

Continuous Rock Mass Stabilisation on a TBM Drive Using PUS Foams

Fortlaufende Gebirgsstabilisierung bei einem TVM-Vortrieb mittels PUS-Schäumen

The 27.3 km-long twin-tube Semmering Base Tunnel in Austria has been under construction since 2012. On contract SBT 2.1, a good 8 km of each tube is driven using two shielded hard rock tunnel boring machines. For the sections passing through fault zones, the tender specified foam grouting as tunnelling progresses. This article describes how this foam grouting was dealt with on site – from preliminary trials through the first applications to the method finally used – with an assessment of the experience gained.

Dr. mont. DI. WOLFGANG ALDRIAN, Principal Expert Tunneling and Mining, Master Builders Construction Chemicals, Austria/Österreich
Bmst. DI. STEFAN ZIMMERMANN, Head of project management Underground Construction/Leiter Projektmanagement Underground Construction, Master Builders Construction Chemicals, Austria/Österreich
DI. WOLFGANG SCHREINER, site management TBM/Bauleitung TBM, ARGE Fröschnitzgraben, Austria/Österreich
Bmst. Ing. MANUEL MASSENBAUER, site management/Bauleitung, ARGE Fröschnitzgraben, Austria/Österreich

1 Project Description

The Semmering Base Tunnel, which has been under construction since 2012, is a rail tunnel with a length of 27.3 km passing under the northern Alpine chain near the Semmering Pass. The two tubes run in parallel at an axial spacing of between 40 and 70 m and are connected to each other with cross passages [1].

The following information about the project and the tender was taken from various chapters of the construction contract [2]. The entire tunnel is divided into three construction sections (Fig. 1) and is being driven from two portal sites and three intermediate access points:

- Tunnel Gloggnitz – SBT 1.1 (incl. intermediate access point at Göstritz)
- Tunnel Fröschnitzgraben – SBT 2.1
- Tunnel Grautschenhof – SBT 3.1

1.1 Contract SBT 2.1

The tunnel system of this contract comprises the following main elements:

- Two single-track running tunnels each about 12.9 km long, driven from the intermediate access point at Fröschnitz. Two-thirds of these two single-track tunnels are being driven using a TBM (tunnel boring machine, 10.14 m in diameter) and about one-third sequentially

Der zweiröhrige, 27,3 km lange Semmering-Basistunnel in Österreich befindet sich seit 2012 in Bau. Gut jeweils 8 km pro Röhre davon werden im Baulos SBT 2.1 mittels zweier geschildeter Hartgesteinstunnelvortriebsmaschinen aufgeföhren. Für die Durchörterung der Störungszonen wurden vortriebsbegleitende Schauminjektionen bereits in der Ausschreibung festgelegt. Wie man sich auf der Baustelle dieser Thematik der Schauminjektionen genähert hat – vom Vorversuch über die ersten Einsätze zu dem letztendlich verwendeten Ansatz – wird, einschließlich einer Beurteilung der gemachten Erfahrungen, in diesem Artikel behandelt.

1 Projektbeschreibung

Der Semmering-Basistunnel ist ein seit 2012 im Bau befindlicher, 27,3 km langer Eisenbahntunnel als Teil der Baltisch-Adriatischen Achse, der in der Nähe des Semmering-Passes die nördliche Alpenkette unterquert. Die beiden parallelen Röhren verlaufen in einem Regel-Achsenabstand von 40–70 m und sind durch Querschläge miteinander verbunden [1].

Die nachfolgend angeführten Projekt- und Ausschreibungsinformationen wurden den verschiedenen Kapiteln des Bauvertrages entnommen [2]. Der gesamte Tunnel ist in drei Baulose unterteilt (Bild 1) und wird über zwei Portalbaustellen sowie drei Zwischenangriffe aufgeföhren:

- Baulos Tunnel Gloggnitz – SBT 1.1 (inkl. Zwischenangriff Göstritz)
- Baulos Tunnel Fröschnitzgraben – SBT 2.1
- Baulos Tunnel Grautschenhof – SBT 3.1

1.1 Das Baulos SBT 2.1

Das Tunnelsystem dieses Bauloses umfasst die folgenden Hauptelemente:

- Zwei eingleisige Streckenröhren mit je etwa 12,9 km Länge, welche vom Zwischenangriff Fröschnitz aus aufgeföhren werden. Diese beiden eingleisigen Röhren werden zu etwa zwei Dritteln mittels TVM (Tunnelvortriebsmaschine; Durchmesser: 10,14 m) und zu einem Drittel im zyklischen Vortrieb aufgeföhren

- Supply and disposal are carried out via two shafts, 400 m-deep, 11- and 8 m-wide (Fröschnitz 1 and Fröschnitz 2), which will be later used as ventilation shafts
- 26 cross passages at a maximum spacing of 500 m
- An underground emergency station

The contract also includes above-ground construction work for the operations, a ventilation building at Fröschnitzgraben and the operation of the Longsgraben landfill site. The following article only describes rock mass stabilisation for the two TBM drives on this contract.

1.2 Tendering of the TBM Drives

The tender specified two hard rock TBMs of type TBM-S (single shield) or TBM-DS (double shield), which are particularly suitable and equipped for the conditions described in the geological forecast (Part 4.1.1 of the tender documents) and in the design documents. There also had to be provision for the implementation of standard (RM), additional (ZM) and special (SM) measures. Some of these measures, which are geotechnically relevant, are described as examples here:

- Die Ver- und Entsorgung erfolgt über zwei 400 m tiefe, 11 bzw. 8 m weite Schächte, welche im Endzustand als Lüftungsschächte Verwendung finden (Fröschnitz 1 und 2)
- 26 Querschläge, deren Abstände zueinander höchstens 500 m betragen
- Eine Nothaltestelle

Zusätzlich beinhaltet dieses Baulos Hochbauarbeiten am Betriebs- und Lüftungsgebäude Fröschnitzgraben sowie den Betrieb der Deponie Longsgraben. In allen weiteren Betrachtungen wird lediglich auf die Thematik der Gebirgsstabilisierung der beiden TVM Vortriebe dieses Bauloses eingegangen.

