
VORTRIEBSOPTIMIERUNG DURCH EINSATZ VON STAHLFASER- SPRITZBETON BEIM VORTRIEB DER 2. RÖHRE DES TUNNELS ROPPEN

OPTIMIZING THE TUNNELLING PROCESS AT THE TUNNEL ROPPEN BY MEANS OF STEEL FIBRE REINFORCED SHOTCRETE

Dipl.-Ing. Gerhard **Brugger**, ÖSTU-Stettin Hoch- und Tiefbau GmbH, Leoben, Österreich

Von den 4.985 Vortriebsmetern der zweiten Röhre des Roppener Tunnels waren knapp 70% in den vortriebstechnisch günstig eingestuften Formationen des Hauptdolomits aufzufahren.

Im zentralen Tunnelbereich wurde ausschließlich die Vortriebsklasse F3 angetroffen, welche in der Kalotte Abschlaglängen bis 3,0 m gestattete. Aufgrund des Trennflächengefüges im Dolomit war es allerdings auch im besten angetroffenen Gebirge zu jeder Zeit erforderlich, zumindest im First- und Kämpferbereich eine Kopfschutz-Sicherung mit bewehrtem Spritzbeton und sofort wirkenden Swellex-Ankern einzubauen.

Durch den Einsatz von Stahlfaser-Spritzbeton - als Sondervorschlag der Arbeitsgemeinschaft - konnte sowohl eine signifikante Steigerung der Vortriebsleistung, als auch eine deutliche Reduktion der Baukosten erzielt werden.

About 70% of the 4.985 meter long, second tube of the Tunnel Roppen had to be mined in good rock conditions of dolomites.

The very best tunnelling conditions were encountered during excavation of the central dolomite section, where blasting rounds of 3.0 meters were feasible at top heading and only little support was necessary. However, due to the given complex jointed structure of the rock, even within the best sections, at least the roof had to be supported with a layer of reinforced shotcrete and instantly effective Swellex bolts.

After a specific proposal of the contractor, steel fibre reinforced shotcrete was implemented instead of wire mesh. By this, a significant improvement of the daily performance as well as a considerable reduction of the overall construction costs could be achieved.

1. Einleitung

Mit 5.100 Metern Länge ist der Roppener Tunnel einer der größten Autobahntunnels in Österreich. Die erste Röhre wurde bereits vor 20 Jahren errichtet und wird seither im Gegenverkehr betrieben.

Die zweite Röhre, welche aufgrund der aktuellen Verkehrsentwicklung und der generell gestiegenen Standards der Tunnelsicherheitstechnik dringend notwendig geworden ist, befindet sich derzeit im Bau. Sie wird in einem Abstand von ca. 40 Metern parallel zur Bestandsröhre geführt. Insgesamt 23 Querschläge (davon 16 begehbare und 7 befahrbare) zwischen den beiden Röhren stehen nach Fertigstellung als Flucht- und Rettungswege zur Verfügung (Bild 1).

Die Arbeiten an der Neubauröhre wurden im Herbst 2006 in Angriff genommen. Seit Herbst 2008 sind die Rohbauarbeiten fertiggestellt und die Tunnelausrüster am Werk.

Der bergmännische Tunnelvortrieb betrug 4.985 Meter. Er wurde, größtenteils im Sprengvortrieb, inklusive zusätzlich ca. 1.000 Meter Querschlägen, in einer Rekordzeit von weniger als 12 Monaten aufgefahren, was in der Hauptröhre einer mittleren Tagesleistung von fast 14 Metern je Kalendertag entspricht. Die erbrachte Vortriebsleistung übertraf selbst die ehrgeizigen Vorgaben aus Kalkulation und Bauvertrag. Der Kalottendurchschlag erfolgte rund ein Monat früher, als prognostiziert.

