



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Institut für Geotechnik
Professur für Untertagbau
Prof. Dr. G. Anagnostou

ETH Zürich
Stefano-Franscini Platz 5
8093 Zürich

Telefon +41 44 63 31 82
www.tunnel.ethz.ch

Räumung ehemaliges Munitionslager Mitholz

Gutachten zur Variante "Verkapselung"

Datum 19 August 2021
Bericht Nr. 215101
Autor Dr. Erich Pimentel
Koreferat Prof. Dr. Georgios Anagnostou

Erstattet an: Eidgenössisches Department für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS

Inhaltsverzeichnis

1. Veranlassung	1
2. Referenzen.....	2
3. Projektsituation	3
4. Potentielle Ursache einer künftigen Explosion nach [3]	3
5. Variante «Verkapselung».....	3
6. Begehung	5
7. Beobachtungen	6
8. Bemerkungen zur den Arbeitsschritten gemäss [1]	10
8.1. Herstellung von Betonwänden als Abschlussbauwerke	10
8.2. Drucklose Zementverfüllungen des Bahntunnels	10
8.3. Drucklose Zementverfüllungen oberhalb des Bahntunnels	12
8.4. Rohrschirm	12
8.5. Niederdruckinjektionen	13
8.6. Hochdruckinjektionen	14
8.7. Kontroll- und Entwässerungs-Interventionsstollen.....	14
9. Beantwortung der Fragen des VBS	15
9.1. Sicherer Einschluss der Munitionsrückstände.....	15
9.2. Ausschluss von Wasserzutritten in die Munitionsnester	15
9.3. Eindringen der Injektionsmasse in den karstigen und zerklüfteten Untergrund	15
9.4. Möglichkeit einer späteren Bergung der Munitionsrückstände	15
10. Schlussfolgerungen.....	16
Anhang 1 Fotodokumentation	17

1. Veranlassung

Das Eidgenössisches Department für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) hat die ETH Zürich mit der Erstellung eines Gutachtens zur in [1] und [2] vorgeschlagenen Variante «Verkapselung» beauftragt [4]. Insbesondere sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- a) Kann der Einschluss der Munitionsrückstände sicher und endgültig gewährleistet werden?
- b) Kann man ausschliessen, dass in Zukunft Wasser in die Munitionsnester eindringen kann?
- c) Wie wird das Risiko für das Eindringen der Injektionsmasse in den karstigen und zerklüfteten Untergrund beurteilt?
- d) Kann nach der Verkapselung eine spätere Bergung der Munitionsrückstände sichergestellt werden (z.B. als Rückfallebene)?

Mit diesem Gutachten wird kein Bezug auf den Amtsvorschlag «Räumung» genommen. Die Risikosituation durch Munitionsrückstände im ehemaligen Munitionslager wird in der Risikoanalyse VBS 2020 [5] beurteilt und stellt ebenfalls keinen Gegenstand dieses Gutachtens dar.

Die Beurteilung der Machbarkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Variante setzt die Kenntnis der Beschaffenheit des Materials im Bahntunnel voraus. Deshalb wurde direkt mit der Mandatserteilung eine Besichtigung der zugänglichen Bereiche des Munitionslagers Mitholz organisiert. Meine Begehung fand am 24.06.2021 statt.

In den Kapiteln 3 und 4 werden die Projektsituation und der potentielle Auslöser einer Detonation beschrieben. Eine Übersicht der in der Variante «Verkapselung» vorgesehenen Arbeitsschritte findet sich im Kapitel 5. Die während der Begehung besichtigten Stellen der Anlage werden im Kapitel 6 beschrieben. In den Kapiteln 7 bis 9 fasse ich meine Beobachtungen zusammen, kommentiere die Arbeitsschritte gemäss [1] aus technischer Sicht und beantworte die Fragen des Auftraggebers.

2. Referenzen

- [1] [REDACTED] (2021a): *Präsentation der Variante «Verkapselung»*. Gespräch beim VBS am 28.05.2021 in Bern
- [2] [REDACTED] (2021b): *Brief [REDACTED] an Generalsekretariat VBS*. 31.05.2021
- [3] Arbeitsgruppe Mitholz (2020): *Ehemaliges Munitionslager Mitholz – Bericht der Arbeitsgruppe Mitholz*. Version 21.10.2020
- [4] GS-VBS (2021b): *Räumung ehemaliges Munitionslager Mitholz - Auftrag für Experten-Gutachten zur Variante «Verkapselung»*. Aktenzeichen GS-VBS-241.2-00-12/20/05. 24.06.2021
- [5] GS-VBS (2020): *Ehemaliges Munitionslager Mitholz - Risikoanalyse VBS 2020*. 04.11.2020.
- [6] Holcim (2004): *Selbstverdichtender Beton*. Version 26.11.2004. Eine Publikation der Holcim (Schweiz) AG.

3. Projektsituation

Gemäss [4] wurde *"im Zweiten Weltkrieg in Mitholz (Gemeinde Kandergrund, Kanton Bern) ein unterirdisches militärisches Munitionslager der Schweizer Armee gebaut. Im Jahr 1947 explodierte ein Teil der eingelagerten Munition. Die Risiken in der damals vorgenommenen Beurteilung wurden als unkritisch eingestuft. Neue Risikobetrachtungen des Eidgenössischen Departements für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport (VBS) aus den Jahren 2018 und 2020 haben ein höheres Risiko infolge einer potenziellen Explosion der vorhandenen Munitionsrückstände aufgezeigt. Experten gehen davon aus, dass sich noch rund 3'500 Bruttotonnen Munition im verstürzten Bahnstollen und im Schuttkegel vor der Anlage befinden.*

Mit dem Projekt «Variantenevaluation Mitholz» wurden Varianten erarbeitet, um das von den Munitionsrückständen ausgehende Risiko zu beseitigen oder dauerhaft zu senken. Im Zentrum der vertieften Prüfung standen Varianten für eine vollständige Räumung der Munitionsrückstände, um die Risiken endgültig beseitigen zu können. Das Gesamtkonzept Räumung sieht vorbereitende bauliche Schutzmassnahmen an den Verkehrsträgern (Nationalstrasse und Schiene) sowie den Wegzug der Bevölkerung für die Dauer der eigentlichen Räumungsarbeiten (voraussichtlich rund 10 Jahre) vor, um die Risiken vor der Räumung in den akzeptablen Bereich zu senken. [...] Im Dezember 2020 hat [REDACTED] bei der Chefin VBS einen konkreten Alternativvorschlag eingereicht. Dieser sieht die Räumung der Munitionsrückstände in den zugänglichen Teilen des Bahnstollens, das völlige Verfüllen aller Hohlräume im Bahntunnel sowie das mehrstufige Ausinjizieren der Schuttkegel und Hohlräume vor." Gemäss [REDACTED] "kann die Problematik durch den Einsatz von Injektionstechnik in wesentlich kürzerer Zeit mit wesentlich tieferen Kosten, ohne Wegzug der Bevölkerung und ohne Schutz der Verkehrsträger gelöst werden."

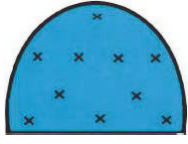
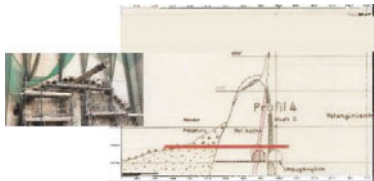
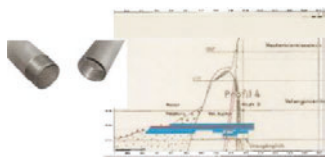
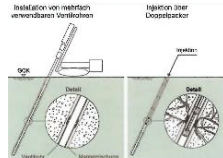
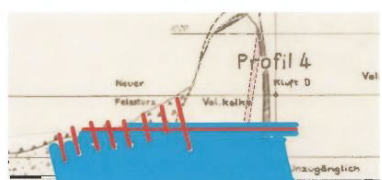
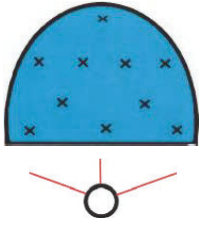
4. Potentielle Ursache einer künftigen Explosion nach [3]

Als eine der möglichen Ursachen für die Explosion von 1947 wurde die Aktivierung von Kupferazid gesehen, welches in den Zündern der noch verbliebenen Munition weiter vermutet wird. Die Aktivierung von Kupferazid wird in [3] auch als massgebende potentielle Ursache einer künftigen Explosion betrachtet. Kupferazid weist eine sehr hohe Empfindlichkeit auf Schlag, elektrostatischer Ladung und Reibung auf. Intakte Zünder stellen trotz Kupferazid kaum eine Gefahr dar; problematisch sind durch Korrosion beschädigte Zünder [3].

