
Bericht Nr. 1422053.1

Lütschental, Kraftwerk Jungfraubahn

Lütschental, Kraftwerk Jungfraubahn

**Geologische Beurteilung der Sackung am Tschingelberg
und deren Einfluss auf den Freispiegelstollen**

Zollikofen, 26. Januar 2023

GEOTEST AG

BERNSTRASSE 165
CH-3052 ZOLLIKOFEN

T +41 (0)31 910 01 01
F +41 (0)31 910 01 00

zollikofen@geotest.ch
www.geotest.ch

Autor(en)	Bearbeitete Themen
Marc Schori	Gesamter Bericht
Elia Sutter	Stollenbegehung
Willi Hubacher	Stollenbegehung
Supervision	Visierte Inhalte
Reto Hänni	Korreferat
Rachel Riner	Korreferat
Hinweise	

GEOTEST AG

Rachel Riner

Marc Schori

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	4
2.	Untersuchungsperimeter.....	5
3.	Vorhandene Unterlagen.....	6
4.	Ausgeführte Untersuchungen	6
5.	Grundlagen	6
5.1	Geologie	6
5.2	Freispiegelstollen und Druckleitung	8
5.3	Messergebnisse Druckleitung 2014 – 2022.....	8
5.4	Sanierungsarbeiten am Freispiegelstollen.....	9
6.	Geländebefunde.....	9
6.1	Geologische Phänomene, Kartierung	9
6.2	Deformationen im Stollen und Stollenverlauf.....	10
7.	Geologisches Modell der Sackung Tschingelberg.....	11
7.1	Abgrenzung von Sackungspaketen	11
7.2	Geologisches Profil	13
8.	Gefährdungsbilder und Modelle	15
8.1	Gefährdungsbild 1	15
8.2	Gefährdungsbild 2.....	15
8.3	Gefährdungsbild 3.....	16
9.	Gefahrenbeurteilung und Kausalität	17
10.	Massnahmenempfehlungen / Weiteres Vorgehen.....	18

Anhänge

- [1] Geologische Karte mit Phänomenen
- [2] Karte der Phänomene mit dokumentierten Stollendeformationen
- [3] Tabelle Stollenverlauf mit Rissdokumentation
- [4] 3D Blockmodell der Sackung

1. Einleitung

Die Jungfraubahn AG betreibt ein über 100-jähriges Wasserkraftwerk in Lütschental (Baubeginn 1906, Inbetriebnahme 1908). Die Turbinen werden mit Wasser aus der Schwarzen Lütschine angetrieben, das über einen Zuleitungsstollen (Freispiegelstollen) zu einem Wasserschloss und schliesslich in eine Druckleitung läuft. Die komplette Infrastruktur des Kraftwerks Lütschental liegt in einer grossräumigen und substabilen Sackung, die sich vom Tschingelberg (unterhalb der Felswände des Itramenbergs) bis hinunter zur Schwarzen Lütschine erstreckt (Abbildung 1). Strukturelle Schäden an der Druckleitung, dem Wasserschloss sowie am Zuleitungsstollen sind Zeugen von Rutschbewegungen. 2012 wurde eine geologische Beurteilung im Perimeter der Druckleitung ausgeführt [1] und darauf basierend ein geodätisches Monitoring initiiert. Seither werden jährlich Messungen durchgeführt.

Die Jungfraubahn AG hat ebenfalls begonnen den Freispiegelstollen des Kraftwerks abschnittsweise zu sanieren. Weitere Sanierungsetappen werden in Abhängigkeit der festgestellten Schadensbilder definiert.

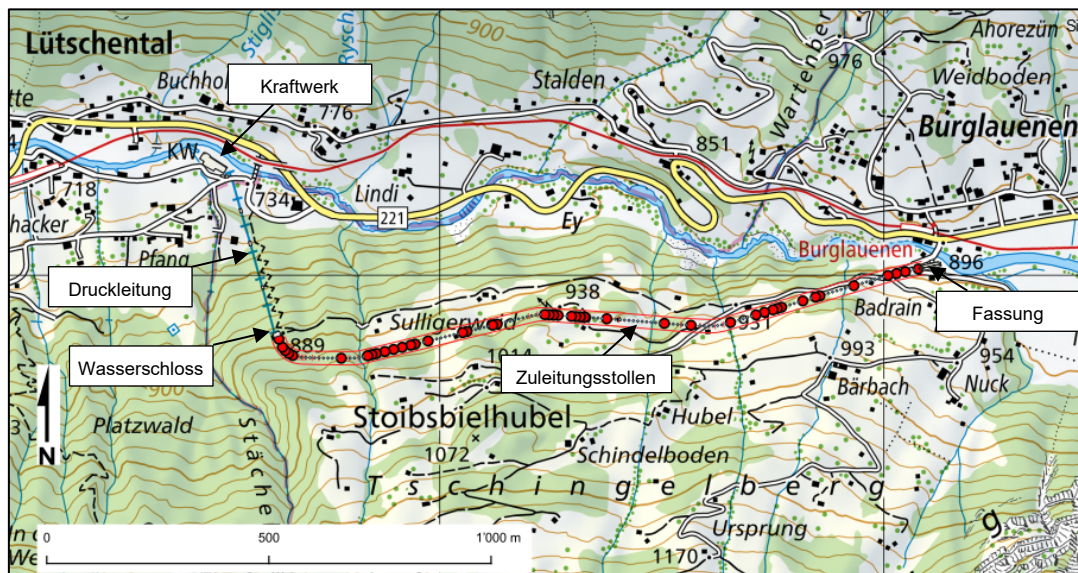


Abbildung 1 Übersicht der Kraftwerksinfrastruktur zwischen Burglauenen, Lütschental und Tschingelberg. Die roten Punkte entlang des Zuleitungsstollens markieren dokumentierte Stollenschäden.

Im Namen der Jungfraubahn AG wurden wir am 02. Juni 2022 von Emch+Berger angefragt, Angaben zur geologischen Situation, dem Schichtaufbau sowie den

Rutschbewegungen und daraus abgeleiteten Gefährdungsbilder für den Freispiegelstollen auszuarbeiten. Zudem muss die Mittelspannungsleitung im Bereich «Stalden» (von der «Ey» bis «Rotmoosweidli», siehe Anhang 1) ausgebaut werden (Nachtrag von Frau Jolanda Eggen, 23. Sept. 2022). Der Ausbau erfolgt entweder als Weitspannleitung oder Kabelleitung und soll ebenfalls in der Gefahrenbeurteilung miteinbezogen werden.

2. Untersuchungsperimeter

Der untersuchte Perimeter erstreckt sich vom Fusse der steilen Felswände des Itramenbergs (Höhenkote ca. 1400 m ü. M.) bis hinunter zur Schwarzen Lütschine, zwischen Burglauenen und der Gemeinde Lütschental (Höhe des Flusses zwischen ca. 730 m bis 900 m ü. M.). Dies umfasst die gesamte grossräumige Sackungsmasse des Tschingelbergs, für welche das ungefähre Ausmass durch INSAR Daten (e.g. BAFU OFEV / INSAR -Datenmodell des Kantons Bern 2014) bekannt ist (Untersuchungsperimeter ca. 2 km²).