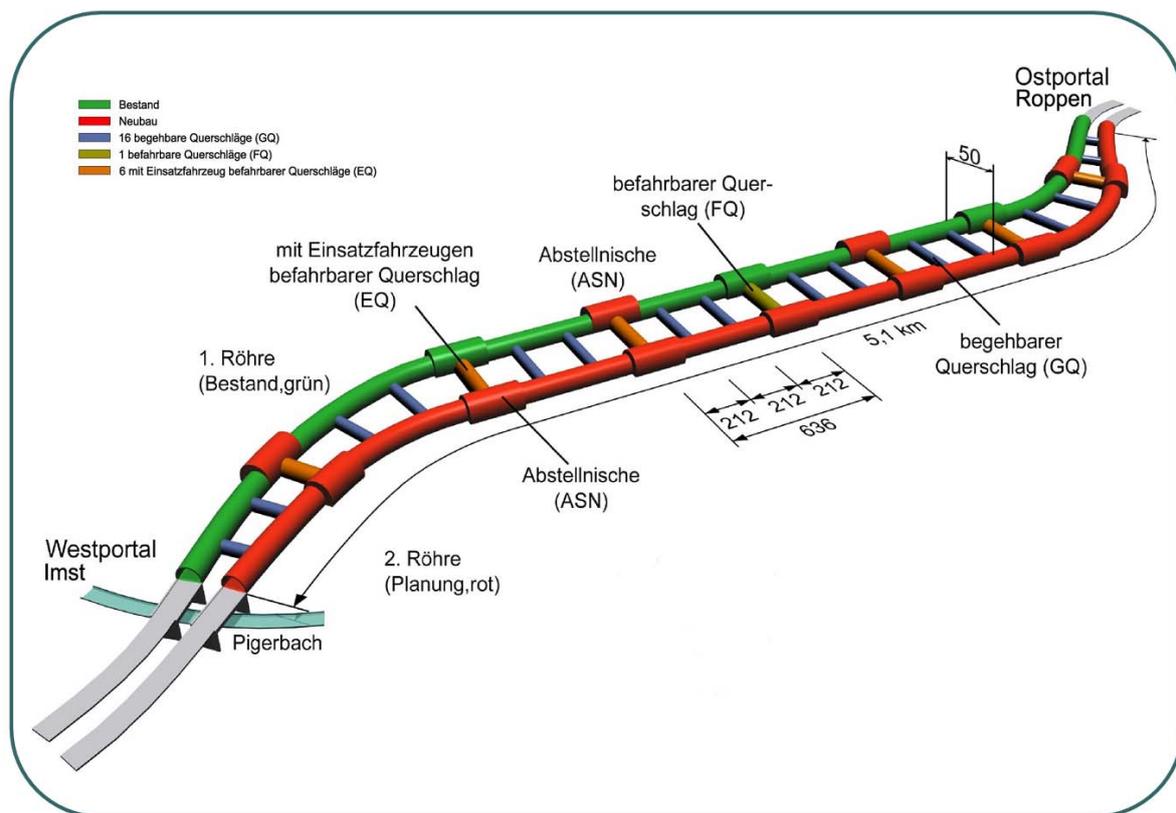


Bild 1: Visualisierung der Baumaßnahme (Grafik: ASFINAG)

Die Gründe dafür, dass dies möglich war, sind mannigfaltig:

- Ein hoch motiviertes und hervorragend eingespieltes Team auf der Baustelle vor Ort,
- Ein optimierter Personal- und Geräteeinsatz durch Stopp- & Go-Betrieb,
- Ein leistungsfähiger Vortrieb mit innovativer Sprengtechnik und modernem Schuttkonzept,
- Günstige geologische Randbedingungen, welche eine optimale Grundlage für den großmaßstäblichen Einsatz von Stahlfaser-Spritzbeton bildeten.

2. Vorgeschichte der Ausführungsalternative „Stahlfaser-Spritzbeton“

Der Einsatz von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton ist - zumindest im österreichischen Verkehrstunnelbau - nach wie vor nur eine in seltenen Ausnahmefällen angewandte Technologie. Wie bei den meisten Tunnelbauverträgen in Österreich war daher, auch im Bauvertrag für den Roppener Tunnel, der Einsatz von Stahlfaser-Spritzbeton ursprünglich nicht vorgesehen gewesen. Die Sicherung der Ausbruchslaubung erfolgte der Planung zufolge durchwegs konservativ, nach den Grundsätzen der NÖT: Anker, Baustahlgitter und Spritzbeton waren in den „guten“ Vortriebsklassen vorgesehen; in den geotechnisch anspruchsvolleren Bereichen zusätzlich noch Tunnelbögen und – bei Bedarf – Vorpfändelemente.

Erst im Zuge der Bauausführung wurde die Idee der Bau ausführenden Arbeitsgemeinschaft geboren, als Alternative zur mattenbewehrten Spritzbetonlage, unter gewissen Voraussetzungen Stahlfaser-Spritzbeton einzusetzen. Dabei waren „gewisse Voraussetzungen“ zuerst nur überall dort angedacht, wo der Aufwand für das Einbauen der Baustahlgitterlage ein überdurchschnittlich hoher war: in Sonderquerschnitten, wie Nischen, Querschlägen, sowie Kreuzungs- und Verschneidungsbauwerken.

Im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Planungsbesprechungen wurde diese erste Idee den Bauherrn und Planern vorgetragen und durchaus wohlwollend aufgenommen. Im Lauf der weiteren technischen und wirtschaftlichen Erwägungen kristallisierte sich heraus, dass die Technologie für beide Vertragspartner in noch größerem Umfang vorteilhaft eingesetzt werden kann: Die geologischen Bedingungen am Roppener Tunnel boten die seltene Gelegenheit, Stahlfaser-Spritzbeton nicht nur in Sonderquerschnitten, sondern auch beim „Normalvortrieb“ im Regelquerschnitt anzuwenden.

