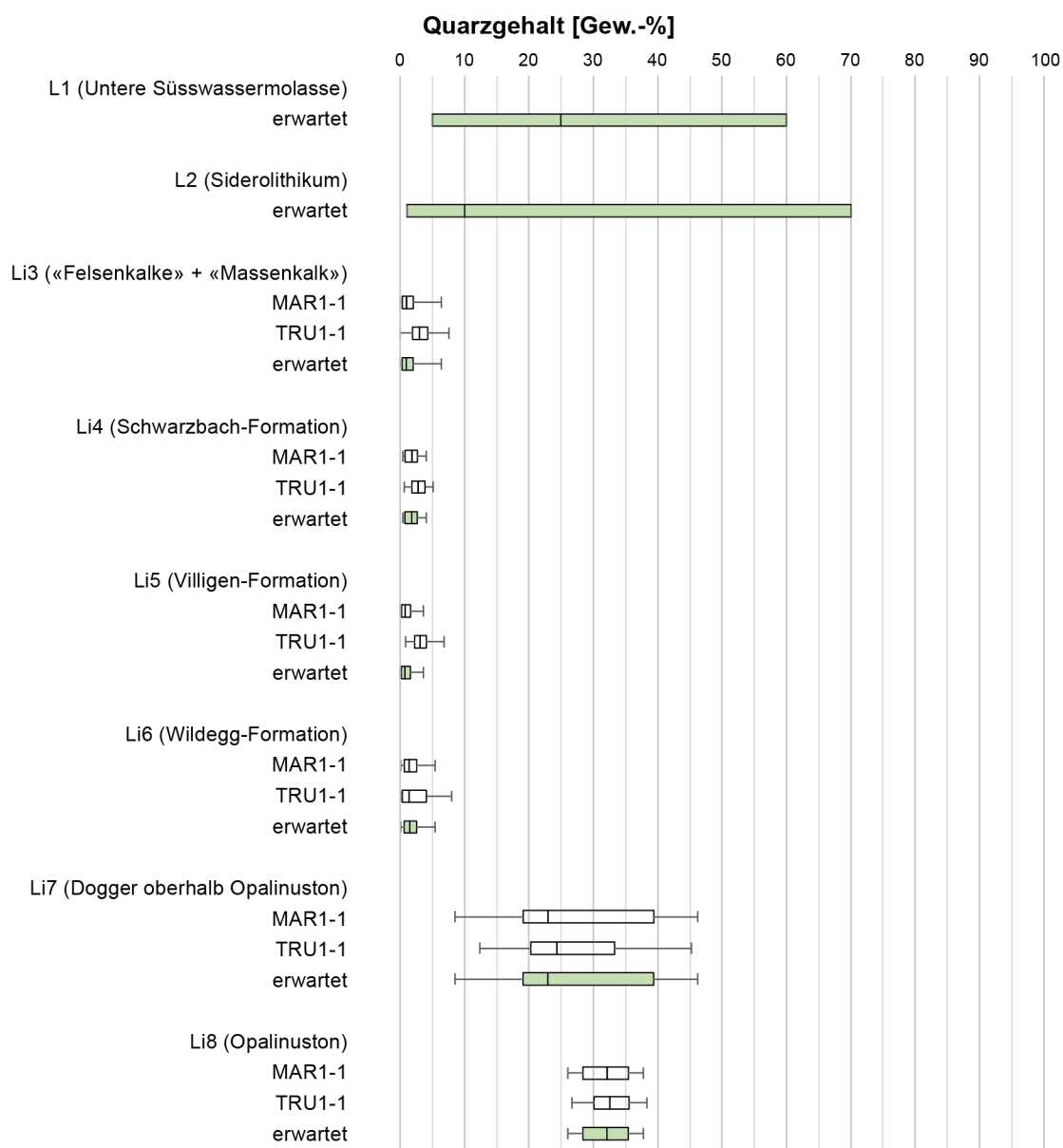


Fig. 3-11: Vergleich des Quarzgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO



Fig. 3-12: Vergleich des Karbonatgehalts der lithologischen Einheiten in den TBO

3.3 Tabellarische Zusammenfassung der lithologischen Einheiten

3.3.1 Li1 (Untere Süßwassermolasse)

Li1 (Untere Süßwassermolasse)						
Gesteinsbeschreibung					Datenqualität	
Lithologische Beschreibung	Fluviatile Sequenzen von meist grob geschichteten, zum Teil schlecht zementierten meist Mittel- bis Grobsandsteinen der Flussrinnen und meist besser zementierten, vorwiegend Feinsandsteinen der Überschwemmungsebenen in Wechsellagerungen mit geringer mächtigen Mergel- und Siltsteinlagen sowie z. T. Kalksteinlagen, lokal Holzreste, bituminöse Einlagerungen				Hinweisdaten	
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	171	20				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	2 %	2 %	25 %	65 %	65 %	Abschätzung
Quarzgehalt [Gew.-%]	5 %	5 %	25 %	60 %	60 %	Abschätzung
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	3 %	3 %	15 %	60 %	60 %	Abschätzung
Pyritgehalt [Gew.-%]	Keine Angabe					
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %				Hinweisdaten	
Besondere Minerale	Neben Quarz können als harte Minerale auch Feldspäte vorkommen.				Hinweisdaten	

3.3.2 Li2 (Siderolithikum)

Li2 (Siderolithikum)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Verwitterungssedimente bestehend aus Boluston mit Einlagerung von Quarzsanden und Bohnerz, z. T. lockergesteinsartig					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	7	10				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	1 %	1 %	5 %	20 %	20 %	Abschätzung
Quarzgehalt [Gew.-%]	1 %	1 %	10 %	70 %	70 %	Abschätzung
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	20 %	20 %	60 %	90 %	90 %	Abschätzung
Pyritgehalt [Gew.-%]	Keine Angabe					
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Hinweisdaten
Besondere Minerale	Teilweise Vererzungen aus Eisen-Hydroxiden (Bohnerze)					Datenspektrum

3.3.3 Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Massiger und grob geschichteter Kalkstein mit einzelnen, dünnen mergeligen Zwischenlagen («Felsenkalke» z. T. in «Massenkalk»-Fazies)					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	137	20				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	86 %	94 %	96 %	97 %	97 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	0 %	1 %	2 %	6 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	2 %	2 %	2 %	3 %	6 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Keine					Hinweisdaten

3.3.4 Li4 (Schwarzbach-Formation)

Li4 (Schwarzbach-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Wechselagerung aus grob geschichteten, glaukonitischen Kalkmergeln und tonigen Kalksteinen					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	15	10				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	79 %	81 %	83 %	85 %	86 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	12 %	13 %	14 %	16 %	18 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Keine					Hinweisdaten

3.3.5 Li5 (Villigen-Formation)

Li5 (Villigen-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Mehrheitlich grob geschichtete bis massige Kalksteine mit dünneren Kalkmergel-Zwischenlagen, gegen unten Kalkmergelanteil zunehmend					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	70	10				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	87 %	91 %	93 %	95 %	96 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	0 %	1 %	2 %	4 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	3 %	4 %	5 %	7 %	11 %	Mod. Datensatz
Pyritgehalt [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Gehalt an Gips/Anhydrit [Gew.-%]	< 1 %					Mod. Datensatz
Besondere Minerale	Keine					Hinweisdaten

3.3.6 Li6 (Wildegg-Formation)

Li6 (Wildegg-Formation)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Mehrheitlich dünn geschichtete Kalkmergel mit einzelnen, teilweise mergeligen Kalkbänken					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert	Ungewissheit [±]				
	20	20				
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	64 %	68 %	75 %	79 %	88 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	0 %	1 %	1 %	2 %	5 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	11 %	18 %	24 %	29 %	33 %	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

3.3.7 Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)

Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Oberer Bereich: mehrheitlich dünn geschichtete Kalk- und Tonmergel bis Tonsteine mit Eisenoolith- und Kalkbänken Unterer Bereich: kalkige, sandige, siltige und tonige Mergel und siltige Tonsteine, meist dünn geschichtet mit einzelnen Eisenoolith- und z. T. siltig-sandigen Kalkbänken					Hinweisdaten
Mächtigkeit der Einheit am Standort des Lüftungsschachts [m]	Erwartungswert		Ungewissheit [±]			
	80		10			
Mineralgehalt	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Karbonatgehalt [Gew.-%]	19 %	24 %	30 %	36 %	49 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	8 %	19 %	23 %	39 %	46 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	20 %	28 %	40 %	49 %	56 %	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

3.3.8 Li8 (Opalinuston)

Li8 (Opalinuston)						
Gesteinsbeschreibung						Datenqualität
Lithologische Beschreibung	Dünn geschichtete, z. T. siltige und sandige Tonsteine					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.-%]	6 %	8 %	10 %	13 %	21 %	Mod. Datensatz
Quarzgehalt [Gew.-%]	26 %	28 %	32 %	35 %	38 %	Mod. Datensatz
Gehalt an Tonmineralen [Gew.-%]	44 %	51 %	55 %	62 %	65 %	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 fünf Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften unterschieden (Fig. 4-1):

- Te1 fasst die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum zusammen.
- Te2 entspricht den «Malmkalken» und fasst die «Felsenkalke» + «Massenkalk», die Schwarzbach-Formation und die Villigen-Formation zusammen.
- Te3 fasst den Bereich der Wildegge-Formation und des Doggers oberhalb des Opalinuston zusammen.
- Te4 entspricht dem Opalinuston.

Als Datengrundlage für die Beschreibung der Gebirgsdurchtrennung dienen die Dossiers V (Strukturgeologie) der TBO-Datenberichte (MAR1-1, TRU1-1) sowie die seismisch kartierten Störungen (Stand August 2023), welche in Nagra NAB 23-19 *in Bearb.* dokumentiert werden. Für die Bohrung RHE1-1 wurde keine Auswertung der Trennflächensysteme durchgeführt, ein qualitativer Vergleich der Strukturaufnahmen mit den anderen Bohrungen im Standortgebiet weist aber auf ein vergleichbares Trennflächensystem hin.

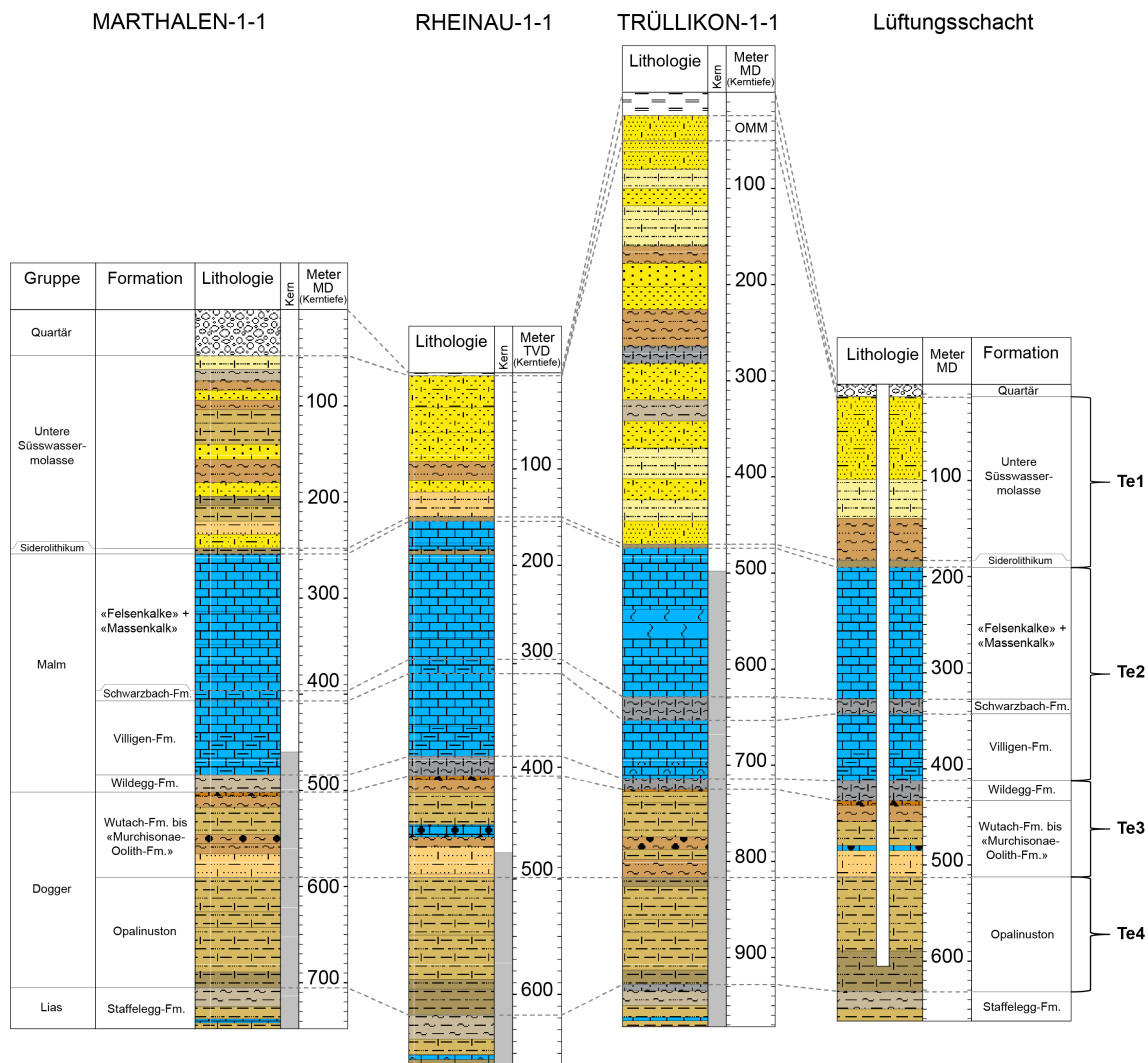


Fig. 4-1: Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften und der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

Als «Störungszone» wird im vorliegenden 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.

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

- Seismisch nicht kartierte Störungszonen: Diese Störungszonen konnten in der Seismikinterpretation nicht kartiert werden.

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

- Seismisch kartierte Störungszonen: Diese Störungszonen sind in der Seismikinterpretation kartiert worden.

Im Bereich der geplanten Zugangsbauwerke sind in der Seismikinterpretation in den Opalinuston überlagernden Gesteinseinheiten Störungszonen kartiert worden (Fig. 4-2). Jedoch werden diese von keiner Bauwerksachse durchörtert. Im Bereich der Bauwerke auf Lagerebene wurden ebenfalls Störungszonen oberhalb und auch unterhalb des Opalinustons in der Seismikinterpretation kartiert. Jedoch wurden keine Störungszonen durch den Opalinuston hindurch kartiert.

Da weder die geplanten Zugangsbauwerke noch die Bauwerke auf Lagerebene seismisch kartierte Störungszonen durchörtern, wird auf diese in diesem Bericht nicht weiter eingegangen. Die seismisch nicht kartierten Störungszonen werden in Kap. 4.3 diskutiert.

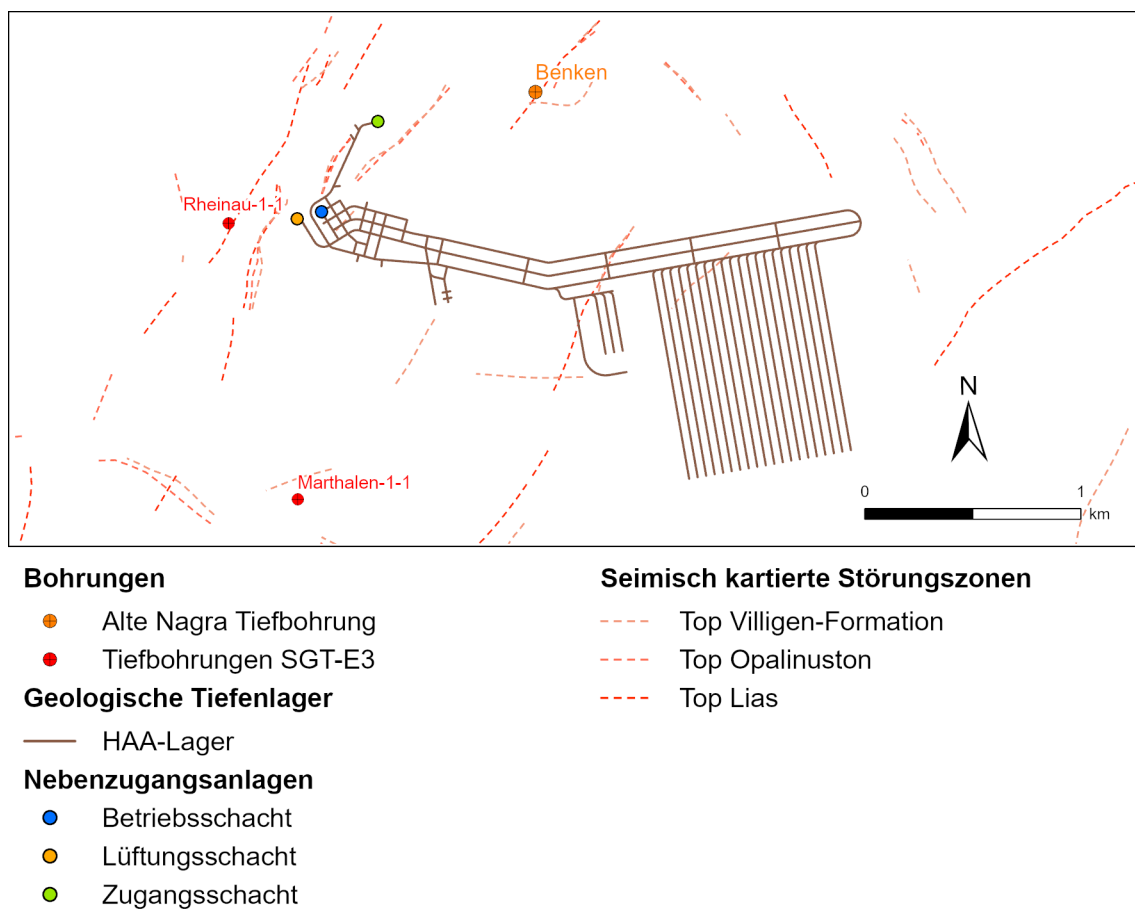


Fig. 4-2: Seismisch kartierte Störungszonen im Bereich der geplanten Bauwerke

4.1 Beschreibung der Trennflächensysteme

Die Beschreibung der Trennflächensysteme in den Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften Te2 («Malmkalke») bis Te4 (Opalinuston) erfolgt anhand der Beobachtungen in den gekernten Bohrabchnitten der TBO (MAR1-1, TRU1-1; Fig. 4-1). Es liegt in der Natur der Trennflächen, dass deren Eigenschaften (insbesondere Trennflächenabstände) räumlich eine grosse Heterogenität aufweisen. Deshalb werden die Beobachtungen in der Bohrung MAR1-1 bei der Ableitung der an den Schachtstandorten zu erwartenden Trennflächeneigenschaften stärker gewichtet.

Für die nicht gekernte Einheit Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum) werden Erwartungswerte anhand von anderen Bauprojekten abgeschätzt.

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 wurden an den Bohrkernen eine grosse Anzahl von Trennflächen miterfasst, die 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

MAR1-1	Anzahl Trennflächen					Länge des Abschnitts [m]
	K1 200/05 ($\pm 20^\circ$)	K2 015/85 ($\pm 20^\circ$)	K3 200/40 ($\pm 20^\circ$)	Keine Zuordnung	Total	
Te1 (Untere Süsswasser- molasse und Siderolithikum)	-					206 (keine Kernstrecke)
Te2 («Malmkalke»)	4	2	3	1	10	24.2 (Kernstrecke 176.2 m)
Te3 (Wildeggen-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	3	0	2	2	7	106.2
Te4 (Opalinuston)	3	0	2	2	7	115.2
Total	10	2	7	5	24	

TRU1-1	Anzahl Trennflächen					Länge des Abschnitts [m]
	K1 205/10 ($\pm 20^\circ$)	K2 015/80 ($\pm 20^\circ$)	K3 200/65 ($\pm 20^\circ$)	Keine Zuordnung	Total	
Te1 (Untere Süsswasser- molasse und Siderolithikum)	-					450 (keine Kernstrecke)
Te2 («Malmkalke»)	40	17	17	70	144	240 (Kernstrecke 216 m)
Te3 (Wildeggen-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	0	0	0	2	2	102.4
Te4 (Opalinuston)	5	2	1	6	14	111.4
Total	45	19	18	78	160	

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 MAR1-1 stärker gewichtet. Es lassen sich drei Trennflächensysteme unterteilen:

- K1 mittleres Einfallen 200/05 ($\pm 20^\circ$)
- K2 mittleres Einfallen 015/85 ($\pm 20^\circ$)
- K3 mittleres Einfallen 200/40 ($\pm 20^\circ$)

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 «Malmkalke» beobachtet. Die Trennflächenanzahl in den anderen Einheiten ist meist zu gering, um diese sinnvoll auszuwerten (Tab. 4-1). Folglich wird angenommen, dass an den geplanten Schachtstandorten 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, sodass 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). Für die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum (Te1), bei denen keine Bohrkerne aus den TBO vorhanden sind, werden Trennflächenabstände aus Oberflächenbeobachtungen herangezogen.

Die Anzahl an effektiven Trennflächen ist in MAR1-1 kleiner als in TRU1-1, wobei die Bandbreite der Trennflächenabstände beider Bohrungen vergleichbar ist. Als Referenzbohrung zur Abschätzung der erwarteten Trennflächenabstände an den geplanten Schachtstandorten wird nicht die zu diesen näherliegende Bohrung MAR1-1 verwendet, sondern die Bohrung TRU1-1. Dies, weil die Anzahl effektiver Trennflächenabstände in MAR1-1 grösser ist. Obschon die Anzahl der Trennflächen in Te2 («Malmkalke») eine Trennflächensystem-spezifische Trennflächenabstandsauswertung erlauben würde, wurde aus Gründen der Robustheit für alle Trennflächensysteme in Te2 die gleiche Trennflächenabstandsverteilung angenommen.

Für die Einheit Te3 und Te4 wird mangels einer genügenden Anzahl von Trennflächen aus Konservativitätsgründen ebenfalls für die Haupttrennflächensysteme K1, K2 als auch K3 dieselbe Verteilung der Trennflächenabstände angenommen.