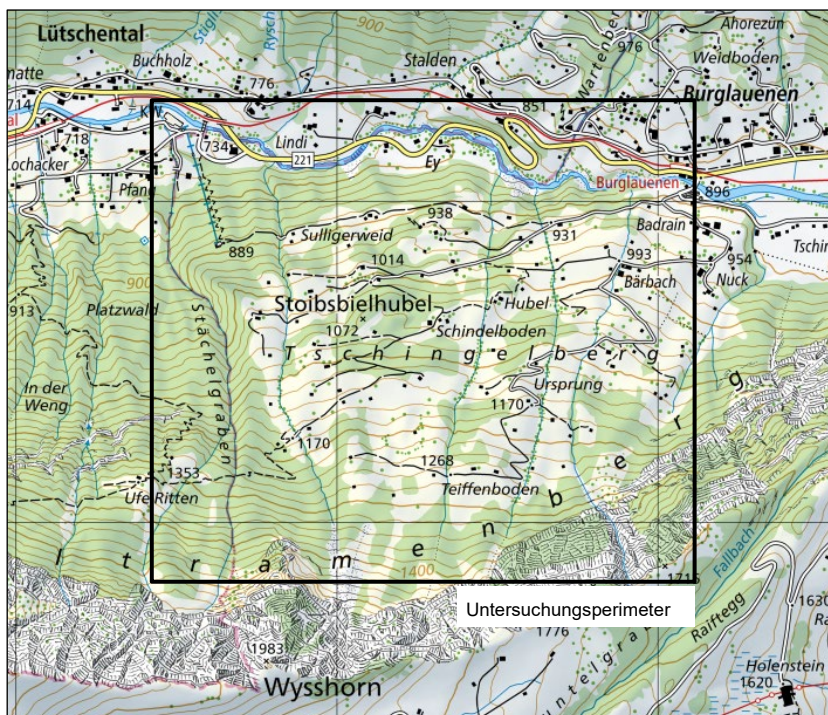


Abbildung 2 Untersuchungsperimeter

3. Vorhandene Unterlagen

- [1] GEOTEST AG (2012), Lütschental, KW Jungfraubahnen, Geologisches Gutachten, Bericht Nr. 1412108.1, Zollikofen
- [2] GEOTEST AG (2014), Lütschental, Rutschbewegungen Druckleitung JB, Begehung vom 04.11.2014, Aktennotiz Nr. 1412108.2, Zollikofen.
- [3] E. Frôté: Das Elektrizitätswerk Burglauen der Jungfraubahn, Sonderdruck der Schweizerischen Bauzeitung Bd. 53, Nr. 20-21 (1909). vgl. StAB P.C. 94
- [4] Graphische Anstalt O. Collioud & Co. (1958), Karte Stollenverlauf KW Lütschental 1:10'000 (Kopie des Originalplanes 1908), Unterseen.
- [5] Swisstopo, H. Guenzler-Seiffert (1937), Profil 6 1:50000 – GA25 Kartenblatt Grindelwald – Meiringen (LK 1229), Wabern, URL:
https://data.geo.admin.ch/ch.swisstopo.geologie-geologischer_atlas_profile/profile/GA25_013_Plate_I_Section_6.pdf

4. Ausgeführte Untersuchungen

- Grundlagestudium, Erstellen Vorgehenskonzept
- Geologische Fernkartierung mit Auswertung der Rutschphänomene
- Konstruktion charakteristischer, geologischer Profilschnitt
- Räumliche Rekonstruktion des Stollenverlaufs (Verlauf auf Karten, Auswertung Vermessungsdaten und Archivberichten)
- Begehung Stollen, Aufnahme Schadensbilder und geografische Lokalisierung / Orientierung
- Auswertung, qualitative Beurteilung und Skizzierung Gefährdungsbilder/Einwirkungen
- Massnahmeempfehlungen (konzeptionell)

5. Grundlagen

5.1 Geologie

Der Untergrund im Untersuchungsperimeter besteht aus Gesteinen der Wildhorndecke, welche im Gebiet in drei geologische Haupteinheiten unterteilt werden: 1) Bajocien-Sandkalke (Hochstollen-Formation), 2) Aalénien-Eisensandsteine

(Glockhaus-Member der Bommerstein-Formation) und 3) Aalénien/Toarcien-Tonschiefer (Mols-Member der Bommerstein-Formation) [5]. Die Wildhorndecke ist stark verfaultet und intern überschoben, deshalb ist das Schichteinfallen im Untersuchungsperimeter nicht einheitlich. Das geologische Profil durch einen nicht versackten Teil der Talsüdseite (GA25 KB Grindelwald – Meiringen, Guenzler-Seiffert 1937, ca. 1 km westlich des Kraftwerks) zeigt eine Doppelantiklinalstruktur, bestehend aus Eisensandstein und Tonschiefer (Abbildung 3).

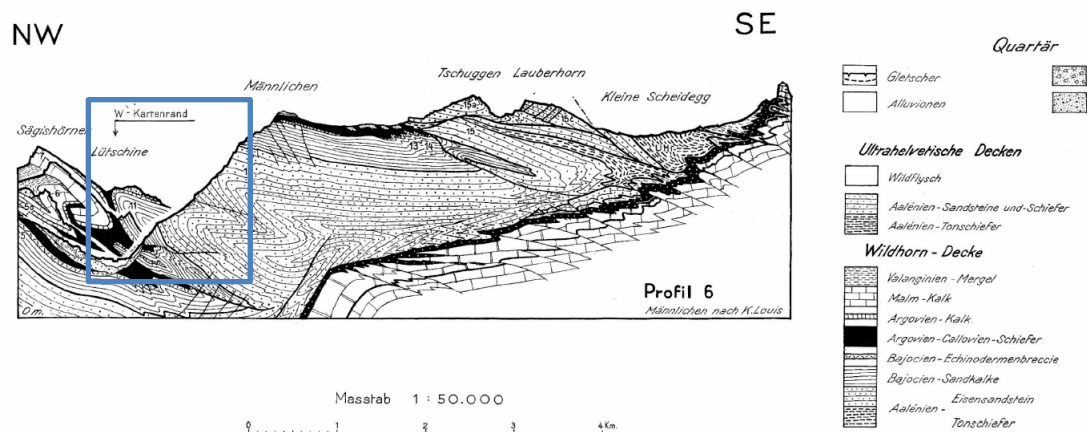


Abbildung 3 Profil aus GA25 LK1229 [5]. Die untersuchte Sackung des Tschingelbergs liegt auf der südlichen Talschulter (markierter Ausschnitt).

Im Bereich des Untersuchungsperimeters (Tschingelberg) sind die Eisensandsteine und Tonsteine tiefgründig versackt. Die Sackungsmassen sind stellenweise aufgeschlossen, vor allem entlang der Schwarzen Lütschine (Front der grossräumigen Sackung, siehe Anhang [1]). Am Tschingelberg sind die Eisensandsteine und Tonschiefer der Sackung meistens nicht aufgeschlossen, sondern bleiben unter Blockschutt, Gehängeschutt, Fels- und Bergsturzmassen, Schuttkegel und Moränenablagerungen verborgen.

Die Talfüllung ist aus Bohrungen bis max. 57 m Tiefe bekannt. Zwischen den Gemeinden Lütschental und Burglauenen sind Fels- und Bergsturzmassen, Murgangablagerungen, sowie fluviatile Ablagerungen der Lütschine dokumentiert (Bohrtiefe max. 20 m). Beim Einlasswehr im Grundacher sind ab einer Bohrtiefe von 25 m Moränenablagerungen dokumentiert. Talabwärts in Gündlischwand wurde bereits ab einer Bohrtiefe von ca. 20 m Moränenablagerungen vorgefunden.

5.2 Freispiegelstollen und Druckleitung

Die Fassung für den Freispiegelstollen befindet sich talaufwärts in Burglauenen, am Grundacher. Über ein Fallenwehr wird Wasser der Schwarzen Lütschine auf ca. 895 m ü. M. gefasst und durch den 1.5 km langen Freispiegelstollen zum Wasserschloss geleitet (Gefälle 2.5 ‰ [3]). Der Zuleitungsstollen verläuft durch den Tschingelberg in einer Tiefe von durchschnittlich ca. 43 m (maximale Tiefe ca. 60 m, Anhang [3]). Der Zuleitungsstollen hat eine Höhe von 2.1 m und eine Breite von 2 m (Abbildung 4). Während der Bauarbeiten wurde erkannt, dass der Stollen ausschliesslich in Bergschutt und «schlechtem Fels» liegt, deshalb wurde er ausgemauert (Wandstärke bis 40 cm) und wasserdicht verputzt [3]. An nassen Stellen wurde das Gewölbe ausserdem mit Dachpappe abgedichtet und eine Steinpackung aufgesetzt [3].

Vom Wasserschloss (Abbildung 1) wird Wasser aus einer Höhe von 889 m ü. M. durch eine oberirdische Druckleitung (Gesamtlänge 424.35 m [3]) zum Kraftwerk im Tal geleitet. Das Kraftwerk steht auf einer Höhe von ca. 727 m ü. M. (Höhenunterschied zum Wasserschloss ca. 162 m).