3. Geologisch- geotechnische Randbedingungen

Der Roppener Tunnel liegt im südwestlichen Ausläufer des mächtigen Tschirgant-Massivs und durchquert im Wesentlichen drei geologische Grundeinheiten (Bild 2):

- Lockermaterial, in der Eingangsstrecke am Ostportal und im Bereich des Pitztaler Knotens, größtenteils in Form von bindigen bis schwach verfestigten Moränenkörpern mit einem Anteil von rund 10 % der Tunnelstrecke;
- Raibler Schichten, anstehend als Wechselfolge von Ton- und Schluffsteinen, Mergeln und Tonschiefern, mit einem Anteil von rund 20% des Tunnels; sowie
- Hauptdolomit, der mit 70 % Streckenanteil die Leistung bestimmende Formation des Vortriebs am Roppener Tunnel darstellte.

Nun ist „Dolomit“ ein Gebirge, in dem auch - bekanntermaßen übervorsichtige - Tunnelbauer bisweilen mutig werden.

Denn die zumeist hohe Festigkeit der Dolomitgesteine, ihre geringe Abrasivität, die gute Standfestigkeit, die relative Wasserunempfindlichkeit, ... sind nur einige der „guten“ Eigenschaften, mit denen „Dolomit“ gerne verbunden wird.

Die geotechnisch wirklich relevante Qualität des Hauptdolomits wird allerdings von ganz anderen Faktoren bestimmt: den Trennflächen, ihrem Gefüge, ihrer Beschaffenheit und ihrer Lage in Bezug auf Tunnelachse und Vortriebsrichtung.

So war auch am Roppener Tunnel die Dolomitstrecke von einem markanten Trennflächensystem von meist steil einfallenden Schicht- und Kluffflächen geprägt, welche – bei ansonsten guter Standfestigkeit des Gebirges – insbesondere im First- und Kämpferbereich immer wieder zu vermehrter Nachbrüchigkeit und geologisch bedingten Mehrausbrüchen führten (Bild 3).

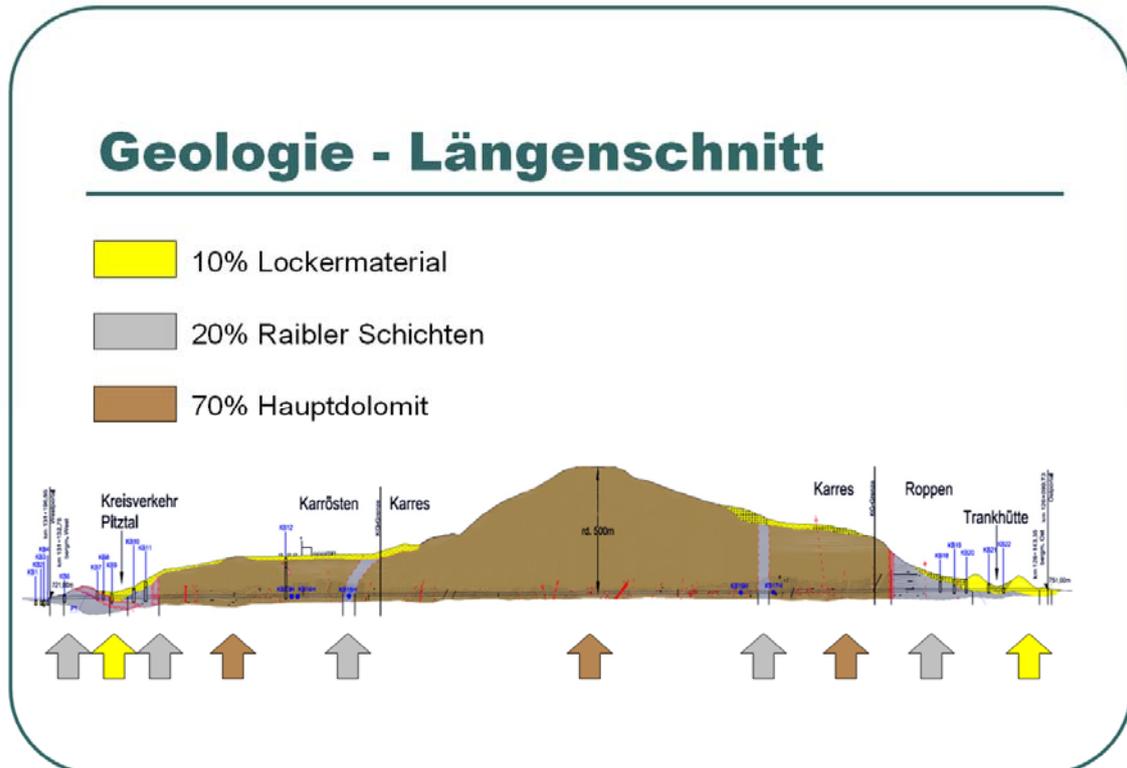


Bild 2: Geologischer Längenschnitt durch den Roppener Tunnel – Hauptgebirgsarten und Homogenbereiche (Quelle: ASFINAG)



