
TBM-TUNNELVORTRIEB MIT EINBAU VON SOHLTÜBBINGEN UND STAHLFASERSPRITZBETON

TBM-TUNNEL-DRIVE WITH INSTALLATION OF INVERT SEGEMENTS AND STEEL FIBRE REINFORCED SHOTCRETE

Martin **Eberli**, NV Bekaert SA, Zwevegem, Belgien
Alexander **Bender**, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, TU Wien, Wien, Österreich

Dieser Artikel beschreibt die Anwendungserfahrungen eines Tunnelausbaus mit Stahlfaserspritzbeton in Kombination mit Sohlübbingen. Aus diesem Verfahren erhofft man sich mit optimaler Prozessgestaltung eine Zeit- und Kostenersparnis herauszuarbeiten. Die Kernfrage beim Einsatz von Stahlfaserspritzbeton liegt in den Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Geologie. In diesem Beitrag werden, anhand eines bereits abgewickelten Projektes, die Dimensionierung einer Stahlfaserspritzbetonschale in Abhängigkeit der Sicherungsklassen vorgestellt. Daraus lassen sich erste Erkenntnisse für einen Standardisierungsprozess dieser Technik ableiten. In Verbindung mit dem Einbau eines vorgefertigten Sohlübbings stellt diese Bauweise eine konkurrenzfähige Variante zur Tübbingauskleidung dar. Weitere Projekte mit der hier vorgestellten Erstanwendung sind bereits in Planung.

This article describes the application experiences of a tunnel lining with steel fibre reinforced shotcrete in combination with tunnel segments. The core question for the use of steel fibre reinforced shotcrete lies in the application limits with regard to geology. In this paper, the design of a steel fibre reinforced shotcrete shell in dependence of the securing classes are presented based on an already completed project. From these first findings a standardization process of this technology can be established. If this construction method is combined with the installation of a prefabricated invert tubbing, it is a competitive alternative to conventional tubbing lining. An outlook for projects under construction show, that the presented construction method is a promising approach.

1. Einleitung

Die Erläuterungen und Erfahrungen, die in diesem Artikel dargestellt sind, beschränken sich auf den maschinellen (kontinuierlichen) Tunnelbau, sprich jenes Verfahren, bei denen Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) zum Einsatz kommen. Durch diese Vortriebsvarianten kann das Übermaß des Sollprofils deutlich geringer gehalten werden als im konventionellen Sprengvortrieb. Für die Vortriebsmannschaft ergibt sich eine höhere Arbeitsplatzsicherheit und geringere MAK-Konzentrationswerte. Die Arbeitsweise der Maschine erfolgt taktweise entsprechend der installierten Hublänge.

Der Bohrprozess wird hinsichtlich der Dauer durch das anstehende Gestein und die maschinentechnischen Leistungsparameter bestimmt. Sämtliche nachlaufenden Tätigkeiten folgen der Taktgeschwindigkeit aus den Vorgaben des Bohrens. Die Sicherung des Hohlraumes erfolgt entweder mittels Spritzbeton oder Tübbingschale. In diesem Artikel wird eine Kombination beider Varianten in Form eines Sohlübbings und Spritzbetonsicherung erläutert. Das Versetzen der Sohlübbinge und das Auftragen von Spritzbeton werden in der

Nachläufereinrichtung vorgenommen. Hier finden anspruchsvolle logistische Prozesse statt. Die Materialversorgung und der Sicherungseinbau müssen auf die Bohrgeschwindigkeit abgestimmt sein, um den Takt der Maschine geringstmöglich zu beeinflussen. Im Falle von Ortbetoneinsatz kann der Sohlensausbau den Bauablauf massiv stören. Vor allem nicht abgestimmte Aushärtezeiten und in weiterer Folge die Verzögerung der Erstbelastung können zu erheblichen Verlusten an Zeit führen. Durch die Verwendung von Fertigteilen für die Tunnelsohle kann die Erstbelastungsfrist entfallen. Ebenso liegen Spritzbetonarbeiten am kritischen Weg. Das heißt, während des Spritzbetonauftrags kann die Maschine keine Bohrleistung erbringen. Sofern der Tunnel zweischalig ausgebaut wird, stellt die Innenschale im Allgemeinen keinen kritischen Prozess in der TBM-Leistungskette dar, da diese erst mit einigem örtlichen Versatz nachgezogen wird.