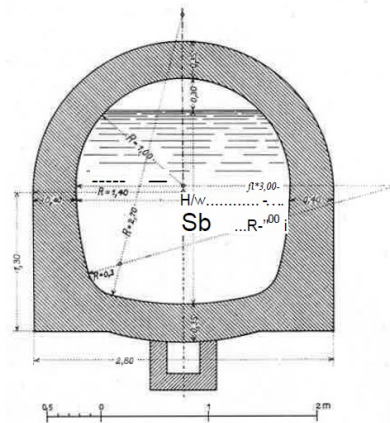


Abbildung 4 Stollenprofil aus [3].

5.3 Messergebnisse Druckleitung 2014 – 2022

Aus der Zwischenbeurteilung 2014 geht hervor, dass sich die Rutschbewegungen im Bereich der Druckleitung und des Wasserschlosses zwischen 2012 – 2014 im Vergleich zu den vorangehenden Jahren verstärkt haben. Die Auswertung der Überwachung 2022 (Emch+Berger) zeigt, dass Bewegungen vor allem bei den Auflagesockeln 18 – 35 sowie dem Wasserschloss (im Wald oberhalb der Horlouwinenweid, Anhang [1]) stattfinden. Erhöhte Bewegungsraten wurden im Jahr 2014 gemessen (bis max. 14 mm/Jahr horizontal). Erhöhte gemessene Bewegungsraten im Jahr 2022 wurden noch nicht verifiziert, und stehen möglicherweise im Zusammenhang mit einer neuen Messinstrumentation.

5.4 Sanierungsarbeiten am Freispiegelstollen

Um der Abrasion der Tunnelwand entgegenzuwirken, wurde bisher in zwei Sanierungsschritten (Abschnitt 1-300 m und Abschnitt 900-1200 m) der defekte Tunnelverputz mit einem Spezialverputz saniert, der sehr steif ist und der eine hohe Widerstandsfähigkeit aufweist gegenüber der Abrasion durch Sand im Zuleitungswasser. An vielen Stellen entlang des Zuleitungsstollens wurden ausserdem strukturelle Schäden beobachtet (Zug-, Druck- und Schubrisse sowie Abplatzungen). Die Entwicklung der Schadstellen wird seit 2015 jährlich mittels Mörtelsiegel kontrolliert und dokumentiert (Abbildung 1). Entlang der Stollenkurve vor dem Wasserschloss (Abschnitt der als nächstes saniert wird) wurden besonders viele strukturelle Schäden des Stollens festgestellt (mündliche Mitteilung C. Baumann, Emch+Berger AG Bern).

6. Geländebefunde

6.1 Geologische Phänomene, Kartierung

Mit Hilfe von Luftbildern, Höhenmodellen und früheren Kartierungen, konnten geomorphologische Rutschungsmerkmale (Anrisslinien, Nackentälchen und seitliche Scherbereiche) im Untersuchungsperimeter kartiert werden. Anhang [1] enthält die Karte der Phänomene, welche für den vorliegenden Bericht erstellt wurde.

Im Osten des Untersuchungsperimeters (Bereich Ursprung, Bärbach, Burglauenen in Abbildung 2) finden sich mehrheitlich überwachsene Blockschuttfelder, die Zeugen von grossen Felsstürzen sind (dokumentierte Ereignisse 1984, StoreMe Nr. BE-1984-S-00006, Gesamtkubatur 2000 m³; 2018, StoreMe-Nr. BE-2018-S-00022, Gesamtkubatur 100 m³). Unterhalb der Flur Ursprung wird aufgrund der Geländeform eine Stirnmoräne vermutet, die von Sturzblöcken überdeckt ist. Unterhalb der Felswände des Itramenbergs sind überdies mehrere Schuttkegel dokumentiert. Im Bereich der genannten Sturz- und Gletscherablagerungen war die Identifikation von Rutschungsphänomenen nur begrenzt möglich (Problem der Überlagerung von geomorphologischen Strukturen).

6.2 Deformationen im Stollen und Stollenverlauf

Der Stollenverlauf (X / Y Position) wurde anhand von historischen Karten ([3], [4]) sowie den Positionen der oberflächlichen Stolleninfrastruktur (Fallenwehr und Wasserschloss) rekonstruiert. Die Höhenlage des Freispiegelstollens wurde entsprechend der Anfangshöhe des Fallenwehrs und eines Gefälles von 0.25% errechnet [3]. Der rekonstruierte Stollenverlauf (X/Y) ist in den Anhängen [1] und [2] in Kartensicht dargestellt. Anhang [3] enthält eine Tabelle für den Freispiegelstollen, in der die Position, sowie die errechnete Überdeckung und absolute Höhe pro 10 m Tunnelabschnitt angegeben sind. Ausserdem sind kurze Deformationsbeschreibungen aus den jährlichen Kontrollen angegeben, sowie die Beschreibungen aus der Begehung der GEOTEST 2022 inklusive Orientierung und Einfallen von Störflächen (grafisch dargestellt in Anhang [2]).

Zusammengefasst ergeben sich aus den Stollendokumentationen folgende Schadensbildtypen:

- Querrisse rechtwinklig oder leicht schräg zum Tunnel und 90° steil. Zwischen Tm 1400 – 1500 sind flachere Einfallwinkel von 30° und 70° dokumentiert.
- Längsrisse parallel zum Tunnel mit Einfallen zwischen 20°-90° gegen Norden
- Abplatzungen und Haarrisse, relativ diffus
- Längs- und Querrisse kombiniert

7. Geologisches Modell der Sackung Tschingelberg

7.1 Abgrenzung von Sackungspaketen

Anhand der Kartierung wurden vier übergeordnete Sackungspakete identifiziert (Abbildung 5). Diese können jeweiligen weiter unterteilt werden in kleinere Schollen oder Rutschkörper.

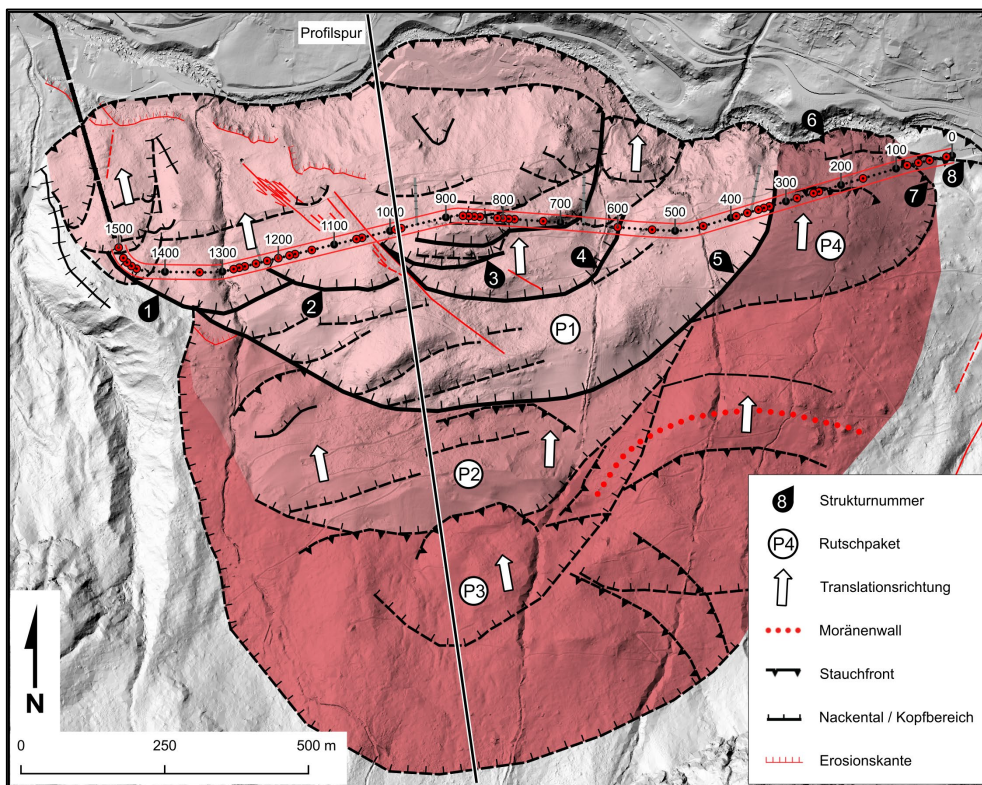


Abbildung 5 Unterteilung der Sackung Tschingelberg. Dokumentierte Störungen im Stollen sind mit roten Punkten entlang des Stollens gekennzeichnet. Strukturnummern sind angegeben für Nackentälchen / Stauchfronten, welche mit grosser Wahrscheinlichkeit mechanisch gekoppelt sind mit dokumentierten Störungen im Stollen. P1-P4: Übergeordnete Sackungspakete, Strukturnummern 1-5: Nackentälchen innerhalb P1 und 6-8: Stauchfronten innerhalb P4.