1.2 Ausschreibung des TVM-Vortriebs

Ausgeschrieben wurden zwei Hartgesteins-TVM vom Typ TBM-S (Einfachschild) oder TBM-DS (Doppelschild), welche für den Vortrieb unter den insbesondere in der geotechnischen Prognose (Teil 4.1.1 der Ausschreibung) sowie in den Planunterlagen beschriebenen Verhältnissen geeignet und ausgestattet sind. Des Weiteren müssen Regel- (RM), Zusatz- (ZM) und Sondermaßnahmen (SM) umsetzbar sein. Einige dieser Maßnahmen, die die Geotechnik betreffend, werden hier beispielhaft genannt:



- 1 Construction progress at the Semmering Base Tunnel in May 2020 (already driven tunnels marked red)

Baufortschritt Semmering-Basistunnel, Stand Mai 2020 (bereits vorgetriebene Strecke ist rot markiert)



2 Injection test 1 in muck pile (site facilities cavern)
Injektionsvorversuch 1 in Haufwerk (Kaverne Baustelleneinrichtung)

Credit/Quelle: ARGE Fröschnitzgraben

Standard measures

- RM6 annular gap filling in the invert
- RM7 stowing of pea gravel in the vault

Additional measures

- ZM1 foam injection through and above the cutterhead
- ZM3 breaking of boulders in front of the cutterhead
- ZM6 full-diameter probe drilling
- ZM9 shallow radial borehole grouting to improve bedding

Special measures

- SM2 grouting/bolting of the face
- SM3 ground treatment using grout screen
- SM4 local ground treatment through the shield lubrication nipples

The tender provided the following chemical grouts:

- Two-component silicate grout (rapid reacting and strongly expanding foam, also sprayable). Associated measures: foam injection above the cutterhead (ZM1), ground treatment through lubrication nipples (SM4)
- Non-foaming elasticised two-component silicate resin with good adhesion properties and secure hardening under injection pressures of up to 10 bar. Associated measures: grouting/bolting of the face (SM2), grout screen (SM3)

Regelmaßnahmen

- RM6 Ringspaltvermörtelung im Sohlbereich
- RM7 Ringspaltverblasung mittels Perlkies im Gewölbebereich

Zusatzmaßnahmen

- ZM1 Schauminjektion durch und über dem Bohrkopf
- ZM3 Zerkleinern von Blöcken vor dem Bohrkopf
- ZM6 Vorauserkundung mittels Vollbohrung
- ZM9 Seichte radiale Bohrlochinjektion zur Bettungsverbesserung

Sondermaßnahmen

- SM2 Injektion/Ankerung der Ortsbrust
- SM3 Gebirgsvergütung mittels Injektionsbohrschirm
- SM4 Lokale Gebirgsvergütung über Schildschmiernippel

Die Ausschreibung sah folgende chemische Injektionsmittel vor:

- Zwei-Komponenten Silikatschaum (schnell reagierender und stark expandierender Füllschaum, anspritzbar). Zugeordnete Maßnahmen: Schauminjektion über dem Bohrkopf (ZM1), Gebirgsvergütung über Schildschmiernippel (SM4)
- Nicht schäumendes, elastifiziertes Zwei-Komponenten-Silikatharz mit guten Hafteigenschaften und gesichertem Aushärten bei Injektionsdrücken bis 10 bar. Zugeordnete Maßnahmen: Injektion/Ankerung der Ortsbrust (SM2), Injektionsbohrschirm (SM3)

There were no requirements concerning the staggering of the shield drives; but the maximum escape distance from the second TBM to the last cross passage to be broken through was limited to 800 m in accordance with the detailed safety plan, which is not dealt with here.

1.3 The Geology in the Tender

The geotechnical forecast in the construction contract already provided numerous indications of fault zones, which explains the additional and special measures in the TBM specification. The geotechnical forecast also describes the system behaviour in the cutterhead as well as in the shield area. As already mentioned, additional and special measures were also defined depending on the rock mass types. It was therefore obvious to consider grouting measures to improve the geotechnical properties of the advance area ahead of the TBM drives.

2 Foam Injections to Improve the Geotechnical System Behaviour

This section describes how those concerned with the foam injection approached the problem – from the preliminary tests through the first application in the TBM to the completed improvements – and how rather “spontaneous” injections evolved into an absolutely systematic approach. The stabilising effect of these measures and the amount of grouting required for the passage of the second TBM through the fault zones are also emphasised.

2.1 Preliminary Underground Tests on the Muck

The first TBM started operation on June 9, 2018. Not long afterward, preliminary tests to consolidate loose excavated material began, to assess the effectiveness of the injection foam. Two large-scale tests were carried



Credit/Quelle: ARGE Fröschnitzgraben

3 Injection test 1 in muck pile, detailed view of excavated consolidated material
Injektionsvorversuch 1 in Haufwerk, Detailansicht eines ausgegrabenen verfestigten Bereiches

Bezüglich versetzter Schildfahrt gab es keine Vorgaben; es wurde nur die maximale Fluchtweglänge der nachlaufenden Maschine zum letzten durchgeschlagenen Querschlag mit 800 m begrenzt, wobei dies dem detaillierten, hier nicht abgehandelten Sicherheitskonzept entspricht.

1.3 Die Geologie in der Ausschreibung

In der geotechnischen Prognose des Bauvertrages finden sich bereits zahlreiche Hinweise auf Störungszonen, welche die Zusatz- und Sondermaßnahmen der TVM-Ausschreibung erklären. Zusätzlich wird in der geotechnischen Prognose auf Systemverhalten im Bohrkopf wie auch im Schildbereich eingegangen. Wie bereits angeführt, wurden in Abhängigkeit der Gebirgsarten zudem Zusatz- und Sondermaßnahmen definiert. Es lag also auf der Hand, sich vor Beginn des maschinellen Vortriebes mit Injektionsmaßnahmen zur geotechnischen Verbesserung des Vortriebsbereiches zu beschäftigen.

2 Schauminjektionen zur geotechnischen Verbesserung des Systemverhaltens

Nachfolgend wird beschrieben, wie sich die mit den Schauminjektionen befassten Personen der Thematik genähert haben – von den Vorversuchen über die ersten Einsätze in der TVM, zu den erarbeiteten Verbesserungen – und auch wie aus eher „spontanen“ Injektionen ein durchaus systematischer Ansatz gefunden wurde. Der stabilisierenden Effekt dieser Maßnahmen sowie der benötigte Injektionsaufwand für den Durchgang der zweiten TVM durch die Störzonen sind weitere thematische Schwerpunkte.