5. Variante «Verkapselung»

Als Massnahmen gegen Korrosion (z.B. durch Wasser) oder eine Detonation (infolge mechanischer Einwirkung, z.B. Reibung oder Schlag bei einem Erdbeben) sollen bei der vorgeschlagenen Variante «Verkapselung» *"sämtliche Hohlräume zu einem monolithischen, massiven Festkörper komplett verfüllt werden"* [1]. (Die Korrosion vergrössert die Gefahr einer Detonation, weil sie zur Beschädigung der Zünder führt.) Hierfür sieht [1] sieben Schritte vor. Diese werden übersichtshalber in Tabelle 1 zusammengefasst. Text und Figuren der Tabelle wurden ohne Änderungen aus [1] entnommen.

Tabelle 1 Arbeitsschritte der Variante «Verkapselung» nach [1]

Schritt	Arbeiten	Skizzen
1	Schliessen sämtlicher Zugänge auf Anlagenniveau mit bestückten Betonwänden (Standrohre, Stützen, Entlastungen, Durchführungen, Webcams, Sensoren, etc.)	 
2	Druckloses Verfüllen der Hohlräume bis zum Scheitel des verstärzten Bahntunnels mit selbstverdichtender Injektionsflüssigkeit (tiefe Abbinde temperatur, niedrige Viskosität)	 
3	Druckloses Verfüllen der grossen Hohlräume oberhalb des bereits verfüllten Bahntunnels (Schritt 2) von aussen mit selbstverdichtender Injektionsflüssigkeit	
4	Einbau einer horizontalen Rohrschirmdecke D=168 mm (ggf. mehrlagig) quer zum verfüllten Bahntunnel ca. 2 m über dem Scheitel des Bahntunnels (statische Funktion: Ersatzmassnahme anstelle Überdeckung)	
5	Injizieren der Hohlräume durch die Rohrschirmrohre mit geringen, definierten Verpressdrücken (Massnahme gegen Eindringen von Meteorwasser)	
6	- Mehrfach bohren und injizieren mit hohen Verpressdrücken (Massnahme zur Schliessung und kompakter Verfestigung des gesamten Schuttkegels und Kluftsystems) - Ergänzende mehrfache Hochdruckinjektionen durch die Rohrschirmrohre	 
7	Bau eines Kontroll- und Entwässerungs-Interventionsstollens unter dem verfüllten Bahntunnel. Überprüfung Verhältnisse unter dem Bahntunnel. Kontrolle eines allfälligen Wasserzuflusses Interventionsmöglichkeit sichergestellt Langzeitsicherheit durch Monitoring sichergestellt	

6. Begehung

Die Begehung vom 24.06.2021 fand in Begleitung des Projektleiters "Ehemaliges Munitionslager Mitholz", seines Stellvertreters sowie eines Vertreters des Kommandos KAMIR¹ statt. Vorgängig hat der Projektleiter die Schritte der Variante «Verkapselung» (entsprechend Kapitel 5) beschrieben. Ich habe folgende, derzeit zugängliche, Bereiche des Bahntunnels besichtigt (Bild 1): das ehemalige Stollenportal Nord, der Einstieg von Kammer 8 in den Bahntunnel und den Sektor C (Gang von Kammer 10 nach 12).

Meine zur Dokumentation der Beobachtungen aufgenommenen Photos befinden sich im Anhang 1.

Je nach Verschüttungsgrad bzw. Zugänglichkeit wird der betroffene Bereich in Sektoren unterteilt (Bild 1). So sind der Sektor A und der Nordrand des Sektors B frei zugänglich, während der Rest von Sektor B nahezu vollkommen zugeschüttet ist. Sektor C ist teilweise zugeschüttet, ist aber im Bereich zwischen den Kammern 10 und 12 begehbar. Die Verlängerung des Bahntunnels in Sektor D diente dem Gleiswechsel (Weiche) und konnte wegen des Versturzes bisher noch nicht genau erkundet werden. Vor dem Sektor B befindet sich ein grosser Schuttkegel. Die Standsicherheit der Felsformation Dreispitz (Sektor C) wurde durch die Detonationen von 1947 stark beeinträchtigt.

¹ Doktrinstelle der Armee für den Bereich Kampfmittelbeseitigung und Minenräumung

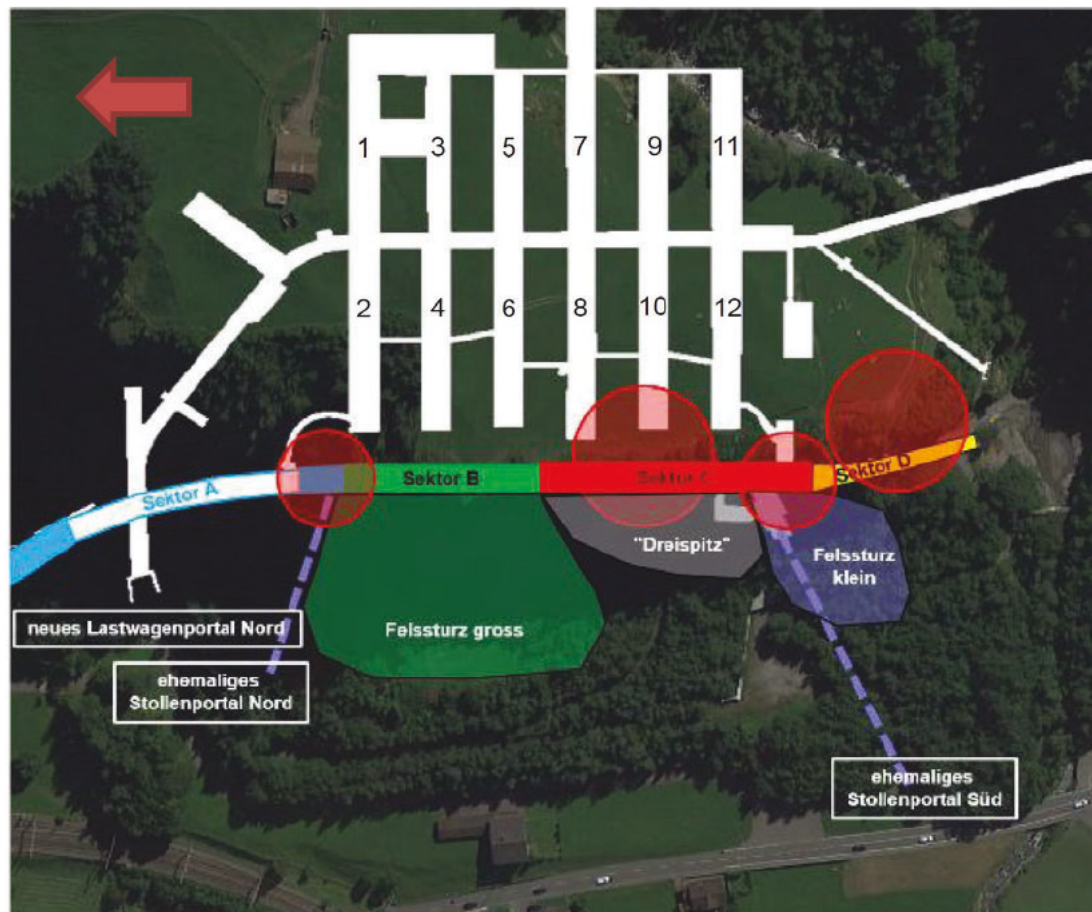


Bild 1: Situationsplan des Munitionslagers Mitholz [3]

7. Beobachtungen

Die Anlage befindet sich in einer Kalksteinformation in der Fluh bei Mitholz. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Fluh vor dem Bau der Anlage (ca. 1930) und nach dem Detonationsereignis (1948). In Bild 3 sind die Ablagerungen des Schuttkegels gut sichtbar. Heutzutage ist diese Fläche grösstenteils durch Wald bedeckt.