Bild 3: Markante Trennfläche im linken Kämpfer des Ostvortriebes führt zu geologisch bedingtem Überprofil (Foto: Arge Tunnel Roppen).

Die Abschlaglänge im Hauptdolomit betrug im Regelfall 3,0 m (Vortriebsklasse F3/ ... nach ÖNORM B 2203). Auf eine sofortige und systematische Sicherung nach jedem Abschlag, mit 4 m langen Swellex-Ankern, einer Lage Baustahlgitter (AQ50), und 10 cm Spritzbeton konnte jedoch im Kalottenvortrieb - auch in den besten angetroffenen Dolomitgesteinen – aufgrund der Trennflächensituation zu keinem Zeitpunkt verzichtet werden.

Dabei ist insbesondere das Aufbringen der Gitterlage ein zeitkritischer und personalintensiver Vorgang im Arbeitszyklus, bei dem zumindest die halbe Vortriebsmannschaft im frisch ausgebrochenen Bereich, unter einer noch ungesicherten Firste, arbeiten muss. Nicht selten werden beim „Stoppellochbohren“, darunter versteht man das Herstellen der ca. 50 cm tiefen Bohrlöcher zum Einschlagen der Befestigungshaken für die Baustahlmatten (zumeist im Raster von ca. 1,0 x 1,0 m), zusätzliche Auflockerungen und Nachbrüche aktiviert.

Neben dem Schüttern ist daher das Gittern der gefährlichste Arbeitsschritt im Zyklus von Hochleistungs-Sprengvortrieben.

Bei der Anwendung von Stahlfaser-Spritzbeton entfällt dieser Arbeitsschritt zur Gänze, was allein aus Gründen der Arbeitssicherheit für diese Methode spricht.

4. Vorversuche und Spezifikationen

Nachdem am grünen Tisch die Grundsatzentscheidung der Verwendung von Stahlfaser-Spritzbeton – ausschließlich für die „besten“ Vortriebsklassen F3/ ... - gefallen war und auch eine Vergütungsregelung vereinbart werden konnte, die für die Vertragspartner eine „Win-Win“- Situation ergab, machte man sich auf der Baustelle mit Hochdruck an die technische Erprobung.

Technisches Ziel war die Herstellung eines Stahlfaser-Spritzbetons, welcher bei einer Dicke von 10 cm einen vergleichbaren Ausbauwiderstand erreichte, wie eine gleich dicke, einlagig mit AQ50 bewehrte Spritzbetonschale.

Dabei sollte die zuvor ausgezeichnet bewährte Spritzbetonrezeptur und verwendete Gerätekonzeption weitestgehend unverändert bleiben (Tab. 1).

In mehreren Testreihen wurden verschiedene Fasertypen und –fabrikate, jeweils mit Dosierungen von 30 bis 40 kg/m³ praktisch getestet und Prüfkörper angefertigt. Es stellte sich beim Spritzen mit dem Spritzroboter „Meyco Suprema“ rasch heraus, dass eine zu hohe Faserdosierung und zu lange Fasern zu Problemen bei der Verarbeitung, namentlich „Igelbildung“ und Stopfern im Spritzschlauch, hinter der Düse, führten.

Fasern mit einer Länge von rund 30 mm konnten hingegen bei Dosierungen von 30 bis 35 kg/m³ im Regelfall, auch bei voller Spritzleistung von ca. 18 m³/h, problemlos verarbeitet werden.

Letztendlich fiel, sowohl aus technischen wie wirtschaftlichen Erwägungen heraus, die Wahl auf die Stahlfaser des Typs UNOLOC[®] 30/0.6 mm, welche bei einer Dosierung von 30 kg/m³ die angestrebten Materialkennwerte voll erbringen konnte (Tab. 2).

Das Arbeitsvermögen nach EFNARC Plattendruckversuchen an 3 Spritzkisten lag, knapp unter 700 Joule, nach SIA 162/6 ca. 5000 Nm/m. Mit diesen Werten konnte der zuvor erwähnte rechnerische Nachweis der Gleichwertigkeit mit einer herkömmlich bewehrten Außenschale hergeleitet werden.