Für die Herstellung beider Betonbauteile, sprich Sohlübbing und Spritzbetonsicherung, kann eine Bewehrung in Form von Stahlfasern zweckmäßig sein. Die Stahlfaserbewehrung ist vor allem davon abhängig, ob sie gespritzt oder werksmäßig eingebaut wird. Eine Übersicht gängiger Varianten für Tübbinge und Spritzbeton bietet Tabelle 1. Die Mindestdosierung basiert auf den Herstellerangaben. Diese können durch Normen oder Richtlinien länderspezifisch abweichen.

Tabelle 1: Kennwerte handelsüblicher Stahlfasern [5]

Einsatzgebiet	Faserlänge	Faserdurchmesser	Zugfestigkeit	Minstdosierung lt. Hersteller
Spritzbeton	35 mm	0,55 mm	1.345 N/mm ²	15 kg/m ³
Tübbing	60 mm	0,75 mm	1.800 N/mm ²	10 kg/m ³

Im Falle des Sohlübbings führt der Einsatz von Stahlfasern zum Entfall des klassischen Bewehrungskorbes, was in der Reduktion von Mannstunden für die Bindung und Verlegung mündet. Auch bei Anwendung von Stahlfaserbeton im Spritzbetonverfahren können Mannstunden für die Herstellung der Netze entfallen. Neben einer Kostenreduktion profitiert die Arbeitssicherheit, da kritische Arbeitsprozesse an der ungesicherten Ausbruchlaibung gesenkt werden.

Die Herstellung der Hohlraumsicherung im Tunnelbau durch Spritzbeton bietet vor allem folgende Vorteile:

- a) Entfall der Schalung
- b) Einfaches Aufbringen dünner Schichten
- c) Abdeckung der Anforderungen an die Frühfestigkeit

Dicke und Anforderungen an den Spritzbeton richten sich vor allem nach den vorherrschenden Bedingungen unter Tage. Die Zugabe von Stahlfasern zum Spritzbeton ist für Österreich in der ÖNORM EN 14889-1 [11] geregelt. Da im aufgetragten Spritzbeton weniger Fasern enthalten sind als im Mischgut, ist der Fasergehalt regelmäßig zu überprüfen. Bezüglich der Verbundanforderungen aus Beton und Stahlfasern gibt es festgelegte Grenzen für Größtkorn und Betonfestigkeitsklasse. Im Tunnelbau wird zum Aufbringen meist das Nassspritzverfahren verwendet, da hier eine geringere Staubeentwicklung vorliegt. Die Herstellung von Arbeitsfugen sind im Vorfeld genau zu planen, da ein Übergriff der Fasern zwischen zwei benachbarten Betonierabschnitten in der Regel nicht vorliegt. Gegebenenfalls muss eine zusätzliche Anschlussbewehrung eingelegt werden [2].

Für die Herstellung von Stahlfaserspritzbeton werden geeignete Stahlfasern in die Ausgangsmischung des Betons hinzugegeben. Die Mindestdosierung liegt in Österreich bei 30 kg/m³, dadurch können folgende besondere Eigenschaften erzielt werden:

- Verbesserung des Nachrissverhaltens bzw. Energieabsorptionsvermögens
- Verringerung der Frühschwindrissbildung
- Ersatz der Bewehrung bei nicht konstruktiv bewehrten Bauteilen
- Verbesserung der Homogenität durch Vermeidung von Spritzschatten aus der Bewehrung

Die Zugabe kann in der Mischanlage, im Fahrwischer oder am Förderband zur Spritzmaschine erfolgen. Die losen Fasern müssen dabei entwirrt sein um keine „Igel“ (Faserklumpen) zu bilden. Bei geklebte Faserbündeln entfällt dieser Arbeitsschritt. Mit einer Dosiereinrichtung kann die Zugabe auch erst direkt im Förderstrom der Spritzmaschine von Statten gehen [2].