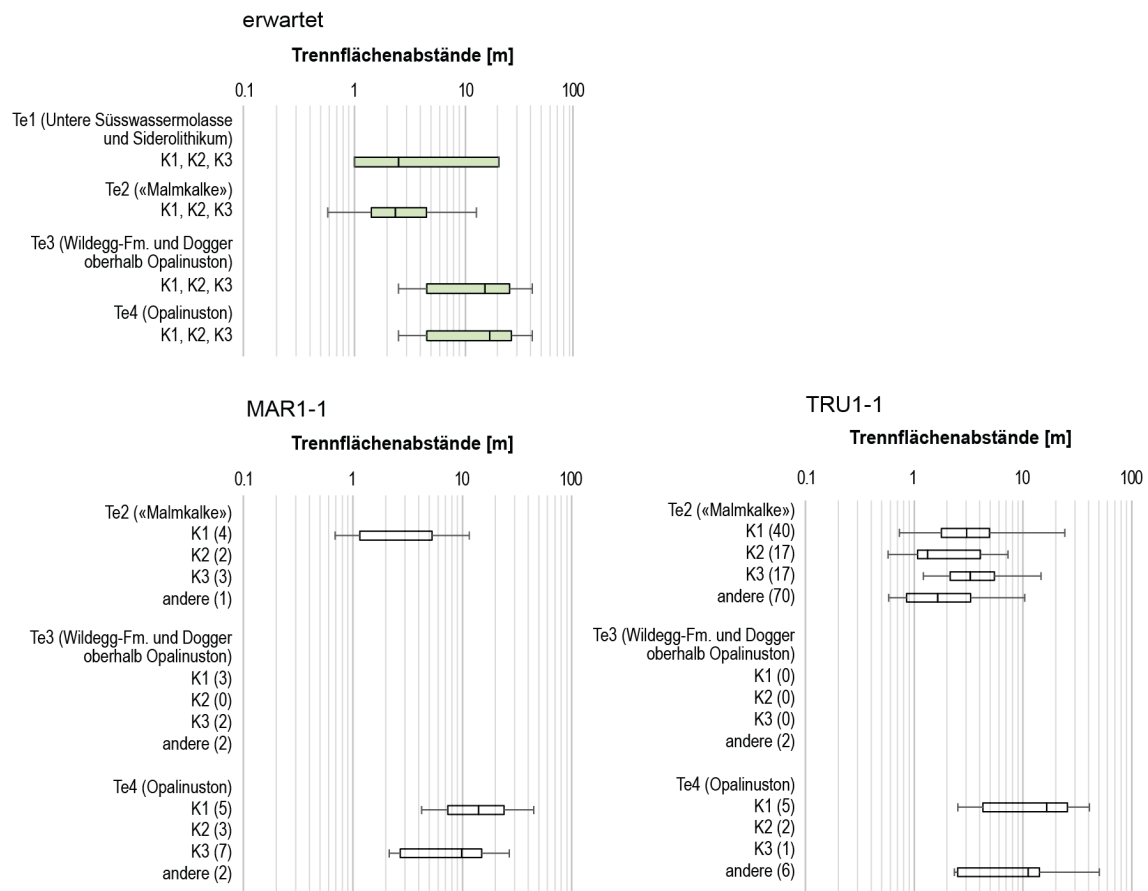


Fig. 4-3: Zusammenstellung der Trennflächenabstände der effektiven Trennflächen in den TBO sowie der erwarteten Trennflächenabstände an den geplanten Schachtstandorten

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 allen TBO 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 «Felsenkalken» + «Massenkalk» (Te2), die durch Lösungsprozesse aufgeweitet wurden und eine Öffnungsweite > 1 cm aufweisen, werden als Karsthohlräume betrachtet (vgl. Kapitel 7). Sie werden bei der Auswertung der Öffnungsweiten der Trennflächen nicht berücksichtigt.

Tab. 4-2: Erwartete Öffnungsweiten der Trennflächen an den Schachtstandorten

	Öffnungsweite [mm]		
	P0.05	P0.5	P0.95
Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	0	0	1
Te2 («Malmkalke»)	0	0	8
Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	0	0	3
Te4 (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 Oberflächenaufschlüssen werden als wenig repräsentativ für die Verhältnisse in mehreren hundert Meter Tiefe beurteilt. Deshalb wird ohne Differenzierung nach Trennflächensystem oder lithologischen Gesteinseigenschaften eine Persistenz von 10 m ($\pm$ 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 TBO gleichermassen berücksichtigt (Tab. 4-3).

Tab. 4-3: Erwarteter Trennflächenzustand an den Schachtstandorten

	Zustand der Trennflächen
Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Vereinzelt mit tonigem oder sandigem Material verfüllt, z. T. angewittert
Te2 («Malmkalke»)	Vereinzelt Tonverfüllungen, z. T. durch Lösungsprozesse aufgeweitet
Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Vereinzelt mit Tonverfüllungen
Te4 (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 wird 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 Grössen 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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	0 %	15 %	25 %	60 %
Te2 («Malmkalke»)	5 %	25 %	30 %	40 %
Te3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	0 %	5 %	5 %	95 %
Te4 (Opalinuston)	0 %	5 %	5 %	90 %

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 «verteilt» 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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	5 %	70 %	25 %
Te2 («Malmkalke»)	5 %	70 %	25 %
Te3 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	5 %	65 %	30 %
Te4 (Opalinuston)	5 %	65 %	30 %

4.3 Beschreibung der Störungszonen

Störungszonen werden unterschieden in «seismisch kartierte» und «seismisch nicht kartierte Störungszonen», wobei weder die geplanten Zugangsbauwerke noch die Bauwerke auf Lagerebene seismisch kartierte Störungszonen durchörtern (Fig. 4-2).

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 Zugangsbauwerke sowie den Bauwerken auf Lager-ebene 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 (Te2)
- Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (Te4)

Diese zwei Gruppen werden als «Endmember» betrachtet. Die Sand-, Mergel- und Tonsteine der Einheiten Te1 und Te3 werden im Rahmen dieses ingenieurgeologischen Berichts zur Gruppe «Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten» gezählt. Dies, obwohl der interne Aufbau der Störungszonen durch die zum Teil vorkommenden Wechsellagerung von unterschiedlich kompetenten Gesteinseinheiten stärker geprägt sein kann.

4.3.1.1 Seismisch nicht kartierte Störungszonen in kompetenten Gesteinseinheiten

Der interne Aufbau von seismisch nicht kartierten Störungszonen in der Einheit Te2 («Malmkalke») ist vom eher spröden Bruchverhalten des Gesteins geprägt. Sie weisen eine mehr oder weniger ausgeprägte interne Zonierung auf.

In den TBO wurden in den «Malmkalken» verschiedene seismisch nicht kartierte Störungszonen durchbohrt (z. B. Fig. 4-5). Aufgrund dieser Beobachtungen und Analogbeispielen werden für die vorliegende ingenieurgeologische 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.

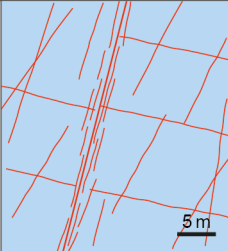
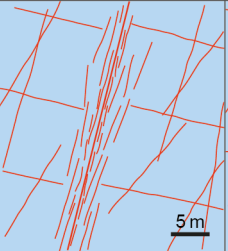
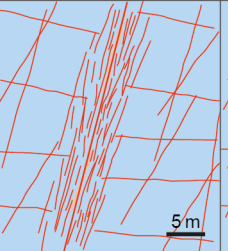
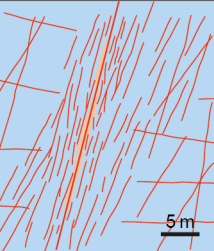
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Beschreibung der Störungszone	Bis zu wenige Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich mit einer bis zu mehreren Dezimetern mächtigen, stark zerrütteten «Kernzone»	Mehrere 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 <u>nicht</u> 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 wurden ausschliesslich nicht kartierte Störungszone des Typs I (z. B. Fig. 4-5 links) und Typs II (z. B. Fig. 4-5 rechts) angetroffen.

Als Beispiel für eine Störungszone des Typs III kann die Störungszone im Tiefenabschnitt von ca. 537.5 – 554.0 m der Bohrung BUL1-1 betrachtet werden (Fig. 4-6 (Ebert et al. 2021)). Es handelt sich dabei um eine flach einfallende Störungszone in den «Felsenkalken». Die in der Bohrung rund 17 m mächtige Störungszone zeichnet sich durch eine erhöhte Trennflächendichte sowie eine wenige Meter mächtige Zone intensiv zerbrochenen Gesteins aus. Die Störungszone weist eine ausgeprägte Überprägung durch Lösungserscheinungen auf, wobei die Paläo-Karsthohlräume mit tonig-siltigen Sedimenten verfüllt sind. Bezüglich des Versatzes entlang dieser Störungszone sind keine Angaben möglich.

Störungszone des Typs IV wurden in keiner TBO angebohrt. Der Typ IV beschreibt Störungszone in kompetenten Gesteinseinheiten, die eine Mächtigkeit von zehner Meter aufweisen. Sie besteht aus einer zentralen Zone («Störungskern») die von einer «Auflockerungszone» umgeben ist. Die «Auflockerungszone» weist eine gegen den «Störungskern» hin zunehmende Gebirgsdurchtrennung auf. Der bis zu mehrere Meter mächtige «Störungskern» besteht aus einem stark zerrüttetem und zum Teil brekziösen Gebirgsbereich.

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

Störungszone in Karbonatgesteinen können wie im Beispiel, das in Fig. 4-6 abgebildet ist, durch Verkarstungsprozesse überprägt sein. Das Vorkommen dieser möglichen Überprägung und deren Eigenschaften werden in Kapitel 7 beschrieben.

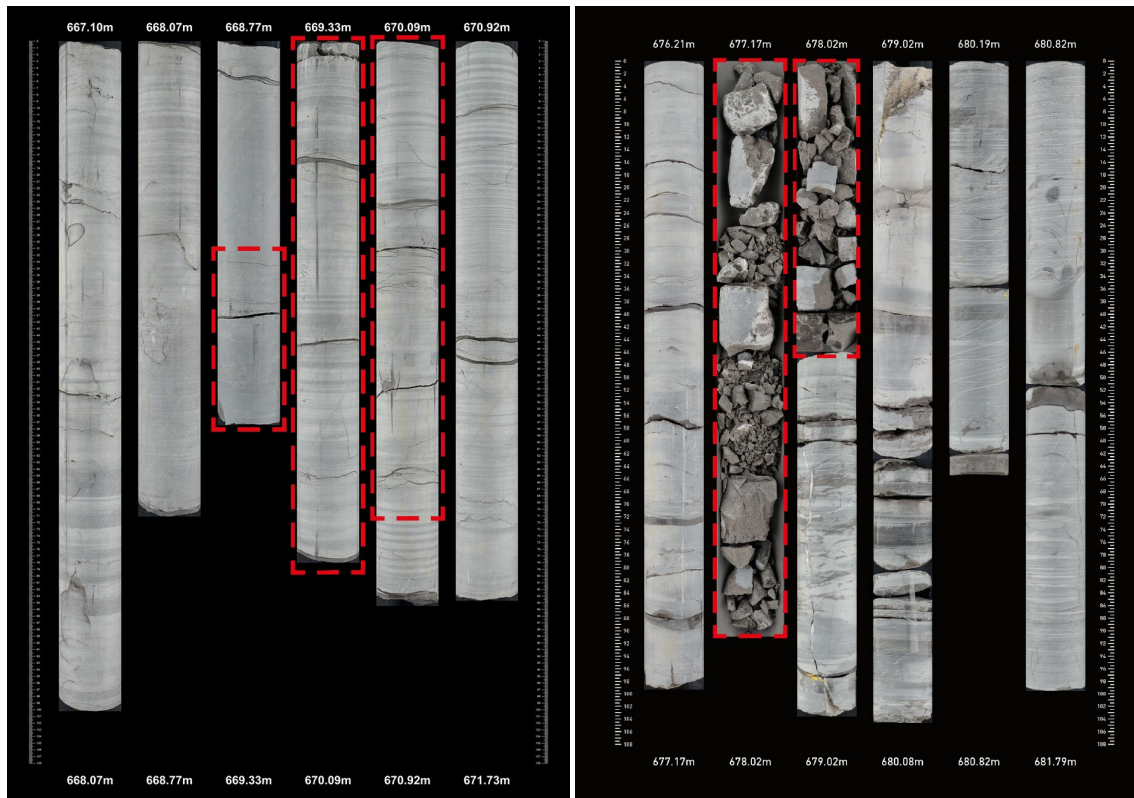


Fig. 4-5: Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen in kompetenten Gesteins-einheiten

Links: Typ I in TRU1-1 Bohrmeter 669.0 – 670.8, rechts: Typ II in TRU1-1 Bohrmeter 677.0 – 678.4)

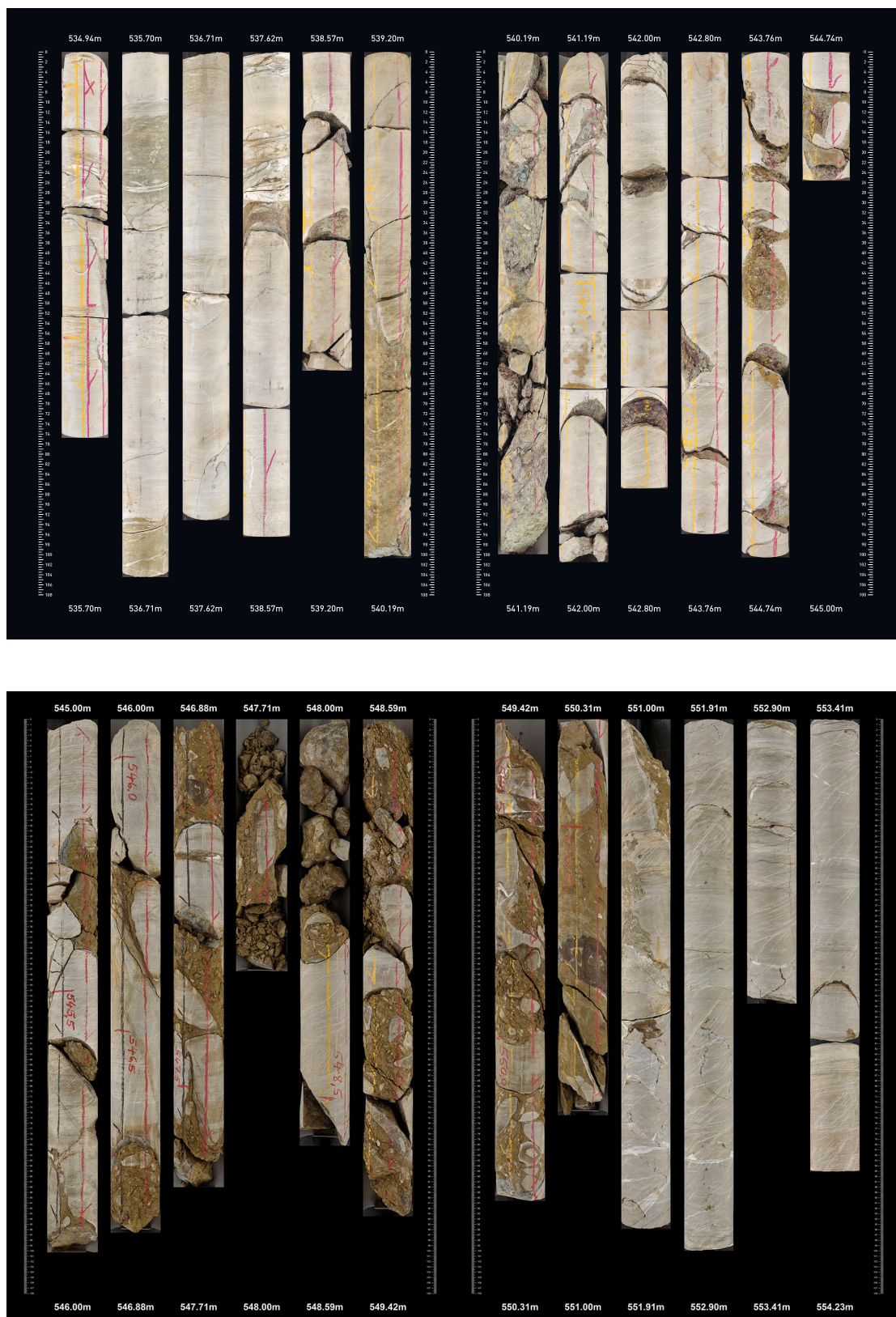


Fig. 4-6: Beispiel einer durch Verkarstungsprozesse überprägten Störungszone des Typs III aus BUL1-1

4.3.1.2 Seismisch nicht kartierte Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten

Der Verlauf sowie der interne Aufbau von Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten wie dem Opalinuston (Te4) sind durch eine sogenannte «weiche Verbindung» («soft linkage») geprägt (Fig. 4-7). 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 Störungszonen, bei denen tektonisch schwach überprägte Bereiche neben stark durchtrennten oder gar vollständig zerscherten Bereichen vorkommen.

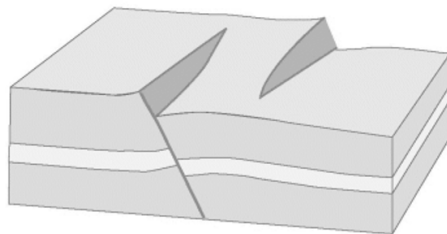


Fig. 4-7: Schematische Darstellung des «soft linkage»-Verlaufs von Störungszonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten

Aufgrund der Beobachtungen in den TBO und Analogbeispielen werden für die vorliegende ingenieurgeologische Beschreibung vier Typen von Störungszonen unterschieden (Fig. 4-8). Diese unterscheiden sich bezüglich Mächtigkeit und Komplexität ihres 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.

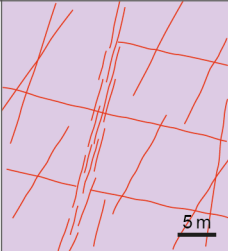
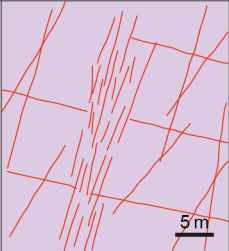
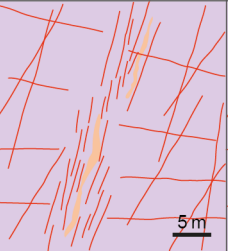
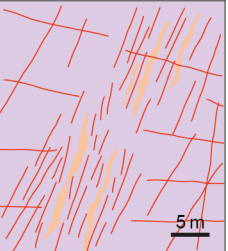
	Typ I	Typ II	Typ III	Typ IV
Beschreibung der Störungszone	Bis zu wenige Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich	Mehrere Meter mächtiger Gebirgsbereich mit Trennflächenabständen im dm-Bereich 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

Fig. 4-8: Typen von Störungszone, die im vorliegenden Bericht zur Beschreibung von wenig kompetenten Gesteinseinheiten verwendet werden

In den TBO wurden nur nicht kartierte Störungszone vom Typ I (z. B. Fig. 4-9) angetroffen. Dabei handelt es sich meist um Bereiche mit einer erhöhten Trennflächendichte resp. einem reduzierten Trennflächenabstand im dm-Bereich.

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

Störungszone 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 mehrere Meter mächtig sein.

Der 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 Kataklastit 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.

Der Typ IV stellt einen zehner Meter mächtigen Gebirgsbereich mit einer ausgeprägten internen Zonierung dar. Der mehrere Meter mächtige «Störungskern» besteht aus engstehenden Trennflächen die vereinzelt das Gebirge so weit zerschneiden, dass das Gestein als Kataklastit 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 Störungszone des Typs I und II durchörtert werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Entlang der Bauwerkachsen auch Störungszone des Typs III vorkommen, wobei es als extrem unwahrscheinlich betrachtet wird, dass Störungszone 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. 4-9: Beispiele von in den TBO angefahrenen Störungszonen des Typs I in wenig kompetenten Gesteinseinheiten
(MAR1-1 Bohrmeter 620.9 – 621.9)

4.4 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften

4.4.1 Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	200/05		20			Hinweisdaten
K2	015/85		20			Hinweisdaten
K3	200/40		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Trennflächen-abstände [m]	1.0		2.5		20.0	Abschätzung
Öffnungsweite [mm]	0		0		0	Abschätzung
Zustand	Vereinzelt mit tonigem oder sandigem Material verfüllt, z. T. angewittert					Abschätzung
Trennflächenkörper						
Volumen der Trennflächen-körper [%]	Klein [0.2 m³]	Mittel [0.2 – 2 m³]	Gross [2 – 10 m³]	Sehr gross [> 10 m³]		
	0 %	15 %	25 %	60 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	5 %	70 %	25 %			Mod. Datensatz

4.4.2 Te2 («Malmkalke»)

Te2 («Malmkalke»)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	200/05		20			Hinweisdaten
K2	015/85		20			Hinweisdaten
K3	200/40		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Trennflächen-abstände [m]	0.6	1.4	2.3	4.5	12.5	Hinweisdaten
Öffnungsweite [mm]	0	0	0	0	8	Hinweisdaten
Zustand	Vereinzelt Tonverfüllungen, zum Teil durch Lösungsprozesse aufgeweitet					Hinweisdaten
Trennflächenkörper						
Volumen der Trennflächen-körper [%]	Klein [0.2 m³]	Mittel [0.2 – 2 m³]	Gross [2 – 10 m³]	Sehr gross [10 m³]		
	5 %	25 %	30 %	40 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	5 %	70 %	25 %			Mod. Datensatz

4.4.3 Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	200/05		20			Hinweisdaten
K2	015/85		20			Hinweisdaten
K3	200/40		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Trennflächen-abstände [m]	2.5	4.5	15.0	25.0	40.0	Hinweisdaten
Öffnungsweite [mm]	0	0	0	0	3	Hinweisdaten
Zustand	Vereinzelt Tonverfüllungen					Hinweisdaten
Trennflächenkörper						
Volumen der Trennflächen-körper [%]	Klein [$< 0.2 \text{ m}^3$]	Mittel [$0.2 - 2 \text{ m}^3$]	Gross [$2 - 10 \text{ m}^3$]	Sehr gross [$> 10 \text{ m}^3$]		
	0 %	5 %	5 %	95 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	5 %	65 %	30 %			Mod. Datensatz

4.4.4 Te4 (Opalinuston)

Te4 (Opalinuston)						
Beschreibung der Trennflächensysteme						Datenqualität
Trennflächensysteme						
Orientierung [°]	Erwartete Orientierung		Ungewissheit [±]			
K1	200/05		20			Hinweisdaten
K2	015/85		20			Hinweisdaten
K3	200/40		20			Hinweisdaten
Persistenz [m]	10		5			Abschätzung
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	
Trennflächen-abstände [m]	2.5	4.5	16.5	26.0	40.0	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]		
	0 %	5 %	5 %	90 %		Mod. Datensatz
Grundform Trennflächen-körper [%]	Balkenartig	Plattig	Kubisch			
	5 %	65 %	30 %			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 Untersuchungsgebiet in vier Einheiten unterteilt (Fig. 5-1):

- Hy1 fasst die oft meist wenig durchlässigen Einheiten der Unteren Süsswassermolasse und des Siderolithikums zusammen. Im Bereich von Sandsteinrinnen kann die Untere Süsswassermolasse höhere hydraulische Durchlässigkeiten aufweisen.
- Hy2 entspricht dem Malm-Aquifer und fasst die lithologischen Einheiten der «Felsenkalk» + «Massenkalk», der Schwarzbach-Formation und der Villigen-Formation zusammen.
- Hy3 fasst den wenig durchlässigen Bereich der Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb dem Opalinuston zusammen.
- Hy4 entspricht dem äusserst geringdurchlässigen 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 (MAR1-1, TRU1-1, RHE1-1).