Im Projektgebiet gibt es eine hangparallele Störung, die sogenannte Mitholz Störung. Diese streicht praktisch parallel zum Tunnel und schneidet den Tunnelquerschnitt [5] (Bild 4).

Nachfolgend werden die während der Begehung beobachteten, für die Erstellung des Gutachtens relevanten, geotechnischen Gegebenheiten zusammengefasst:

- Die Ablagerungen in den Sektoren B bis D sind sehr heterogen (Bild 1). Sie haben eine sehr grosse Korngrössenbandbreite: von sehr kleinen Partikeln (Korngrösse Silt bis Ton; Bilder A1-1 bis A1-6 in Anhang 1) bis hin zu grossen Felsblöcken (Bilder A1-5, A1-10 und

A1-11). Die Ablagerungen stammen teils aus dem infolge der Explosion zertrümmerten Fels (Felsblöcke bis Feinstaub) und teils aus späteren Niederbrüchen (Blöcke).

- An mehreren Stellen kann eine nach Korngrösse geordnete Ablagerung beobachtet werden, mit den grobkörnigen Bestandteilen im unteren Bereich und den feinkörnigen Fraktionen oben (Bilder A1-4 und A1-5). Aufgrund ihres Gewichts wird die meiste Munition eher im unteren Bereich erwartet. Sie kann aber auch oberflächennah in den Ablagerungen angetroffen werden (Bild A1-11).
- Im Sektor C hat sich ein grösserer Felsbereich, mit einer geschätzten Höhe von bis zu 10 m, aus dem First abgelöst (Bild A1-12).
- Gemäss VBS wurde die hangparallele und nahezu vertikale Störung durch den Schwandendruck beim Ereignis von 1947 geöffnet. Sie ist heutzutage teilweise leer.
- Die o.g. Störung und weitere Trennflächen sind wasserführend (Bild A1-9). Gemäss mündlicher Auskunft des Projektleiters weisen Beobachtungen auf einen direkten Zusammenhang zwischen der Menge des anfallenden Wassers im Bahntunnel und der Regenintensität hin. An einigen Stellen können Stalaktite beobachtet werden (Bild A1-10).
- In Sektor C kann im Sohlbereich an der Westwand eine offene Trennfläche beobachtet werden (Bild A1-9). Wie tief die Öffnung reicht, konnte nicht festgestellt werden.
- Lokal können vereinzelte Holzreste aus Regalen und Verpackungen beobachtet werden (Bilder A1-7 und A1-12).

Die oben beschriebenen Gegebenheiten resultieren aus visuellen Beobachtungen und händischer Abtastung (z.B. zur Unterscheidung zwischen Sand und Silt). In der Geotechnik wird der Aufbau solcher Lockergesteinsablagerungen im Untergrund üblicherweise mittels Kernbohrungen und anschliessender Laboruntersuchungen erkundet. Im vorliegenden Fall ist dies jedoch wegen der Detonationsgefahr ausgeschlossen. Daher kann nicht bestimmt werden, von welchem Material (grob- oder feinkörnig) die Munitionsnester umgeben sind.



Bild 2: Die "Fluh" bei Mitholz - ca. 1930. Blick vom Kirchhorn gegen Osten. Phot. L+T. Explosion Munitionsmagazin Mitholz / Beilage Nr. 29a zu den Berichten des Untersuchungsrichters / Beilagen zu den geologischen Gutachten Reference code: E5150A#2008/190#204* (Ausschnitt)



Bild 3: Die "Fluh" bei Mitholz - Januar 1948, von Westen. Phot. Leupin & Schwank, Bern. Explosion Munitionsmagazin Mitholz / Beilage Nr. 29a zu den Berichten des Untersuchungsrichters / Beilagen zu den geologischen Gutachten Reference code: E5150A#2008/190#204* (Ausschnitt)

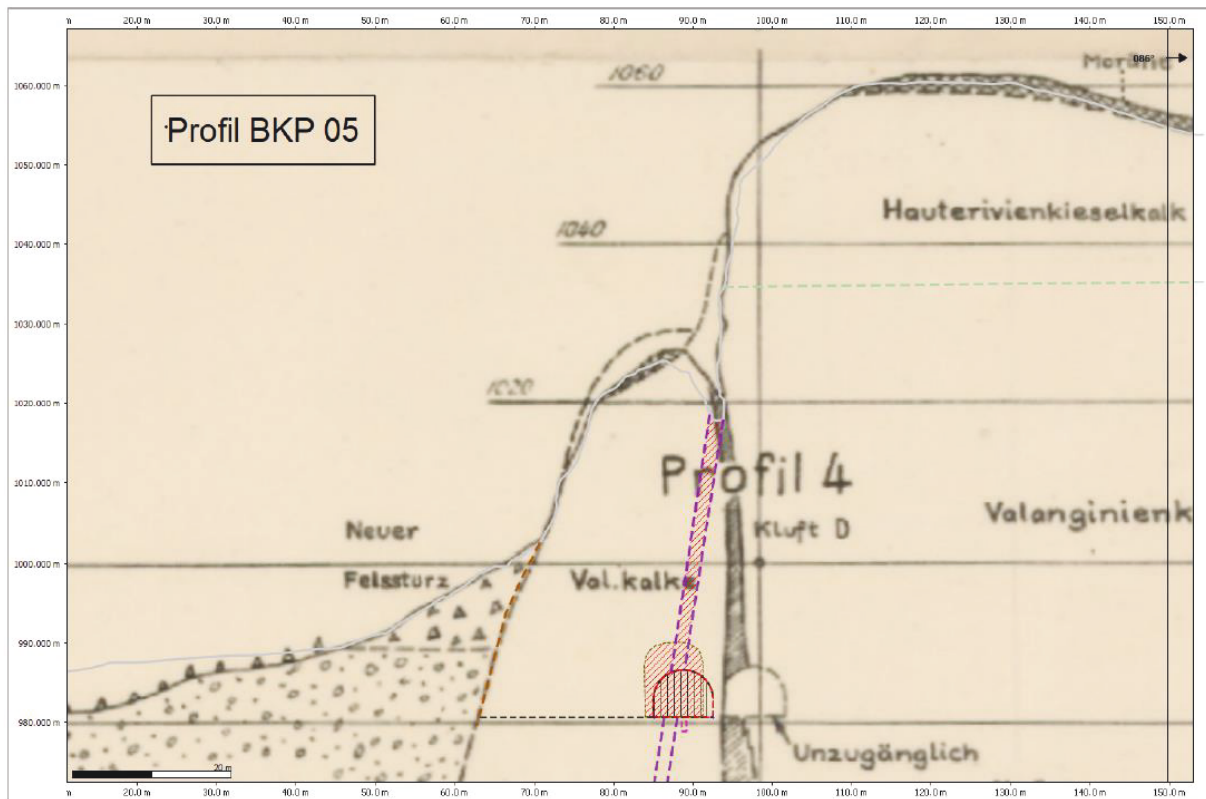


Bild 4: Profil aus zusammengeführten Daten aus unterschiedlichen Quellen. Im Hintergrund (vergilbtes Papier) ist das Profil 4 von Beck (1948) und darüber ist die Lage des Tunnels nach neueren Messungen (CSD bzw. Lüthy) eingezeichnet [5].