2. Ausgangslage

Im Falle langgestreckter Tunnelbauwerke mit homogener Geologie und gleichbleibendem Querschnitt wird dem maschinellen Tunnelbau oft der Vorzug gegeben. Über lange Vortriebsstrecken kann eine hohe Vortriebsleistung die Vorlaufzeiten aus Maschinenanlieferung und -installation wieder aufholen, welche beim konventionellen Vortrieb entfallen. Zum einen werden die Sicherheitsbedingungen untertage durch die maschinellen Vorkerhungen deutlich verbessert. Zum anderen können Nachbrüche und Übermaß deutlich reduziert werden. Der kontinuierlich fortschreitende Prozess minimiert Fehlerquellen und optimiert den baubetrieblichen Ablauf. Durch maschinengestützte Datenaufzeichnungen wird eine gute Dokumentation der Vortriebsarbeiten möglich. Vor allem im Zuge der Digitalisierung können solche Datenbestände sinnvoll genutzt werden. Die Vielzahl der positiven Aspekte mündet in der regen Anwendung des maschinellen Vortriebes weltweit. Die Durchmesser der ausgebrochenen Querschnitte reichen im maschinellen Tunnelbau von 1,50 m bis 19,00 m.

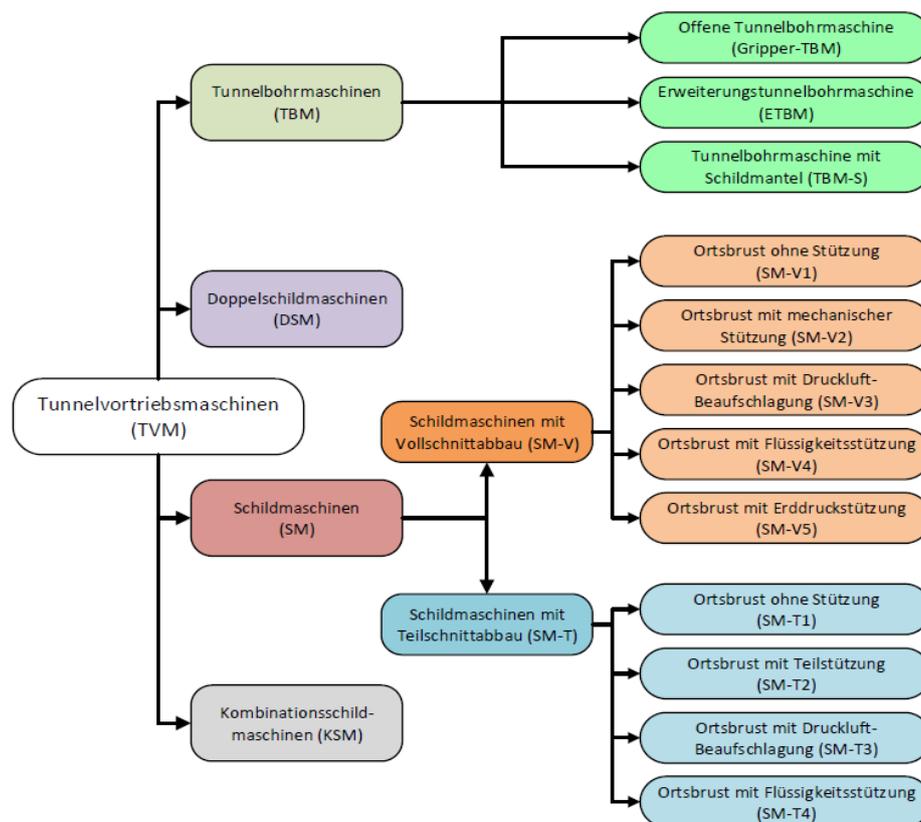


Bild 1: Übersicht der verschiedenen Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) nach DAUB – modifiziert nach Bisenberger T. [10]

Bild 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Tunnelvortriebsmaschinen. Die TVMs lassen sich in vier große Gruppen unterteilen:

- a) Tunnelbohrmaschinen (TBM)
- b) Doppelschildmaschinen (DSM)
- c) Schildmaschinen (SM)
- d) Kombinationsschildmaschinen (KSM)

Tunnelbohrmaschinen werden bevorzugt im Festgestein bzw. Fels ohne Grundwasserandrang eingesetzt. Im Falle der offenen Tunnelbohrmaschine (auch Gripper-TBM) und der Erweiterungstunnelbohrmaschine wird die Maschine am Ausbruchsrand des Gebirges mit einer Grippereinrichtung verspannt, anschließend erfolgt der Abbau durch den Bohrkopf. Die Stützung des Gebirges erfolgt, je nach Bedarf, in einem dem Bohrkopf nachgelagerten Maschinenabschnitt durch den Einbau von Stützmittel. Tunnelbohrmaschinen mit Schild werden ebenfalls im Festgestein eingesetzt, jedoch wird bei dieser Vortriebsvariante standardmäßig eine vollumfängliche Tübbingschale eingebaut. Diese Maschine besitzt keine Grippereinrichtung, der Vorschub erfolgt durch Hydraulikpressen, welche sich am zuletzt eingebauten Tübbingring abstützen [10].