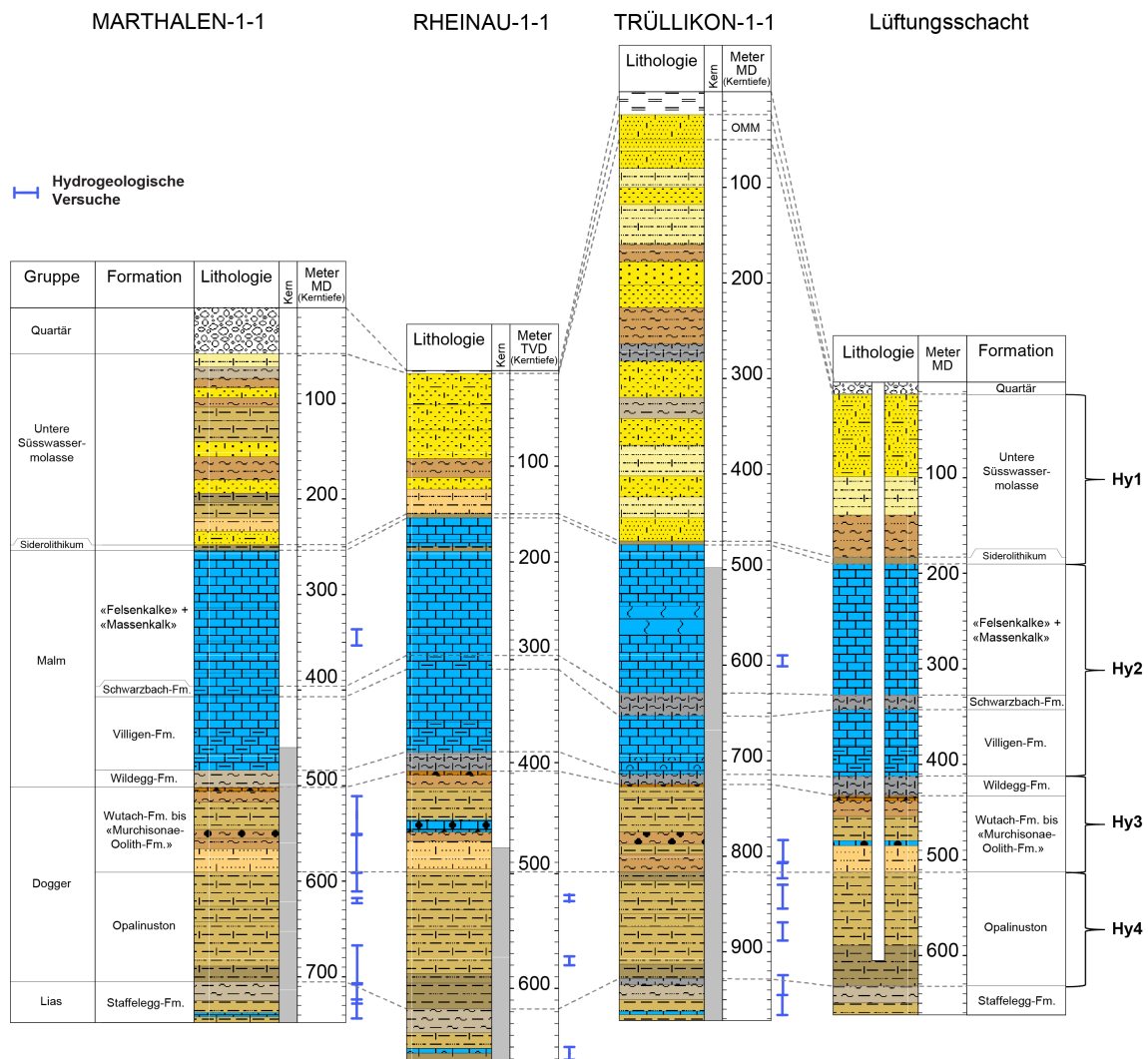


Fig. 5-1: Gegenüberstellung der hydrogeologischen Einheiten aus ingenieurgeologischer Betrachtung und der lithostratigraphischen Einteilung sowie der Messbereiche der durchgeführten hydrogeologischen Versuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

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 Benken (Nagra 2001) 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 die Schachtstandorte und die Bauwerke auf Lagerebene die hydrogeologischen Daten aller TBO gleichermassen berücksichtigt.

Da in der Molasse und dem Siderolithikum (Hy1) in den TBO keine hydrogeologischen Versuche oder Messungen in den TBO durchgeführt wurden, wird für die hydrogeologischen Charakterisierung dieser Einheiten auf Literaturwerte zurückgegriffen (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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum):
Aquitard, in Sandsteinrinnen z. T. lokale Porenaquifere möglich
Die lithologisch sehr heterogene Einheit kann lokale Aquifere aufweisen, im Besonderen innerhalb von sandigen Rinnen.
Im Untersuchungsgebiet ist keine Nutzung dieses Grundwassers bekannt.
- Hy2 («Malmkalke»):
Trennflächenaquifer
Bei dieser Einheit handelt es sich um einen regionalen Trennflächenaquifer (Malm-Aquifer) mit wichtigen Infiltrationsgebieten im anstehenden Malm des Tafeljuras sowie mit einer Exfiltrationszone im Rheintal (Nagra 2014c). Der obere Bereich der hydrogeologischen Einheit («Felsenkalk» + «Massenkalk») weist eine Überprägung durch Hohlräume einer Paläo-Verkarstung auf (vgl. Kapitel 7). Da diese Paläo-Karsthohlräume weitgehend mit dichten Sedimenten verfüllt sind, haben diese für die heutige Dynamik im Aquifer eine untergeordnete Bedeutung (Schwarz et al. 2021a, Nagra 2001). Deshalb wird der Malm-Aquifer als Trennflächenaquifer und nicht als Karstaquifer betrachtet. Dennoch können allfällige nicht verfüllte Karsthohlräume lokal den Grundwasserfluss beeinflussen.
Im Untersuchungsgebiet gibt es keine Nutzung.
- Hy3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston):
Aquitard, in tonarmen Schichten z. T. lokale Wasserführung bedingt durch Trennflächen möglich
Die lithologisch sehr heterogene hydrogeologische Einheit weist im Allgemeinen geringe Gebirgsdurchlässigkeiten auf (Kap. 5.1.3). In den tonarmen Abschnitten können lokal auch leicht erhöhte Durchlässigkeiten auftreten.
Im Untersuchungsgebiet gibt es keine Nutzung.
- Hy4 (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 TBO und den Ergebnissen der hydrogeologischen Modellierung (Gmünder et al. 2014, Luo et al. 2013) sowie des hydrogeologischen Langzeitbeobachtungssystems in der Bohrung Benken abgeleitet (z.B. Hayer et al. 2022). Dies gilt für die hydraulisch durchlässige Einheit Hy2 («Malmkalke») (Fig. 5-2). In den Einheiten Hy3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston) und Hy4 (Opalinuston) konnte das hydraulische Potenzial generell nicht durch kurzzeitige hydrogeologische Versuche ermittelt werden, da die Gebirgsdurchlässigkeiten dafür zu gering sind. Für diese Einheiten wird die untere Bandbreite auf Grundlage der Messungen in der Bohrung Benken abgeleitet. Die obere Bandbreite wird interpoliert zwischen dem hydraulischen Potenzial im Keuper-Aquifer und dem Potenzial in der Einheit Hy1 (MAR1-1 und Bohrung Benken).

Zur Abschätzung des hydraulischen Potenzials der Einheit Hy2 («Malmkalke») wurden nur die Resultate der Bohrungen MAR1-1 und Benken verwendet, da diese näher an den geplanten Schachtstandorten liegen als TRU1-1. In der Unteren Süsswassermolasse und dem Siderolithikum (Hy1) wurde das hydraulische Potenzial in den TBO nicht gemessen. Zur Abschätzung des Werts der oberen Bandbreite wird die Höhenlage der möglichen Einzugsgebiete herangezogen. Die untere Bandbreite wird auf Grundlage der Höhenlage des Rheins festgelegt.

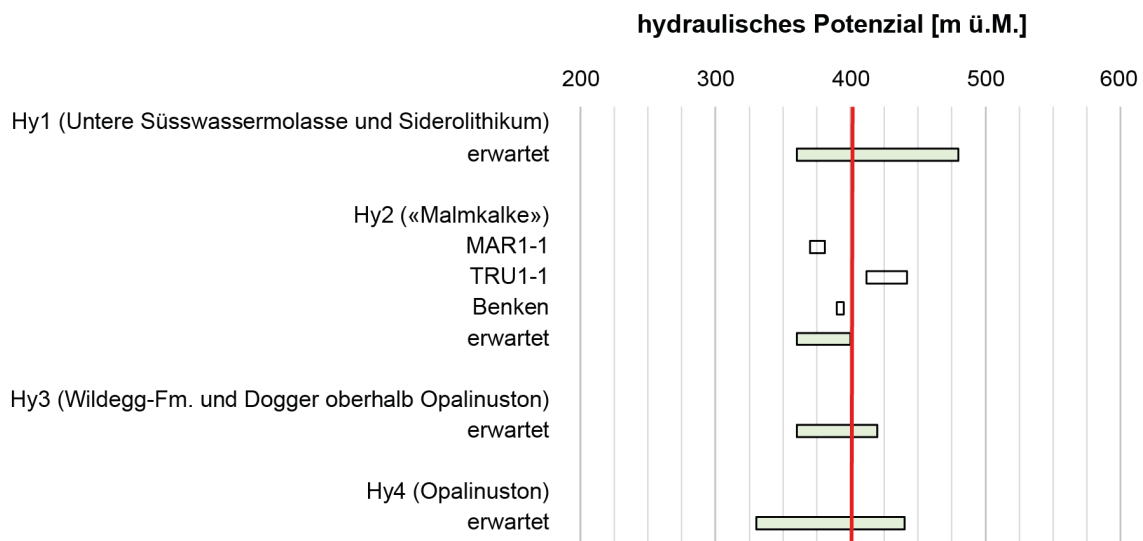


Fig. 5-2: Gegenüberstellung der erwarteten hydraulischen Potenziale in den hydrogeologischen Einheiten mit der Höhenlage der Schachtköpfe der Zugangsschächte (rote Linie)

5.1.3 Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges und von Störungszonen

Die erwartete hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit wird auf Basis von Bohrlochversuchen in den TBO abgeleitet. Die hydraulischen Bohrlochversuche wurden so durchgeführt, dass sowohl «normale» Gebirgsbereiche als auch angefahrne Störungszonen getestet wurden (z. B. (Schwarz et al. 2021a)). Für die hydrogeologischen Einheiten Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum), von denen keine Bohrlochversuche aus den TBO sowie der Bohrung Benken vorliegen, beruhen die Erwartungswerte auf Erfahrungswerten von anderen Projekten (z. B. Gmünder et al. 2013).

Bedingt durch den lithologisch heterogenen Aufbau der Einheiten Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum) sowie Hy3 (Mergel- und Kalksteinabfolgen der Wildeggen-Formation und des Doggers oberhalb des Opalinuston) weisen die hydrogeologischen Einheiten Bandbreiten der Durchlässigkeiten von mehreren Grössenordnungen auf (Fig. 5-3). Für die Einheit Hy3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston) wird die obere erwartete Bandbreite der hydraulischen Durchlässigkeiten höher abgeschätzt als die in situ gemessene Bandbreite. Dies um den Einfluss von nicht beobachteten allfällig vorkommenden durchlässigen Trennflächen in den «harten Bänken» mit zu berücksichtigen. Demgegenüber weist der vergleichsweise homogene Opalinuston der Einheit Hy4 eine geringe Variabilität in der hydraulischen Durchlässigkeit auf.

Ebenfalls eine relativ grosse Bandbreite weist die Einheit Hy2 («Malmkalke») auf (Fig. 5-3). Diese spiegelt das heterogene Vorkommen der hydraulisch wirksamen Trennflächen wider. Die hydrogeologischen Bohrlochversuche im Malm-Aquifer (Hy2) umfassten in den neueren TBO in der Regel ein aktives Fluid Logging und hydraulische Packertests (TBO-Datenberichte Dossier VII). Das Fluid Logging diente unter anderem dazu, die durchlässigsten Zonen zu identifizieren, sodass dort gezielt Packertests durchgeführt werden konnten. Dementsprechend weist der «Packertest-Datensatz» einen Bias zu hohen hydraulischen Durchlässigkeiten auf. Das Fluid Logging ermöglicht desweiteren die Quantifizierung der Transmissivität und in Kombination mit der Abbildung der Bohrlochwand (Image-Log) und den Bohrkernen eine Beschreibung der wasserführenden Zonen. Bei einer detaillierteren Betrachtung der Verteilung der Durchlässigkeiten zeigt sich, dass die «Felsenkalke» + «Massenkalk» gegenüber der Villigen-Formation höhere Durchlässigkeiten aufweisen (TBO-Datenberichte Dossier VII). Dieser Unterschied wird jedoch für die Betrachtungen in diesem Bericht vernachlässigt. Der Erwartungswert und die obere Bandbreite der Einheit Hy2 werden auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Fluid Logging abgeschätzt und spiegeln die hydraulischen Durchlässigkeiten der einzelnen transmissiven Zonen wider.

Die hydraulischen Durchlässigkeiten von Störungszonen wurden basierend auf 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. Einzig in der Bohrung BUL1-1 im Standortgebiet Nördlich Lägern wurden hydraulische Tests in einer grösseren Störungszone durchgeführt (Schwarz et al. 2021b). In dieser paläo-verkarsteten Störungszone in den «Malmkalke» mit siltig-tonig verfüllten Karsthohlräumen wurden sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten gemessen (1.9×10^{-12} m/s).

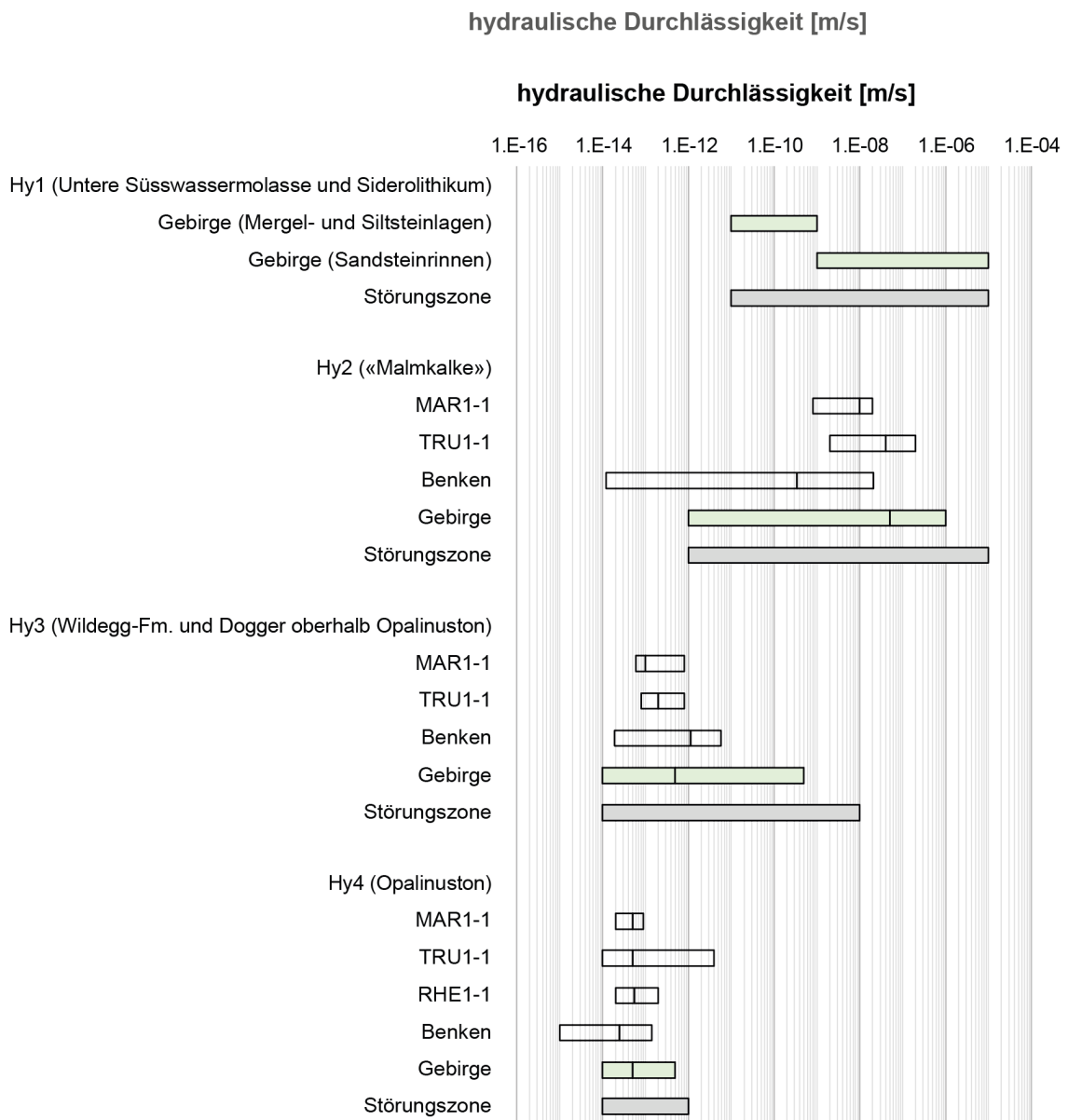


Fig. 5-3: Gegenüberstellung der horizontalen, hydraulischen Durchlässigkeiten des Gebirges und von Störungszone in den hydrogeologischen Einheiten

5.1.4 Wasser-/Gebirgstemperatur

Die Gebirgstemperatur wurde in den TBO MAR1-1 und TRU1-1 (TBO-Datenberichte Dossier VI) und der Bohrung Benken (Nagra 2001) gemessen. In RHE1-1 wurden keine Gebirgstemperaturen erfasst. Die Messreihen zeigen vergleichbare Temperaturprofile (Fig. 5-4), wobei die Temperaturen in MAR1-1 mit der Tiefe schneller zunehmen. Zur Temperaturabschätzung an den geplanten Schachtstandorten werden die Daten aus der Bohrung MAR1-1 stärker gewichtet.

Die am Schachtstandort erwarteten Wasser-/Gebirgstemperaturen werden anhand der gemessenen Temperaturen in der Bohrung MAR1-1 abgeleitet (Fig. 5-4).

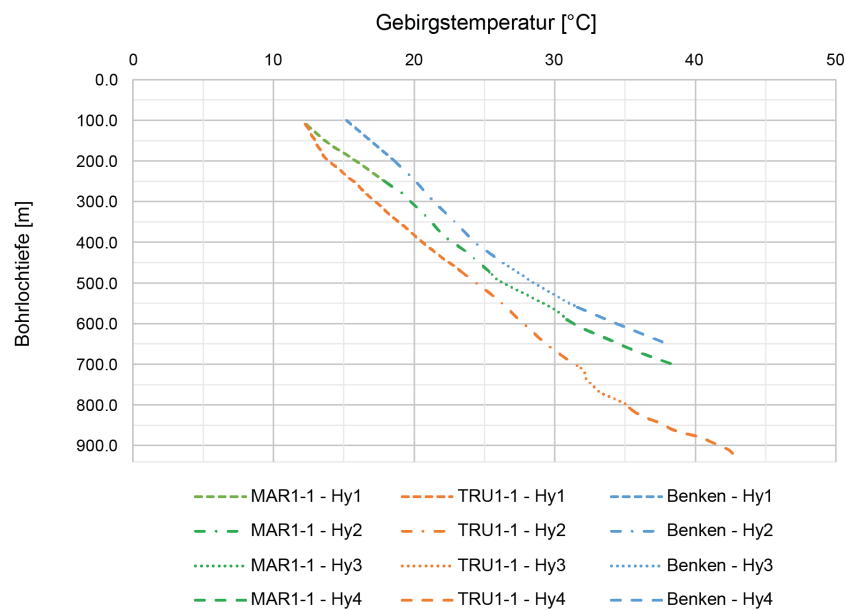


Fig. 5-4: Gemessene Gebirgstemperaturen in den TBO und der Bohrung Benken

5.1.5 Wasserchemismus

Zur Beurteilung des Wasserchemismus werden die Analytikergebnisse der Grundwasserproben aus den TBO (u.a. Lorenz et al. 2022a, Lorenz et al. 2022b) und Benken (Nagra 2001) verwendet, für die gering durchlässigen Einheiten Hy3 und Hy4 wurden auch Porenwasseranalysen berücksichtigt.

Für den Malm-Aquifer kann der Grundwasserchemismus basierend auf den Analysen der Grundwasserproben aus den naheliegenden Bohrungen abgeschätzt werden. Für die Einheiten Hy1 (Untere Süßwassermolasse und Siderolithikum) werden mangels Analysen Literaturwerte aus Bohrungen der Region herangezogen (z. B. Nagra NTB 19-02 *in Bearb.*). Für die Einheiten Hy3 und Hy4 (Wildeggen-Formation bis und mit Opalinuston) kann über weite Strecken nur ein Wertebereich basierend auf Porenwasseranalysen (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.).