Der Stollen verläuft durch die Sackungspakete P1 und P4 (Abbildung 5). Innerhalb dieser Pakete konnten einzelne Stauchfronten und Nackentälchen identifiziert werden, die mit dokumentierten Störungen im Stollen in Zusammenhang stehen (mechanische Kopplung über Gleit- resp. Scherflächen). Der Stollen liegt durchschnittlich ca. 43 m unter Terrain (Anhang [3]). Die Gleitflächen der Sackungspakete

fallen zwischen ca. 30° bis max. 45° gegen Norden ein (Einfallen ergibt sich geometrisch aus den kartierten Phänomenen und der Geländetopografie). Aus diesem Grund überlagern sich die dokumentierten Stollenschäden und Oberflächenstrukturen nicht auf der Karte (e.g. Anhang [2]). *Um die Zusammenhänge ersichtlich zu machen, sind Profile (Abbildung 6) oder 3D-Modelle erforderlich.* Anhand der ausgewerteten geologischen Karte (Anhang [1]) sind hier Nackentälchen / Stauchfronten und Stollendeformationen in Zusammenhang gestellt und tabellarisch aufgezeigt (Tabelle 1).

Tabelle 1 Verbindung von kartierten Oberflächenstrukturen mit Störungen in Stollenabschnitten. Strukturnummern gemäss Abbildung 5.

Nr.	Flurname bei Ausbiss	Tunnelabschnitt (Tunnelmeter Tm, von – bis)	Verursachender Strukturtyp (in Tiefe)
1	Spitzestein - Rosshalta	1230 m – 1500 m	Gleit- und Scherfläche nahe Kopfbereich
2	Wiggen	1040 m – 1220 m	Gleit- und Scherfläche nahe Kopfbereich
3	Dücheltor (- Tschorren)	~780 m – 1030 m	Gleit- und Scherfläche nahe Kopfbereich
4	Steinmasgüöt	Bei 600 m (und 1030 m)	Scherflächen nahe Kopfbereich
5	Haisimatta	330 m – 590 m	Vor allem Scherfläche nahe Kopfbereich
6	(Schwarze Lütschine)	120 m – 320 m	Frontalbereich basale Gleitfläche
7	Schnäggenrain	80 m – 120 m	Gleitfläche bei Frontalbereich
8	Grundacher	10 m – 70 m	Gleitfläche bei Frontalbereich

7.2 Geologisches Profil

Die Spur des geologischen Profils durch die Sackungsmasse läuft durch Tunnelmeter 990 m (siehe Anhang [1]). Die mechanische Aufteilung der Sackungsmasse ist entsprechend der kartierten Phänomene (Anhang [1]) und interpretierten Sackungspakete (Abbildung 5) vorgenommen. Die Geologie unterhalb der basalen Gleitfläche der Sackungsmasse ist am Tschingelberg nicht aufgeschlossen. Es kann aber der Schichtverlauf aus dem GA25 verwendet werden (Abbildung 3), welcher auf das Profil in Abbildung 6 projiziert ist. Aus dieser Projektion geht keine Korrelation von Schichteinfällen mit den Sackungspaketen hervor.

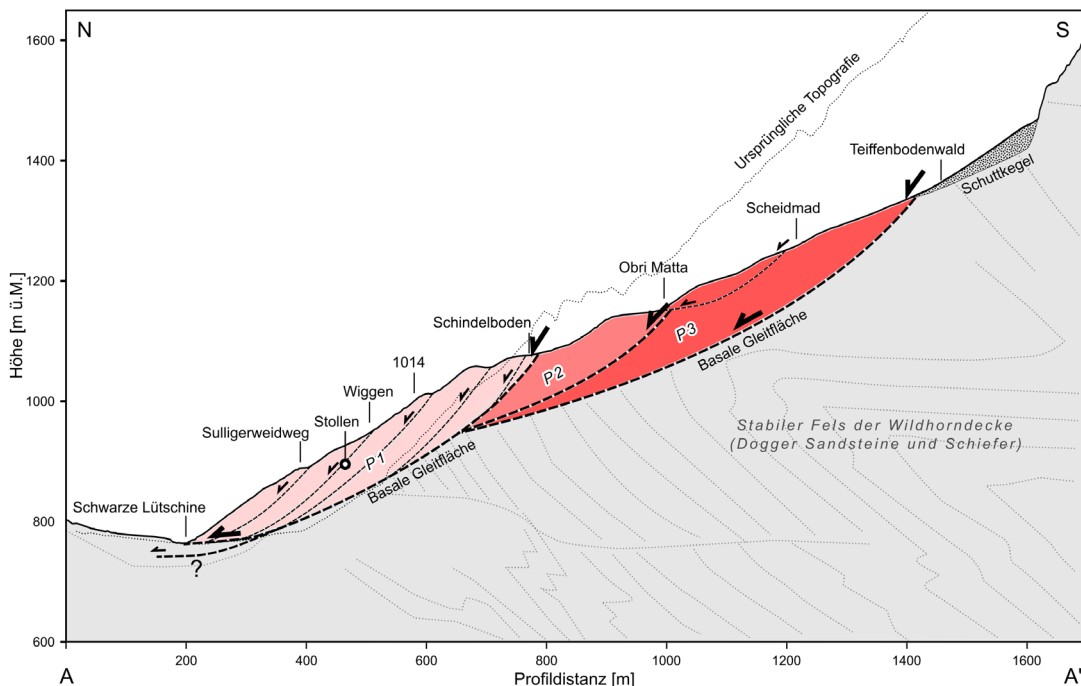


Abbildung 6 Geologisches Profil durch Tunnelmeter 990 m (Profilsur in Abbildung 5). Das Schichteinfälle im geologischen Untergrund (grauer Bereich) ist aus dem Geologischen Atlas (Abbildung 3) bekannt.

Die drei Sackungspakete (P1 bis P3) überschneiden sich im geologischen Profil beim Schindelboden (Abbildung 6). Die Interpretation der Überschneidungsstrukturen ist mit Unsicherheiten verbunden. Massgebend für die Stollendeformationen ist aber lediglich Sackungspaket P1 (und P4 östlich des Profils).

Die Tiefe der basalen Gleitfläche im Profil (Abbildung 6) wird auf 110 m für die oberste Sackungsmasse P3 geschätzt (Messung rechtwinklig zur Gleitfläche). Das

unterste Sackungspaket P1 hat immer noch eine interpretierte Mächtigkeit von 90 m. *Der Stollen liegt somit komplett über der Hauptgleitfläche (Stollentiefe max. ca. 60 m), quert aber Gleitflächen (und seitliche Scherbereiche) von untergeordneten Schollen.*

Das Profil (Abbildung 6) verdeutlicht, dass die Gleitflächen an der Geländeoberfläche etwas steiler nach Norden einfallen (ca. 45°), während sie in der Tiefe flacher werden und in die basalen Gleitflächen einbiegen. Beim angeschnittenen Tunnelmeter 990 liegt der Stollen 41.4 m unter Terrain (Anhang [3]). Der Stollen verläuft durch die Gleitfläche einer Scholle, die an der Terrainoberfläche zum Nackental bei der Flur Wiggen führt (Abbildung 6). D.h. Stollendeformationen bei Tunnelmeter 990 sind mechanisch an Hangbewegungen bei der Flur Wiggen gekoppelt.

Im Tal bei der Schwarzen Lütschine sind keine Stauchfronten aufgeschlossen. Das Flussbett wird aber stellenweise von der Talsüdseite «weggedrückt» (Abbildung 5), was darauf schliessen lässt, dass die Gleitfläche der Sackung bis in die Sedimentfüllung des Talbodens läuft (Abbildung 6), zumindest im Bereich der Ey und möglicherweise auch bei Horlauenen (Anhang [1]).