Im Lockergestein, in Baugrund mit Grundwasser und in heterogenen Böden bedient man sich in der Regel einer Schildmaschine. Diese kann eine kontinuierliche Stützung des zu durchörternden Gebirges mit Hilfe ihres Schildes aufbringen. Der Vorschub erfolgt durch Hydraulikpressen, welche die nachlaufende Tübbingauskleidung des Tunnelbauwerkes als Widerlager nutzen. Bei Schildmaschinen wird zwischen Vollschnittabbau und Teilschnittabbau unterschieden. Außerdem können die verschiedenen Gebirgsstützungen charakterisiert werden [10].

Die Doppelschildmaschine setzt sich aus zwei nacheinander angeordneten Maschinenabschnitten zusammen. Der an der Ortsbrust liegende Teil besteht aus dem Bohrkopf und den Hauptvortriebspresen, im nachgelagerten Teil sind die Nebenvortriebspresen und eine Grippereinrichtung installiert. Mit Hilfe dieser zwei voneinander unabhängigen Hydraulikeinrichtungen kann man mit der DSM in zwei Varianten vortreiben. Bei Vortriebsarbeiten im Festgestein wird das Vortriebsdrehmoment über die Gripper abgetragen. In Baugründen, welche sich nicht zum Abtragen der Vortriebskräfte über die Gripper eignen (Lockergestein), stützt sich die Maschine auf den zuletzt eingebauten Tübbingring ab.

Die Kombinationsschildmaschine steht stellvertretend für Anpassbare Schildmaschinen mit kombinierter Verfahrenstechnik. Dabei kann beim Bau von Tunnelbauwerken mit wechselhaftem Baugrund (oft reicht die Bandbreite des Gebirges vom lockeren Boden bis hin zum Fels), je nach geotechnischen Gegebenheiten, die Verfahrensart angepasst werden [10].

Der gegenständliche Artikel beschreibt die Vorteile und Erfahrungen einer Ausbauvariante beim Einsatz einer offenen Tunnelbohrmaschine (TBM-O). In Bild 2 ist eine Schemaskizze dieser Maschinenvariante veranschaulicht. Die Gesamteinrichtungen gliedern sich in die TBM selbst und die Nachläufereinrichtung. Die verschiedenen Arbeiten hinsichtlich Gesteinsabbau und Sichern finden in den dafür vorgesehenen Arbeitsbereichen statt. Im Bereich von Störzonen oder Nachbrüchen muss der Berg gesichert werden, nach dem Firstschild, im Arbeitsbereich A1, besteht die Möglichkeit verschiedene Sicherungsmassnahmen zu installieren. Im Arbeitsbereich A2, beginnt der Aufbau der Innenschale, hier werden Spritzbeton und Sohlübbing eingebaut. [8]

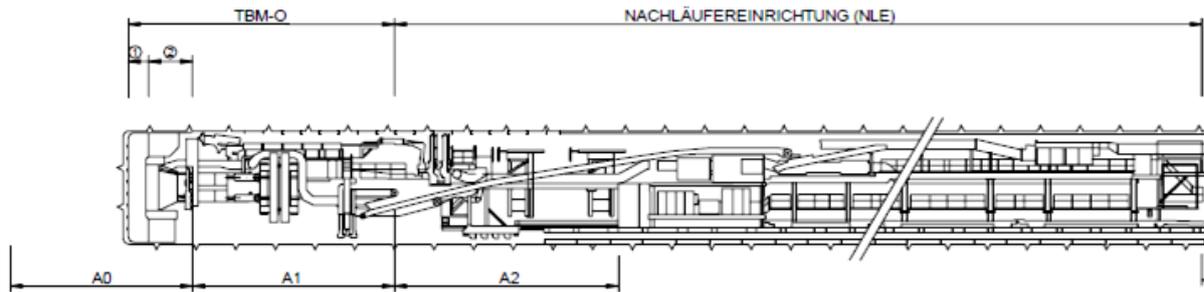


Bild 2: Arbeitsbereiche einer offenen Tunnelbohrmaschine (A0...über und vor dem Bohrkopfträger und Firstschild, A1...im Bereich der TBM, A2...im vorderen Bereich der NLE, A3...hinter der NLE) [8]