2.1 Vorversuche Untertage im Haufwerk

Die erste TVM nahm am 9. Juni 2018 ihren Betrieb auf. Nicht lange danach begannen die Vorversuche zur Verfestigung eines Haufwerkes, um die Wirksamkeit des Injektionsschaums beurteilen zu können. Dazu wurden zwei Großversuche



Credit/Quelle: ARGE Fröschnitzgraben

4 Injection test 2 in muck pile, this time with relatively blocky material
Injektionsvorversuch 2 in Haufwerk, diesmal in relativ blockigem Material

out for this purpose with several hundred kilos of foam being injected through lances in each case. One pile of material had a fine-to-blocky structure – thus showing a certain grading of the material – while the second test was carried out in relatively uniformly blocky material. The requirements for the injection foam were as follows:

- no negative environmental impact,
- good penetration behaviour,
- good adhesion,
- no reaction with damp in the ground,
- a good foaming factor without developing too much pressure.

Since the TBM would also have to cut through the foam later, clogging of the cutterhead due to “heating of the foam material through friction and reversion into a sticky state” had to be ruled out. In technical terms, the foam must not have a critical glass transition temperature. The compound finally chosen was a foaming polyurea-silicate resin (PUS, which has no glass transition temperature). Experience gained in similar projects could be applied here [4].

Fig. 2 shows the first test in the site facilities cavern (the future emergency station). **Fig. 3** shows a detailed view of a grouted area, with the adhesion effect nicely visible. Originally loose, non-cohesive material was turned into a solid block through the injection of foam. It can also be easily seen that the injected foam (yellowish) has scarcely foamed or not foamed at all in the small cavities, so it has adapted itself and glued the material together very well. **Fig. 4** shows the second test in relatively blocky material. This test was undertaken to assess the foaming behaviour with respect to its foam factor and its adhesion in larger cavities. The assessment of these two large-scale tests completely confirmed the suitability of this PUS as the injection foam.

2.2 Mechanised Tunnel Drive

The regular tunnel drive of TBM 2 began on April 29, 2019, almost one year after TBM 1, which made it possible to transfer experience from TBM 1 to the second machine. Regarding the foam injection, there was a question about whether any consolidation in one tube would affect the other tube.

This report is based on experience up to the end of March 2020, by which time TBM 1 had successfully driven 3434 m of 8264 m, and TBM 2 had driven 2811 m of 8128 m – both machines therefore less than halfway through their drives. The best advance rates were 31 m on one day (TBM 1) and 548 m in a month (TBM 2).

durchgeführt, wobei jeweils mehrere hundert Kilogramm Injektionsschaum mittels Lanzen injiziert wurden. Ein Haufwerk war feinteilig bis blockig aufgebaut – wies also durchaus eine gewisse Abstufung des Materials auf – während der zweite Versuch in einem relativ gleichmäßigen, blockigen Material durchgeführt wurde. Die Anforderungen an den Injektionsschaum waren wie folgt:

- kein negativer Einfluss auf die Umwelt,
- gutes Eindringverhalten,
- gute Klebkraft,
- keine Reaktion mit Feuchtigkeit im Baugrund,
- ein guter Schaumfaktor, ohne dabei zu viel Druck zu entwickeln.

Da die TVM auch durch diesen Schaum schneiden würden, war ein Verkleben des Bohrkopfes durch „Anwärmen des Schaummaterials durch Reibung und Rückführung in einen klebrigen Zustand auszuschließen“. Technisch gesprochen darf der Schaum keine kritische Glasübergangstemperatur aufweisen. Das Mittel der Wahl war letztendlich ein schäumendes Polyureasilikatharz (PUS, hat keine Glasübergangstemperatur). Hierbei konnte auf Erfahrungen in ähnlich gelagerten Projekten zurückgegriffen werden [4].

Bild 2 zeigt den ersten Versuch in der Kaverne der Baustelleneinrichtung (später Nothaltestelle). **Bild 3** zeigt eine Detailansicht eines injizierten Bereiches, wobei sehr schön der Verklebungseffekt zu sehen ist. Ursprünglich loses, nicht kohäsives Material wurde durch die Schauminjektion in einen soliden Block verwandelt. Gut erkennbar ist auch, dass der injizierte Schaum (gelblich) in den engen Hohlräumen nicht oder nur kaum geschäumt hat, er sich also anpasst und das Material sehr gut zusammenklebt. **Bild 4** zeigt den zweiten Versuch in relativ blockigem Material. Dieser Test wurde gemacht, um das Schaumverhalten in etwas größeren Hohlräumen bezüglich seines Schaumfaktors und der Klebkraft beurteilen zu können. Die Beurteilung dieser beiden Großversuche bestätigte die Eignung des PUS-Injektionsschaumes vollumfänglich.

2.2 Maschineller Vortrieb

Der reguläre Vortrieb der TVM 2 begann am 29. April 2019, also nahezu ein ganzes Jahr nach der TVM 1. Es ergab sich dadurch die Möglichkeit, Erfahrungen der TVM 1 auf die zweite Maschine zu übertragen. Bezüglich der Schauminjektionen konnte man sich die Frage stellen, ob etwaige Verfestigungen in einer Röhre sich auch auf die zweite Röhre auswirken. Dieser Bericht beinhaltet gemachte Erfahrungen bis Ende März 2020. Bis dahin hatte die TVM 1 erfolgreich 3434 m von 8264 m vorgetrieben, die TVM 2 hatte 2811 m von 8128 m bewältigt – beide Maschinen also weniger als die Hälfte des aufzufahrenden Bereiches. Als maximale Vortriebsleistungen bis dahin sind 31 m an einem Tag (TVM 1) und 548 m im Monat (TVM 2) zu nennen.