8. Gefährdungsbilder und Modelle

Aus den beobachteten Stollendeformationen und den interpretierten Sackungsmassen, lassen sich drei grundsätzliche Typen von Gefährdungsbildern ableiten:

8.1 Gefährdungsbild 1

Das Tunnelsegment liegt nicht auf oder nahe von Scher- oder Gleitflächen, aber innerhalb einer Sackungsmasse. Das Segment wird somit mit der Sackungsmasse bewegt. Innerhalb der einzelnen Schollen können Bewegungsvektoren mit leicht unterschiedlichen Orientierungen auftreten. Das Tunnelsegment bleibt mehrheitlich intakt (stabilisiert durch die dicken Wände), lokale (unvorhersehbare) Druckeinwirkungen führen zu diffusen Schadensbildern, die i.d.R. schwach ausgeprägt sind (e.g. lokale *Abplatzungen an der Tunnelwand*).

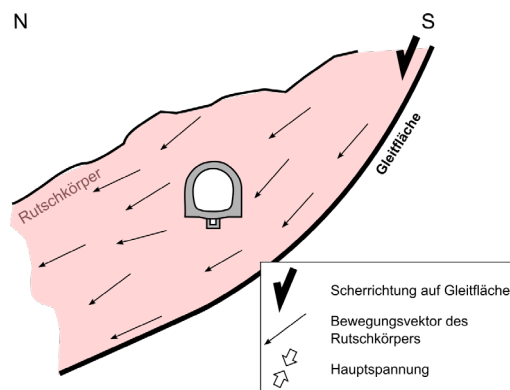


Abbildung 7 Skizze der Situation 1, führt zu diffusen Schadensbildern im Stollen.

8.2 Gefährdungsbild 2

Das Tunnelsegment verläuft durch eine Gleitfläche (oder befindet sich nahe davon). Entlang des Gleithorizonts finden grosse Differentialbewegungen statt. Im Stollen führt dies zu *Längsrissen parallel zur Gleitfläche*. Das Tunnelsegment könnte ausserdem gegen Norden verkippt werden.

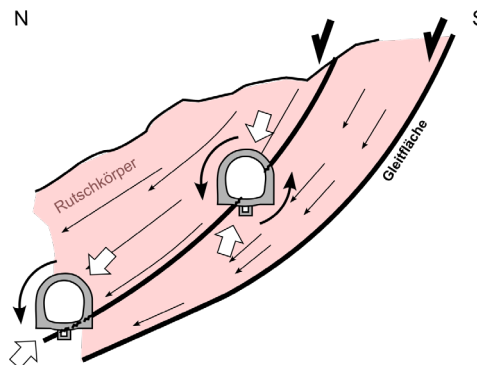


Abbildung 8 Skizze der Situation 2, führt zu Längsrissen im Stollen.

8.3 Gefährdungsbild 3

Die Gleitflächen der Sackungspakete beschreiben im Normalfall eine konkave Form im Querschnitt (Ost-West Profil). Seitlich gehen die Gleitflächen in steilste-hende Scherflächen über (Abbildung 9a). Beim Durchqueren eines Sackungspa-kets passiert der Stollen immer zwei seitliche Scherflächen. An Scherflächen wer-den Stollensegmente «zerschert» und es entstehen Querrisse im Stollen, parallel zu den Scherflächen (die normalerweise schräg zum Stollen stehen, Abbildung 9a).

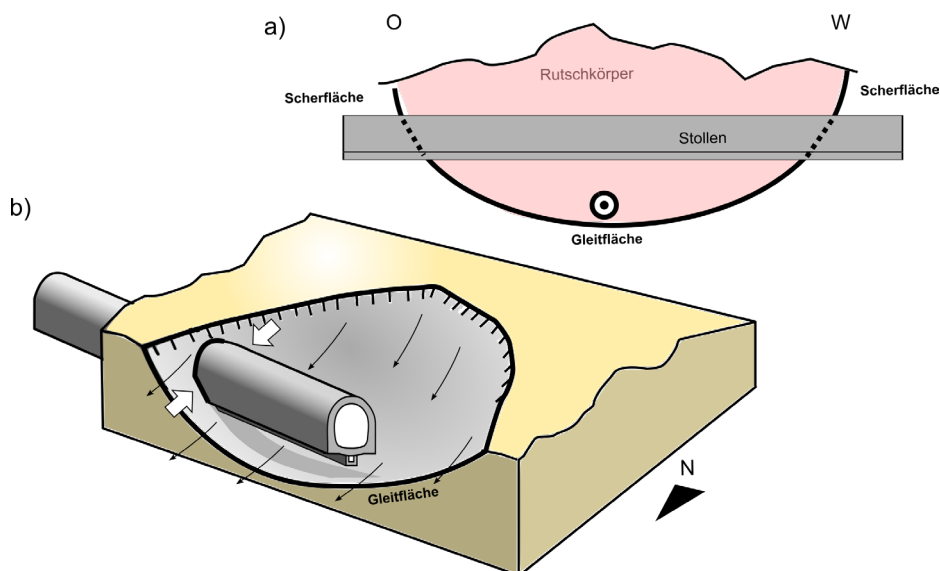


Abbildung 9 Skizze der Situation 3, führt zu Querrissen (mit schrägem Einfallen) im Stollen.

Aus den drei Gefährdungsbildern ergeben sich Mischtypen (e.g. die zu kombinier-ten Quer- und Längsrissen führen). Hauptproblematische Störungen ergeben sich aus den Situationen 2 und 3, welche mit grossen Differentialbewegungen (im Be-reich < 2cm/Jahr, entsprechend den Sackungsraten) verknüpft sind.

9. Gefahrenbeurteilung und Kausalität

Zustand der Sackung: Der Tschingelberg ist eine permanente und grossräumige Sackung, die unterteilt werden kann in untergeordnete Sackungspakete und kleinere Schollen. Rutschbewegungen sind in verschiedenen kritischen Bereichen festzustellen:

- Die Schadensbilder entlang des Freispiegelstollens (und Kontrollen seit 2015) zeigen deutlich, dass der Hang entlang der gesamten Stollenlänge tiefgründig in Bewegung ist. An Schollengrenzen können differentielle Bewegungen von mehreren mm / Jahr auftreten.
- Im Bereich der Druckleitung können Rutschbewegungen oberhalb der Horelouwinenweid bestätigt werden (ab Stütze 18 aufgrund vorläufiger Auswertung der Überwachung per 2022, periodisch > 1 cm/Jahr).
- Ausserdem besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die Flussbiegung im Bereich der Ey durch Hebung an der Sackungsfront verursacht wird (Anhang 1).

Ursachen: Beschleunigte Hangbewegungen am Tschingelberg könnten mit einer Reaktivierung der grossräumigen Sackung durch langanhaltende Starkniederschläge, ausgeprägte Schneeschmelzen sowie Hangfussentlastungen infolge Tiefenerosion der Schwarzen Lütschine bei Unwetterereignissen (analog Unwetter 1999 und 2005) zusammenhängen. Im Raum Grindelwald sowie Lauterbrunnen wurden in den letzten Jahren an verschiedenen Stellen verstärkt Rutschbewegungen beobachtet (siehe Beurteilung [2]).

Entwicklung: Es ist davon auszugehen, dass die Hangbewegungen auch zukünftig anhalten und zu Schäden an Infrastrukturen (Freispiegelstollen, Wasserschloss und Druckleitung) führen. Während Reaktivierungsphasen können sich Infrastrukturschäden verstärken.

Gefahr: Deformationen des Stollens in Folge von anhaltenden Rutschbewegungen führen zu zwei Hauptproblemen (betrieblich und geologisch):

- Der Verputz bricht auf und durch das Stollenwasser werden einzelne Verputzstücke abgerissen und in die Kraftwerksturbinen gespült. Dies verursacht technische Probleme im KW Lütschental (erhöhter baulicher / betrieblicher Unterhalt).
- Durch Stollenschäden kann Wasser in den Hang und insbesondere in Rutschgleitflächen gelangen. Wassereintritt in Gleitflächen ist ein

unmittelbarer Förderfaktor für Rutschbewegungen und kann zu erheblichen Beschleunigungen von Sackungsbewegungen führen.