Als Beispiel für hochwertige Ergebnisse und Erkenntnisse beim Einsatz dieser Maschinenvariante ist der Gotthard Basistunnel, Schweiz, zu nennen. Für die Durchörterung des Gotthardmassivs waren auf 85 km Tunnellänge 4 Gripper-TBM im Einsatz. Die Vortriebsstrecke entspricht dabei 75% des gesamten Haupttunnels. Die Felssicherung wurde konventionell mit Spritzbeton und Ankern, sofern nötig, ausgeführt. Hierfür war auf dem TBM-Nachläufer eine Betonspritzeinheit verbaut.

Üblicherweise wird das Nassspritzverfahren angewendet, da eine kontinuierliche Beschickung des Spritzroboters mit Nassmischgut relativ einfach zu bewerkstelligen ist. Die spritzfertige Betonmischung lässt sich mit den entsprechenden Zusatzstoffen über eine längere Zeit transportieren oder auch begrenzt lagern. Die logistischen Anforderungen sind hoch, können aber mit maßgeschneiderten betontechnologischen Konzepten bewerkstelligt werden.



Bild 3: Spritzbetonmanipulator auf elliptischem Bogen, Fa. Sika – Aliva, [6]

Der heute hochmechanisierte Tunnelbau verwendet beim Einbau des Spritzbetons einen Spritzbetonmanipulator. Das im Bild 3 dargestellte Gerät ist auf einem fahrbaren Joch aufgebaut, dieses sitzt wiederum auf der Nachläufereinrichtung der TBM. Der Spritzbetonmanipulator muss sowohl im Arbeitsbereich A1 zur Sofortsicherung als auch im Arbeitsbereich A2 für die Auskleidung eingesetzt werden können [6].

Der Sohleneinbau stellt eine maßgebende Einschränkung bei der Versorgung der Ortsbrust dar. Im Falle einer Ortbetonsohle darf diese im frischen Zustand nicht belastet werden. Die Abbindezeit bis zum Erreichen der vorgeschriebenen Belastungsfestigkeit kann demnach am kritischen Weg liegen und die Bauzeit maßgebend beeinflussen. Um die Dauer der Erstbelastungsfrist zu verkürzen, kann schnellabbindender Beton eingesetzt werden. Dieser erreicht eine hohe Frühfestigkeit. Jedoch können hier die Beschleuniger die Endfestigkeit negativ beeinflussen. Der Endzustand kann dadurch außerdem mehr Schwindrisse aufweisen.

Durch einen vorgefertigten Sohlübbingen werden mehrere Nachteile einer Ortbetonsohle und die dadurch auftretenden Probleme an der Wurzel gelöst. Durch eine zeitlich vorgelagerte, werkmäßige Herstellung entfallen sämtliche Fristen bis hin zur vollständigen Belastbarkeit des Fertigteilelements. Das Versetzen kann mittels Tübbingerektor im Zuge der mechanisierten Prozesskette einer Tunnelbohrmaschine bequem erfolgen. Durch das werkmäßige Einbinden von Formteilen oder Gleistragplatten bietet ein Sohlübbing weitere Vorteile.

3. Wahl des Vortriebskonzeptes und der Ausbaumethode

Nach der Maschinenauswahl folgt eine vertiefende Analyse logistischer Anforderungen aus baubetrieblichen Aspekten. Das Ausbruchmaterial wird meist über Förderbänder durch den Nachläufer transportiert. Der Transport des Sicherungsmaterials zur Ortsbrust erfolgt meist im gleis- oder radgebundenen Betrieb. Als Aufnahme- und Umschlagplatz dient wieder die Nachläufereinrichtung. Von einem hier situierten Zwischenspeicher aus erfolgt die Manipulation der Sicherungsmittel hin zum gewünschten Einbauort.