Der Chemismus der Wässer ist durch eine hohe bis sehr hohe Chlorid- und teilweise Sulfatkonzentration charakterisiert. Eine Ausnahme stellen die Wässer des Malm-Aquifers dar, deren Sulfatgehalt im Vergleich z. T. geringer ist. 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 der Einheit Hy2 basieren auf den Grundwasseranalysen der naheliegenden Tiefbohrungen. Demgegenüber basieren die Konzentrationen in den darunter liegenden Einheiten Hy3 und Hy4 auf wässrigen Auszügen von Gesteinsproben (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]	Schwefelwasserstoff [mg/L]
Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	7.7 – 8.3	800 – 2'500	200 – 450	15 – 60	< 0.04
Hy2 («Malmkalke»)	7.6 – 8.4	1'500 – 4'000	4 – 800	50 – 100	< 0.1
Hy3 (Wildegge-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)		4'000 – 9'000	1'000 – 2'000 (max 4'500)		
Hy4 (Opalinuston)	6.9 – 7.4	7'000 – 9'000	2'000 – 3'000 (max 4'500)		

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, Hydrotests, 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 mindestens in kleinen Mengen als möglich beurteilt, wobei in den TBO lediglich in den hydrogeologischen Einheiten Hy1 und Hy2 (Untere Süsswassermolasse bis und mit «Malmkalke») leicht erhöhte Methangehalte festgestellt wurden. Während der TBO-Kampagne konnte zum Teil während der Förderung von Grundwasserproben aus dem Malm-Aquifer durch die Druckentlastung ein Ausgasen von Methan beobachtet werden.

Das Vorkommen von flüssigen Kohlenwasserstoffen wird nur in der hydrogeologischen Einheit Hy1 (Untere Süsswassermolasse) als möglich beurteilt. Überregional ist das Vorkommen von geringen Mengen bekannt (z. B. Sachs & Schneider 2012). In den TBO wurden keine Hinweise auf flüssige Vorkommen von Kohlenwasserstoffen gefunden.

5.2 Tabellarische Zusammenfassung der hydrogeologischen Einheiten

5.2.1 Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Aquitard (in den Sandsteinrinnen Porenaquifer)			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Keine Nutzung im Untersuchungsgebiet bekannt; private Nutzungen ohne Schutzzonen sind möglich Die Bohrungen der Mineralquellen Eglisau (derzeit nicht genutzt) nutzten Wässer der Unteren Süsswassermolasse			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	330		500	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit Mergel- und Siltsteinlagen [m/s]	1E-11		1E-09	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit Sandsteinrinnen [m/s]	1.E-09		1E-05	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-11		1E-05	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	10	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	18	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite	Obere Bandbreite		
pH-Wert	7.7	8.3		Hinweisdaten
Calcium [mg/L]	15	60		Hinweisdaten
Sulfat [mg/L]	200	450		Hinweisdaten
Chlorid [mg/L]	800	2'500		Hinweisdaten
Schwefelwasserstoff [mg/L]		0.04		Hinweisdaten
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: Möglich; In den TBO wurden z. T. leicht erhöhte Methangehalte festgestellt Flüssig: Möglich; überregional z. T. Vorkommen mit geringen Konzentrationen bekannt, für das Untersuchungsgebiet liegen keine Hinweise vor			Hinweisdaten

5.2.2 Hy2 («Malmkalke»)

Hy2 («Malmkalke»)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Trennflächenaquifer (allfällige Paläo-Karsthohlräume hydraulisch nicht oder nur örtlich von Bedeutung)			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Im Untersuchungsgebiet keine Nutzungen bekannt; der Malm-Aquifer wird im Kanton Zürich als ein potenzieller schutzwürdiger Grundwasserleiter betrachtet			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	360		400	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-12	5E-08	1E-06	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-12		1E-05	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	18	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	26	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite	Obere Bandbreite		
pH-Wert	7.6	8.4		Datenspektrum
Calcium [mg/L]	50	100		Datenspektrum
Sulfat [mg/L]	4	800		Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	1'500	4'000		Datenspektrum
Schwefelwasserstoff [mg/L]		0.1		Hinweisdaten
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: Möglich; in den TBO wurden z. T. leicht erhöhte Methangehalte festgestellt Flüssig: Keine Vorkommen zu erwarten			Hinweisdaten

5.2.3 Hy3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

Hy3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)				
Beschreibung der hydrogeologischen Einheiten				Datenqualität
Aquiferart	Aquitard (z. T. lokale Wasserführung bedingt durch Trennflächen möglich)			Hinweisdaten
Nutzung des Grundwassers	Keine Nutzung; Nutzungsmöglichkeiten aufgrund geringer Durchlässigkeit stark eingeschränkt			Hinweisdaten
	P0.05	P0.5	P0.95	
Hydraulisches Potenzial [m]	360		420	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-14	5E-13	5E-10	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-14		1E-08	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	26	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	31	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite	Obere Bandbreite		
pH-Wert	6.9	7.4		Datenspektrum
Calcium [mg/L]				
Sulfat [mg/L]	1'000	2'000		Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	4'000	9'000		Datenspektrum
Schwefelwasserstoff [mg/L]				
Vorkommen von Kohlenwasserstoffen	Gasförmig: Möglich; in den TBO wurden nur unwesentliche Gasgehalte gemessen Flüssig: Keine Vorkommen zu erwarten			Hinweisdaten

5.2.4 Hy4 (Opalinuston)

Hy4 (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]	330		440	Hinweisdaten
Hydraulische Durchlässigkeit des Gebirges [m/s]	1E-14	5E-14	5E-13	Datenspektrum
Hydraulische Durchlässigkeit von Störungszonen [m/s]	1E-14		1E-12	Abschätzung
Wasser-/Gebirgs-temperatur [°C]		Erwartungswert	Ungewissheit [±]	
	Top der Einheit	31	5	Hinweisdaten
	Basis der Einheit	38	5	Hinweisdaten
Wasserchemismus	Untere Bandbreite	Obere Bandbreite		
pH-Wert	6.9	7.4		Datenspektrum
Calcium [mg/L]				
Sulfat [mg/L]	2'000	3'000		Datenspektrum
Chlorid [mg/L]	7'000	9'000		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 umfasst die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum.
- Gm2 entspricht den «Malmkalken» und fasst die «Felsenkalke» + «Massenkalk», die Schwarzbach-Formation und die Villigen-Formation zusammen.
- Gm3 entspricht der Wildeggen-Formation.
- Gm4 fasst den Dogger oberhalb des Opalinuston zusammen.
- Gm5 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 (felsmechanische und geomechanische Laborversuche) der TBO-Datenberichte (MAR1-1, TRU1-1).

An den Bohrkernen der Bohrung RHE1-1 wurden keine geomechanischen Laborversuche durchgeführt.

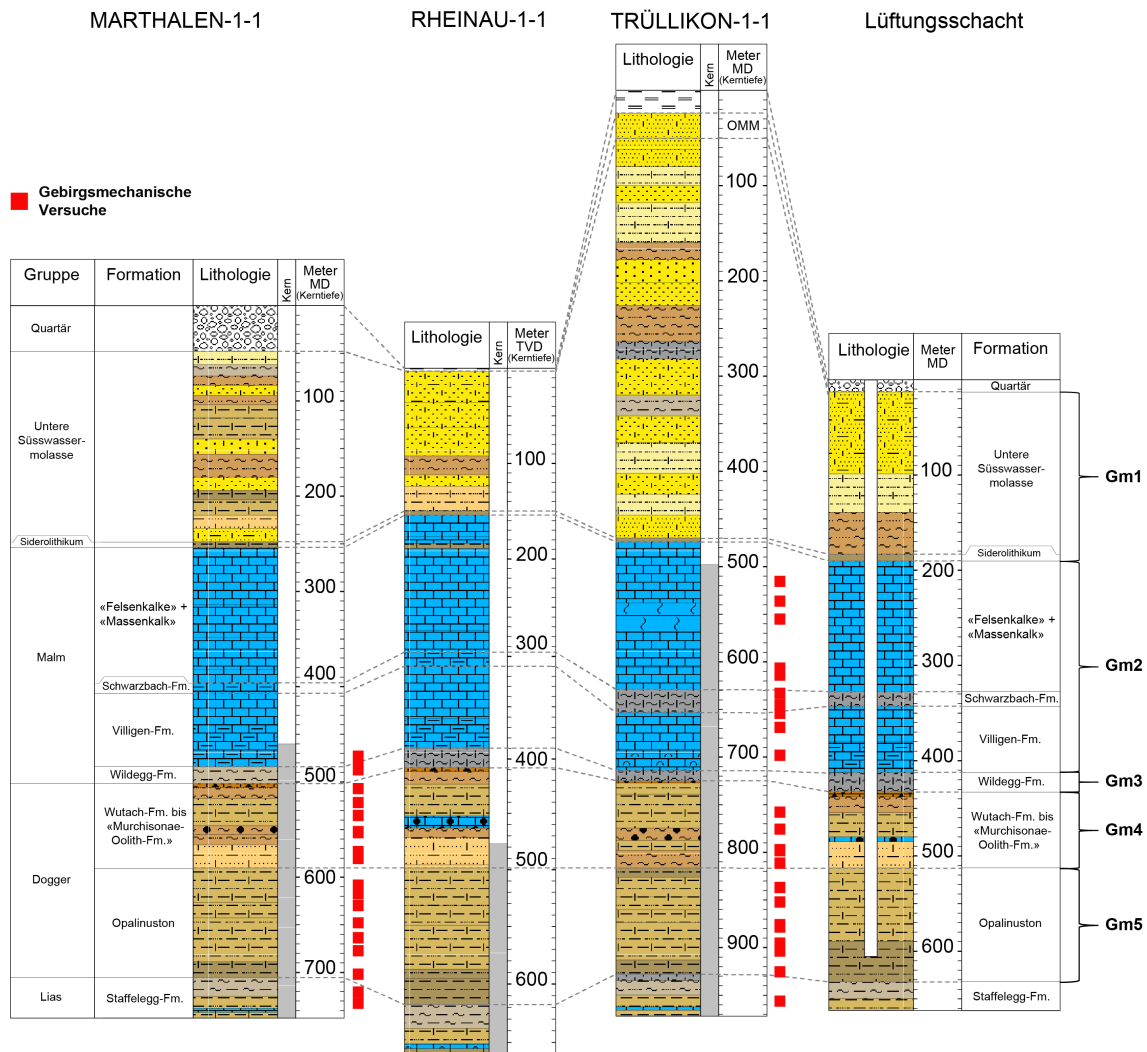


Fig. 6-1: Gegenüberstellung der geomechanischen Einheiten mit der lithostratigraphischen Einteilung sowie Angabe der Probeentnahmen für die Laborversuche in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

6.1 Ableiten der geomechanischen Gesteinseigenschaften

Die geomechanischen Gesteinseigenschaften Gm2 bis Gm5 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 Bohrlöchaufnahmen sei auf die entsprechenden Datenberichte der TBO verwiesen (TBO-Datenberichte Dossiers IX und VI).

Die Bohrlochabschnitte der Einheit Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum) wurden in den TBO destruktiv gebohrt. Deshalb konnte in diesem Abschnitt keine geomechanische Beprobung durchgeführt werden. Ausserdem wurden in diesen Abschnitten auch nicht systematisch Bohrloch-Logs durchgeführt. Aufgrund der sehr grossen lithologischen Heterogenität in dieser Einheit (Abfolge von Sand-, Mergel- und Tonsteinen sowie Konglomeraten) variieren die geomechanischen Eigenschaften räumlich sehr stark, von lockergesteinsartigem Verhalten über Felsverhalten bis hin zu besonderen Eigenschaften von Erz-

vorkommen. Die geomechanischen Eigenschaften wurden für die geomechanische Einheit Gm1 durch Erfahrungswerte aus anderen Bauprojekten abgeschätzt (z.B. Neuer Bözberg-Eisenbahntunnel, Eppenbergr-Eisenbahntunnel).

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 Gm2 («Malmkalke») bis und mit Gm4 (Dogger oberhalb Opalinuston) verwendet. Für die Ableitung der erwarteten Bandbreite an den Schachtstandorten werden die Modellresultate von MAR1-1 stärker gewichtet.

Für die Einheit Gm5 (Opalinuston) werden die erwarteten Werteverteilungen direkt aus den Laborversuchen abgeleitet.

Die Verteilung der geomechanischen Eigenschaften der einzelnen Einheiten ist in den verschiedenen TBO vergleichbar (Fig. 6-2, Fig. 6-3, Fig. 6-4).

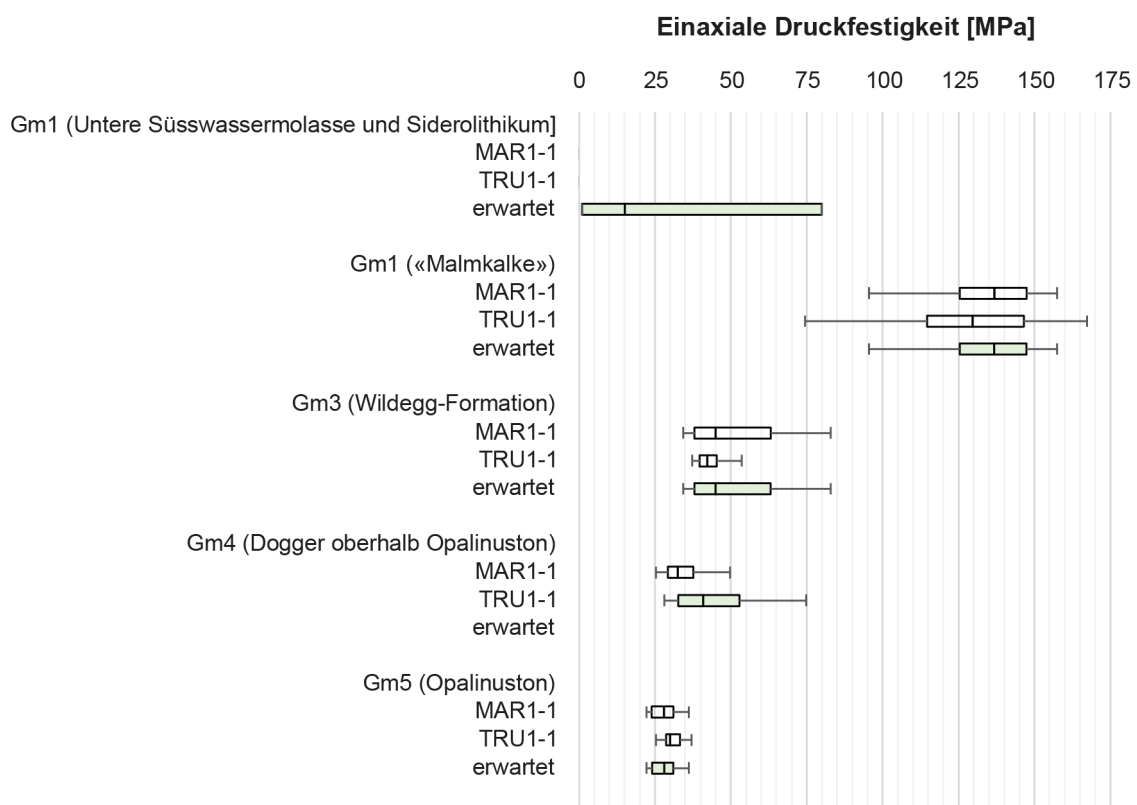


Fig. 6-2: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten einaxialen Druckfestigkeiten

Für die Einheit Gm5 (Opalinuston) ist die erwartete Werteverteilung direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

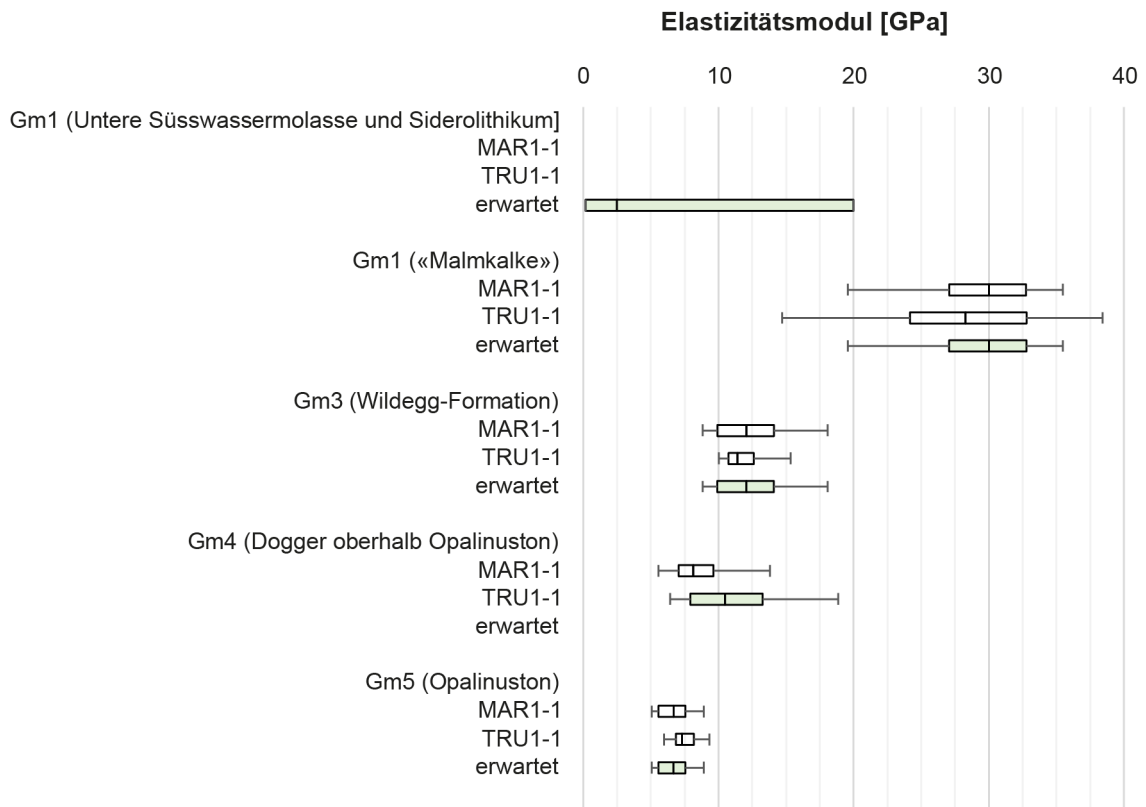


Fig. 6-3: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Elastizitätsmodule

Für die Einheit Gm5 (Opalinuston) ist die erwartete Werteverteilung direkt aus den Laborversuchen abgeleitet worden.

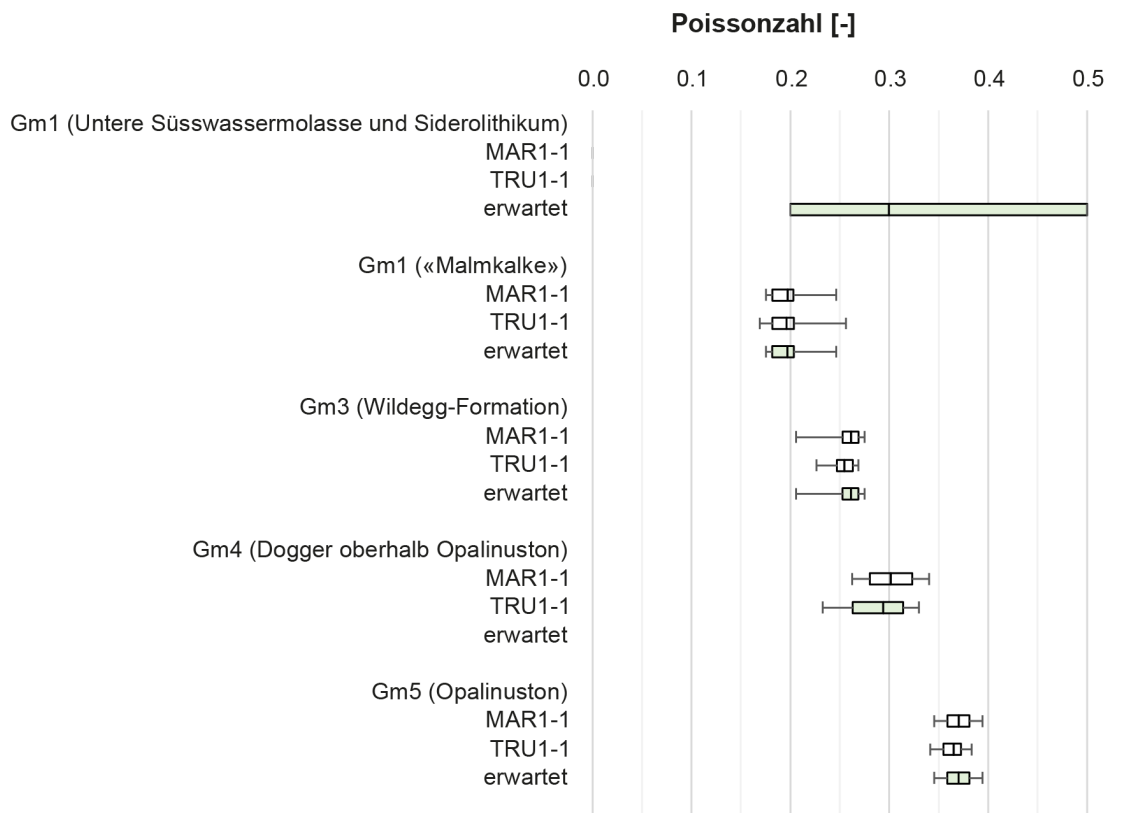


Fig. 6-4: Gegenüberstellung der Verteilung der modellierten Poissonzahlen

Für die Einheit Gm5 (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, den 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, Gm4, Gm5) aufgrund der Gehalte, der Zusammensetzung und der Verteilung der Tonminerale das grösste Quellpotenzial aufweisen (vgl. Kapitel 3).

Die in Gm2 vorkommenden tonreichen Karsthohlraumverfüllungen (vgl. Kap. 7.1.5) können ebenfalls ein gewisses Quellpotenzial aufweisen und sind analog Gm1 zu bewerten. Die «Malmkalke» an und für sich weisen kein Quellpotenzial auf.

Die Erwartungswerte für das Quellvermögen (Quelldruck, Quellmass) der geomechanischen Einheiten basieren auf Oedometerversuchen und werden nicht mit dem oben beschriebenen Interpolationsverfahren bestimmt (Kap. 6.1.1). Entsprechende Laborversuche 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. 6.4.5 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 an den Schachtstandorten resp. den Bauwerken auf Lagerebene dar.