8. Bemerkungen zur den Arbeitsschritten gemäss [1]

Die Variante "Verkapselung" [1] sieht sieben Arbeitsschritte vor (s. Kapitel 5). Diese Schritte werden in [1] nur stichwortartig beschrieben, was eine Unschärfe bezüglich Zielsetzung und Ausführung jedes Schrittes bedingt und eine abschliessende Prüfung der Machbarkeit und Wirksamkeit der vorgeschlagenen Massnahmen erschwert.

Erschwerend ist auch der Umstand, dass unklar ist, was mit einigen Begriffen gemeint ist. Der Begriff "selbstverdichtende Injektionsflüssigkeit" ist im Tunnelbau nicht geläufig. Was in Schritt 2 mit "selbstverdichtender Injektionsflüssigkeit" wahrscheinlich gemeint wird, ist ein selbstverdichtender Beton (wie er beim Verfüllungen von grossen Hohlräumen verwendet wird) und kein Injektionsmittel im geotechnischen Sinne.

Ferner hat der im Arbeitsschritt 6 von [1] verwendete Begriff "Hochdruckinjektionen" eine ganz konkrete technische Bedeutung. Er bezeichnet ein bestimmtes geotechnisches Verfahren (in der Schweiz auch als "jet grouting" bekannt)¹, welches unter den Bedingungen von Mitholz nicht einsetzbar ist. Mit "Hochdruckinjektionen" scheinen einfach Injektionen unter hohem Verpressdruck gemeint zu sein.

8.1. Herstellung von Betonwänden als Abschlussbauwerke

Die Abschlussbauwerke inkl. Durchführungen für Standrohre, Stützen oder Druckentlastungsrohre, elektrische Leitungen für Webcams oder Sensoren sind machbar. Unklar ist was die Webcams erfassen sollen (siehe Kapitel 8.2) und welche Sensoren zu welchem Zweck im verschütteten und zu verfüllenden Bahntunnel installiert werden sollen.

8.2. Drucklose Zementverfüllungen des Bahntunnels

Gemäss [1] sollen alle Hohlräume bis zum Scheitel des verschütteten Bahntunnels mit einer sogenannten selbstverdichtenden Injektionsflüssigkeit tiefer Abbinde-temperatur und niedriger Viskosität drucklos verfüllt werden.

Der für diese Aufgabe vermutlich angedachte selbstverdichtende Pumpbeton wurde u.a. für das Betonieren in engen Schalungen entwickelt. Beim Betonieren einer etwa 1 m dicken Betonplatte kann die Temperatur im Kernbereich um mehr als 40 °C ansteigen [6]. Es wäre zu prüfen, inwiefern die, durch das Abbinden bedingte, Temperaturerhöhung die Detonationsgefahr erhöht.

¹ vgl. Wormuth und Schneider (Hrsg.), 2016, Baulexikon - Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens, Beute Verlag GmbH, Berlin - Wien - Zürich (<https://baulexikon.beuth.de/HOCHDRUCKINJEKTION.HTM>)

Bei der Verfüllung des Bahntunnels muss aus injektionstechnischer Sicht zwischen verschiedenen Hohlraumgrössen unterschieden werden, und zwar zwischen

- dem grossen Hohlraum oberhalb des eingestürzten Materials (Ablagerung) bis zum Tunnelscheitel und
- den kleineren Hohlräumen in der Ablagerung samt Munition bzw. Munitionsnester.

Verfüllung des Hohlraums oberhalb der Ablagerungen

Das Verfüllen des oberen Bereichs entspricht den aus dem Tunnelbau bekannten Betonverfüllungen. So zum Beispiel entsteht bei einem Tagbruch ein Krater an der Geländeoberfläche, der vor der Wiederaufnahme der Vortriebsarbeiten üblicherweise mit Beton verfüllt wird. Nach der Verfestigung des Betonpfropfens sind die Böschungen des Kraters standsicher, so dass die Vortriebsarbeiten im Tunnel wiederaufgenommen werden können. Ein weiteres Beispiel ist das seitliche Antreffen eines Karsthohlraumes. Um eine ausreichende Bettung der Tunnelschale zu gewährleisten, wird in diesem Fall der Karsthohlraum mit Beton verfüllt.

Im vorliegenden Fall kann durch eine geeignete Auslegung und Verteilung der Leitungen der gesamte Bereich zwischen Ablagerungen und First der Kammern verfüllt werden.

Der Erfolg des Verfüllens kann durch ein unkontrolliertes Wegfliessen von Verfüllmaterial durch offene Karststrukturen beeinträchtigt werden. In den zugänglichen Tunnelabschnitten, die ich beabsichtigt habe, gab es keine bezüglich Pumpbeton relevanten Felsmerkmale. (Offene Klüfte wie in Bild A1-9 wären für dünnflüssigere Füllmaterialien problematisch.) Zur abschliessenden Beurteilung dieses Gefährdungsbildes müsste man Aufschlüsse über den gesamten zu verfüllenden Bahntunnel und nähere Auskünfte über das in [1] angedachte "selbstverdichtende Injektionsmittel" haben.

Verfüllung des Porenraums der Ablagerungen

Anders sieht es im unteren Bereich des Tunnelquerschnitts aus (Lockergesteinsablagerungen und Munitionsnester). Im Anschluss an die Detonation wurden Felsfragmente unterschiedlicher Grösse (von grossen Blöcken bis zu feinen Partikeln) samt Munition teilweise durch die Luft geschleudert. Analog zu einem Sedimentationsvorgang fand an einigen Stellen teilweise eine Klassierung nach Grösse statt. Grobkörnigere Partien wie Blöcke oder Kies sowie auch Munition lagerten sich vorzugsweise unten ab. Darauf lagerten sich immer feinere Partikel und zuletzt, wie bei der Begehung beobachtet, feinkörniges Material ab (mit der Korngrösse von Silt, evtl. auch von Ton). Bei solchen Ablagerungen muss das Füllmaterial zunächst die oberen feinkörnigen Schichten durchdringen, um schliesslich die Munition einschliessen zu können.

Aus physikalischer Sicht können nur Porenräume verfüllt werden, die Abmessungen entsprechend eines Vielfaches des grössten Korns des Füllmaterials aufweisen. Selbst wenn anstatt des selbstverdichtenden Pumpbetons eine Zementsuspension mit Mikrozetement ($D_{95} = 10 \mu\text{m}$) gewählt wird, können Böden mit mehr als 20% Feinanteil (z.B. Silt oder Ton) nicht verpresst werden, auch nicht unter hohem Druck wie z.B. 10 bar oder mehr. Die Bilder A1-1 bis A1-8 im Anhang 1 zeigen exemplarisch Ablagerungen, die durch eine drucklose Zementsuspension mit Sicherheit nicht

durchdrungen werden können. Sollte man Pumpbeton wählen, dann vergrössern sich die kritischen, nicht verfüllbaren Bereiche erheblich.

Gesamtbeurteilung von Schritt 2

Zusammenfassend wird man mit der vorgeschlagenen Massnahme einen Grossteil der Hohlräume des Bahntunnels (den Bereich zwischen Scheitel und den Ablagerungen) sicher verfüllen können. Jedoch können Ablagerungen oder Munitionsnester, die durch feinkörniges Material abgedeckt sind, nicht zu einem monolithischen, massiven Festkörper verfüllt werden. (Dies bedeutet, dass im Falle von Erschütterungen, z.B. eines Erdbebens, eine Detonation des Kupferazids in den Zündern durch Reibung oder Schlag ausgelöst werden kann.) Wasser kann durch diese feinkörnigen Schichten weiterhin zirkulieren und zur Korrosion von zurzeit intakter Munition und Freisetzung von Kupferazid beitragen.

Visuell, z.B. mittels Kameras, oder elektrisch mittels Sensoren kann der Füllvorgang von grossen Hohlräumen (zwischen Ablagerungen und Tunnelfirste), jedoch nicht das Eindringen der Zementsuspension in den Ablagerungen beobachtet werden. Für letzteres müssten die Sensoren innerhalb der Ablagerungen platziert werden. Die hierfür notwendigen, abzuteufenden Bohrungen können aber wegen der Detonationsgefahr nicht durchgeführt werden (Kapitel 7). Der Erfolg der Verfüllung der Porenräume kann also nicht kontrolliert werden.