Für eine maximale Tagesleistung kann in Abhängigkeit des Baugrundes ein Wert von bis zu 30 m/AT angesetzt werden. Würde eine Ortbetonsohle zum Einsatz kommen, muss darauf geachtet werden, dass die Sohle nicht gleichzeitig unter dem Nachläufer hergestellt werden kann. Die Abbindezeit bis zur Erstbelastung stellt einen wesentlichen Schwachpunkt in der baubetrieblichen Zeitoptimierung dar. Selbst bei deutlich geringeren Vortriebsgeschwindigkeiten von etwa 7 m/AT käme es höchstwahrscheinlich zu Zeiteinbußen auf Grund der Ausschulfrist. Erfahrungswerte für Ausschulfristen in Abhängigkeit der Zementfestigkeitsklasse sind in Tabelle 2 angegeben. Die Betonieretappen von Ortbetonsohlen bewegen sich dabei zwischen 8 – 12 m.

Tabelle 2: Erfahrungswerte für Ausschulfristen aus DIN 1045:1988-07 [1]

Festigkeitsklasse des Zements	Seitliche Schalung von Balken und Schalung von Wänden und Stützen
	[Tage]
42,5 R, 52,5 N, 52,5 R	1
32,5 R, 42,5 N	2
32,5 N	3

Aus diesem Grund wird die Sohle meist später, nachdem Firste und Ulme bereits fertiggestellt sind, eingebaut. Aber auch in diesem Fall können die Ausschulfristen und daraus resultierende Wartezeiten nicht ausgeschaltet werden. Mit einer Brücke über den Sohleneinbau kann die Wartezeit reduziert werden, man benötigt aber eine weitere Grossinstallation im Tunnel. Um diese Hilfsbrücke anwenden zu können, muss der Ausbruchquerschnitt einen Mindestdurchmesser aufweisen, damit ein erforderlicher Lichtraum über der Brücke für den Fahrzeugverkehr bestehen bleibt. Der limitierende Faktor beim Einbau von Ortbeton ist somit die Aushärtezeit und damit einhergehend die Verzögerung, bis der Beton belastet werden darf.

Vorproduzierte Elemente, in Form von Sohlübblingen, haben den Aushärteprozess bereits hinter sich und können versetzt, ausgerichtet und belastet werden. Eine Montageeinheit für Sohlübblinge wird am Nachläufer installiert und so in den Gesamtprozess integriert. Die Koordination der Zulieferung muss in den Logistikplan einfließen. Mittels just-in-time Belieferung vom Fertigteilwerk hin zur Sicherungsstelle reduzieren sich die Installationsflächen auf den Baustelleneinrichtungsflächen. Ein Zwischendepot der Sohlelemente auf dem Nachläufer garantiert einen kontinuierlichen Einbau ohne Unterbrechung. Im Bedarfsfall kann die Einbautätigkeit mit einer anderen Arbeit gekoppelt werden, um die Mannschaft nicht zu vergrössern, sondern gegebenenfalls zu verkleinern.

Zusammenfassend kann der Sachverhalt wie folgt dargestellt werden. Die zeitaufwändigen Faktoren im Sicherungseinbau mit Ortbetonsohle sind

- a) Einbauzeit
 - Produktion der Schalung, Armierung, Betonieren, Erstbelastungsfrist
- b) Logistik
 - Bewirtschaftung Materiallager vor dem Tunnel, Qualitätsmanagement Baumaterial vor der Anwendung
 - Anlieferung im Tunnel, Schalmaterial, Armierung, Material für die Betonprüfung, Qualitätsmanagement, Beton

Um die komplizierte Logistik bei Ortbetonverarbeitung in der Tunnelsohle zu vermeiden ist der Einsatz von Fertigteilen zweckmässig. So kann vor allem die Erstbelastungsfrist umgangen werden. Für den Einbau von Fertigteilen gilt es, baubetriebliche Konzepte für folgende Punkte zu dimensionieren:

- a) Transport der Sohlelemente zur Einbaustelle
- b) Transport des Sicherungsmaterials (Schrauben, Dübel, Mörtel) zur Einbaustelle
- c) Entkoppelte Schutterung