5 Foam injection from cutterhead, TBM 1
Schauminjektion aus Bohrkopf, TVM 1

2.2.1 Start of Injections

The site was prepared for the grouting works. During the tunnel drive, it turned out that fault zones were easily spotted:

- through a very obvious increase of the cutterhead torque from 2000–4000 KNm to up to 15 000–16 000 KNm with peaks over 18 000 KNm (note: the maximum torque is 22 000 KNm)
- and through a clearly visible extra volume of conveyed material on the belt (from an intended value of 430 t (for each 2 m stroke) up to 1000 t)

The machine effectively came to a stop with no further progress possible.

The intended injection locations were the manhole, the bucket openings and the disc boxes. The prepared injection lances were 1.5–2.5 m long unperforated steel tubes with a diameter of 0.5 inch or, for the really loose areas, self-drilling glass-reinforced plastic (GRP) injection bore (IBO) anchors of the same length. The lances were inserted into the loose areas and the PUS injected through the lance using a two-piston pump, Y-piece, static mixer and connecting hose. The agreed injection stop criteria were visual assessment, visible emergence of foam or a strong increase of the pump pressure, which was however mostly assessed acoustically. The injection pressures

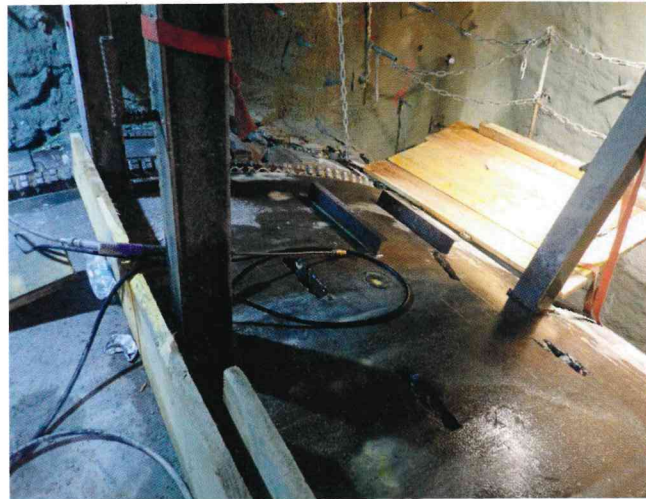
2.2.1 Der Beginn der Injektionen

Die Baustelle war auf Injektionsarbeiten vorbereitet. Während des Vortriebs zeigte sich bald, dass Störungszonen sich recht klar ankündigten:

- durch einen sehr deutlichen Drehmomentanstieg des Bohrkopfes von ca. 2000–4000 KNm auf bis zu 15 000–16 000 KNm, mit Spitzen über 18 000 KNm (Anmerkung: Das maximale Drehmoment beträgt 22 000 KNm)
- sowie durch ein deutlich sichtbares Mehrvolumen des geförderten Ausbruchsmaterials auf dem Förderband (von einem Sollwert von 430 t je 2 m Hub auf bis zu 1000 t)

Die Maschine kam quasi selbst zum Stillstand, ein weiterer Vortrieb war so gar nicht mehr möglich.

Als Injektionsstellen waren das Mannloch, die Räumeröffnungen sowie die Meißelkästen vorgesehen. Die vorbereiteten Injektionslanzen waren 1,5–2,5 m lange unperforierte Stahlrohre mit einem Durchmesser von 0,5 Zoll oder aber, für den ganz nachbrüchigen Bereich, selbstbohrende IBO-Anker aus GFK gleicher Länge. Die Lanzen wurden in den nachbrüchigen Bereich eingeführt und das PUS über eine 2-Kolbenpumpe, Y-Stück, Zwangsmischer und Verbindungsleitung zur Lanze injiziert. Als Abbruchkriterium hatte man sich auf eine visuelle Beurteilung, das sichtbare Austreten des Schaumes, wie auch auf einen starken Anstieg des Pumpendruckes geeinigt, welcher jedoch überwiegend akustisch beurteilt wurde. Die gemessenen



6 Slots visible in exposed shield of TBM 1
Schlitze sichtbar im freigelegten Schild TVM 1



7 Rotary drilling of grouting holes carried out through a drill hole in the shield (for probe drilling or special measure SM3, rock mass improvement with grout screen)
Dreh Schlagbohrung zur Herstellung der Injektionslöcher, ausgeführt über eine Bohrgasse im Schild (für eine Erkundungsbohrung oder Sondermaßnahme SM3, Gebirgsvergütung mittels Injektionsbohrschirm)

measured at the pump were between 20 and 130 bar, and the grouted volumes were in the range of single figures of tonnes for the entire grouting work for one machine stoppage. The required two-component PUS injection foam was delivered in canisters, which also permitted very efficient control of the uniform volume flow. The resin was injected in a ratio by volume of 1:1 (A+B), which was very easy to check from the number of empty canisters after each grouting phase. The measured pumping times were about 5–10 hours.

Fig. 5 shows a foam injection from the cutterhead, with the restricted and thus not ideal conditions being apparent.

Injektionsdrücke an der Pumpe betrugen zwischen 20 und 130 bar, die verpressten Volumina bewegten sich im niedrigen einstelligen Tonnen-Bereich pro gesamten Injektionseinsatz bei einem Maschinenstillstand. Der benötigte zweikomponentige PUS-Injektionsschaum wurde dafür in Kanistern angeliefert, was auch eine sehr effiziente Kontrolle des gleichmäßigen Volumenstroms zuließ. Das Harz war im Volumenverhältnis 1:1 (A+B) zu injizieren, was durch die Anzahl der leeren Kanister pro Injektionsvorgang sehr leicht zu überprüfen war. Die dafür gemessenen Pumpenstunden betrugen etwa 5–10 Stunden.

Bild 5 zeigt eine Schauminjektion aus dem Bohrkopf heraus, wobei deutlich die beengten und demnach nicht idealen Verhältnisse zu sehen sind. Das ausgequollene Schaummaterial zeigte das Ende dieses Injektionsvorganges an.