8.3. Drucklose Zementverfüllungen oberhalb des Bahntunnels

Es gelten die gleichen Bemerkungen bezüglich des Füllmaterials wie im Kapitel 8.2. Das Verfüllen von aussen des Bereichs oberhalb des eingestürzten Gewölbes des Bahntunnels ist wegen der erschwerten Zugänglichkeit zwar anspruchsvoll, aber machbar. Das im letzten Kapitel beschriebene Gefährdungsbild eines Wegfliessens des Füllmaterials durch offene Karststrukturen besteht auch für Arbeitsschritt 3; es kann mangels ausreichender Aufschlüsse nicht abschliessend beurteilt werden.

8.4. Rohrschirm

In diesem Arbeitsschritt sollen lange horizontale Bohrungen durch den Schuttkegel und durch den Kalkstein durchgeführt werden. Die in [1] angedachte Widerlagerfunktion des Rohrschirmes setzt eine genaue Lage der Bohrungen unter Einhaltung von Toleranzen voraus. Daher müssen die Bohrungen horizontal gerichtet abgeteuft werden und die jeweilige Bohransatzpunkte genau platziert werden. Aufgrund der Beschaffenheit der Böschung (siehe Bild 3), mit teilweise sehr grossen Felsblöcken an der Oberfläche, muss daher vorgängig eine etwa 60 m lange Arbeitsplattform für das Bohrgerät eingerichtet werden. Ferner wird wegen der geringen Überdeckung und den Felsblöcken im vorderen Bereich ein Bohren durch den Schuttkegel ohne vorgängige Zusatzmassnahmen sehr schwierig bis unmöglich sein. Zum Vergleich, in einem Tunnelportal im Lockergestein würde man eine vertikale Wand (z.B. eine Bohrpfahlwand) erstellen und nach Freilegung

des vorderen Bereiches senkrecht zu dieser bohren. Da ein Bohren im unteren Bereich des Schuttkegels ausgeschlossen ist, scheidet diese Zusatzmassnahme aus.

Ferner wäre zu prüfen, ob die Erschütterungen durch die Errichtung der Arbeitsplattform oder durch das dreh Schlagende Bohren, insbesondere durch den harten Kalkstein, eine Detonation auslösen können. Die Beurteilung dieser Gefahr entzieht sich meiner Kompetenz.

8.5. Niederdruckinjektionen

Nach der Installation der Rohrschirme sind Injektionen unter niedrigem Druck zur Abdichtung vorgesehen.

Injektionen durch die Rohre sind üblich beim Einsatz von Rohrschirmen als vorausseilende Massnahme in Tunnelvortrieben durch Lockergestein, allerdings für eine andere Zielsetzung (siehe nächsten Absatz). Die Rohre werden hierfür mit verhältnismässig kleinen Löchern versehen, die durch jeweilige Pfropfen dicht bleiben. Nach der Installation des Rohres wird eine Injektionslanze mit Doppelpacker mittig zu den jeweiligen Löchern platziert und der entsprechende Pfropfen durch den Injektionsdruck rausgedrückt.

Beim Einsatz von Rohrschirmen in rolligen Böden (Sand, Kies) wird der Bereich zwischen den Rohren verpresst, um beim Vortrieb des Tunnels ein Rieseln zwischen den Rohren zu verhindern (Sanduhreffekt). Hierfür reicht eine sehr lokale und bescheidene Verfestigung des Bodens zwischen den Rohren aus; ein vollständiges Verfüllen der Porenräume ist nicht erforderlich, falls kein Bergwasser vorhanden ist. Um Dichtigkeit gegen Eindringen von Wasser zu gewährleisten müsste unter einem relativ hohen Injektionsdruck verpresst und nachverpresst werden und die Massnahme müsste evtl. durch zusätzliche, zwischen den Rohren anzuordnenden Injektionsbohrungen ergänzt werden. Hierbei ist zu beachten, dass im konkreten Fall Mitholz ein zu hoher Injektionsdruck ein Aufbrechen des Schuttmaterials oberhalb des Rohres verursachen würde. Diesbezüglich gilt als Faustregel, dass der Injektionsdruck 1 bar pro 10 m Überlagerung nicht übersteigen sollte.

Angesichts der über längere Rohrabschnitte sehr kleinen Überlagerung kann das Verpressen - schon wegen des niedrigen Injektionsdruckes - keineswegs die Dichtigkeit des Materials um die Rohre gewährleisten.

In [1] ist keine Kontrollmöglichkeit vorgesehen. Zum Vergleich: In der Geotechnik wird bei Abdichtungsinjektionen ein Bohrraster gewählt. Zwischen den Bohransatzpunkten wird eine Bohrung abgeteuft und als Referenz ein Wasserdruckversuch (WD-Test) durchgeführt. Nach durchgeführter Verpressung wird der WD-Test wiederholt. Sollten die Ergebnisse nicht zufriedenstellend sein, werden zusätzliche Bohrungen abgeteuft (Verdichtung des Bohrrasters) und verpresst. Eine solche Vorgehensweise ist bei der Variante «Verkapselung» nicht vorgesehen und in der konkreten Situation auch nicht möglich.

8.6. Hochdruckinjektionen

Wie eingangs erläutert, scheinen hier unter "Hochdruckinjektionen" Injektionen unter einem höheren Verpressdruck und nicht das in der Schweiz als jet grouting bekannte Verfahren gemeint zu sein. Die Variante «Verkapselung» sieht das mehrfache Bohren und Verpressen mit höheren Injektionsdrücken (zwecks Schliessung und Verfestigung des gesamten Schuttkegels und sogar der Klüfte im Bahntunnelbereich) mittels relativ kurzer subvertikaler Bohrungen vor.

Problematisch sind die Injektionslanzen am Rand des Schuttkegels (Tabelle 1), denn diese würden das Schuttmaterial inkl. allfälliger Munitionsnester in Richtung Tal wegdrücken. Es ist ungewiss, ob dies eine Detonation auslösen könnte. Das im vorgängigen Arbeitsschritt vermeintlich geschaffene Widerlager wird diesem Druck nicht standhalten. Der schwach zementierte Bereich zwischen den Rohren wird durch den Injektionsdruck aufgebrochen. Sollte dieser Bereich einem gewissen Druck standhalten, dann werden die Rohre mangels Auflager im vorderen Bereich als ein sehr langer Kragarm (einige Dekameter) durch Biegung beansprucht, so dass einerseits der zementierte Bereich Zugrisse erleidet und nachgibt, andererseits das Injektionsgut längs der Rohrschirmdecke in Richtung Tal wegfliesst.

Gemäss Zeile 6 der Tabelle 1 soll das Injektionsgut bis auf Sohlniveau des Schuttkegels eindringen. Da Korngrössenverteilung und Aufbau des Schuttkegels unbekannt sind, kann nicht beurteilt werden, ob das Injektionsgut tatsächlich bis zum Sohlniveau des Schuttkegels eindringen kann. Es sind weder eine vorgängige Erkundung von Korngrössenverteilung und Aufbau, noch eine nachträgliche Kontrolle des Injektionserfolgs mittels Bohrungen ausreichender Tiefe möglich.

8.7. Kontroll- und Entwässerungs-Interventionsstollen

Als letzter Arbeitsschritt ist der Bau eines Kontroll- und Entwässerungs-Interventionsstollens unter dem verfüllten Bahntunnel vorgesehen. Aus dem Stollen heraus sollen radiale Drainagebohrungen bis einige Meter unterhalb der Sohle des Bahntunnels gebohrt werden. Mit dieser Massnahme sollen gemäss [1] die Verhältnisse unter dem Bahntunnel überprüft sowie ein allfälliger Wasserzufluss kontrolliert werden. Ferner soll die Interventionsmöglichkeit und die Langzeitsicherheit durch Monitoring sichergestellt werden [1].