Auch im Talbereich bei der Ey sind differentielle Bewegungen von $> 1 \text{ cm / Jahr}$ zu erwarten beim Übergang vom Sackungsgebiet zum stabilen Terrain. Die aktuelle Mittelspannungsleitung (Freileitung) durchquert diesen Bereich, kann aber die Differentialbewegungen weitgehend aufnehmen (siehe Verlauf in Anhang [1]).

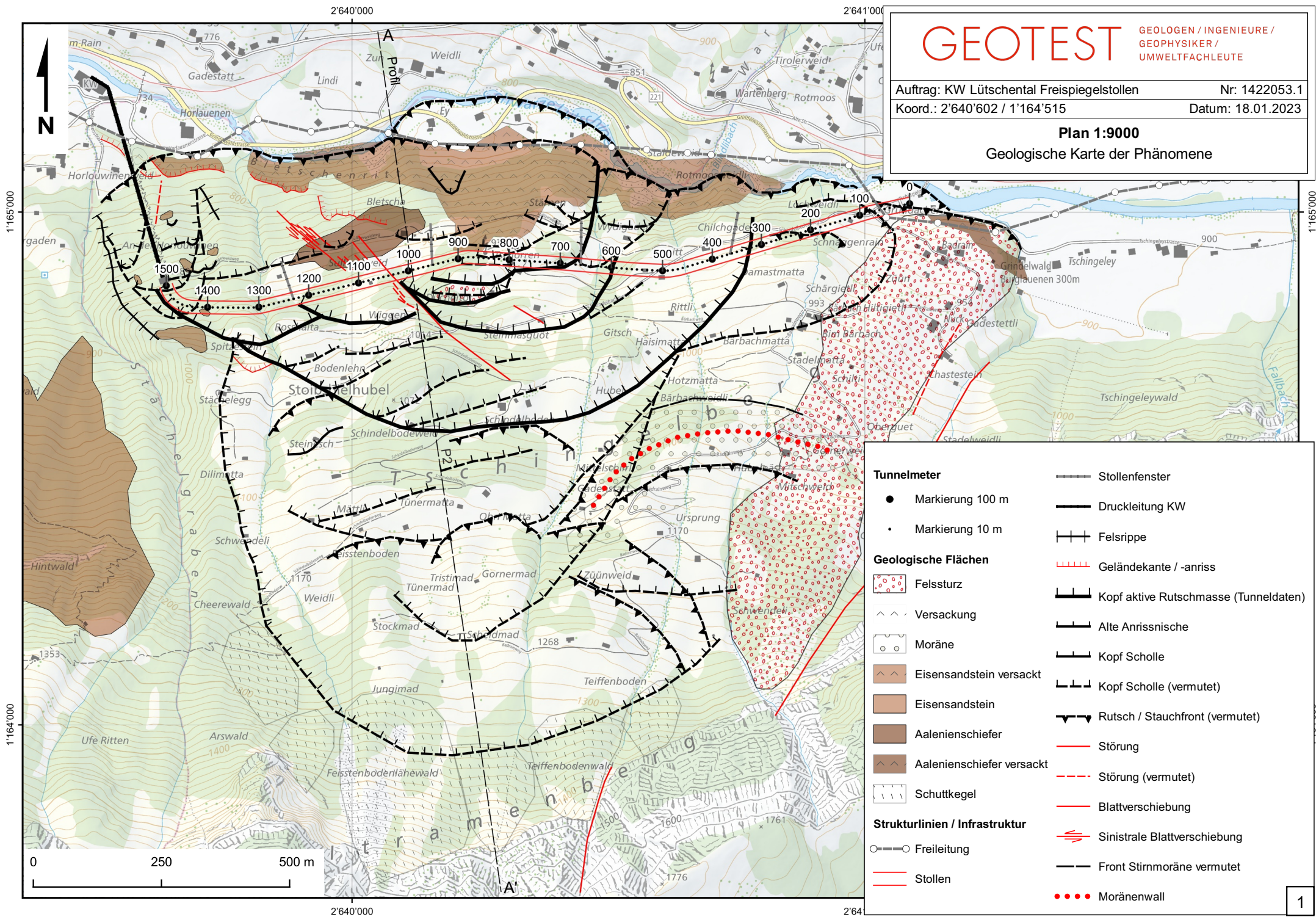
10. Massnahmenempfehlungen / Weiteres Vorgehen

Der Betrieb des Kraftwerkes ist nicht unmittelbar durch Hangbewegungen gefährdet, es ergeben sich aber vermehrt Probleme mit dem Zustand der Stollenwände. Aus der Analyse der Hangbewegungen ergeben sich folgende Massnahmevorschläge:

- Hangbewegungen sind tiefgründig (bis ca. 90 m); Massnahmen zur Verminderung der Bewegungen sind unverhältnismässig und nicht realisierbar.
- Bauliche Massnahmen an bestehenden Bauwerken zur Schadensverhinderung sind unverhältnismässig.
- Wir empfehlen Massnahmen in den betrieblichen und baulichen Unterhalt zu integrieren:
 - Schadensbilder im Stollen regelmässig dokumentieren und Mörtelsiegel anbringen (jährlich oder nach aussergewöhnlichen Unwetterereignissen) wie seit 2015 etabliert
 - Jährliche punktuelle Unterhaltsarbeiten ausführen (Risse schliessen, Verputzarbeiten)
 - Beim Sanieren von grösseren Stollensegmenten kann ggf. der Einsatz einer flexiblen Abdichtung abgeklärt werden
 - Geodätische Messungen im Bereich Druckleitung und Wasserschloss weiterführen
 - Ggf. Erweiterung des Messnetzes entlang der Stollenachse (an Oberflächenstrukturen in Verbindung mit Stollendeformationen, siehe Abbildung 5 und Tabelle 1) z.B. durch GPS-Messungen.
- Eine detaillierte Schadenskartierung (Stollenabwicklung und Längenprofil) erachten wir als zielführend. Dazu ist eine Neuvermessung mittels Laserscanaufnahme des Stollens durch den Geometer erforderlich. Diese dient zugleich als Nullmessung um die Entwicklung zu überwachen (in

Kombination mit Folgemessungen z.B. nach langanhaltenden Regenfällen, spätestens 2033).

- Integration der Neuvermessung in das räumliche Rutschmodell zum besseren Verständnis des Schadensmechanismus und Justierung des kinematischen Prozessmodells.
- Den geplanten Ausbau der Mittelspannungsleitung im Bereich «Ey» und «Rotmoosweidli» empfehlen wir oberirdisch (als Weitspannleitung) zu führen, um die mit der Sackung verbundenen Scherbewegungen im Tal aufnehmen zu können.