Tabelle 1: Spritzbeton-Rezeptur

Stahlfaser-Spritzbeton

Verfahren:	Nass-Spritzbeton	
Spritzgerät:	Meyco Suprema, Leistung bis 18m ³ /h	
Schlauchgarnitur:	65 mm / Düse 50 mm	
Betonrezeptur:	CEM I 42,5 R HS C3A-frei	420 kg/m ³
	Zuschlag	0/8 mm
	Zusatzstoff: Hydraulit M	20 kg/m ³
	W/B Wert	0,44
	Fließmittel Viscocrete SC305	0,9 %vZ
	BE-Mittel Gecedral F2000HP	8,0 %vZ
Faserdosierung:	UNOLOC® 30/0.6	30 kg/m ³

Tabelle 2: Produktdatenblatt Stahlfaser / Abb. DINO 100 (Quelle: IFT)

Produktdatenblatt

Stahldrahtfasern

UNOLOC 30/0.6

Stahldrahtfasern mit Endhaken

1. Faserform

Abmessungen:

Länge:	30 mm +/- 10 %
Durchmesser:	0,6 mm +/- 10 %
Wirksame L/D:	50
Höhe des Endhakens:	2,5 mm +/- 10 %
Länge des Endhakens:	6,0 mm +/- 10 %
Winkel des Endhakens:	40° +/- 10 %
Faseranzahl:	~ 15.026 St./kg

Festigkeiten:

Zugfestigkeit:	> 1.200 N/mm ²
Rohdichte:	7,85 kg/dm ³
Anzahl der Biegungen:	≥ 2
Biegeradius:	180° um 2,5 mm Lehre
Oberfläche:	Blank, Graublank, verzinkt „Z“



DINO 100 cws am Roppener Tunnel

Die Anlieferung der Stahlfasern auf die Baustelle erfolgte vorwiegend in „Big Bags“. Die Faserzugabe in die Trommeln der Mischfahrzeuge wurde durch eine vollautomatische mobile Dosieranlage DINO 100 cws realisiert.

5. Praktische Umsetzung und Erfahrungen

Erst, nachdem die durchwegs positiven Ergebnisse der vorgeschriebenen Prüfungen vorlagen, konnte im Juli 2007 in beiden Vortrieben mit der praktischen Umsetzung des Einsatzes von Stahlfaser-Spritzbeton begonnen werden. Bis dahin waren bereits knapp 1.500 Meter der Dolomitstrecke aufgeföhren und ausschreibungsgemäß – mit Baustahlgitter – gesichert worden. Die restliche Dolomitstrecke von 2.035 Meter hingegen wurde – bis zum Durchschlag im Oktober 2007 - durchwegs mit Stahlfaser-Spritzbeton gesichert.

Dieses unmittelbare Neben- bzw. Nacheinander alternativer Bauverfahren bei ansonsten identischen Rahmenbedingungen ermöglicht den direkten und seriösen Vergleich und gestattet es, die Vorteile der Fasertechnik eindrucksvoll zu veranschaulichen.

Ein Vergleich der Vortriebszyklen – ermittelt wurden die durchschnittlichen Teilzeiten aller Kalottenabschläge in Vortriebsklasse F3/ ... mit Baustahlgitter bzw. Faserbewehrung – ergibt eine signifikante Steigerung der Vortriebsleistung von 30 % durch die Anwendung von Faserspritzbeton (Bilder 4 und 5).