Für Störungszonen hatte sich zu diesem Zeitpunkt folgender Arbeitsrhythmus etabliert: Stopp zum Schäumen aus dem Bereich des Bohrkopfes mittels etwa 2 m langer Lanzen, anschließend Vortrieb von 2–4 m, wieder Stopp zum Schäumen und so weiter. Ein Vortrieb über einen längeren Bereich war nicht möglich; er führte dann zu exakt denselben Beobachtungen, die den Stopp wenige Meter vorher ausgelöst hatten. Man landete sozusagen in einem wenig effizienten, sehr schnell wechselnden Stop-and-Go-Betrieb über jeweils 2–4 m. Als Zeitfresser identifiziert wurden die Injektionszeiten. Um diese zu verringern, wurde stärkeres Augenmerk auf die Mehrförderung des Ausbruchmaterials gelegt. Das Abbruchkriterium wurde von ≤ 1000 t auf 600–700 t je 2 m Hub reduziert, was noch immer einem Überausbruch von etwa 50 % entspricht. Dies war der Überlegung geschuldet, weniger Gebirge potentiell aufzulockern und auch weniger Injektionsmaterial zu benötigen. Eine nennenswerte Beschleunigung des Vortriebes konnte damit jedoch nicht erreicht werden.

Der limitierende Faktor für einen effizienteren Betrieb war offensichtlich die geringe Reichweite der Schauminjektionen aus den beengten Bereichen heraus, welche somit zu erhöhen war. Da die zur Verfügung stehenden Injektionspunkte den Einsatz längerer Lanzen nicht wirklich zuließen, mussten neue Injektionspunkte gefunden werden, die das Injizieren deutlich weiter reichender und größerer Schaumvolumina zuließen.

2.2.2 Der verbesserte Injektionsansatz

Als einziger sinnvoller Platz für Injektionen bot sich der Bereich im Schutz des TVM-Schildes an. Es mussten deshalb Injektionslöcher in das Maschinenschild geschnitten werden. Man entschied sich für schlitzförmige Öffnungen, um eine deutlich größere Flexibilität bezüglich des Bohr- bzw. Injektionswinkels zu erhalten. Ausgeführt wurden sieben Schlitzte, alle im zentralen Firstbereich (etwa im Bereich von „10:30 bis 13:30 Uhr“). Bild 6 zeigt diese Schlitzte, wobei man auch deren Nähe zum Bohrkopf sehen kann (das Foto wurde im Rahmen einer Überflüstung aufgenommen). Die Schlitzte wurden während des Vortriebes mit Deckeln verschlossen.

The emerging foam shows the end of the injection process.

At this time, the following working rhythm had become established for fault zones: stop to inject foam from the cutterhead area with lances about 2 m long; an advance of 2–4 m; another stop to inject foam and so on. Advancing further was not possible because it led to exactly the same observations that had preceded the stop a few metres further back. The end result was a rather inefficient and rapidly alternating stop-and-go operation over 2–4 m in each case.

The identified time waster was the injection times. To reduce these, great attention was paid to the extra conveyance of excavated material. The machine stop criterion was reduced from ≤ 1000 t to 600–700 t per 2 m stroke, which still corresponded to an extra quantity of about 50 % compared to the theoretical quantity of 430 t. This was based on the consideration of potentially losing less of the original rock mass strength and thus needing less injection material. However, this did not lead to a noticeable acceleration of the tunnel drive.

The limiting factor for efficient operation was clearly the limited reach of the foam injection from the restricted working areas, which therefore had to be increased. Since the available injection points did not permit the use of longer lances, new injection points had to be found to permit injection with a much longer reach and in larger volumes.

2.2.2 The improved Injection Approach

The only sensible location for new injection positions was the area under the protection of the TBM shield. Injection holes thus had to be cut through the shield. A decision was made to make slot-shaped openings to gain much more flexibility regarding the drilling and injecting angle. Seven slots were made at about 10:30 to 13:30 on a clock face. Fig. 6 shows these slots, where you can also see their proximity to the cutterhead (the photo was taken during overcutting of the crown). The slots were closed with covers during the advance.

The flexibility gained with this approach allowed much deeper injection holes to be drilled. The lengths of the injection lances and the GRP IBO anchors now varied from 2 to 7 m, with lengths greater than 4 m perforated for the last 1.5–2 m (also the GRP anchors) to enable better foam injection. Graded lance lengths (two per slot) were also used, with injection always starting at the deepest point.

The injection stop criteria were again specified as emergence of foam or an increase of the pumping pressure to 180 bar. At the end of each injection, the inserted lances were flushed to make them available for further use. This

Die durch diesen Ansatz gewonnene Flexibilität wurde genutzt, um deutlich tiefere Injektionsbohrungen vorzusehen. Die Längen der Injektionslanzen bzw. GFK IBO-Anker variierten nun von 2 bis 7 m, wobei zusätzlich Lanzen ab 4 m Länge auf den letzten 1,5–2 m perforiert wurden (auch am GFK-Anker), um eine bessere Schauminjektion zu ermöglichen. Auch wurde mit abgestuften Lanzenlängen (zwei pro Schlitz) gearbeitet, wobei man die Injektionen jeweils an den tiefsten Punkten begann.

Als Abbruchkriterium wurden wieder der Schaumaustritt bzw. ein Anstieg des Pumpendruckes auf 180 bar festgelegt. Jeweils am Ende wurden die eingebauten Lanzen wieder gespült um sie für eine weitere Injektion zur Verfügung zu haben. Nach und nach erfolgten die Injektionen über alle Injektionsschlitzte. Danach begann man die Lanzen erneut mit Material zu beaufschlagen, und injizierte sozusagen eine zweite Runde, bei Bedarf auch noch eine dritte. Dies hatte das Ziel, die Hohlräume bestmöglich zu verfüllen und das Gebirge geotechnisch zu verbessern. Die Arbeiten konnten nunmehr mit deutlich mehr Platz aus einem gut gesicherten Bereich heraus ausgeführt werden, beispielhaft in Bild 7 zu sehen.

Als bestmöglicher Zeitpunkt für den Beginn der Injektionen wurde der bereits modifizierte Ansatz verfolgt, dass eine Erhöhung um 50 % der Ausbruchsförderung zum Stopp der Maschine führen würde. Zusätzlich als Auslöser etabliert



8 View of grouted area through bucket opening
Blick aus Räumeröffnung auf injizierten Bereich



9 Injected and consolidated rock from TBM 1
Injiziertes und verfestigtes Gestein aus TVM 1

Credit/Quelle: ARGE Fröschnitzgraben

wurde ein Anstieg auf 85 % des maximalen Drehmoments. Dies war dem Umstand geschuldet, dass vor Etablierung dieses Grenzwertes gelegentlich das Wiederandrehen des Bohrkopfes nicht möglich war und nach dem Injektionsstopp der Bohrkopf händisch freigeräumt werden musste. Zusätzlich wurde auch die Anpresskraft des Bohrkopfes genauer beobachtet, da deren Anstieg eine instabile Ortsbrust, teilweise auch einen Nachbruch von oben anzeigte.