GEOTEST

GEOLOGEN / INGENIEURE /
GEOPHYSIKER /
UMWELTFACHLEUTE

Auftrag: KW Lüttschental Freisiegelstollen

Nr: 1422053.1

Koord.: 2°64'602 / 1°164'515

Datum: 18.01.2023

Plan 1:9000
Geologische Karte der Phänomene

Tunnelmeter

- Markierung 100 m
- Markierung 10 m

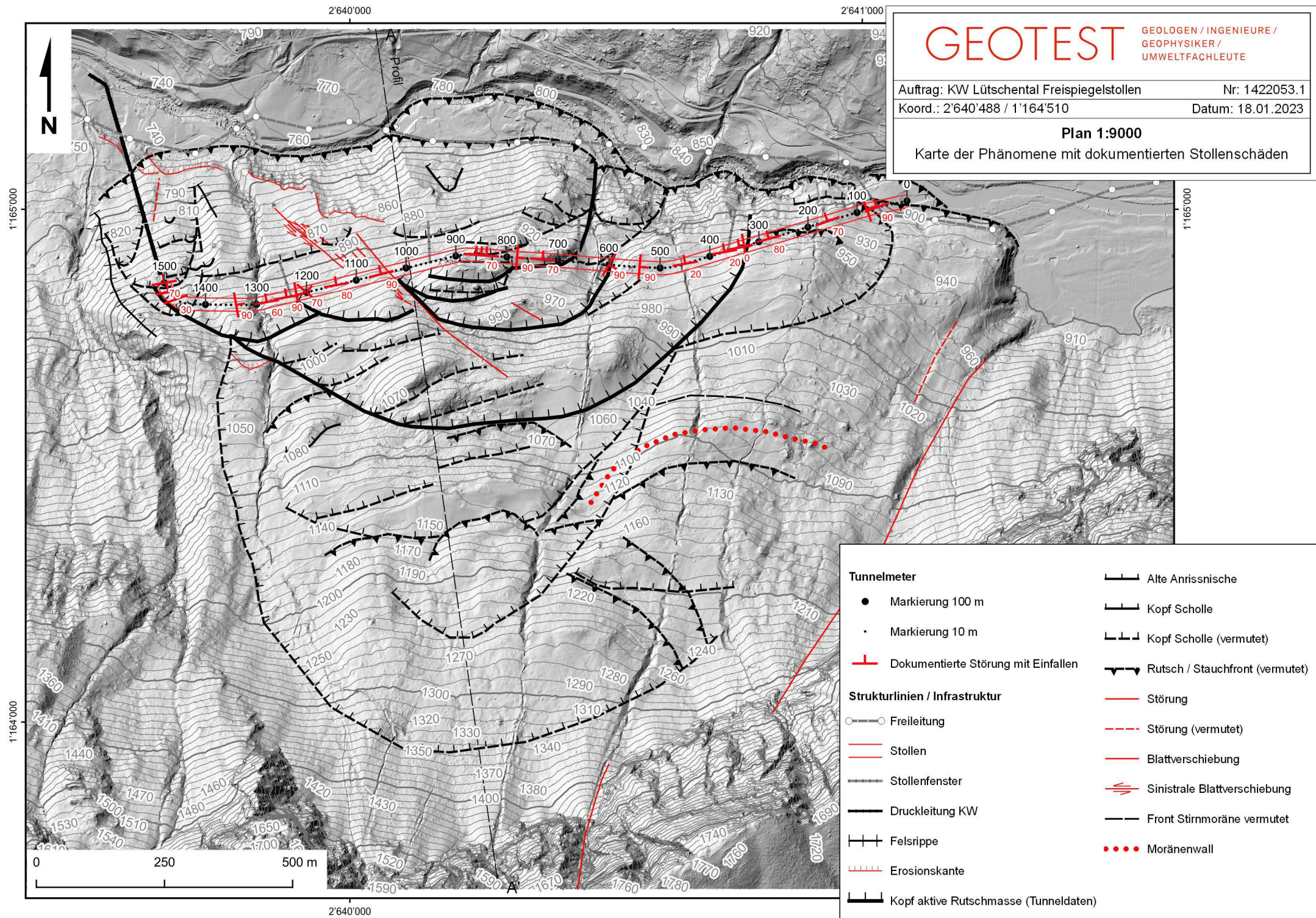
Geologische Flächen

- Felssturz
- Versackung
- Moräne
- Eisensandstein versackt
- Eisensandstein
- Aalenienschiefer
- Aalenienschiefer versackt
- Schuttkegel

Strukturlinien / Infrastruktur

- Freileitung
- Stollen

- Stollenfenster
- Druckleitung KW
- Felsrippe
- Geländekante / -anriss
- Kopf aktive Rutschmasse (Tunneldaten)
- Alte Anrissnische
- Kopf Scholle
- Kopf Scholle (vermutet)
- Rutsch / Stauchfront (vermutet)
- Störung
- Störung (vermutet)
- Blattverschiebung
- Sinistrale Blattverschiebung
- Front Stirnmoräne vermutet
- Moränenwall



Anhang 3 - Stollenverlauf mit Rissdokumentation

Der Stollenverlauf (X/Y Koordinaten) wurde mittels historischer Karten erstellt. Die Stollenhöhe [m ü.M.] basiert auf der Annahme eines gleichmässigen Gefälles von 0.25% zwischen dem Einlasswehr in Burglauenen und dem Wasserschloss auf dem Tschingelberg. Resultate der jährlichen Kontrollen seit 2015 (durch Ingenieur) sowie Beobachtungen der Begehung durch GEOTEST 2022 im Stollen sind kurz beschrieben. Die Orientierung (Azimuth und Dip) der Hauptstörung ergeben sich aus Beobachtungen im Tunnel (GEOTEST 2022) in Bezug auf den rekonstruierten Stollenverlauf. Tm: Tunnelmeter, Az.: Azimuth (Norden = 0°, Osten = 90°), Dip: Einfallwinkel der Störung (Vertikal = 90°)

Tm [m]	X	Y	Sohle		Jährliche Kontrolle Beschreibung	Begehung 2022 GEOTEST Beschreibung	Orient.	
			Tiefe [m]	Höhe [m ü.M.]			Az.	Dip
0	2641087.4	1165016.2	5.1	889.5				
10	2641077.6	1165014.2	5.9	889.5	Decke 2020			
20	2641067.8	1165012.1	7.3	889.5				
30	2641058.1	1165010.0	8.7	889.5				
40	2641048.3	1165007.9	10.1	889.4	2021 Riss am Boden	Mehrere feuchte Stellen		
50	2641038.5	1165005.8	11.6	889.4				
60	2641028.7	1165003.8	12.8	889.4	Decke Riss Siegel 2020	Längsriss	340	90
70	2641018.9	1165001.7	13.6	889.4				
80	2641009.2	1164999.4	14.6	889.3		Querriss	70	90
90	2640999.6	1164996.6	16.0	889.3				
100	2640990.0	1164993.7	17.7	889.3				
110	2640980.5	1164990.8	21.3	889.3				
120	2640970.9	1164988.0	24.5	889.2		Längsrisse zw. Tm 120 und 140		
130	2640961.3	1164985.1	26.3	889.2				
140	2640951.7	1164982.3	29.3	889.2				
150	2640942.1	1164979.4	31.2	889.1				
160	2640932.5	1164976.6	32.4	889.1		Längsrisse nahe Decke zw. Tm 160 bis 165	340	70
170	2640922.9	1164973.7	32.5	889.1				
180	2640913.4	1164970.9	30.6	889.1				
190	2640903.8	1164968.0	34.9	889.0				
200	2640894.2	1164965.1	36.4	889.0				
210	2640884.6	1164962.3	37.0	889.0				
220	2640875.0	1164959.4	39.0	889.0				
230	2640865.4	1164956.6	40.9	889.0				
240	2640855.9	1164953.7	41.5	888.9	Vertiefungen 2019			
250	2640846.3	1164950.9	44.9	888.9	Vertiefungen 2019			
260	2640836.7	1164948.0	48.2	888.9				
270	2640827.1	1164945.2	50.1	888.9				
280	2640817.5	1164942.3	53.6	888.8		Längsrisse nahe Decke	345	80
290	2640807.9	1164939.4	57.2	888.8				
300	2640798.4	1164936.6	58.9	888.8				
310	2640788.8	1164933.7	57.5	888.8				
320	2640779.2	1164930.9	56.4	888.7				
330	2640769.6	1164928.0	54.6	888.7		Mehrere Querrisse zw. Tm 340 und 330	80	90
340	2640760.0	1164925.2	53.4	888.7	Risse 2020	Kurze Längsrisse an Wand	350	0
350	2640750.4	1164922.3	52.9	888.6	Risse 2020			
360	2640740.9	1164919.5	52.2	888.6				
370	2640731.3	1164916.6	53.5	888.6	gerissen versintert 2020	Kurze, seitliche Längsrisse	350	20
380	2640721.7	1164913.8	53.1	888.6				
390	2640712.1	1164910.9	52.1	888.5	gerissen versintert 2020			
400	2640702.5	1164908.0	52.2	888.5				
410	2640692.9	1164905.2	52.4	888.5				
420	2640683.4	1164902.3	53.5	888.5				
430	2640673.8	1164899.5	55.8	888.5				
440	2640664.2	1164896.6	55.7	888.4				
450	2640654.6	1164893.8	56.3	888.4		Seitliche Längsrisse, versintert	350	20
460	2640645.0	1164890.9	58.0	888.4				
470	2640635.3	1164888.5	57.3	888.4				
480	2640625.5	1164886.8	57.3	888.3				
490	2640615.6	1164885.7	57.6	888.3				
500	2640605.6	1164885.5	57.9	888.3				
510	2640595.6	1164885.9	58.6	888.3				
520	2640585.6	1164886.3	58.9	888.2				
530	2640575.6	1164886.9	58.8	888.2				
540	2640565.6	1164887.4	58.0	888.2		Querriss	95	90
550	2640555.6	1164888.0	57.6	888.1				
560	2640545.6	1164888.5	57.5	888.1				