Der Bau eines Stollens ist Stand der Technik, wobei hier mit geeigneten Massnahmen die Gefahr einer Detonation wegen vortriebsinduzierten Erschütterungen ausgeschlossen werden muss.

Ansonsten ist der Arbeitsschritt 7 zu vage beschrieben. Es wird nicht näher beschrieben, welche Verhältnisse unter dem Bahntunnel und zu welchem Zweck zu überprüfen sind. Es ist unklar welche Interventionen bei welchen Monitoring-Ergebnissen und zum welchem Zweck angedacht sind, oder welchem Aspekt der Langzeitsicherheit durch welche Art von Monitoring Rechnung getragen wird.

9. Beantwortung der Fragen des VBS

9.1. Sicherer Einschluss der Munitionsrückstände

Frage des VBS: *Kann der Einschluss der Munitionsrückstände sicher und endgültig gewährleistet werden?*

Beurteilung der ETH Zürich: Der Einschluss der Munitionsrückstände kann insbesondere wegen der teilweise ausgedehnten Schichten aus feinkörnigem Material (mit der Korngrösse von Silt bis Ton) (Kapitel 8.2 und 8.6) nicht gewährleistet werden. Besonders problematisch ist es, dass keine Möglichkeit der Erfolgskontrolle verfügbar ist.

9.2. Ausschluss von Wasserzutritten in die Munitionsnester

Frage des VBS: *Kann man ausschliessen, dass in Zukunft Wasser in die Munitionsnester eindringen kann?*

Beurteilung der ETH Zürich: Da weder die Munitionsnester mit Zementmittel eingeschlossen, noch alle Wasserwegsamkeiten abgedichtet werden können, ist es nicht möglich Wasserzutritte in die Munitionsnester auszuschliessen.

9.3. Eindringen der Injektionsmasse in den karstigen und zerklüfteten Untergrund

Frage des VBS: *Wie wird das Risiko für das Eindringen der Injektionsmasse in den karstigen und zerklüfteten Untergrund beurteilt?*

Beurteilung der ETH Zürich: Die Gefahr eines Eindringens des Verfüllmaterials (Injektionsmittel, Pumpbeton) in den karstigen und zerklüfteten Untergrund kann ohne detaillierte vorgängige Erkundung nicht beurteilt werden.

9.4. Möglichkeit einer späteren Bergung der Munitionsrückstände

Frage des VBS: *Kann nach der Verkapselung eine spätere Bergung der Munitionsrückstände sichergestellt werden (z.B. als Rückfallebene)?*

Beurteilung der ETH Zürich: Die Variante «Verkapselung» sieht die vollständige Verfüllung aller verbliebenen Hohlräume des Bahntunnels vor. Dadurch wäre die Möglichkeit einer späteren Bergung der Munitionsrückstände ausgeschlossen, denn man müsste die erhärtete Zement- oder Betonmasse nahezu erschütterungslos abbauen können. Aufgrund der Detonationsgefahr würden die gängigen Verfahren zum Lösen vom Fels wie Bohren und Sprengen oder der Einsatz eines Abbauhammers oder einer Teilschnittmaschine mit Schrämkopf ausscheiden. Zusammenfassend, die Variante «Verkapselung» bietet keine Rückfallebene.

10. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend und beziehend auf die Fragen des VBS können mit der Variante "Verkapselung" weder die Munitionsrückstände sicher eingeschlossen, noch der Zutritt von Wasser in die Munitionsnester ausgeschlossen, noch Erfolgskontrollen durchgeführt, noch allfällig erforderliche spätere Massnahmen getroffen werden.

Eine spätere Bergung der Munitionsrückstände würde verunmöglicht.

Angesichts der mangelnden Robustheit des Konzeptes fällt die fehlende Möglichkeit einer zuverlässigen Überprüfung des Erreichens der Ziele in den kritischen Arbeitsschritten umso stärker ins Gewicht.