Es zeigte sich sogleich, dass deutlich mehr Injektionsmaterial pro Stopp injiziert wurde. Diese Volumen lagen bei etwa 20–50 t pro Einsatz, was aber auch sofort den gewünschten Erfolg zeigte. Nach Wiederandrehen konnte die TVM relativ problemlos 6 m (= drei Hübe) fahren, ohne dass es zu Indikationen eines gestörten Gebirges kam. Durch die größeren Injektionsvolumina erfolgte eine Umstellung der PUS-Harzlogistik von Kanister auf IBCs (Intermediate Bulk Container), die 1 m³ Material fassen. Die Kontrolle der gleichmäßigen Beschickung der Pumpe mit den Komponenten A und B erfolgte über Markierungen am Füllstand auf den IBCs. Der Vortrieb in Störzonen erfolgte noch immer im Stop-and-Go Betrieb, der ununterbrochene Vortrieb über drei Hübe, gelegentlich auch vier, war nun möglich.

Die **Bilder 8 und 9** zeigen beispielhaft den Injektionserfolg: **Bild 8** zeigt einen Blick durch die Räumeröffnung vom Bohrkopf auf den injizierten Bereich, wo sehr schön die gelben Spuren des PUS-Schaumes zu sehen sind; **Bild 9** zeigt ein verfestigtes, bereits geförderttes Stück Fels.

Das Ziel, den Vortrieb durch Störzonen mittels Schauminjektionen relativ effizient zu ermöglichen, war somit erreicht. Es ist auch noch zu erwähnen, dass im Nachgang zusätzliche Injektionen in bereits mit Schäumen verklebten und verfestigten Bereichen auszuführen sind (siehe ZM9 unter 1.1). Diese Injektionen sind durch die Tübbinge hindurch vorgesehen und haben das Ziel, etwaige noch bestehende, tunnelnahe Hohlräume zu füllen und eine dauerhafte, genügend gute Bettung der Tunnelschale zu gewährleisten.

2.2.3 Der Vergleich beider TVM

Wie erwähnt, werden zwei Röhren leicht zeitversetzt von zwei Vortriebsmaschinen aufgeföhren. Da der Achsabstand der Röhren zwischen 40 und 70 m beträgt, war nicht unbedingt von einer gegenseitigen Beeinflussung auszugehen.

Man kann jetzt die Aufnahme von Injektionsmaterial über die Tunnellänge auftragen und dabei beide TVM vergleichen. Zur Erinnerung: TVM 1 begann den Vortrieb in Röhre 2, TVM 2 folgte Monate später in Röhre 1 nach. Genau dies ist in **Bild 10** dargestellt, wobei zur Vereinfachung der geringe Stationsversatz ignoriert wurde. Die betrachteten ca. 1000 Laufmeter Tunnelausbruch zeigen folgendes Bild: In TVM 1 wird injiziert, was sich zum Teil etwa stations- und volumengenau bei TVM 2 wiederholt. So sind die im blauen Rahmen hervorgehobenen Volumen etwa gleich, bei den anderen Stationen

Figs. 8 and 9 show examples of successful grouting. **Fig. 8** shows a view of the injected area through the bucket opening of the cutterhead, with the yellow traces of the PUS foam clearly visible. **Fig. 9** shows a consolidated and already conveyed lump of rock.

The aim of enabling relatively efficient boring through fault zones using foam injection had thus been reached. It should however also be mentioned that additional grouting has to be carried out subsequently in the areas that have already been glued and consolidated with foam (see ZM9 under 1.1). This grouting is carried out through the segment lining and is intended to fill any cavities still open near the tunnel to ensure permanent adequate bedding of the lining.