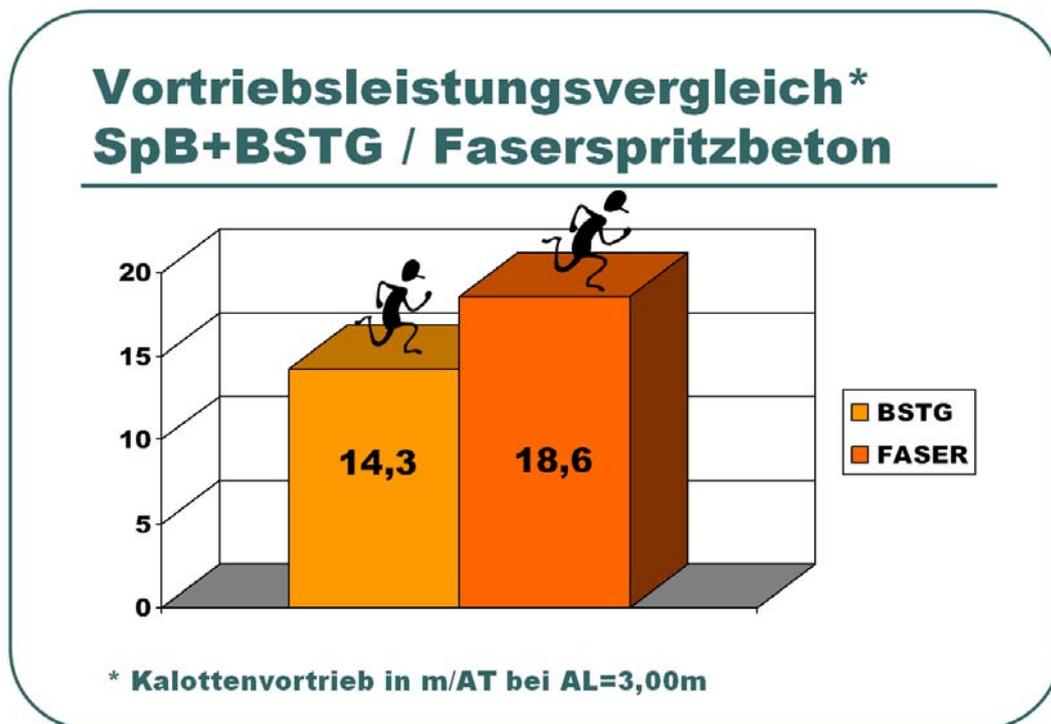


Bild 4: Vergleich der Vortriebsleistungen in der Kalotte

Bemerkenswert ist, dass die Leistungssteigerung nicht nur im Arbeitsgang „Gittern“ zustande kommt, der mit durchschnittlich 45 Minuten zur Gänze entfällt. Es fällt auf, dass auch 15 Minuten beim „Bohren“ und 10 Minuten beim „Spritzen“ eingespart werden konnten.

Die ersteren 15 Minuten Zeiteinsparung beim Bohren lassen sich durch den Entfall der „Stoppellöcher“ und davon häufig induzierter geologisch bedingter Nachbrüche erklären.

Die gesteigerte Spritzleistung wiederum ist allgemein auf einen reduzierten Spritzbetonverbrauch zurückzuführen. Dieser ist im Besonderen durch verminderten Rückprall und die Reduktion des geologisch bedingten Mehrausbruchs beim Herstellen der „Stoppellöcher“ bedingt.

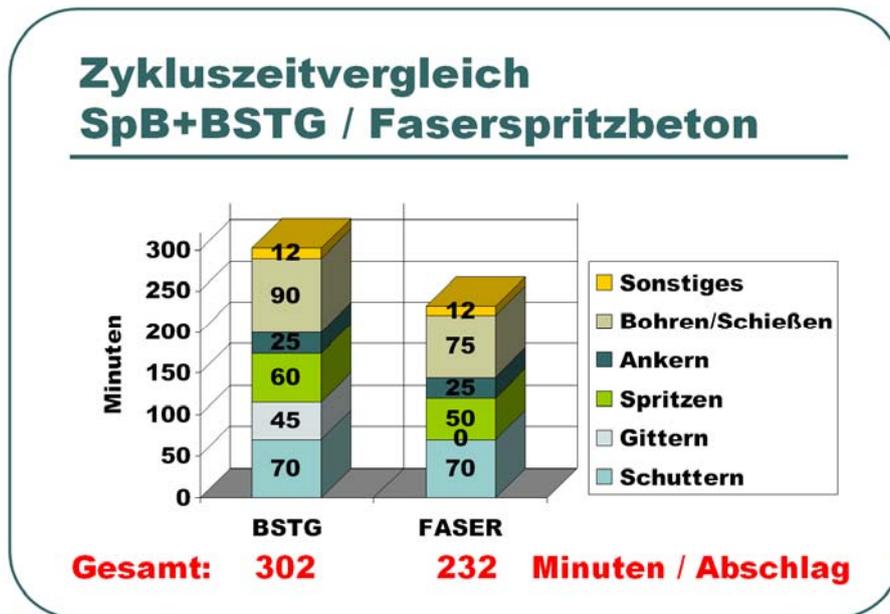


Bild 5: Zykluszeitvergleich

Die Grafik aller erbrachten Vortriebsleistungen im SOLL-IST Vergleich (Bild 6) veranschaulicht den signifikanten Anstieg sowohl der tatsächlich erbrachten IST- wie auch der vertraglichen SOLL-Vortriebsleistungen. Da Stahlfasern – im Gegensatz zum Baustahlgitter – entsprechend der ÖNORM B 2203 bei der Ermittlung der zweiten Ordnungszahl nicht berücksichtigt werden, profitiert der Bauherr durch einen billigeren Ausbruchpreis für technisch gleichwertige Ausführungsqualität.