SHmax ist im Standortgebiet in NNW-SSE-Richtung orientiert. Die dominante Richtung aus den Bohrungen im Standortgebiet ergibt $172^{\circ} (\pm 9^{\circ})$ und ist in den geomechanischen Einheiten Gm2 bis Gm5 relativ konstant.

Aus der Unteren Süsswassermolasse und dem Siderolithikum (Gm1) liegen keine Beobachtungen aus den Bohrungen vor. Aufgrund der geringeren Tiefe muss in dieser Einheit mit einer Verzerrung der Hauptspannungsrichtungen aufgrund topographischer Effekte gerechnet werden. Auch für die Spannungsmagnituden muss in der geomechanischen Einheit Gm1 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 < 5 resp. < 8 MPa begrenzt sein.

Die Spannungsmagnituden für die Einheiten Gm2 bis Gm5 können aus Daten und Modellrechnungen relativ gut abgeschätzt werden, insbesondere für Shmin (Fig. 6-5). Dabei ist auffällig, dass die kompetenteren Schichten im Malm höhere Differenzspannungen in horizontaler Richtung (SHmax – Shmin) aufweisen. Zudem ist das Spannungsregime stärker kompressiv in Gm2 und, aufgrund der geringen Tiefenlage auch in Gm1, als in den unteren geomechanischen Einheiten.

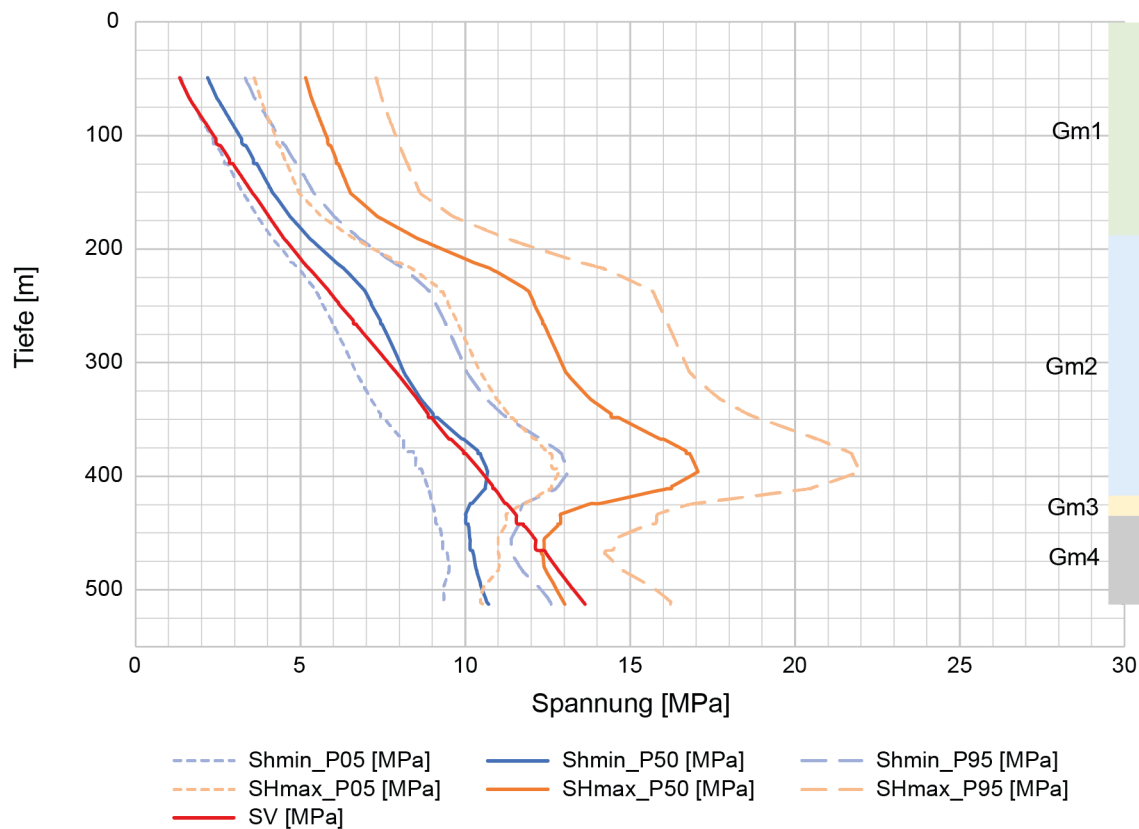


Fig. 6-5: Prognostiziertes Spannungsprofil am Standort des Betriebsschachts

Für die Einheit Gm5 (Opalinuston) sei auf Tab. 6-1 verwiesen.

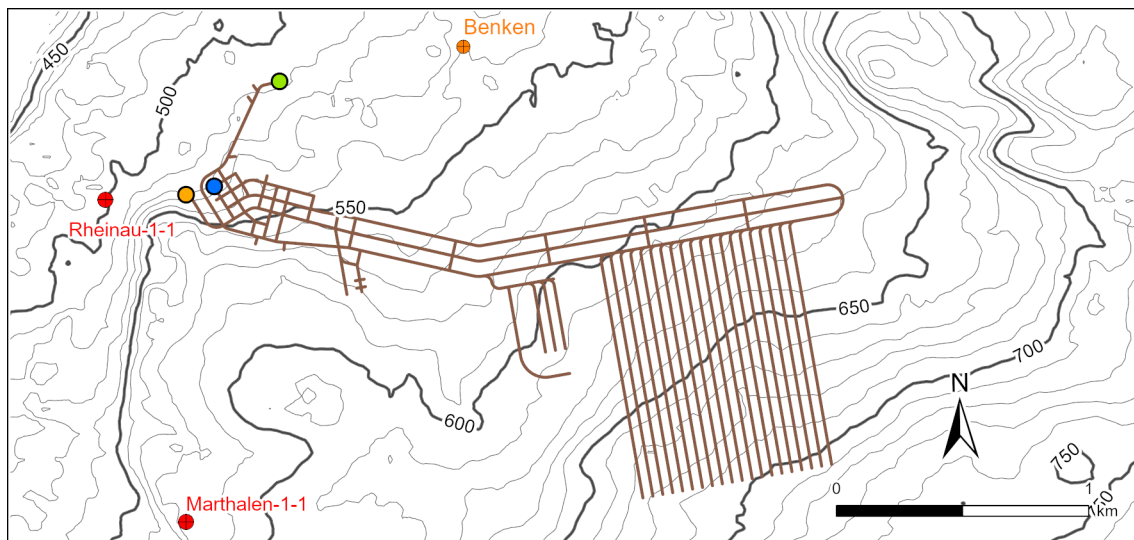
Die aus dem Spannungsmodell abgeleiteten Bandbreiten der Spannungsmagnituden entlang des geplanten Betriebsschachts sind in Fig. 6-5 dargestellt. Für die geomechanische Einheit Gm5 (Opalinuston) ist die Anzahl durchgeführter MHF-Versuche deutlich grösser als in den anderen geomechanischen Einheiten. Die Messungen zeigen einen konsistenten Trend mit der Tiefe, unabhängig vom Standortgebiet. Die erwartete Bandbreite für die geomechanische Einheit Gm5 (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 Betriebsschacht.
- 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 ($\rho = 2450 \text{ kg/m}^3$)
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
600	10.2	11.1	11.8	12.7	10.5	11.7	13.7	15.5	14.4
650	11.1	12.0	12.8	13.8	11.3	12.7	14.8	16.8	15.6
700	11.9	12.9	13.8	14.9	12.2	13.6	16.0	18.1	16.8
750	12.8	13.8	14.7	15.9	13.1	14.6	17.1	19.4	18.0
800	13.6	14.8	15.7	17.0	14.0	15.6	18.3	20.7	19.2



Erdwissenschaftliche Untersuchung

- Tiefbohrungen SGT-E3
- Alte Nagra Tiefbohrung

Geologische Tiefenlager

— HAA-Lager

Nebenzugangsanlagen

- Betriebsschacht
- Lüftungsschacht
- Zugangsschacht

Überlagerung Opalinuston

— Überlagerung Top Opalinuston

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

6.4 Tabellarische Zusammenfassung der geomechanischen Einheiten

6.4.1 Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)				
Geomechanische Gesteinseigenschaften				
	P0.05	P0.5	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]	20	24	27	Abschätzung
E_i Modul [GPa]	0.2	2.5	20.0	Abschätzung
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	1.0	15.0	80.0	Abschätzung
Poissonzahl [-]	0.2	0.3	0.5	Abschätzung
Spitzenkohäsion [MPa]	0.2	1.0	1.0	Abschätzung
Spitzenreibungswinkel [°]	20.0	40.0	50.0	Abschätzung
Spaltzugfestigkeit [MPa]	0.2	1.0	5.0	Abschätzung
Quelldruck [MPa]	1		3	Abschätzung
Quellmass [%]	1		5	Abschätzung
Gebirgsspannungen				
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert	
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	5.0	6.4	8.3	Mod. Datensatz
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	8.6	11.0	14.5	Mod. Datensatz
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		5.4		Mod. Datensatz

6.4.2 Gm2 («Malmkalke»)

Gm2 («Malmkalke»)						
Geomechanische Gesteinseigenschaften						
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]	26		27		27	Datenspektrum
E_i Modul [GPa]	19.6	27.1	30.0	32.8	35.5	Mod. Datensatz
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	95.5	125.4	136.7	147.4	157.5	Mod. Datensatz
Poissonzahl [-]	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	Mod. Datensatz
Spitzenkohäsion [MPa]	21.0		27.0		35.0	Mod. Datensatz
Spitzenreibungswinkel [°]	36.0		40.0		50.0	Mod. Datensatz
Spaltzugfestigkeit [MPa]	7.8	10.7	11.6	12.6	13.6	Mod. Datensatz
Quelldruck [MPa]	0				0	Hinweisdaten
Quellmass [%]	0				0	Hinweisdaten
Gebirgsspannungen						
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert			
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	8.8	10.6	12.8	Mod. Datensatz		
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	12.6	16.3	20.8	Mod. Datensatz		
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		10.8		Mod. Datensatz		

6.4.3 Gm3 (Wildegg-Formation)

Gm3 (Wildegg-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]	8.8	9.9	12.1	14.1	18.1	Mod. Datensatz
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	34.3	38.1	45.0	63.1	83.0	Mod. Datensatz
Poissonzahl [-]	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	Mod. Datensatz
Spitzenkohäsion [MPa]	11.0		18.0		24.0	Mod. Datensatz
Spitzenreibungswinkel [°]	10.0		20.0		55.0	Mod. Datensatz
Spaltzugfestigkeit [MPa]	3.0	3.4	4.0	5.5	7.2	Mod. Datensatz
Quelldruck [MPa]	1				3	Hinweisdaten
Quellmass [%]	1				5	Hinweisdaten
Gebirgsspannungen						
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert			
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	9.4	10.6	12.5	Mod. Datensatz		
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	10.5	12.9	16.1	Mod. Datensatz		
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		13.5		Mod. Datensatz		

6.4.4 Gm4 (Dogger oberhalb Opalinuston)

Gm4 (Dogger oberhalb Opalinuston)						
Geomechanische Gesteinseigenschaften						
	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]	25		25		26	Datenspektrum
E_i Modul [GPa]	5.6	7.1	8.1	9.7	13.8	Mod. Datensatz
Einaxiale Druckfestigkeit [MPa]	25.3	29.2	32.4	37.7	49.7	Mod. Datensatz
Poissonzahl [-]	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	Mod. Datensatz
Spitzenkohäsion [MPa]	8.0		17.0		21.0	Mod. Datensatz
Spitzenreibungswinkel [°]	16.0		19.0		38.0	Mod. Datensatz
Spaltzugfestigkeit [MPa]	2.4	2.8	3.1	3.6	4.7	Mod. Datensatz
Quelldruck [MPa]	1				3	Hinweisdaten
Quellmass [%]	1				5	Hinweisdaten
Gebirgsspannungen						
	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert			
Minimale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	11.9	12.6	13.6	Mod. Datensatz		
Maximale horizontale Spannungsmagnitude [MPa]	13.3	14.4	16.0	Mod. Datensatz		
Vertikale Spannungsmagnitude [MPa]		15.2		Mod. Datensatz		

6.4.5 Gm5 (Opalinuston)

Gm5 (Opalinuston)					
Geomechanische Gesteinseigenschaften					
		P0.05	P0.5	P0.95	Datenqualität
Raumgewicht [kn/m ³]		25	25	26	Datenspektrum
E₁ 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		3	Datenspektrum
Quellmass [%]		1		5	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 Karsthohlräum ist ein Lösungshohlräum, 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 ist ein nicht verkarstungsfähiger Bereich, der die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum umfasst.
- Ka2 ist ein Bereich mit einer Paläo-Verkarstung und entspricht den «Felsenkalken» + «Massenkalk»
- Ka3 ist ein Bereich mit verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten, die jedoch keine Verkarstungserscheinungen aufweisen, er umfasst die Schwarzbach- und die Villigen-Formation.

- Ka4 ist ein nicht verkarstungsfähiger Bereich, der die Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinustons umfasst.
- Ka5 entspricht dem nicht verkarstungsfähigen Opalinuston.

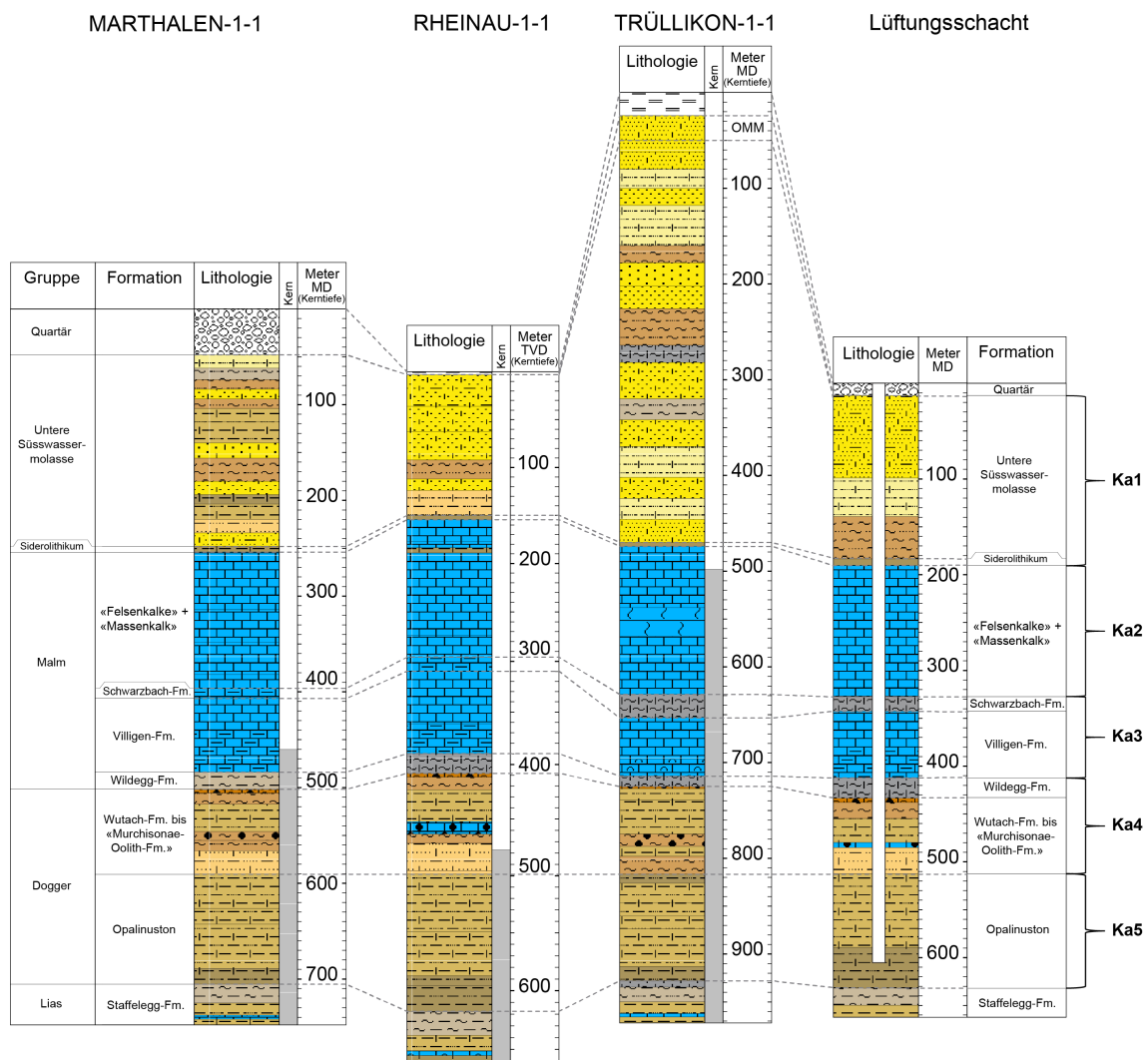


Fig. 7-1: Gegenüberstellung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften mit der lithostratigraphischen Einteilung in den TBO und am Prognoseprofil des Lüftungsschachts

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 speleologischen und hydrogeologischen Bedingungen im Standortgebiet angepasst.

Als Datengrundlage dienen die Beobachtungen aus den TBO. Naturgemäss weisen Verkarstungseigenschaften eine grosse räumliche Heterogenität auf. Deshalb wurden für die Karstprognose an den geplanten Schachtstandorten nicht nur Beobachtungen aus dem Standortgebiet, sondern auch Beobachtungen aus dem Gebiet Nördlich Lägeren zur Bewertung herangezogen.

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 Gew.-%)
- verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten (Karbonatanteil > 80 Gew.-%)

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

In der jeweiligen lithologischen Abfolge an den geplanten Schachtstandorten (vgl. Kapitel 3) werden folgende Gesteinseinheiten als verkarstungsfähig betrachtet:

- Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»): Die «Felsenkalke» + «Massenkalk» weisen weitgehend über die gesamte Mächtigkeit einen Karbonatgehalt von mehr als 90 Gew.-% auf.
- Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation): Der Karbonatgehalt der Schwarzbach-Formation liegt um die 80 Gew.-% (z. B. P0.5 in MAR1-1 83 Gew.-% in TRU1-1 77 Gew.-%). Demgegenüber weist die Villigen-Formation weitgehend über die ganze Mächtigkeit einen Karbonatgehalt von mehr als 90 Gew.-% auf, wobei die Untergrenze zur Wildegg-Formation durch eine graduelle Abnahme des Karbonatgehalts der Kalksteine und das Mächtigerwerden der Mergellagen gekennzeichnet ist, was zu einer zunehmenden Nichtverkarstungsfähigkeit führt.

Folglich werden folgende Einheiten als nicht verkarstungsfähig betrachtet:

- Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)
- Ka4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)
- Ka5 (Opalinuston)

7.1.2 Verkarstung der verkarstungsfähigen Gesteinseinheiten

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

Es besteht weitgehend ein Konsens darüber, dass die «Malmkalke» der Nordostschweiz eine Paläo-Verkarstung aufweisen (z. B. Bitterli et al. 2000, Guendon 1984). So wurden auch in den TBO verschiedene Karsthohlräume erbohrt und dokumentiert (vgl. TBO-Datenberichte Dossiers II und III). Hingegen fehlen in den TBO Hinweise auf eine rezente Verkarstung der «Malmkalke» im Standortgebiet. Weiter weist der «Malmkalk-Aquifer» im Standortgebiet nicht die typische Hydrodynamik eines Karstaquifers auf (vgl. Kapitel 5). Die hohen Verweilzeiten der Grundwässer deuten auf eine sehr geringe Dynamik mit geringen Fliessgeschwindigkeiten hin (z. B. Waber et al. 2014).

Die Beobachtungen in den TBO zeigen, dass Karsthohlräume nur in den «Felsenkalke» + «Massenkalk» vorkommen (Fig. 7-2). In der Schwarzbach- und auch in der Villigen-Formation sind keine Karsthohlräume zu beobachten.

Zusammenfassend kann die Verkarstung der «Malmkalke» wie folgt beurteilt werden (Tab. 7-1):

- Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»): Paläo-verkarstete Einheit, wobei das Karströhrensystem für die heutige Dynamik im «Malmkalk-Aquifer» eine untergeordnete Bedeutung hat (Trennflächenaquifer mit nicht oder nur lokal kommunizierenden Karsthohlräumen, vgl. Kapitel 5). Es gibt keine Hinweise auf eine rezente Verkarstung.
- Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation): Es gibt weder Hinweise für eine rezente noch eine Paläo-Verkarstung. Dies schliesst nicht aus, dass lokal (isolierte) Lösungshohlräume vorkommen können. Diese werden jedoch im Kontext dieses Berichts nicht als Karsthohlräume, sondern als erweiterte Trennflächen angesehen.