Zürich, 19. August 2021

Dr. Erich Pimentel

Anhang 1 Fotodokumentation

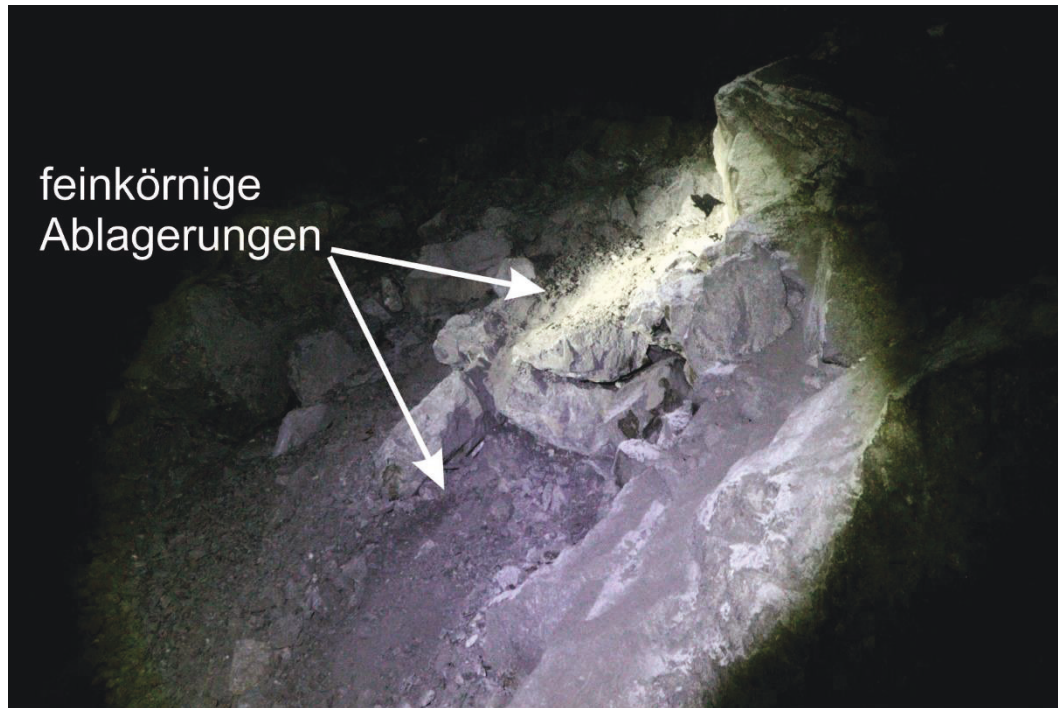


Bild A1-1: Schuttböschung im Bahntunnel im Bereich der Kammer 8

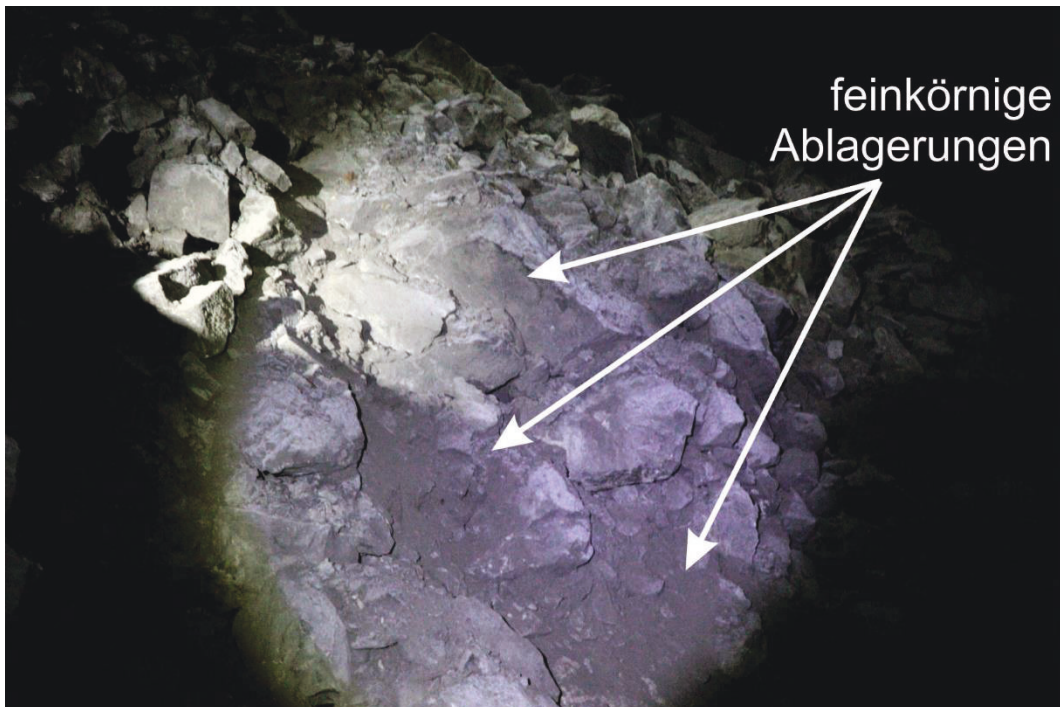


Bild A1-2: Schuttböschung im Bahntunnel im Bereich der Kammer 8

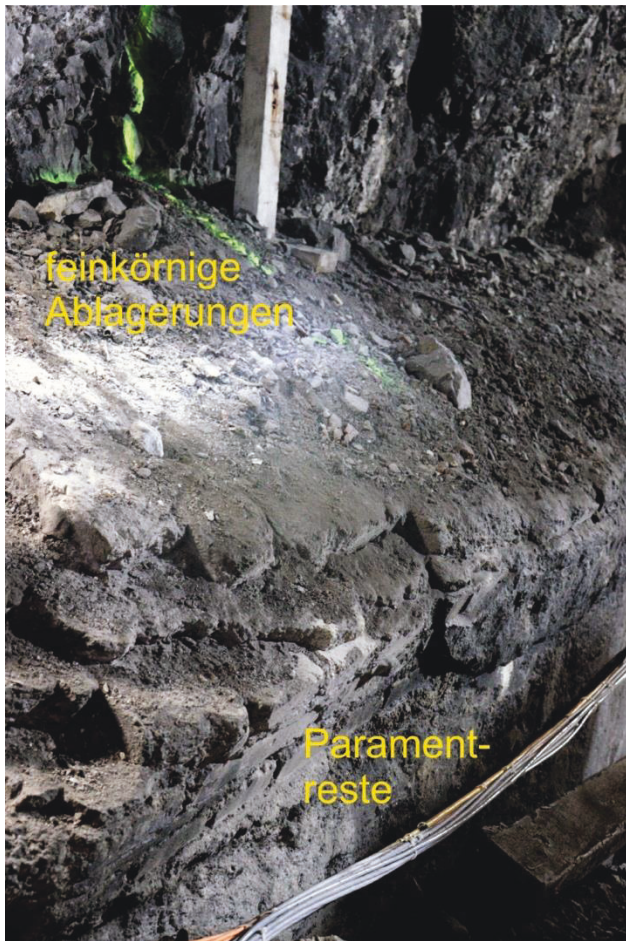


Bild A1-3: Paramentreste des Bahntunnels zwischen den Kammern 10 und 12

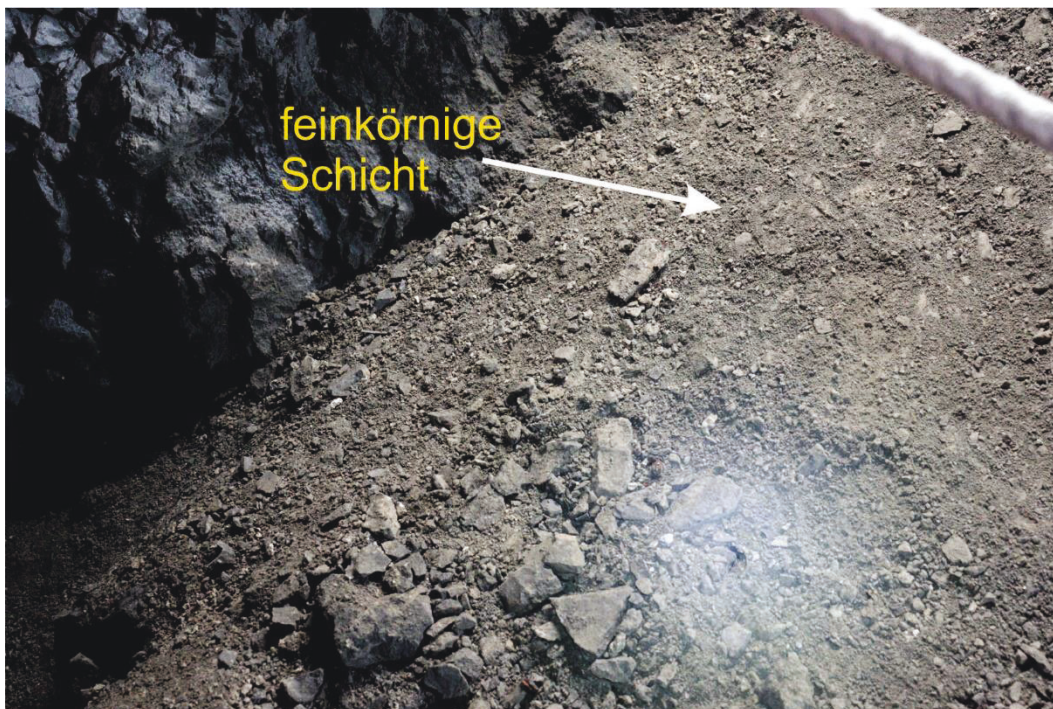


Bild A1-4: Schuttböschung im Bahntunnel zwischen den Kammern 10 und 12



Bild A1-5: Schuttböschung im Bahntunnel zwischen den Kammern 10 und 12



Bild A1-6: Schuttböschung im Bahntunnel zwischen den Kammern 10 und 12