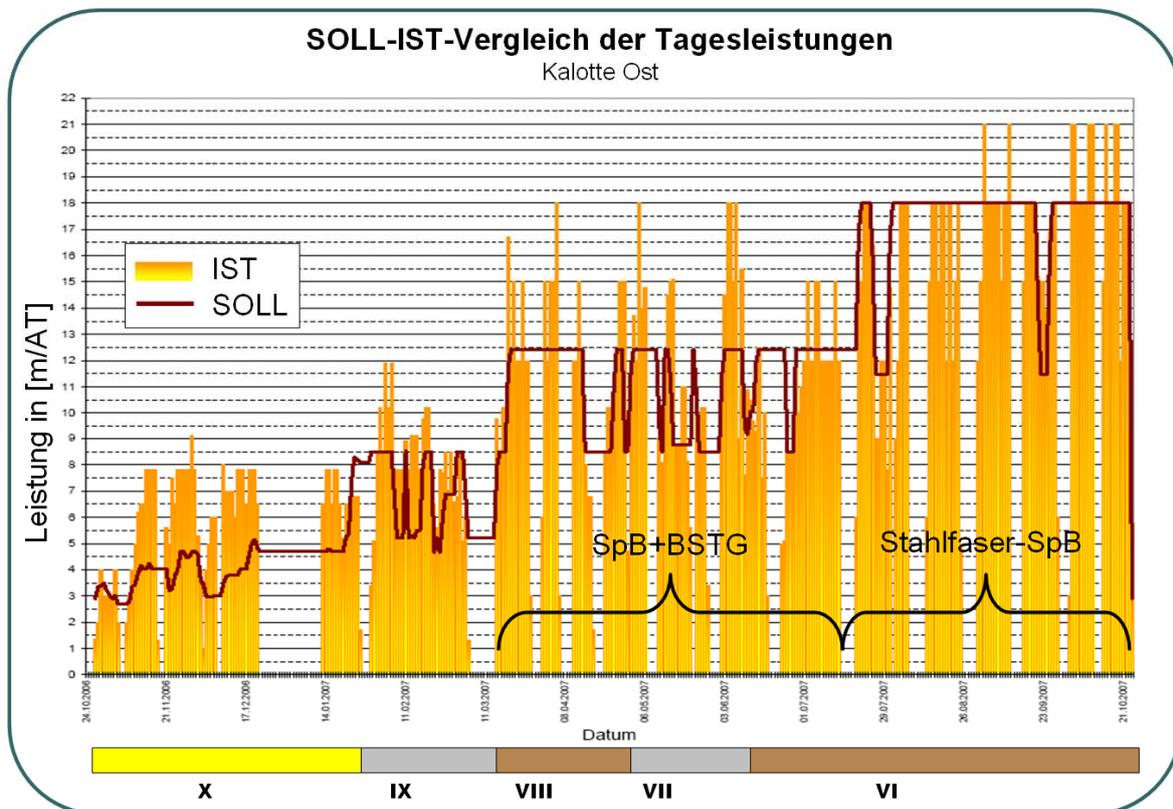


Bild 6: SOLL-IST-Vergleich der Vortriebsleistungen in der Kalotte des Vortriebs Ost

Ebenso profitieren beide Vertragspartner von einer effektiven Verkürzung der Vortriebsdauer: Durch die erzielte Leistungssteigerung konnten, wie die Rückrechnung für eine Strecke von 2.035 Metern ergibt, insgesamt ca. 33 Vortriebstage an Bauzeitverkürzung „eingespart“ werden (Bild 7).

Schlussendlich trat noch ein anderer, nicht weniger bemerkenswerter Vorteil der Arbeit mit Stahlfaser-Spritzbeton zutage: eine wesentlich geringere Abhängigkeit der Tagesleistung von personellen Engpässen bei den Vortriebsmannschaften. Die „Standardbesetzung“ eines Vortriebsdrittels betrug zwar in beiden Fällen 6 Mann, jedoch machte sich speziell beim Gittern als personalintensivste Tätigkeit eine (krankheits- oder urlaubsbedingte) Reduktion auf unter 5 Mann sofort als Leistungsminderung bemerkbar. Beim Arbeiten mit Stahlfaser-Spritzbeton konnte hingegen auch mit manchmal auf nur 4 Mann reduzierten Mannschaften zumindest tageweise eine adäquate Leistung erbracht werden, wie bei Vollbesetzung.