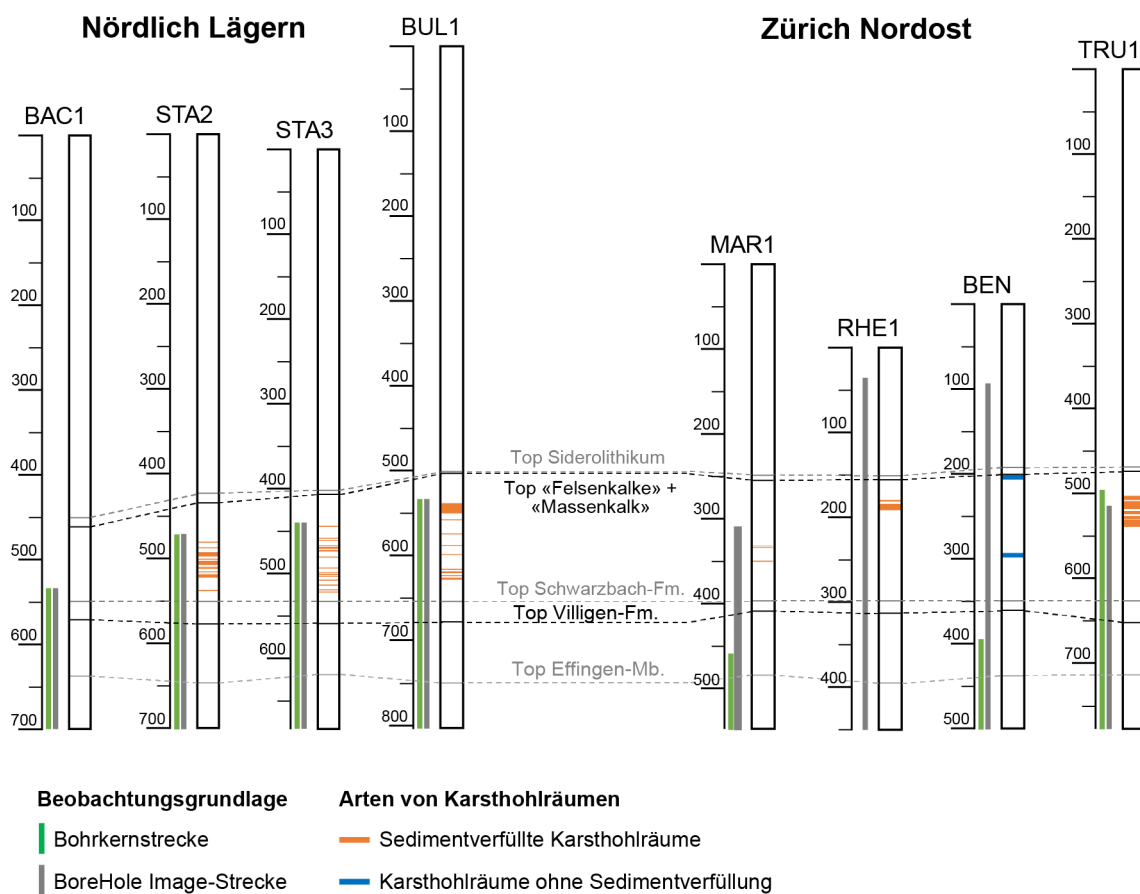


Fig. 7-2: Beobachtete Lösungshohlräume in den TBO der Standortgebiete Nördlich Lägern und Zürich Nordost

Bohrungen wurden auf Top Schwarzbach-Formation ausgerichtet.

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

Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Verkarstung des Gebirges
Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Nicht verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Verkarstungsfähig	Verkarstet (paläo-verkarstung)
Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Nicht verkarstungsfähig	Nicht verkarstet
Ka5 Opalinuston	Nicht verkarstungsfähig	Nicht verkarstet

7.1.3 Auftretenshäufigkeit von Karsthohlräumen

Karsthohlräume sind nur in der verkarsteten Einheit Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk») zu erwarten.

Das Vorkommen von Karsthohlräumen in einem Gebirge ist räumlich weder zufällig noch gleichmässig, sondern an gewisse Trennflächen gebunden, sogenannte Initialfugen (z. B. Lowe 1992). Eine Initialfuge ist eine tektonische oder lithologische Trennfläche, entlang derer sich bevorzugt Karsthohlräume entwickeln. Anhand ihrer Bedeutung für die Entwicklung der Karströhrennetze können Initialfugen in solche lokaler und solche regionaler Bedeutung unterteilt werden.

Regionale Initialfugen sind üblicherweise grössere Störungen/Störungszonen oder markante lithologische Kontraste (z. B. pyritreiche Gesteinszwischenlagen oder Schichtgrenzen). Als Beispiel einer solchen regionalen, tektonischen Initialfuge kann die in BUL1-1 angebohrte verkarstete Störungzone (Bohrtiefe 537.5 – 554.0 m) verstanden werden (Fig. 4-6) (Schwarz et al. 2021a). Da die Karströhrendichte entlang von regionalen Initialfugen in der Regel grösser ist, wird üblicherweise zwischen Karströhrendichten entlang lokaler und entlang solcher regionaler Initialfugen unterschieden.

Für den Bereich der geplanten Schachtstandorte gibt es keine Hinweise auf regionale Initialfugen in den «Felsenkalke» + «Massenkalk». Hingegen liegt der Betriebsschacht im Bereich einer seismisch kartierten Störungzone (vgl. Kap. 4.3). Diese kann als regionale Initialfuge betrachtet werden, also als Gebirgsbereich mit einer erhöhten Karströhrendichte. Dies schliesst nicht aus, dass noch weitere lokale Initialfugen vorhanden sind.

Abgesehen von der Anhäufung von Karsthohlräumen entlang von Initialfugen ist in vielen Karstgebieten auch eine Abnahme der Karströhrendichte mit der Distanz von der (Paläo-)Karstoberfläche zu beobachten (z. B. Filipponi et al. 2012, Milanović 2000). In den TBO wurde dieser Bereich nicht gekernt, weshalb keine beobachtungsbasierten Aussagen für diesen Bereich gemacht werden können. Es kann dennoch angenommen werden, dass auch im Standortgebiet eine solche Tendenz erwartet werden kann. Insbesondere ist in den ersten rund 10 – 20 m unterhalb der (Paläo-)Karstoberfläche mit einer grösseren Karströhrendichte zu rechnen.

7.1.4 Karsthohlraumgrössen

Karsthohlräume weisen in der Regel Durchmesser grösser einige Zentimeter auf, können jedoch bis zu mehrere Dekameter gross sein. Die Grösse eines Karsthohlraums ist in Längsrichtung in der Regel nicht konstant und kann sich auch auf kurze Strecken um Grössenordnungen ändern (z. B. Frantz et al. 2021).

In den TBO wurden Karsthohlräume verschiedener Grössen angebohrt. Die angebohrte Öffnungsweite dieser Hohlräume reicht von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern (Fig. 7-3). Dabei können grosse Hohlräume als selten vorkommend erachtet werden, während kleine Hohlräume häufiger vorkommen. Es kann angenommen werden, dass mit den TBO die Bandbreite und die Verteilung der Hohlraumeigenschaften nicht vollständig abgedeckt werden (z. B. Hoover 2003), insbesondere die grossen, sehr selten vorkommenden Hohlraumgrössen können als unterrepräsentiert erachtet werden. Da die Karsthohlraumgrössen in einem verkarsteten Gebirge oft eine logarithmische Verteilung aufweisen (z. B. Maqueda et al. 2023), kann davon ausgegangen werden, dass die Beobachtungen aus den TBO dennoch eine gute Datengrundlage für die zu erwartenden Hohlraumgrössen darstellen.

Um den «Sampling-Bias» bezüglich den grösstmöglich anzutreffenden Karsthohlraumgrössen zu berücksichtigen, wird als grösstmöglicher anzutreffender Karsthohlraum der grösste bekannte Karsthohlraum des Nordschweizer Juras angenommen. Die Halle im Dieboldslöchl bei Pfeffingen hat eine Profilfläche von rund 220 m² resp. einen äquivalenten Durchmesser von rund 15 m (Bitterli 1996).

Verkarstete Gebiete weisen oft eine mehr oder weniger ausgeprägte vertikale Karsthohlraum-Grössenverteilung auf. Dabei verfügen die (paläo)oberflächennahen Bereiche über verhältnismässig mehr kleinräumige Karsthohlräume als die tieferliegenden Bereiche. Die Beobachtungen in den TBO lassen für das Standortgebiet keine solche Unterscheidung zu, da der obere Bereich der «Felsenkalk» + «Massenkalk» nicht gekernt. Da die Gefährdung durch Karsthohlräume in der Regel mit zunehmender Grösse der Hohlräume akzentuierter ist, wird die Karsthohlraum-Grössenverteilung aus den TBO für die ganze verkarstete Einheit verwendet (Fig. 7-3).

Die Karsthohlraum-Grössenverteilungen in den verschiedenen TBO sind vergleichbar. Aus Konservativitätsüberlegungen wird als erwartete Verteilung an den geplanten Schachtstandorten die Verteilung von BUL1-1 verwendet, wobei die Verteilung erweitert wird um den grösstmöglich zu erwartenden Hohlraum mit einem Durchmesser von 15 m.

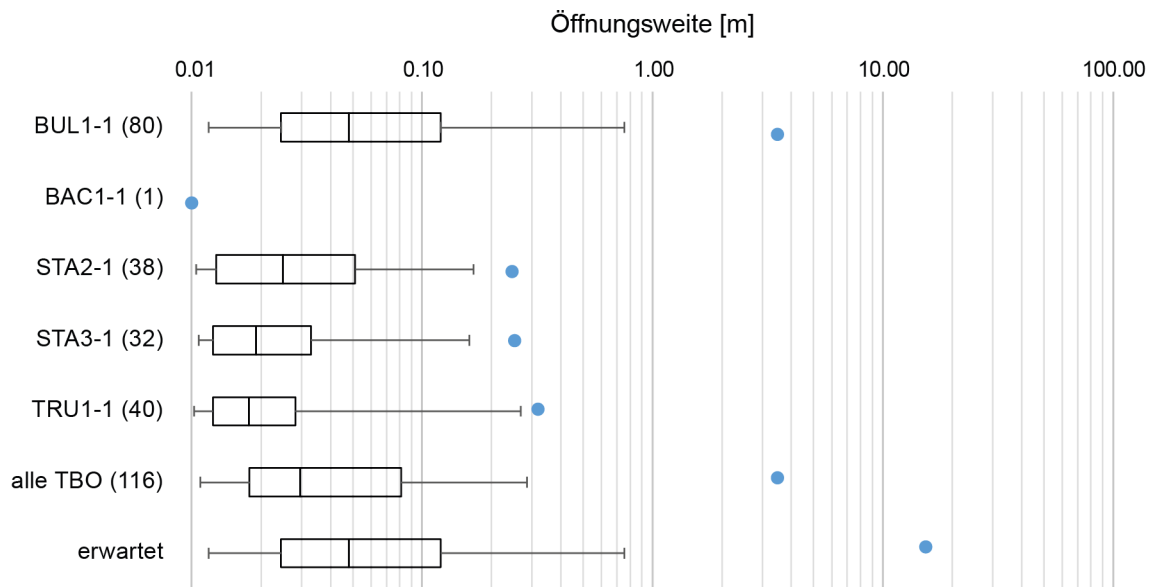


Fig. 7-3: Verteilung der beobachteten Öffnungsweiten der Karsthohlräume in den Bohrkernen der TBO

Dabei wird angenommen, dass die Öffnungsweite im Bohrkern dem Hohlraumdurchmesser entspricht. Die blauen Punkte entsprechen den grössten in der TBO gemessenen Öffnungsweiten. Bei der erwarteten Bandbreite der Öffnungsweiten entspricht der Maximalwert (blauer Punkt) der Grösse des grössten bekannten Karsthohlraums des Nordschweizer Juras (Bitterli 1996). Die Werte in Klammern entsprechen der Anzahl Beobachtungen.

Alle in den Bohrkernen beobachteten Karsthohlräume sind sedimentverfüllt.

7.1.5 Art der Hohlraumverfüllung

Paläo-Karsthohlräume können ganz oder teilweise mit Sedimenten verfüllt sein oder auch keine Sedimente beinhalten (z. B. Osborne 2003). Die in den TBO angetroffenen Karsthohlräume sind mit dichten, siltig-sandigen Sedimenten verfüllt (z. B. Fig. 7-2 und Fig. 7-4). Weiter zeigen Beobachtungen der Paläo-Karsthohlräume in den Malmkalken der Nordschweiz, die während Tunnelbaumassnahmen angefahren wurden, dass auch diese überwiegend vollständig mit Sedimenten verfüllt sind (z. B. alter und neuer Bözberg-Eisenbahntunnel, Cholfirst-Strassentunnel oder Galgenbuck-Strassentunnel). Die in den TBO beobachteten verfüllten Lösungshohlräume verfügen über sehr geringe hydraulische Durchlässigkeiten (z. B. Schwarz et al. 2021a). Zusätzlich weisen die hydrogeologischen Beobachtungen aus den Tiefbohrungen darauf hin, dass der Paläo-Karstaquifer seine karsttypischen hydraulischen Eigenschaften verloren hat (vgl. TBO-Datenberichte Dossier VII). Das Karströhrensystem wurde durch Sedimente mindestens zum Teil «plombiert».

Es wird erwartet, dass die an den geplanten Schachtstandorten angefahrenen Karsthohlräume mit dichten siltig-sandigen Sedimenten verfüllt sind. Nicht oder nur teilweise verfüllte Karsthohlräume sind jedoch nicht vollständig auszuschliessen.



Fig. 7-4: Beispiel eines sedimentverfüllten Karsthohlraums
(TRU1, 505 m, Kaehr & Gysi 2021)

7.1.6 Wasserführung der Karsthohlräume

Die Einheit Ka2 befindet sich heute in der gesättigten Zone, dementsprechend werden keine luft-erfüllten Karsthohlräume erwartet. Obschon erwartet wird, dass alle Karsthohlräume vollständig und dicht mit Sedimenten verfüllt sind, kann dennoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass nicht oder nur teilverfüllte Karsthohlräume beim Bau der Zugangsbauwerke angetroffen werden können.

Die weitgehend vollständige Kolmatierung des Karströhrensystems durch Höhlensedimente führt dazu, dass das Karströhrensystem heute nur noch bedingt hydraulisch kommuniziert, weshalb die allfälligen nicht oder nur teilweise verfüllten Karsthohlräume hydraulisch als isoliert betrachtet werden können.

7.2 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften

7.2.1 Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nicht verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.2 Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

Ka2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)								
Beschreibung der Gebirgsverkarstung								Datenqualität
Verkarstungs-fähigkeit der Gesteinseinheit	Verkarstungsfähig							Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Verkarstet (Paläo-Verkarstung)							Hinweisdaten
Karsthohlraum-grösse [m]	Min	P0.05	P0.25	P0.5	P0.75	P0.95	Max	
	0.01	0.01	0.02	0.05	0.1	0.8	15	Hinweisdaten
Art der Hohlraum-verfüllung	Erwartet			Nicht auszuschliessen				
	Mit dichten, siltig-sandigen Sedimenten verfüllt			Keine oder Teilverfüllung mit Sedimenten				Hinweisdaten
Wasserführung	Erwartet			Nicht auszuschliessen				
	Keine Wasserführung			Hydraulisch isolierte wassergefüllte Karsthohlräume				Hinweisdaten
Lufterfüllte Hohlräume	Erwartet			Nicht auszuschliessen				
	Keine lufterfüllten Karsthohlräume			Keine lufterfüllten Karsthohlräume				Hinweisdaten

7.2.3 Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)

Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.4 Ka4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

Ka4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)		
Beschreibung der Gebirgsverkarstung		Datenqualität
Verkarstungsfähigkeit der Gesteinseinheit	Nicht verkarstungsfähig	Hinweisdaten
Art der Verkarstung	Nicht verkarstet	Hinweisdaten

7.2.5 Ka5 (Opalinuston)

Ka5 (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 Baumethode 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, wobei auf methodenbedingte Gefährdungen durch spezifische Baumethoden nicht eingegangen wird (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 fünf Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften unterschieden (Fig. 8-1):

- Gb1 fasst die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum zusammen.
- Gb2 entspricht den «Felsenkalken» + «Massenkalk».
- Gb3 fasst die Schwarzbach- und die Villigen-Formation zusammen.
- Gb4 umschliesst die Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinuston.
- Gb5 entspricht dem Opalinuston.

Gruppe	Formation	Lithologie	Meter MD	lithologische Einheiten	Trennflächen-Einheiten	hydrogeologische Einheiten	geomechanische Einheiten	Verkarstungs-Einheiten	Gefährdungs-bilder
Quartär									
Untere Süsswasser-molasse			100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1
				Li2					
Malm	«Felsenkalk» + «Massenkalk»		200	Li3	Te2	Hy2	Gm2	Ka2	Gb2
	Schwarzbach-Fm.		300	Li4					
	Villigen-Fm.		400	Li5				Ka3	Gb3
	Wildeggen-Fm.			Li6			Gm3		
	Wutach-Fm. bis «Murchisonae-Oolith-Fm.»		500	Li7	Te3	Hy3	Gm4	Ka4	Gb4
Dogger	Opalinuston		600	Li8	Te4	Hy4	Gm5	Ka5	Gb5
Lias	Staffelegg-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 Trennflächen-eigenschaften	Ablösen von Trennflächenkörpern			
		Horizontale Ablösungen von Gesteinsplatten im Firstbereich	Ablösungen im Firstbereich infolge ungünstiger Trennflächen-orientierung	Blockgleiten aus den Paramenten	Grösse der Trennflächenkörper
Gb1 (Untere Süsswasser-molasse und Siderolithikum)	Te1 (Untere Süsswasser-molasse und Siderolithikum)	Extrem unwahrscheinlich (wird nur in den Schachtbauwerken aufgefahren)	Extrem unwahrscheinlich (wird nur in den Schachtbauwerken aufgefahren)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Te2 («Malmkalke»)				
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)					
Gb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)				
Gb5 (Opalinuston)	Te4 (Opalinuston)	Schachtbauwerke: extrem unwahrscheinlich Bauten auf Lagerebene: wahrscheinlich	Schachtbauwerke: extrem unwahrscheinlich Bauten auf Lagerebene: wahrscheinlich		

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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Extrem unwahrscheinlich (wird nur in den Schachtbauwerken aufgefahren)	Extrem unwahrscheinlich (wird nur in den Schachtbauwerken aufgefahren)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m ³ möglich
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Te2 («Malmkalke»)				
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)					
Gb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Te3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)				
Gb5 (Opalinuston)	Te4 (Opalinuston)	Schachtbauwerke: extrem unwahrscheinlich Bauten auf Lagerebene: wahrscheinlich	Schachtbauwerke: extrem unwahrscheinlich Bauten auf Lagerebene: wahrscheinlich		

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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Möglich
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Gm2 («Malmkalke»)	Unwahrscheinlich
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)		
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Gm3 (Wildeggen-Formation)	Möglich
	Gm4 (Dogger oberhalb Opalinustons)	
Gb5 (Opalinuston)	Gm5 (Opalinuston)	Wahrscheinlich

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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Gm1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Wahrscheinlich
Gb2 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Gm2 («Malmkalk»)	Unwahrscheinlich
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)		
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Gm3 (Wildeggen-Formation)	Wahrscheinlich
	Gm4 (Dogger oberhalb Opalinustons)	
Gb5 (Opalinuston)	Gm5 (Opalinuston)	Wahrscheinlich

8.1.3 Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge

Die Gefahr der Instabilität durch rolliges Gebirge beinhaltet das Ausrieseln von kohäsionsarmen, gering verzahnten, trockenen bis feuchten Gesteinseinheiten resp. Gesteinslagen. Bei hohem Wassergehalt kann es auch zu murgangartigem Ausfliessen kommen.

Dieses Gebirgsverhalten ist beim Anfahren von nicht oder nur schlecht verfestigten Sand- und/oder Kieslagen oder «Taschen» vorstellbar. In den betrachteten Gesteinseinheiten ist diese Gefahr in schlecht verfestigten Gesteinslagen der Molasse, mit entsprechenden Sedimenten verfüllten Karsthohlräumen in den «Felsenkalken» + «Massenkalk» sowie beim Durchörtern von Störungszonen möglich (Tab. 8-5).

Zur Beurteilung der Gefährdungen werden die lithologischen Beschreibungen (Kapitel 3), Störungscharakterisierungen (Kap. 4.3) und die Beschreibung der Verkarstung (Kapitel 7) bewertet.

Tab. 8-5: Beurteilung der Gefährdung durch Instabilitäten durch rolliges oder fließendes Gebirge

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Lithologische Einheiten		Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften		Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	
	Lithologische Einheiten	Mögliche Gefährdung	Einheiten mit ähnlichen Trennflächeneigenschaften	Mögliche Gefährdung (Störungszonen Typ III)	Einheiten mit ähnlichen Verkarstungseigenschaften	Mögliche Gefährdung
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Li1 (Untere Süsswassermolasse)	In schlecht zementierten Sandsteinen ist bei mechanischer Beanspruchung resp. Deformationen ein Kohäsionsverlust und damit lockergesteinsähnliches Verhalten möglich	Te1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Kohäsionsarmer Störungskern möglich und damit lockergesteinsähnliches Verhalten möglich	Ka1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Nicht erwartet
	Li2 (Siderolithikum)					
Gb2 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Li3 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Nicht erwartet	Te2 («Malmkalk»)	Nicht erwartet	Ka2 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Anfahren von grossen Karsthöhlräumen, die mit kohäsionsarmen Sedimenten verfüllt sind
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Fm.)	Li4 (Schwarzbach-Fm.)				Ka3 (Schwarzbach- und Villigen-Fm.)	Nicht erwartet
	Li5 (Villigen-Fm.)					
Gb4 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	Li6 (Wildegge-Fm.)		Te3 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	Kohäsionsarmer Störungskern möglich und damit lockergesteinsähnliches Verhalten möglich	Ka4 (Wildegge-Fm. und Dogger oberhalb Opalinuston)	
	Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)				Ka5 (Opalinuston)	
Gb5 (Opalinuston)	Li8 (Opalinuston)		Te4 (Opalinuston)			

8.2 Gefahren in Zusammenhang mit dem 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. 8-6), während für den permanenten Wasserzutritt der Ansatz von El Tani (2003) verwendet wird (Tab. 8-7).

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

Tab. 8-6: 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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1	Gebirge (Mergel-, Tonlagen)	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich			
		Gebirge (Sandsteinrinnen)	Wahrscheinlich					Möglich	Extrem unwahrscheinlich
		Störungszone	Wahrscheinlich					Möglich	Extrem unwahrscheinlich
Gb2 («Felsenkalk» + «Massenkalk») und Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Hy2	Gebirge	Wahrscheinlich				Möglich	Extrem unwahrscheinlich	
		Störungszone	Wahrscheinlich					Möglich	Extrem unwahrscheinlich
		Gebirge mit Karsthohlräumen	Wahrscheinlich				Möglich	Unwahrscheinlich	
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3	Gebirge	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich			
		Störungszone	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich		
Gb5 (Opalinuston)	Hy4	Gebirge	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich					
		Störungszone	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich					

Tab. 8-7: 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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1	Gebirge (Mergel-, Tonlagen)	Wahrscheinlich	Möglich	Extrem unwahrscheinlich				
		Gebirge (Sandsteinrinnen)	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich		
		Störungszone	Wahrscheinlich		Möglich	Wahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich		
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk») und Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Hy2	Gebirge	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich			
		Störungszone	Wahrscheinlich			Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
		Gebirge mit Karsthöhlräumen	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich				
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3	Gebirge	Wahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich				
		Störungszone	Wahrscheinlich	Möglich	Extrem unwahrscheinlich				
Gb5 (Opalinuston)	Hy4	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. 8-8: 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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Hy2 («Malmkalke»)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)					
Gb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Wahrscheinlich	Wahrscheinlich
Gb5 (Opalinuston)	Hy4 (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. Bedeutende Bergwasserzutritte werden jedoch nur in den aufzufahrenden Strecken der Unteren Süsswassermolasse und der «Malmkalke» erwartet (Tab. 8-9).