3.1 Vorgefertigter Sohlübbling

Am Beispiel des Tunnelbaus am CERN im schweizerisch-französischem Grenzgebiet können die in Tabelle 3 dargestellten Kosten für Bewehrung hergeleitet werden. Die angegebenen Werte verstehen sich als Herstellungskosten und entstammen dem Projekt *Vorbereitungsarbeiten Large Hadron Collider (LHC), CERN*, und unterliegen der Preisbasis 2018. Es gelangen hier die Varianten konventionelle Bewehrung, Faserbewehrung und eine Kombination beider Bewehrungsmöglichkeiten zur Analyse. Miteinbezogen in die Kostenberechnung werden die Materialkosten der Stahlbewehrung bzw. Faserbewehrung, die Einbaukosten und die Kosten für allfällige Hilfsmaterialien wie Distanzstreifen und Unterlagsleisten.

Tabelle 3: Erfahrungswerte für die Herstellung von Sohlübblingen [3]

Bewehrung konventionell 105 kg/m ³		Faserbewehrung 35 kg/m ³		Kombi-Bewehrung 50 kg/m ³ + 35 kg/m ³	
Bezeichnung	Preis	Bezeichnung	Preis	Bezeichnung	Preis
Stahl (S 500 d)	850 €/t	Faser	1.950 €/t	Stahl (S 500 d)	1.280 €/t
Fertigung	420 €/t	Zugabe	50 €/t	Faser	2.000 €/t
Einbau	5 €/t				
Distanzhalter	5 €/t				
Gesamtkosten	1.280 €/t		2.000 €/t	Stahl 64.- €/m ³ + Faser 70.- €/m ³	
Gesamtkosten	134 €/m ³		70 €/m ³	134 €/m ³	

Nachfolgend wird Tabelle 3 genauer erläutert. In der ersten Spalte sind die Werte für eine konventionelle Bewehrung mit 105 kg/m³ Stahl S 500 d zu Materialkosten von 850 €/t

aufgezeigt. Die Fertigung (Vorarbeiten, Schweißen, etc.) der Armierung benötigt 420 €/t. Der Einbau des Bewehrungskorbs wird mit einem Ansatz von 5 €/t gerechnet und die Distanzhalter aus dem Systemkasten werden ebenfalls mit 5 €/t kalkuliert. Die Herstellungskosten der Bewehrung belaufen sich auf 1.280 €/t. Daraus resultieren Kosten von 134,40 €/m³ Beton.

Die zweite Spalte betrachtet die Anwendung von Stahlfaserbeton. Die Materialkosten einer hochfesten Faser liegen bei 1.950 €/t, dies entspricht den Materialeigenschaften und dem höheren Fertigungsgrad des Baustoffs. Die Zugabe in die Betonmischung ist mit 50 €/t kalkuliert, beinhaltet sind hier Lagerung und Dosierung in die Betonmischung. Die Kosten von Material (Faser) und Zugabe liegen bei 2.000 €/t, auf die benötigten 35 kg/m³ ergibt dies einen Betrag von 70 €/m³.

Die dritte Spalte betrachtet die Stahlkosten bei einer kombinierten Bewehrung, hier wird ein reduzierter Anteil Bewehrungsstahl plus der gesamte Stahlfaseranteil von 35 kg/m³ analog einer reinen Faserbewehrung verwendet. 50 kg/m³ Bewehrung liegen somit bei 64 €/m³ zuzüglich des Kostenansatzes der Faserbewehrung von 70 €/m³ erhält man einen Betrag von 134 €/m³.

Bei den Kosten einer Tonne Bewehrung stellt die Faserbewehrung zwar die teuerste Variante dar, jedoch liegt hier ein niedriger Bewehrungsgrad von 35 kg/m³ vor. Somit wird die Stahlfaserbewehrung umgelegt auf den m³-Beton die günstigste Herstellungsvariante mit ca. 70 € Bewehrungskosten [3]

Für den Baubetrieb stellt eine Tübbingherstellung mit Faserbewehrung somit eine konkurrenzfähige Variante im Sinne der Preisgestaltung dar. Es gilt hier jedoch auch die geltenden Normungsbestimmungen hinsichtlich Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit einzuhalten. Die Anwendung von reinen Stahlfaser-armierten Formteile ist nicht in allen länderspezifischen Normen geregelt, so kann auf internationale Normen und Merkblätter zurück-griffen werden.