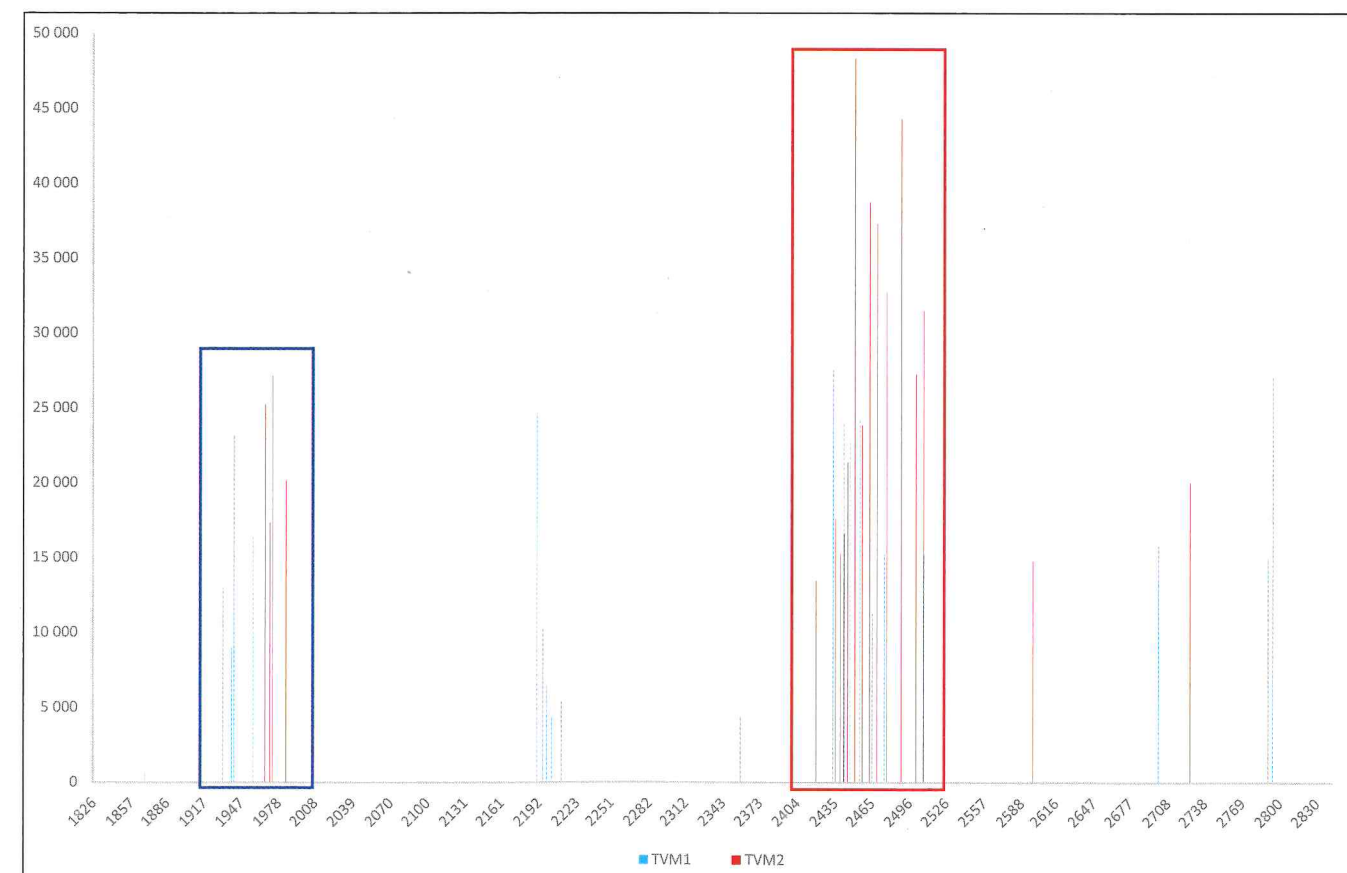
2.2.3 Comparison of the Two TBMs

As already mentioned, the first tunnel boring machine excavated its tube ahead of the other. Since the axial spacing of the tubes is between 40 and 70 m, reciprocal influencing of one tube on the other was not really expected.

wurden von der TVM 1 kleinere Volumen in offensichtlich kleinräumige Störungen injiziert, bei TVM 2 war dies nicht nötig. Mit einer, signifikanten Ausnahme bei etwa Station 2450–2490 m, die mit dem roten Rahmen in **Bild 10** hervorgehoben ist. Nachfolgend werden Beobachtungen über diese Station abgehandelt sowie Überlegungen dazu angestellt.

Beim Vortrieb der TVM 1 zeigte sich, dass über diesen gesamten Störungsbereich deutlich größere Injektionsmengen zur Stabilisierung notwendig waren; es kam hier zu insgesamt acht Injektionsstopps. Die TVM fuhr aus der Störung heraus, und die eingebauten Tübbinge zeigten den Anstieg einer Belastung durch zunehmende Deformationen und erste Risse. Um diesen Bereich zu stabilisieren, wurden Zusatzinjektionen durch die Schale (ZM9) angeordnet. Als Injektionsmaterial kam Zementsuspension zur Anwendung. Als Injektionstiefe waren 1,5 m vorgesehen, ausgeführt wurden 2 m. Diese Maßnahme reichte aus, die Deformationen zu stoppen.

Etwa vier Monate später durchfuhr TVM 2 offensichtlich denselben Störungsbereich in einem Achsabstand von 40 m zur bereits aufgeföhrenen Röhre (Gleis 2). Die nach den gleichen Kriterien injizierten Schaumvolumina waren 2,5 Mal größer als



10 Foam injection in running tunnel 2 (TBM 1, blue) and running tunnel 1 (TBM 2, red): Grout take per measure in kg (y axis) against tunnel chainage (x axis). The slight chainage offset has been ignored as a simplification

Schauminjektion Streckenröhre 2 (TVM 1, blau) und Streckenröhre 1 (TVM 2, rot): Injektionsaufnahme pro Maßnahme in kg (y-Achse) über Vortriebsstationierung (x-Achse). Der geringe Stationsversatz wurde zur Vereinfachung ignoriert

Credit/Quelle: ARGE Fröschnitzgraben

It is possible to draw a diagram of the grout consumption over the tunnel length and thus compare the two TBMs. TBM 1 started boring in tube 2, and TBM 2 followed months later in tube 1. Grouting volumes are shown in Fig. 10, with the slight chainage offset ignored as a simplification. The considered excavation of about 1000 running metres of tunnel shows the following picture: grouting is carried out in TBM 1, and this is sometimes repeated at the same chainage and with the same volume in TBM 2. The volumes marked with a blue rectangle are about the same. At other chainages, smaller volumes were apparently injected into small-scale faults in TBM 1, which was not necessary for TBM 2. One significant exception is chainage 2450–2490 m, which is marked with a red rectangle in Fig. 10. Observations about this section are now described and discussed.

As TBM 1 passed through, it turned out that much larger quantities had to be injected to stabilise this fault zone, with eight stops in total for grouting. The TBM drove out of the fault, and the installed segment lining showed increased loading through increasing deformation and cracks. In order to stabilise this section, additional grouting was carried out through the lining (ZM9), with cement suspension being used as grout. An injection depth of 1.5 m was specified, with 2 m-deep injections carried out. This measure was sufficient to stop the deformations.

About four months later, TBM 2 drove through the same fault zone at an axial distance of 40 m from the already driven tube (track 2). The foam volumes injected under the same stop criteria were 2.5 times greater than previously with TBM 1, and 15 grouting stops were necessary. As TBM 2 was passing through the fault zone (tube 1), a renewed increase of deformation was observed in tube 2 (TBM 1), and the cracks in the segments became larger (Fig. 11).

TBM 1 was stopped and it was decided to remove the loose segment parts and replace them with shotcrete. A shotcrete inner lining strengthened with mesh and U-profiles was also installed in the extended crown area. These measures had the intended impact and stabilised this section.

What conclusions can be drawn from this?

TBM 1 bored through a fault zone, which was partially consolidated with injected foam. The volume balance of the belt weigher indicated significant overbreak, which was only partially backfilled with foam. The remaining rock bridges led to a very uneven loading of the lining and to the observed cracks, which were stopped with more grouting very near the lining. This resulted in a system with a factor of safety of slightly greater than 1. Any additional loading would make the scarcely stable state unstable again (it should be noted here that it is much easier to make this observation with hindsight).