Tab. 8-9: Beurteilung des Versinterungspotenzials

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften	Versinterungspotenzial
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Wahrscheinlich
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Hy2 («Malmkalke»)	Wahrscheinlich
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)		
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Unwahrscheinlich
Gb5 (Opalinuston)	Hy4 (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 Ersticken) 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).

Das Zuströmen von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen in die Schachtbauwerke ist insbesondere in der Unteren Süsswassermolasse und den «Malmkalken» möglich (vgl. Kap. 5.1.6). Jedoch wird das Vorkommen von lokal isolierten, grösseren Gasvorkommen als unwahrscheinlich erachtet.

Die Beurteilung der Gefährdung durch Methan und höhere Kohlenwasserstoffe erfolgt anhand der Massnahmenstufen der SUVA (Suva 2022) (Tab. 8-10).

Tab. 8-10: Beurteilung der Massnahmenstufen zur Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagebauten in Erdgas-führenden Gesteinsschichten

Massnahmenstufen		0	1	2	3	4
Definition nach Suva (2022)						
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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Wahrscheinlich		Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gb2 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Hy2 («Malmkalk»)	Wahrscheinlich		Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gb3 Schwarzbach- und Villigen-Formation						
Gb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Wahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Gb6 (Opalinuston)	Hy5 (Opalinuston)	Wahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	

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 H₂S 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. 8-11). Als Grundlage dienen die Quarzgehalte in Kap. 3.2.

Tab. 8-11: Beurteilung der Quarzfeinstaub-Belastung

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Quarzfeinstaub-Belastung		
		Klein	Mittel	Gross
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Li1 (Untere Süsswassermolasse)	50 %	50 %	-
	Li2 (Siderolithikum)	70 %	30 %	-
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	100 %	-	-
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Li4 (Schwarzbach-Formation)	100 %	-	-
	Li5 (Villigen-Formation)	100 %		
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Li6 (Wildeggen-Formation)	100 %	-	-
	Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)	20 %	80 %	-
Gb5 (Opalinuston)	Li8 (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. 8-12) 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. 8-12: Beurteilung der Massnahmenstufen bezogen auf die Trockenraumtemperatur einschliesslich der Gebirgs- resp. Bergwassertemperatur

Massnahmenstufen		0	1	2	3	4
Definition nach Rast et al. (2003)						
Beurteilung						
Trockentemperatur am Hauptarbeitsplatz ohne Lüftung		< 23 °C	23 – 25 °C	25 – 28 °C	28 – 32 °C	> 32 °C
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Hy1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Wahr-scheinlich	Möglich	Unwahr-scheinlich	Extrem unwahr-scheinlich	
Gb2 («Felsenkalk» + «Massenkalk»)	Hy2 («Malmkalk»)	Wahr-scheinlich	Möglich		Unwahr-scheinlich	Extrem unwahr-scheinlich
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)		Wahrscheinlich			Möglich	Unwahr-scheinlich
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Hy3 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinustons)	Unwahr-scheinlich	Möglich	Wahrscheinlich		Möglich
Gb5 (Opalinuston)	Hy4 (Opalinuston)	Extrem unwahr-scheinlich	Unwahr-scheinlich	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. 8-13). 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. 8-13: Bewertung der Gesteinsabrasivität

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Gesteinsabrasivität			
		Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Li1 (Untere Süsswassermolasse)	40 %	50 %	10 %	-
	Li2 (Siderolithikum)	60 %	20 %	20 %	-
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	100 %	-	-	-
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Li4 (Schwarzbach-Formation)	100 %	-	-	-
	Li5 (Villigen-Formation)	100 %	-	-	-
Gb4 (Wildeggen-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Li6 (Wildeggen-Formation)	100 %	-	-	-
	Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)	20 %	75 %	5 %	-
Gb5 (Opalinuston)	Li8 (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, Eppenberg-Eisenbahntunnel).

Eine geogene Belastung des Ausbruchmaterials durch im Gebirge natürlich vorkommende Schwermetalle ist möglich, insbesondere in den den Opalinuston überlagernden, mergelreichen Gesteinseinheiten (Tab. 8-14). Eine geogene Belastung durch Kohlenwasserstoffe ist in der Unteren Süsswassermolasse möglich. Es wird als unwahrscheinlich erachtet, dass der Opalinuston geogen belastet ist.

Tab. 8-14: Beurteilung der geogenen Belastung des Ausbruchmaterials

Einheiten mit ähnlichen Gefährdungseigenschaften	Einheiten mit ähnlichen lithologischen Eigenschaften	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	Radioaktivität
Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)	Li1 (Untere Süsswassermolasse)	Möglich	Möglich	Extrem unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
	Li2 (Siderolithikum)		Unwahrscheinlich		
Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Li3 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)	Möglich (Karsthohlraumverfüllungen)			
Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)	Li4 (Schwarzbach-Formation)	Unwahrscheinlich			
	Li5 (Villigen-Formation)				
Gb4 (Wildeg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)	Li6 (Wildeg-Formation)	Möglich			
	Li7 (Dogger oberhalb Opalinuston)				
Gb5 (Opalinuston)	Li8 (Opalinuston)	Unwahrscheinlich			

8.5 Tabellarische Zusammenfassung der Einheiten mit ähnlichen ingenieurgeologischen Gefährdungsbildern

8.5.1 Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

Gb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)				
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 (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	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 (schlecht zementierte Sandsteinlagen oder Störungszonen)			
Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt				
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge (Mergel-, Tonsteinlagen)	< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 1	1 – 10
Gebirge (Sandsteinrinnen)	< 100	100 – 1'000		> 1'000
Störungszone	< 100	100 – 1'000		> 1'000
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge (Mergel-, Tonsteinlagen)	< 0.01	0.01 – 0.1		0.1 – 1
Gebirge (Sandsteinrinnen)	< 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	wahrscheinlich			
Betonexpositions-klasse	erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	erhöhtes Korrosionspotenzial			
Gesundheitliche Auswirkungen				
	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaubbelastung	50 %	50 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 4	
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Unwahrscheinlich			
Aspestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Möglich	Möglich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	40 %	50 %	10 %	0 %

8.5.2 Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

Gb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)				
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 (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Unwahrscheinlich		Druckhaftes Gebirge Störungszonen des Typs III	unwahrscheinlich
Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge	Möglich (Sedimentverfüllungen der Karsthohlräume)			
Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt				
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 10	10 – 100	> 100	
Störungszone	< 100	100 – 1'000		> 1'000
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01	0.01 – 0.1	> 0.1	
Störungszone	< 1	1 – 10	10 – 100	100 – 1'000
Überschreiten der Einleitgrenzwerte	Wahrscheinlich (hoher Sulfat- und Chloridgehalt)			
Versintern von Drainageleitungen	Wahrscheinlich			
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 0	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 4	
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Unwahrscheinlich			
Aspestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Möglich (Karsthohlraumverfüllungen)	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	100 %	0 %	0 %	0 %

8.5.3 Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)

Gb3 (Schwarzbach- und Villigen-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 (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Unwahrscheinlich		Druckhaftes Gebirge Störungszonen des Typs III	Unwahrscheinlich
Instabilität durch rolliges oder fließendes Gebirge	Extrem unwahrscheinlich			
Gefahren in Zusammenhang mit Wasserzutritt				
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Initialer Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 10	10 – 100		100 – 1'000
Störungszone	< 100	100 – 1'000		> 1'000
Permanenter Wasserzutritt [L/min m]				
Gebirge	< 0.01	0.01 – 0.1	0.1 – 1	1 – 10
Störungszone	< 1	1 – 10	10 – 100	100 – 1'000
Überschreiten der Einleitgrenzwerte	Wahrscheinlich (hoher Sulfat- und Chloridgehalt)			
Versintern von Drainageleitungen	Wahrscheinlich			
Betonexpositions-kategorie	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 2	Klasse 3	Klasse 4	
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 1	Klasse 3	Klasse 4	
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	unwahrscheinlich			
Aspestexposition	extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	100 %	0 %	0 %	0 %

8.5.4 Gb4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

Gb4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb 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 Störungszonen	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke)	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	< 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			
Betonexpositionsklasse	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Gesundheitliche Auswirkungen				
	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaubbelastung	35 %	65 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 3	Klasse 4	Klasse 0	
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	unwahrscheinlich			
Aspestexposition	extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabrasivität	Kaum abrasiv	Abrasiv	Sehr abrasiv	Extrem abrasiv
	35 %	60 %	5 %	0 %

8.5.5 Gb5 (Opalinuston)

Gb5 (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 Störungszonen	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke) Wahrscheinlich (Bauten auf Lagerebene)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerke) Wahrscheinlich (Bauten auf Lagerebene)	Möglich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Störungszonen des Typs III	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Bauten auf Lagerebene)	Extrem unwahrscheinlich (Schachtbauwerk) Wahrscheinlich (Bauten auf Lagerebene)	Wahrscheinlich	Ablösungen bis mehrere m³ möglich
Druckhaftes Gebirge ohne Störungszone	Wahrscheinlich		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	< 0.01			0.01 – 0.1
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-kategorie	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Korrosion von metallischen Einbauten	Erhöhtes Korrosionspotenzial			
Gesundheitliche Auswirkungen				
	Klein	Mittel	Gross	
Quarzfeinstaubbelastung	0 %	100 %	0 %	
	Wahrscheinlich	Möglich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich
Gesundheitliche Auswirkungen durch die Temperatur	Klasse 4	Klasse 2	Klasse 1	Klasse 0
Explosionsgefahr von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen	Klasse 0	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Gesundheitliche Auswirkungen durch Schwefelwasserstoff	Extrem unwahrscheinlich			
Aspestexposition	Extrem unwahrscheinlich			
Andere Gefahren				
Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials	Schwermetalle	Kohlenwasserstoffe	Asbest	
	Unwahrscheinlich	Unwahrscheinlich	Extrem unwahrscheinlich	
Geisteinsabradierbarkeit	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 fünf ingenieurgeologische Homogenbereiche unterschieden:

- Hb1 entspricht der Unteren Süsswassermolasse und dem Siderolithikum.
- Hb2 entspricht den «Felsenkalken» + «Massenkalk».
- Hb3 fasst die Schwarzbach- und die Villigen-Formation zusammen.
- Hb4 umschliesst die Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinustons.
- Hb5 entspricht dem Opalinuston.

Gruppe	Formation	Lithologie	Meter MD	lithologische Einheiten	Trennflächen-Einheiten	hydrogeologische Einheiten	geomechanische Einheiten	Verkarstungs-Einheiten	Gefährdungs-bilder	Baugrundmodelle
Quartär										
Untere Süsswassermolasse			100	Li1	Te1	Hy1	Gm1	Ka1	Gb1	Hb1
Siderolithikum			200	Li2						
Malm	«Felsenkalken» + «Massenkalk»		300	Li3	Te2	Hy2	Gm2	Ka2	Gb2	Hb2
	Schwarzbach-Fm.			Li4						
	Villigen-Fm.		400	Li5				Ka3	Gb3	Hb3
	Wildegg-Fm.			Li6			Gm3			
Dogger	Wutach-Fm. bis «Murchisonae-Oolith-Fm.»		500	Li7	Te3	Hy3	Gm4	Ka4	Gb4	Hb4
	Opalinuston		600	Li8	Te4	Hy4	Gm5	Ka5	Gb5	Hb5
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 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

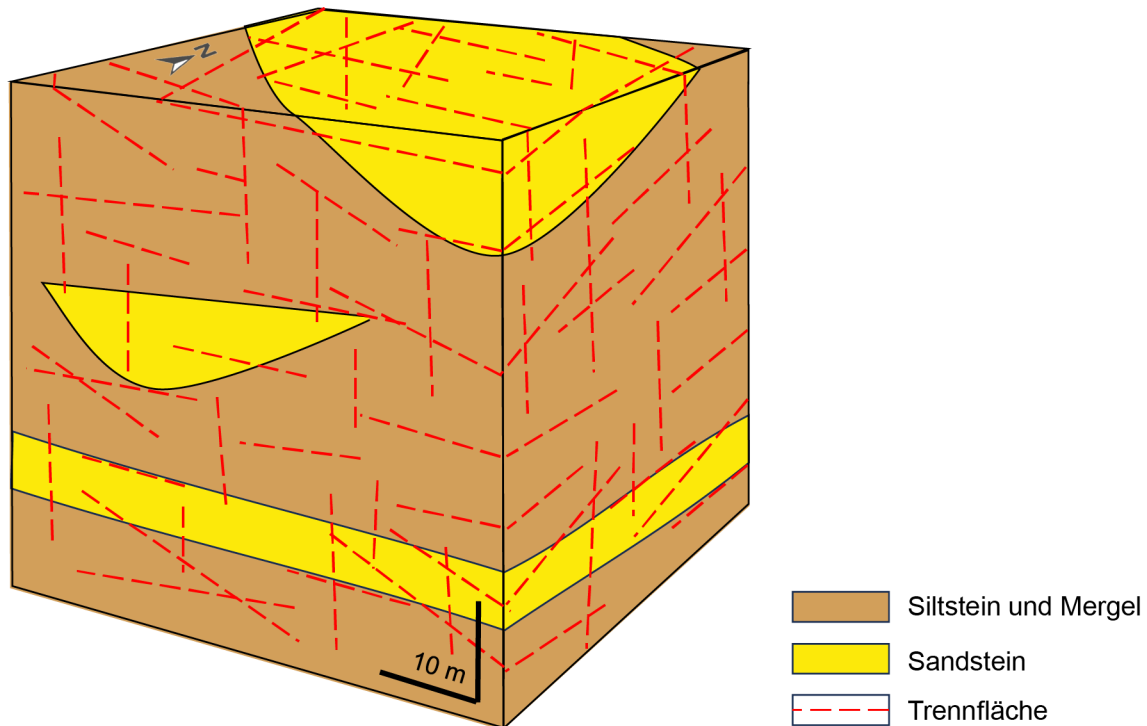


Fig. 9-2: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb1 (Untere Süsswassermolasse und Siderolithikum)

9.1.1.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb1 umschließt die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum und wird nur beim Bau der Zugangsbauwerke aufgeföhren (Lüftungsschacht: -13 bis -190 m).

Er besteht aus einer mehrheitlich grob geschichteten Wechsellagerung aus vorwiegend Sandsteinen (z. T. schlecht verfestigt) und Siltsteinen sowie Mergeln und Konglomeraten (Kapitel 3). Die Einheit wird als nicht verkarstungsfähig betrachtet (Kapitel 7).

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 zu erwartenden Eigenschaften dieser Gebirgsbereiche entsprechen Störungzonen in wenig kompetenten Gesteinseinheiten (Kap. 4.3.1.2).

Aus hydrogeologischer Sicht weist der Homogenbereich eine grosse räumliche Heterogenität auf (Kapitel 5). Die Untere Süsswassermolasse und das Siderolithikum zeigen eine eher geringe hydraulische Durchlässigkeit (Aquitard), wobei die Untere Süsswassermolasse mit Sandsteinrinnen durchsetzt ist, die Eigenschaften von lokalen Porenaquiferen haben können. Die Bergwässer weisen erhöhte Chlorid- und Sulfatkonzentrationen auf.

In den TBO wurden für den Homogenbereich Hb1 keine geotechnischen Laborversuche durchgeführt. Naturgemäss ist eine grosse Variabilität und räumliche Heterogenität der geomechanischen Eigenschaften zu erwarten. Sie reichen von schlecht verfestigten, lockergesteinsähnlichen bis zu härteren karbonatreichen Lagen und weisen geringe bis mittlere Gesteinsfestigkeiten auf.

9.1.1.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

- Druckhaftes Gebirge möglich, in Störungszonen wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.1.2).
- Anfahren von kohäsionsarmen Gesteinseinheiten mit der Gefahr von Einbrüchen von lockergesteinsartigem Material möglich (vgl. Kap. 8.1.3).
- Bautechnisch relevante Wasserzutritte (initial 10 – 100 L/min m möglich) (vgl. Kap. 8.2.1).
- Aufbereitung von chlorid- und sulfatreichen Bergwässern wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.2.2).
- Ausgasung von Methan und höheren Kohlenwasserstoffen in geringer Konzentration während einer kurzen Zeit wahrscheinlich resp. über eine längere Zeit möglich (vgl. Kap. 8.3.1).
- Geogene Verunreinigung des Ausbruchmaterials möglich (vgl. Kap. 8.4.2).

9.1.1.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb1 wurde in den TBO durchbohrt. Jedoch wurden diese Abschnitte zerstörend gebohrt und beim Bohrloch-Logging, abgesehen von der Temperatur, auch nicht messtechnisch erfasst. Für die Angaben zu diesem Bereich wurden weitgehend Angaben und Erfahrungen aus benachbarten Projekten herangezogen. Dies und die grosse räumliche Heterogenität der Eigenschaften dieser Einheit erlauben nur eine hinweisende Prognose für die geplanten Schachtstandorte.

Die Prognosesicherheit wird als ausreichend beurteilt für eine stufengerechte Beurteilung der ingenieurgeologischen Gebirgsverhältnisse. Eine Erhöhung der Prognosesicherheit sowie eine Reduktion der erwarteten Bandbreiten der Eigenschaftswerte ist mittels Erkundungsmassnahmen an den Schachtstandorten zu erwarten.

9.1.2 Hb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

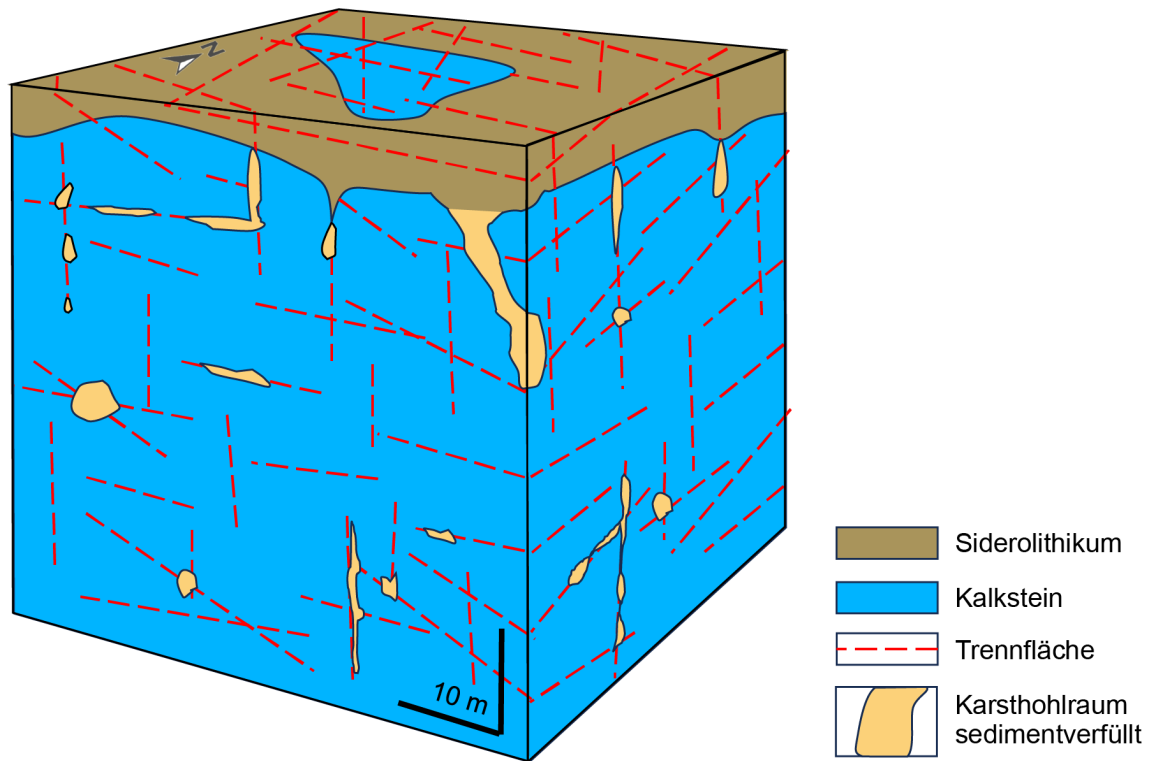


Fig. 9-3: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb2 («Felsenkalke» + «Massenkalk»)

9.1.2.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb2 umschließt die «Felsenkalke» + «Massenkalk» und wird nur beim Bau der Zugangsbauwerke aufgefahen (Lüftungsschacht: -190 bis -327 m).

Er besteht aus grob geschichtetem bis massigem Kalkstein (Kapitel 3) und zeigt eine Überprägung durch eine Paläo-Verkarstung (Kapitel 7).

Der Homogenbereich weist eine mittel- bis weitständige Gebirgsdurchtrennung auf (Kapitel 4).

Im Bereich des Betriebsschachts wurde im Homogenbereich Hb2 eine Störungszone seismisch kartiert. An den anderen Schachtstandorten wurden seismisch keine Störungzonen kartiert. Dies schließt nicht aus, dass seismisch nicht kartierte Störungzonen angetroffen werden können. Die erwarteten Eigenschaften dieser Gebirgsbereiche entsprechen Störungzonen in kompetenten Gesteinseinheiten (Fig. 4-4).

Die räumliche Verteilung der Hohlräume der Paläo-Verkarstung ist stark heterogen, wobei angenommen werden kann, dass in den oberen Zehnermetern der Einheit die Karsthohlraum-dichte höher ist und mit der Tiefe abnimmt. Ausserdem ist eine erhöhte Karströhrendichte im Bereich der seismisch kartierten Störungszonen zu erwarten. Der Durchmesser der Karsthohlräume kann einige Zentimeter bis wenige Meter betragen, im Extremfall auch mehr. Es wird davon ausgegangen, dass die Karsthohlräume mit dichten, siltig-sandigen Sedimenten verfüllt sind. Es kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass auch nicht oder teilverfüllte Karsthohlräume vorkommen können.

Aus hydrogeologischer Sicht ist der Homogenbereich Teil des Malm-Aquifers (Kapitel 5). Es handelt sich hierbei um einen Trennflächenaquifer. Die vorhandenen Karsthohlräume haben keine oder nur lokal eine Bedeutung für die Hydrodynamik des Aquifers, da die Hohlräume weitgehend mit Sedimenten verfüllt sind. Das Vorkommen allfälliger nicht kartierter Störungszonen kann lokal die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen. Die Bergwässer weisen erhöhte Chlorid- und Sulfatgehalte auf.