570	2640535.7	1164889.3	48.1	888.1		Längsrisse seitlich zw. Tm 560 und 580		
580	2640525.7	1164890.1	41.4	888.1				
590	2640515.7	1164890.9	35.2	888.0				
600	2640505.8	1164891.8	34.8	888.0	Riss quer über Decke 2019, 2020, 2021	Diffuse Risse, wahrscheinlich schräger Versatz	120	90
610	2640495.8	1164892.6	35.7	888.0				
620	2640485.8	1164893.4	37.5	888.0				
630	2640475.9	1164894.3	34.7	888.0				
640	2640465.9	1164895.1	34.4	887.9		Weitere Längsrisse seitlich		
650	2640456.0	1164895.9	36.7	887.9				
660	2640446.0	1164896.8	40.2	887.9				
670	2640436.0	1164897.6	42.6	887.9		Seitenstollen zw. Tm 660 und 680		
680	2640426.0	1164898.4	43.4	887.8		Druck, seitliche Längsrisse		
690	2640416.1	1164899.3	45.5	887.8				
700	2640406.1	1164900.1	47.9	887.8				
710	2640396.1	1164900.8	49.9	887.8				
720	2640386.2	1164901.5	52.8	887.7		Längsrisse zw. Tm 720 und 740		
730	2640376.2	1164902.2	53.0	887.7		Längsrisse zw. Tm 720 und 740	5	70
740	2640366.2	1164902.9	52.7	887.7		Längsrisse zw. Tm 720 und 740		
750	2640356.2	1164903.6	52.8	887.6				
760	2640346.3	1164904.3	53.0	887.6				
770	2640336.3	1164905.0	53.6	887.6				
780	2640326.3	1164905.6	54.4	887.6	Abplatzungen ab Tm 786 in 2021	Querriss bei Tm 780 m	95	90
790	2640316.3	1164906.3	55.5	887.5	Abplatzungen werden grösser 2020			
800	2640306.4	1164907.0	57.1	887.5	Abplatzungen werden grösser 2020			
810	2640296.4	1164907.7	57.7	887.5	Abplatzungen bis Tm 807 2021			
820	2640286.4	1164908.4	58.8	887.5				
830	2640276.4	1164909.1	59.7	887.5				
840	2640266.5	1164909.8	56.7	887.4		Längsrisse Tunnel zw. Tm 840 bis 860	5	70
850	2640256.5	1164910.4	54.1	887.4		Längsrisse Tunnel zw. Tm 840 bis 860	5	70
860	2640246.5	1164911.0	53.1	887.4		Längsrisse Tunnel zw. Tm 840 bis 860	5	70
870	2640236.5	1164911.6	54.4	887.4		Schräg zu Tunnel zw. Tm 880 und 860		
880	2640226.5	1164912.1	53.3	887.3				
890	2640216.6	1164910.9	49.7	887.3				
900	2640206.8	1164908.8	50.2	887.3				
910	2640197.1	1164906.7	49.2	887.3				
920	2640187.4	1164904.3	45.9	887.2				
930	2640177.6	1164901.9	43.4	887.2				
940	2640167.9	1164899.5	44.2	887.2				
950	2640158.2	1164897.2	44.1	887.1				
960	2640148.5	1164894.8	43.5	887.1				
970	2640138.8	1164892.4	43.1	887.1				
980	2640129.1	1164890.1	42.8	887.1	Querlängsrisse bei Tm 984 m 2019			
990	2640119.4	1164887.7	41.4	887.0	Decke Querriss 2020			
1000	2640109.6	1164885.3	41.6	887.0				
1010	2640099.9	1164882.9	41.4	887.0				
1020	2640090.2	1164880.6	41.3	887.0				
1030	2640080.5	1164878.2	41.2	887.0				
1040	2640070.8	1164875.8	43.1	886.9				
1050	2640061.1	1164873.5	46.5	886.9	Feiner Längsrisse		345	90
1060	2640051.4	1164871.1	47.8	886.9	Siegel gerissen Decke 2019			
1070	2640041.6	1164868.7	47.0	886.9				
1080	2640031.9	1164866.4	46.3	886.8				
1090	2640022.2	1164864.0	46.2	886.8				
1100	2640012.5	1164861.6	45.4	886.8				
1110	2640002.8	1164859.2	43.3	886.8				
1120	2639993.1	1164856.9	41.2	886.7				
1130	2639983.4	1164854.5	39.8	886.7				
1140	2639973.6	1164852.1	39.1	886.7	Siegel neu gerissen zw. 2018/2019	Risse parallel Decke	350	80
1150	2639963.9	1164849.8	38.0	886.6				
1160	2639954.2	1164847.4	37.5	886.6				
1170	2639944.5	1164845.0	38.1	886.6	Risse			
1180	2639934.8	1164842.6	39.2	886.6	Risse	Risse schräg entlang Decke		
1190	2639925.1	1164840.3	39.2	886.5				
1200	2639915.4	1164837.9	38.2	886.5	Siegel gerissen bei Tm 1197 in 2021	Risse schräg en echelon	40	70
1210	2639905.6	1164835.5	38.0	886.5				
1220	2639895.9	1164833.1	39.7	886.5		Quer- und Längsrisse	80	90
1230	2639886.2	1164830.8	40.9	886.5				

1240	2639876.5	1164828.4	42.6	886.4		Parallel Tunnel durch Decke	350	90
1250	2639866.8	1164826.0	43.3	886.4				
1260	2639857.1	1164823.7	43.8	886.4	Riss Wand, Siegel gerissen 2021	Parallel Tunnel, en echelon System		
1270	2639847.3	1164821.3	46.9	886.4	Schrägrisse, Abplatzungen 2020			
1280	2639837.6	1164818.9	45.8	886.3	Riss Wand	Parallel Tunnel, schräg einfallend	350	60
1290	2639827.9	1164816.6	36.9	886.3				
1300	2639818.1	1164814.5	32.0	886.3				
1310	2639808.2	1164813.8	42.9	886.3				
1320	2639798.2	1164813.4	48.9	886.2				
1330	2639788.2	1164813.3	49.1	886.2				
1340	2639778.2	1164813.4	48.5	886.2		Quer und Längsrisse durch Decke	80	90
1350	2639768.2	1164813.5	48.2	886.1				
1360	2639758.2	1164813.6	47.2	886.1		Risse parallel Decke		
1370	2639748.2	1164813.7	44.6	886.1				
1380	2639738.2	1164813.8	40.5	886.1		Riss parallel Tunnel, durch Decke.	355	70
1390	2639728.2	1164813.9	35.8	886.0				
1400	2639718.2	1164814.2	33.6	886.0				
1410	2639708.2	1164814.5	32.4	886.0				
1420	2639698.2	1164814.8	33.8	886.0				
1430	2639688.2	1164815.2	34.6	886.0				
1440	2639678.3	1164816.6	34.1	886.0				
1450	2639668.8	1164819.6	32.5	886.0	Mehrere Risse neues Siegel			
1460	2639660.0	1164824.2	27.7	886.0	Mehrere Risse neues Siegel 2020, 2021 (Schrägrisse), Riss im Boden	En Echelon, horizontale Linie entlang Tunnelwand.	340	30
1470	2639652.2	1164830.5	21.8	886.0	Riss im Siegel			
1480	2639645.8	1164838.1	15.5	886.0	Querriss neues Siegel 2018	1 Riss subvertikal rechth. zu Stollen, 1 Riss horizontal	350	80
1490	2639641.0	1164846.9	9.6	886.0				
1500	2639637.7	1164856.3	4.0	886.0	Durchgehender Riss 2021	1 Riss parallel zu Decke, 1 Riss Tunnelquerschnitt	350	70

3D Blockmodell der Sackung

Geologisches Modell mit Kartierung und Profil