11 Overloaded segments in running tunnel 2 (TBM 1)
Überbeanspruchte Tübbinge in Streckenröhre 2 (TVM 1)

Monate vorher bei TVM 1, und es waren dafür auch 15 Injektionsstopps notwendig. Schon während der Durchörterung von TVM 2 (Röhre 1) durch die Störzone zeigte sich eine erneute Aufnahme von Deformationen in Röhre 2 (TVM 1), die Risse in den Tübbingen wurden größer (Bild 11).

Der Vortrieb der TVM 1 wurde eingestellt und man entschied sich, die losen Tübbingteile zu entfernen und durch Spritzbeton zu ersetzen. Zusätzliche wurde eine mit Gittermatten und U-Profilen verstärkte Spritzbetoninnenschale im erweiterten Firstbereich eingebracht. Die Maßnahmen führten zum gewünschten Erfolg und stabilisierten diesen Bereich.

TBM 2 drove into the same fault zone and consumed much more grout. It cannot be assessed here whether this was due to local reduction of rock mass strength by the earlier passage of TBM 1 or whether other reasons were decisive. In any case, load transfer from the excavation of TBM 2 reached the other track and led to additional loading, which once again overloaded the just stabilised lining.

It can therefore be said that, despite the very large axial spacing of 40 m, there was reciprocal loading of the tunnel tubes in this fault zone.

3 Conclusions

It has been clearly demonstrated that the injection of PUS foam as a tunnel advances can lead to considerable improvement of the rock conditions and, in some cases, it is necessary to enable a successful TBM drive in the first place. The preliminary tests carried out in the cavern proved a successful way to ensure that the grouting measures were as efficient as possible.

For injecting from the machine, it was found that longer lances, or drilling that reached further forward, reduced the continuous alternation between stoppage and grouting and thus enabled more efficient tunnelling. This required the provision of suitable injection slots in the machine, which enable variable and multi-stage injection and are also useful for the geologists as viewing slots.

Regarding the criteria for stopping the machine and starting grouting, it can only be said that these should indeed be specified at an early stage but must be continuously adapted to the specific requirements on site.

A geotechnical consideration of the grouting measures is generally very advantageous, although with larger fault zones, more attention must be paid to deeper rock mass consolidation. For this purpose, deep initial or subsequent grouting is expressly recommended – and not only for the case of a second parallel tube.

Finally, the authors wish to thank Austrian Railways ÖBB, who have made the publication of this article possible.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Semmering-Basistunnel>
- [2] Bauvertrag Teil B/2, B/3 Anhang 06 und B/4
- [3] <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/semmering-basistunnel/aktuelles-s>
- [4] Ground improvement with urea silicate foam for a shielded hard rock TBM, Köpf M., Mayr R., Hong Kong Tunneling Conference 2009

Welche Schlussfolgerungen lässt dies nun zu?

TVM 1 durchörterte eine Störung, welche mit Injektions-schaum teilverfestigt wurde. Die Volumenbilanzen der Bandwaage deuteten signifikante Mehrausbrüche an, welche auch mit einem schäumenden Material nur teilweise aufgefüllt wurden. Die verbleibenden Gesteinsbrücken führten zu einer stark ungleichmäßigen Belastung der Ausbauschale und zu den festgestellten Rissen, welche mit sehr ausbruchsnahen Injektionen gestoppt wurden. Man hinterließ sozusagen ein System, welches einen Sicherheitskoeffizienten geringfügig über 1 aufwies. Jede Zusatzbelastung würde den gerade noch stabilen Zustand wieder instabil werden lassen (es ist hier anzumerken, dass es viel leichter ist, diese Betrachtung einige Zeit später anzustellen).

TVM 2 fuhr in dieselbe Störung und konsumierte offensichtlich deutlich mehr Injektionsmaterial. Ob dies aufgrund einer Teilauflockerung bereits durch den Vortrieb der TVM 1 erfolgte oder aber andere Gründe dafür ausschlaggebend waren, kann hier nicht beurteilt werden. Auf jeden Fall reichte die Lastumlagerung durch den Ausbruch der TVM 2 bis zum anderen Gleis und sorgte dort für eine Zusatzbelastung, welche die gerade stabilisierte Schale erneut überforderte.

Es kann also behauptet werden, dass es trotz des doch sehr großen Achsabstandes von 40 m zu einer wechselseitigen Belastung der Tunnelröhren im Bereich dieser Störung kam.

3 Schlussfolgerungen

Es hat sich ganz klar gezeigt, dass PUS-Schauminjektionen vortriebsbegleitend eine deutliche Gebirgsverbesserung herbeiführen können und ggf eine erfolgreiche TVM-Durchörterung überhaupt erst ermöglichen. Um diese Injektionsmaßnahmen möglichst effizient durchführen zu können, haben sich die in der Kaverne durchgeführten Vorversuche bewährt.

Für Injektionen aus der Maschine heraus hat sich gezeigt, dass längere, weiter nach vorne reichenden Lanzen bzw. Bohrungen den ständigen Wechsel zwischen Injizieren und Stillstand verringern und somit einen effizienteren Vortrieb zuließen. Dazu sind auf der Maschine aber geeignete Injektionsschlitze vorzusehen, welche variable und mehrstufige Injektionen ermöglichen und auch den Geologen als Sichtschlitze dienen können.

Bezüglich der Kriterien zu Maschinenstopp und Injektionsbeginn kann nur gesagt werden, dass diese zwar frühzeitig festgelegt werden sollen, aber fortlaufend auf die speziellen Baustellenerfordernisse angepasst werden müssen

Eine geotechnische Betrachtung der Injektionsmaßnahmen ist grundsätzlich sehr vorteilhaft, wobei aber bei größeren Störungszonen mehr Augenmerk auf eine tiefere Gebirgsverfestigung gelegt werden sollte. Zu diesem Zweck sind auch tief reichende Erst- oder Nachverpressungen ausdrücklich empfohlen – und dies nicht nur für den Fall einer zweiten parallelen Röhre. Zu guter Letzt möchten die Autoren noch der ÖBB danken, welche die Veröffentlichung dieses Artikels ermöglicht haben.