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

9.1.2.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

- Bautechnisch relevante Wasserzutritte (initialer Wasserzutritte aus Störungszonen 10 – 100 L/min m möglich; karstbedingte Wasserzutritte werden nicht erwartet, können aber nicht vollständig ausgeschlossen werden) (vgl. Kap. 8.2.1).
- Mögliches Anfahren von grösseren mit Sediment verfüllten Karsthohlräumen, die zu Sedimenteintritten oder «Mixed face»-Bedingungen führen können (vgl. Kap. 8.1.3).
- Aufbereiten von chlorid- und sulfatreichen Bergwässern wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.2.2).
- Ausgasung von Methan und höhere Kohlenwasserstoffe in geringer Konzentration während einer kurzen Zeit wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.3.1).

9.1.2.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb2 wurde in den TBO durchbohrt. Jedoch wurden die oberen Abschnitte zerstörend erbohrt und beim Bohrloch-Logging, abgesehen von der Temperatur, auch nicht messtechnisch erfasst (vgl. z. B. Fig. 7-1). Die gekernteten und geloggteten Bohrabschnitte beginnen erst einige Zehnermeter unterhalb des Tops. Deshalb sind für den oberen Abschnitt des Homogenbereichs nur Beobachtungen des Bohrkleins und keine Messungen aus den TBO verfügbar.

Es kann dennoch davon ausgegangen werden, dass die gewonnenen Informationen aus den gekernteten Bereichen weitgehend für den ganzen Homogenbereich repräsentativ sind. Die Verkarstungseigenschaften weisen naturgemäss eine grosse räumliche Heterogenität auf. Deshalb sind die Erkenntnisse aus den TBO diesbezüglich nur als hinweisend zu bewerten. Dies ungeachtet, dass der obere Bereich, der stärker verkarstet erwartet wird, nicht gekernt wurde.

Die Prognosesicherheit wird als ausreichend beurteilt für eine stufengerechte Beurteilung der ingenieurgeologischen Gebirgsverhältnisse. Eine Erhöhung der Prognosesicherheit sowie eine Reduktion der erwarteten Bandbreiten der Eigenschaftswerte sind mittels Erkundungsmassnahmen an den Schachtstandorten zu erwarten. Dies trifft im Besonderen auf die Beurteilung der Karstgefährdungen sowie die möglichen störungszonenbedingten Wasserzutritte zu (Nagra 2022a).

9.1.3 Hb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)

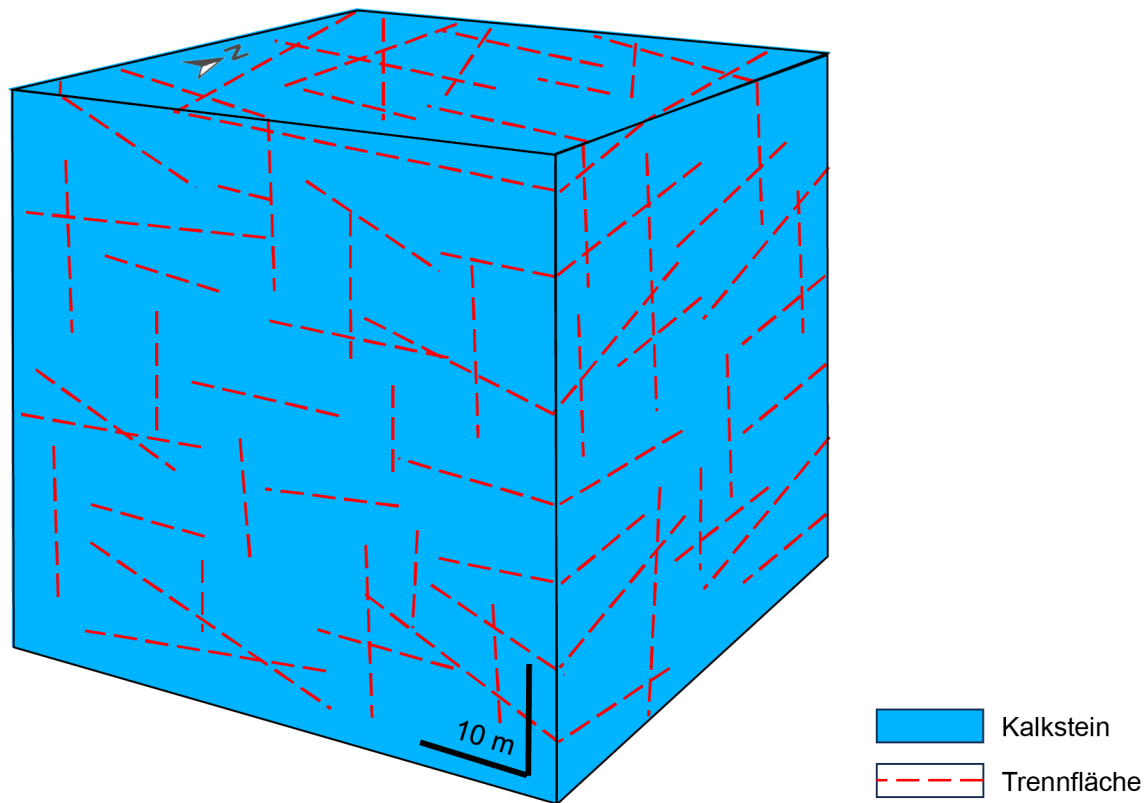


Fig. 9-4: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb3 (Schwarzbach- und Villigen-Formation)

9.1.3.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb3 umschließt die Schwarzbach- und Villigen-Formation und wird nur beim Bau der Zugangsbauwerke aufgefahen (Lüftungsschacht: -327 bis -412 m).

Er besteht aus grob geschichteten bis massigen, vorwiegend reinen Kalksteinen (Kapitel 3). Die Kalksteine werden zwar als verkarstungsfähig betrachtet, sind jedoch nicht verkarstet (kein Vorkommen von Karsthohlräumen; Kapitel 7). Durch Lösungsprozesse lokal erweiterte Trennflächen können vorkommen, diese werden jedoch nicht als Karsthohlräume definiert.

Der Homogenbereich weist eine mittel- bis weitständige Gebirgsdurchtrennung auf (Kapitel 4).

Im Bereich des Betriebsschachts wurde im Hb3 eine Störungszone seismisch kartiert. An den anderen Schachtstandorten wurden seismisch keine Störungszone kartiert. Dies schliesst nicht aus, dass seismisch nicht kartierte Störungszone angetroffen werden können. Die erwarteten Eigenschaften dieser Gebirgsbereiche entsprechen Störungszone in kompetenten Gesteinseinheiten (Fig. 4-4).

Aus hydrogeologischer Sicht ist der Homogenbereich Teil des Malm-Aquifers (Kapitel 5). Es handelt sich um einen Trennflächenaquifer. Das Vorkommen allfälliger nicht kartierter Störungszonen kann lokal die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen. Die Bergwässer weisen erhöhte Chlorid- und Sulfatgehalte auf.

In den TBO wurde der Homogenbereich Hb3 für geomechanische Versuche beprobt. Die Messresultate in den verschiedenen Bohrungen sind vergleichbar und weisen hohe Gesteinsfestigkeiten auf (vgl. Kapitel 6).

9.1.3.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdungen sind zu betrachten:

- Bautechnisch relevante Wasserzutritte (initialer Wasserzutritte aus Störungszonen 10 – 100 L/min m möglich) (vgl. Kap. 8.2.1).
- Aufbereiten von chlorid- und sulfatreichen Bergwässer wahrscheinlich (vgl. Kap. 8.2.2).

9.1.3.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb3 wurde in den TBO zum Teil gekernt und geloggt. Die aus den TBO gewonnenen Erkenntnisse sind aus heutiger Sicht auch für die geplanten Schachtstandorte übertragbar. Die grösste Ungewissheit besteht in Bezug auf das mögliche Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen und damit verbundener Wasserzutritte.

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

9.1.4 Hb4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

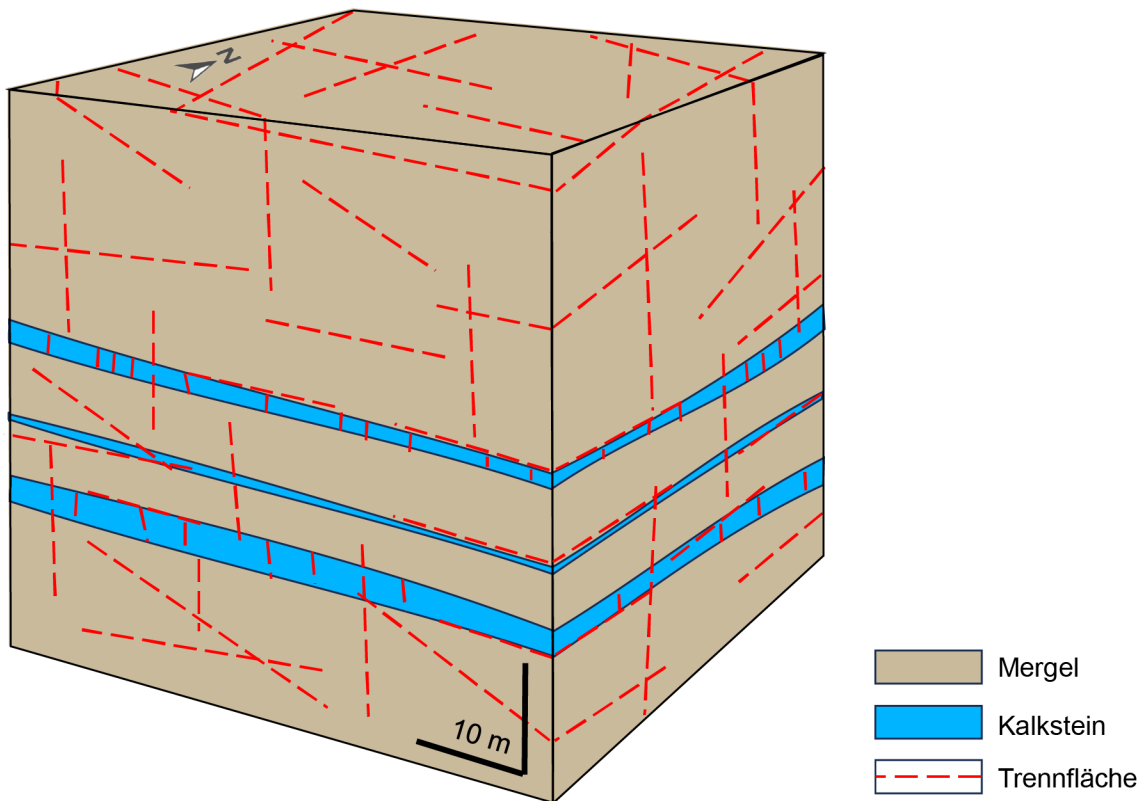


Fig. 9-5: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb4 (Wildegg-Formation und Dogger oberhalb Opalinuston)

9.1.4.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb4 fasst die Wildegg-Formation und den Dogger oberhalb des Opalinustons zusammen. Der Bereich wird nur beim Bau der Zugangsbauwerke durchörtert (Lüftungsschacht: -412 bis -512 m).

Der Homogenbereich besteht aus dünn bis grob geschichteten teils sandigen Kalk- und Tonmergeln (Kapitel 3). Vereinzelt können bis zu mehrere Meter mächtige karbonatreiche Schichten vorkommen. Die Gesteine des Homogenbereichs werden 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 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 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 Störungszonen die hydraulische Durchlässigkeit in den kompetenten Lagen erhöhen können. Für Störungszonen in den wenig kompetenten Lagen wird keine signifikante Erhöhung der Durchlässigkeit erwartet.

In den TBO wurde der Homogenbereich Hb4 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).

9.1.4.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

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

9.1.4.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb4 wurde in den TBO vollständig gekernt und geloggt. Die aus den TBO gewonnenen Erkenntnisse sind aus heutiger Sicht auch für die geplanten Schachtstandorte übertragbar. 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 an den Schachtstandorten weiter reduziert werden könnten.

9.1.5 Hb5 (Opalinuston)

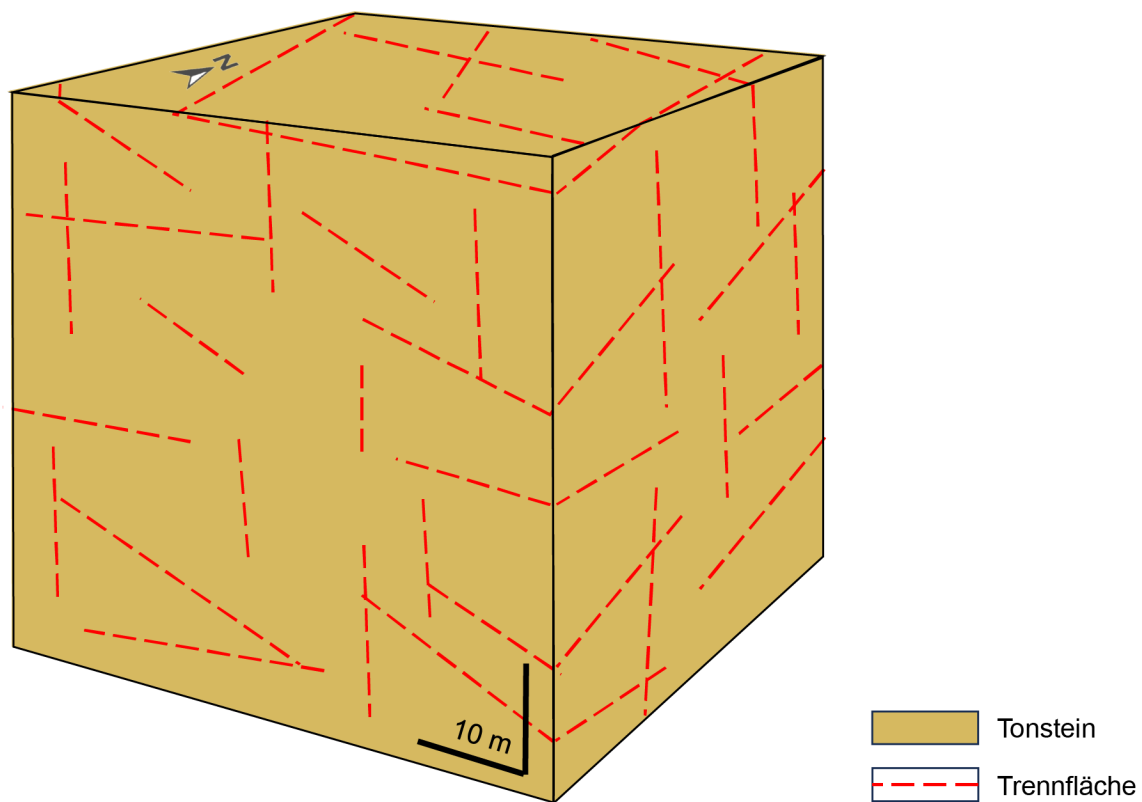


Fig. 9-6: Schematische Darstellung des Baugrundmodells für ein Schachtbauwerk im ingenieurgeologischen Homogenbereich Hb5 (Opalinuston)

9.1.5.1 Allgemeine Gebirgsbeschreibung

Der ingenieurgeologische Homogenbereich Hb5 entspricht dem Opalinuston. Der Bereich wird beim Bau der Zugangsbauwerke durchfahren (Lüftungsschacht: -512 bis -605 m) und ist der Bereich, in dem alle Bauwerke auf Lagerebene liegen werden.

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 weitständige Gebirgsdurtrennung 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. 4.3.1.2).

Aus hydrogeologischer Sicht handelt es sich beim Homogenbereich Hb5 um eine sehr gering-durchlässige Einheit (Kapitel 5), weshalb keine Wasserzutritte zu erwarten sind. Es wird nicht erwartet, dass allfällig vorkommende, nicht kartierte Störungzonen die hydraulische Durchlässigkeit erhöhen.

In den TBO wurde der Homogenbereich Hb5 intensiv für geomechanische Versuche beprobt. Die Messresultate in den verschiedenen Bohrungen sind vergleichbar und weisen eine geringe Gesteinsfestigkeit auf (vgl. Kapitel 6).

9.1.5.2 Hauptgefährdungen

Als ingenieurgeologische Hauptgefährdung sind zu betrachten:

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

9.1.5.3 Prognosesicherheit

Der Homogenbereich Hb5 wurden 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 sowohl 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 an den Schachtstandorten 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 durchfahren 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 die Baugrundeigenschaften der Unteren Süsswassermolasse, das Vorkommen von Karsthohlräumen in den «Felsenkalken» + «Massenkalk» sowie das Vorkommen von seismisch nicht kartierten Störungszonen.

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. (1996): Höhlen der Region Basel - Laufen. Speläologisches Inventar der Schweiz, Band III. Speläologisches Inventar der Schweiz. Speläologische Kommission der Schweizerischen Akademie der Naturwissenschaften, Basel.
- Bitterli, T., Graf, H.R., Matousek, F. & Wanner, M. (2000): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 1050 Zurzach. Erläuterungen. Schweizerische geologische Kommission.
- 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.
- 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.
- Ebert, A., Gregorczyk, L., Hägerstedt, E. & Gysi, M. (2021): TBO Bülach-1-1: Data Report Dossier V Structural Geology. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08 V.
- Eisenlohr, T. & Müller, P. (2015): Standortareal ZNO-6b-SMA-HAA-Kombi Jäckli AG, Zürich Geologisch-geotechnischer Bericht: Baugrundbeschreibung und geotechnische Beschreibung der oberflächennahen Abschnitte der Zugangsbauwerke (Rampe, Schächte). Nagra Arbeitsbericht NAB 15-51.
- 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 Ingenieurgeologen 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*.
- Frantz, Y., Collon, P., Renard, P. & Viseur, S. (2021): Analysis and stochastic simulation of geometrical properties of conduits in karstic networks. *Geomorphology* 377, 107480. DOI: 10.1016/j.geomorph.2020.107480.
- 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*.
- 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.
- Guendon, J.-L. (1984): Les paléokarsts des Alpes occidentales du Trias à l'Éocène. *Revue de Karstologie et de Spéléologie Physique* 4/1, 2-10. DOI: 10.3406/karst.1984.938.
- Haldimann, P., Graf, H.R. & Jost, J. (2017): *Geologischer Atlas der Schweiz Blatt 1071 Bülach Erläuterungen*, Bundesamt für Landestopografie swisstopo.
- Hänni, R. & Ris, H. (2017): *Geologische und geotechnische Terminologie der Schweizer Molasse = Terminologie géologique et géotechnique des formations de la Molasse suisse = Geological and Geotechnical Rock Terminology of the Swiss Molasse formation*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK.
- Hayer, J., Fanger, L., Firat Lüthi, B. & Vogt, T. (2022): *Sondierbohrung Benken Langzeitbeobachtung 2021: Dokumentation der Messdaten*. *Nagra Arbeitsbericht NAB 22-15*.

- Hoover, R.A. (2003): Geophysical Choices for Karst Investigations. *In*: Beck, B. F. (Hrsg.): Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Ninth Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Huntsville, Alabama, United States, September 6-10, 2003. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 529-538.
- 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*.
- Kaehr, D. & Gysi, M. (2021): TBO Trüllikon-1-1: Data Report Dossier II Core Photography. *Nagra Arbeitsbericht NAB 20-09 II*.
- 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. (2022a): Borehole MAR1-1 (Marthalen-1-1): Fluid Sampling and Analytical Hydrochemical Data Report. *Nagra Arbeitsbericht NAB 21-25*.
- Lorenz, G.D., Pechstein, A. & Stopelli, E. (2022b): Borehole TRU1-1 (Trüllikon-1-1): Fluid Sampling and Analytical Hydrochemical Data Report. *Nagra Arbeitsbericht NAB 21-24*.
- Lowe, D.J. (1992): The origin of limestone caverns: in inception horizon hypothesis. PhD Thesis. Manchester Polytechnic, UK.
- Luo, J., Monninkhoff, B. & Becker, J. (2013): Hydrogeological model Zürich Nordost and Südanden. *Nagra Arbeitsbericht NAB 13-24*.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. (1985): Swelling pressure calculated from mineralogical properties of a Jurassic opalinus 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.
- Maqueda, A., Renard, P. & Filipponi, M. (2023): Karst conduit size distribution evolution using speleogenesis modelling. *Environ Earth Sci* 82/14. DOI: 10.1007/s12665-023-11035-6.

- 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.
- 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 Raton (Florida).
- Nagra (2001): Sondierbohrung Benken: Untersuchungsbericht : Textband. Nagra Technischer Bericht NTB 00-01.
- 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 (2022a): Beherrschung möglicher karstbedingter Wasserzutritte während des Baus und Betriebs eines geologischen Tiefenlagers. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-41.
- Nagra (2022b): Module der Lagerarchitektur. Nagra Arbeitsbericht NAB 22-35.
- Nagra (2022c): 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 23-19 (*in Bearb.*): Interpretation 3D Seismic Survey Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 23-19.
- Nagra NAB 24-19 (*in Bearb.*): Stress field in the siting regions Jura Ost, Nördlich Lägern and Zürich Nordost. Nagra Arbeitsbericht NAB 24-19.
- Nagra NTB 19-02 (*in Bearb.*): Die Tiefengrundwässer in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland: Beschaffenheit, Herkunft und unterirdische Verweilzeit. Nagra Technischer Bericht NTB 19-02.
- Osborne, R. (2003): Paleokarst: cessation and rebirth? Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers.
- 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.
- Sachs, O. & Schneider, N. (2012): Auftreten von Kohlenwasserstoffen in der Region des Jura-Südfuss (Abschnitt Aarwangen – Baden). Nagra Arbeitsbericht NAB 12-32.
- Schwarz, R., Schlickenrieder, L. & Vogt, T. (2021a): TBO Bülach-1-1 Data Report: Dossier VII Hydraulic Packer Testing. Nagra Arbeitsbericht NAB 20-08 VII.
- Schwarz, R., Schlickenrieder, L. & Vogt, T. (2021b): 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.
- Waber, H.N., Heidinger, M., Lorenz, G. & Traber, D. (2014): Hydrochemie und Isotopenhydrogeologie von Tiefengrundwässern in der Nordschweiz und im angrenzenden Süddeutschland. Nagra Arbeitsbericht NAB 13-63.
- 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.