Bild A1-7: Holzreste im Bahntunnel zwischen den Kammern 10 und 12

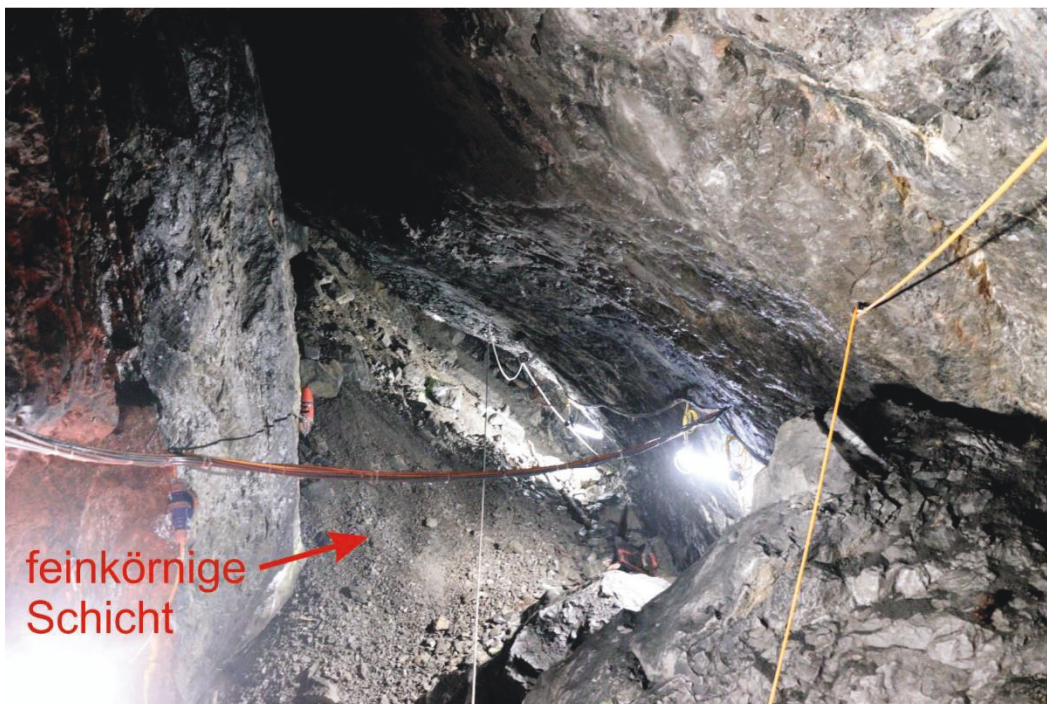


Bild A1-8: Schuttböschung im Bahntunnel zwischen den Kammern 10 und 12

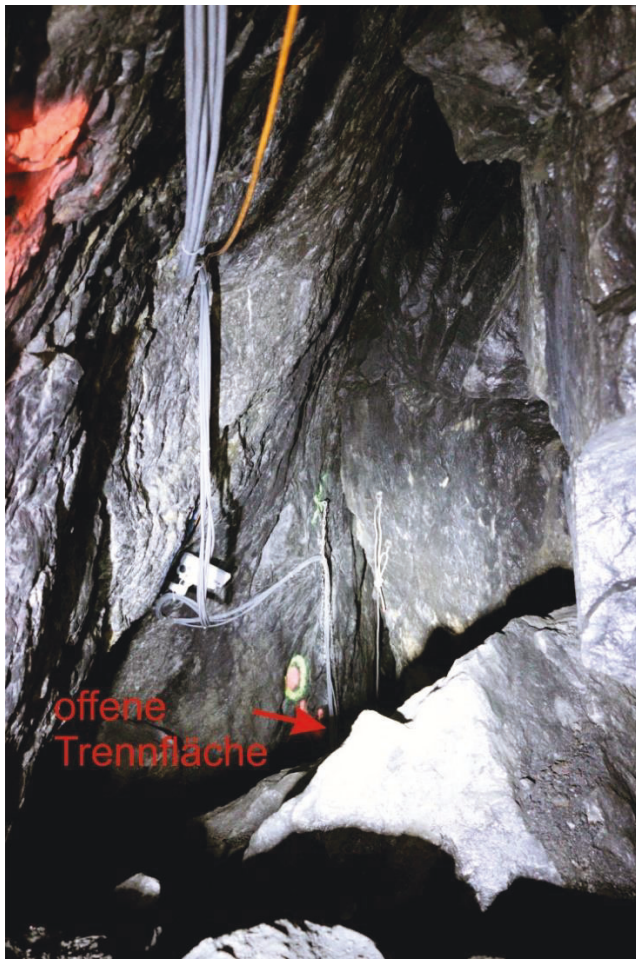


Bild A1-9: Offene wasserführende Trennfläche zwischen den Kammern 10 und 12

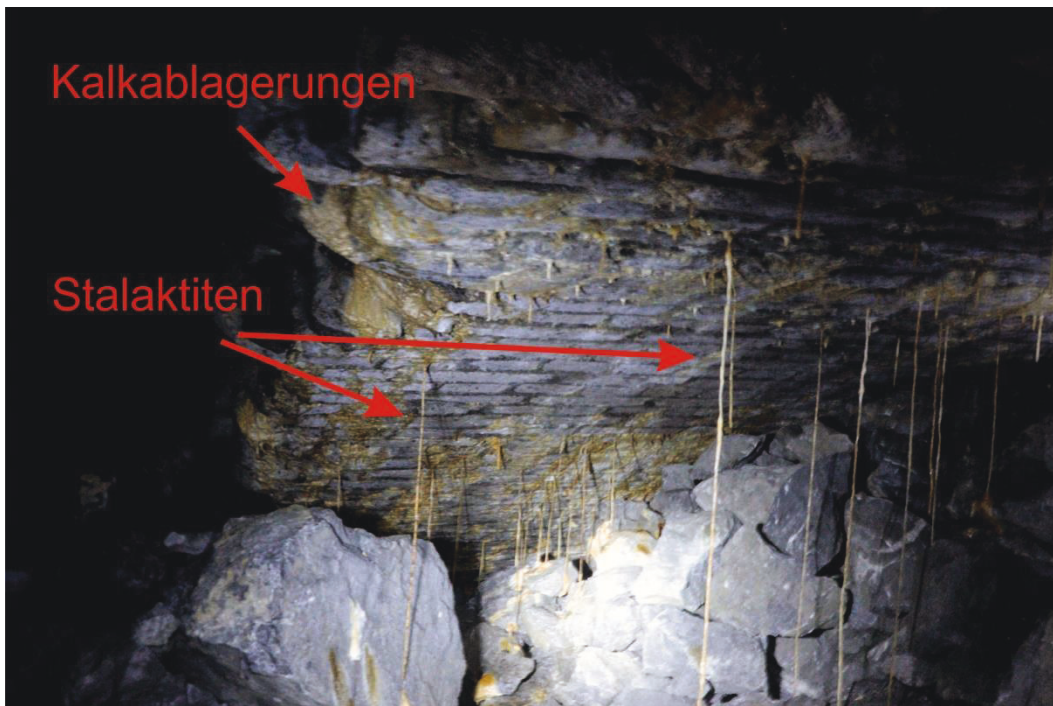


Bild A1-10: Stalaktiten und Kalkablagerungen im Bahntunnel (Sektor B Nord)

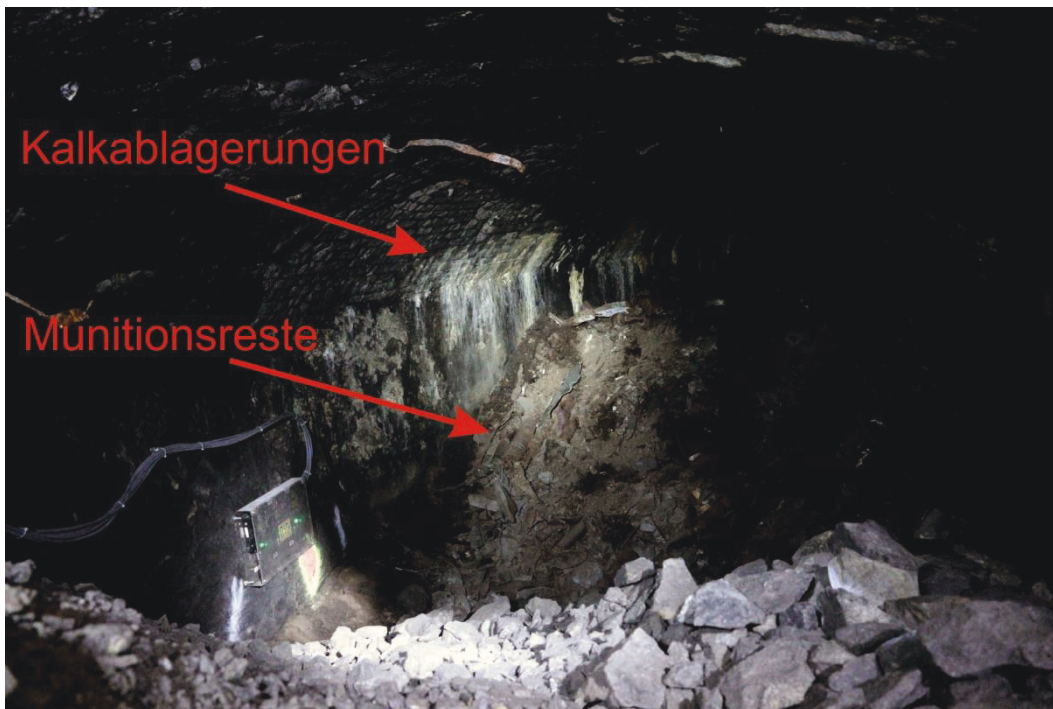


Bild A1-11: Blick aus dem Bahntunnel in Richtung ehemaliges Stollenportal Süd



Bild A1-12: Ablösungen vom First des Bahntunnels zwischen den Kammern 10 und 12