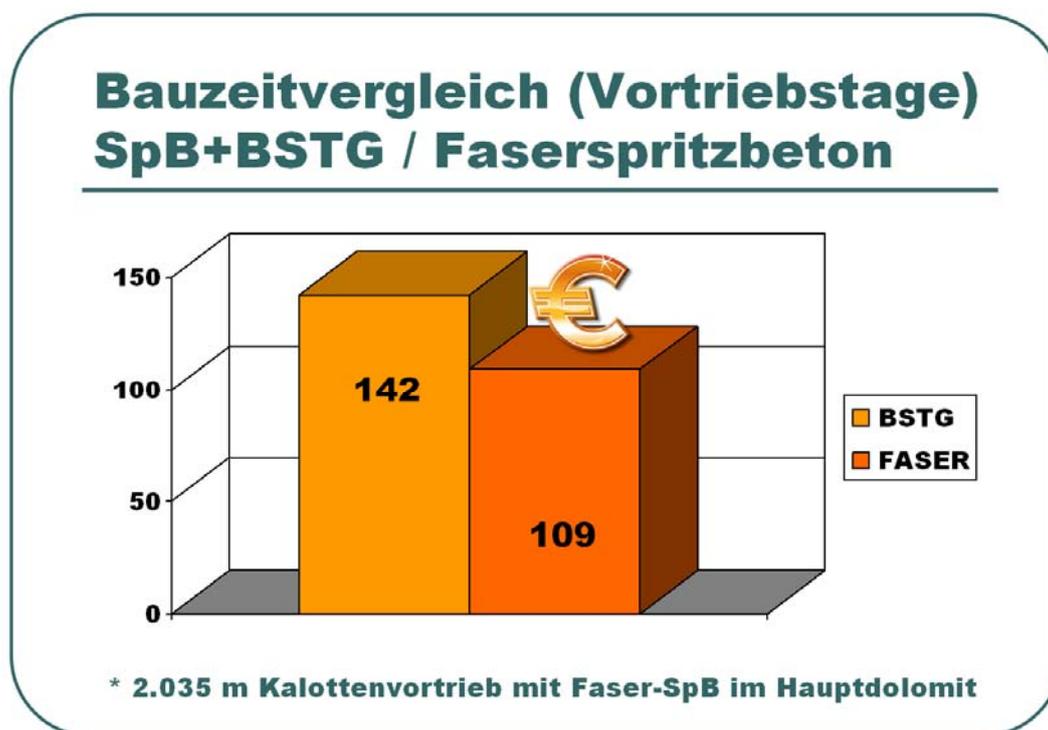


Bild 7: Theoretische Vortriebsdauer für Kalottenvortrieb, rückgerechnet aus Zykluszeiten

6. Schlussfolgerungen und Manöverkritik

Außergewöhnliche Stör- und Zwischenfälle, die auf die Ausführungsalternative zurückzuführen gewesen wären, sind auf über 2 Kilometer Vortriebsstrecke nicht bekannt geworden. Auch in allen Sonderquerschnitten hat sich der Einsatz von Stahlfaser-Spritzbeton erwartungsgemäß bestens bewährt.

Verbesserungspotentiale waren, wenn überhaupt, bestenfalls im logistischen Bereich der Faserdosierung zu lokalisieren, wo hin und wieder kleinere Betriebsstörungen aufgetreten sind.

Zu guter Letzt sei der einzig bekannt gewordene *Nachteil* einer Außenschale aus Stahlfaser-Spritzbeton erwähnt: Ihre Oberfläche ist, aufgrund der teilweise herausragenden Nadeln, als Abdichtungsuntergrund ungeeignet. Diesem Umstand sollte bei der Kalkulation und Ausführung des Abdichtungsträgers Rechnung getragen werden.

7. Zusammenfassung

Zusammenfassend gesehen ist der „Großversuch“ am Roppener Tunnel für alle Projektbeteiligten sowohl technisch als auch wirtschaftlich ausgesprochen erfolgreich verlaufen. Auch im Hinblick auf die Arbeitssicherheit hat die Fasertechnologie deutliche Vorteile gezeigt.

Es ist nur bedauerlich, dass durch eine zu lange Prüf-, Entscheidungs- und Genehmigungsprozedur bis zum Eintritt der Vortriebe in die relevanten Gebirgsbereiche des Hauptdolomits zu viel Zeit verstrichen ist, um noch mehr vorhanden gewesene Einsparungspotentiale nutzen zu können.

Es bleibt zu hoffen, dass Bauherren und Planer, basierend auf den positiven Erfahrungen aus Roppen, der zukunftsweisenden Faserspritzbetontechnologie auch bei kommenden Projekten mit „günstigen Randbedingungen“ eine Chance geben werden.

Der Autor

Dipl.-Ing. Gerhard Brugger
Absolvent der Montanuniversität Leoben, Studienrichtung Bergwesen, Wahlfachgruppe Tiefbauingenieurwesen, 1989
Projektleiter der ÖSTU-Stettin Hoch- und Tiefbau GmbH, Abt. Untertagebau, Leoben (A),
2006 - 2008 Bauleiter der Arge Tunnel Roppen
brugger.gerhard@oestu-stettin.at