3.2 Stahlfaserspritzbeton

Der Spritzbeton für die Ausbruchlaibung wird nach den „Anforderungen an Spritzbeton“ der SIA 198 [9] hergestellt und aufgebracht. Dabei weist der Spritzbeton folgende Eigenschaften auf:

- Spritzbeton nach SIA 198: SC 4
- Druckfestigkeitsklasse: C 30/37
- Expositionsklasse: XA1, XD1
- Größtkorn: 16 mm
- Chloridgehaltsklasse: Cl 0.2
- Fasern, die der Europäischen Norm EN 14889-1 entsprechen
- Fasern mit CE-Kennzeichnung
- Fasern aus gezogenem Draht, min Zugfestigkeit des Stahldrahtes >1.000 MPa
- Abmessungstoleranzen nach EN 14889-1
- Faserlänge: 30 bis 35 mm

Je nach Sicherungskategorie (SK) wurde die Mächtigkeit des Spritzbetons angepasst. Die Spritzbetondicke richtet sich entsprechend den Gebirgsverhältnis und liegt zwischen 5 – 25 cm.

4. Planung der vorgestellten Ausbauvariante

Die Sicherung der Tunnellaibung durch den Einbau vorgefertigter Sohlübbinge in Verbindung mit Spritzbetonauskleidung wird in Ausschreibungen meist nicht als Standardlösung definiert.

Hier hat der Unternehmer ein Alternativangebot, dass diese Bauvariante beinhaltet, aus Eigeninitiative heraus zu legen. Hinsichtlich Alternativangebot muss jedoch eine generelle Legbarkeit in der Ausschreibung zugelassen werden. Ungeachtet dessen muss seitens des Auftraggebers der technischen Machbarkeit der Bauvariante zugestimmt werden. Alternativangebote bergen das Potential, Tunnelbauprojekte kosteneffizient auszuführen und den neusten Stand von Bautechnologie und Bauverfahren zuzulassen. In der Erarbeitung eines Konzeptes der hier beschriebenen Ausbauvariante können auch Zulieferer und Baustoffexperten eingebunden werden. Die allfälligen Positionstexte sind jedenfalls herstellerneutral anzuführen.

Erfahrungsgemäß wirken in kreisförmigen, segmentalen Tunnelauskleidungen nach dem Einbau nur Drucknormalkräfte in Kombination mit geringen Biegemomenten. Die Hauptbelastung des Sohlübbings besteht also aus Druckspannungen. Dies ermöglicht erst die Anwendung von SFRC-Segmenten (SFRC: Steel Fiber Reinforced Concrete) ohne konventionelle Bewehrung.

In der Planung von Tunnelsegmenten müssen folgende Nachweise geführt werden:

- a) Ausschalen
- b) Transport und Lagerung
- c) Abplatzen und Berstkraft an der Ringverbindung
- d) Bersten an der Längsfuge
- e) Schnittkräfte durch Baugrundlasten

Durch den Einsatz eines Sohlübbings in Kombination der Laibungssicherung mittels Spritzbeton entfallen die Betrachtungen der Berstkräfte in den Ringverbindungen und Bersten an der Längsachse. Modellrechnungen und nicht lineare Finite Element Methoden für die Berechnungen von SFRC-Segmenten stellen Hersteller von Stahlfasern kostenfrei zur Verfügung.

In Tabelle 4 sind die nachzuweisenden Einwirkungen auf Sohlübbinge in Abhängigkeit der Beanspruchung dargestellt.

Tabelle 4: Einwirkungen im Tübbing in Abhängigkeit der Beanspruchung [5]

	Ausschalen	Stapelung	Transport und Lagerung	Gebrauchstauglichkeit
Biegung	X	X	X	X
Torsion			X	X
Druck			X	X
Anprallstoß	X	X	X	
Schwinden und temperaturabhängige Verformung	X	X		

5. Projektspezifische Erfahrungen „Sicherheitsstollen Gießbachtunnel“

Die ASTRA, das Bundesamt für Straßen in der Schweiz, hat bei der Errichtung des Sicherheitsstollen Gießbachtunnel in der Gemeinde Iseltwald bei Brienz das oben erläuterte Verfahren angewendet. Das Tunnelbauwerk weist einen Außenradius von 2,60 m, einen Innenradius von 2,35 m und eine Länge von 3,34 km auf. Der Ausbau besteht aus einer Kombination von Sohlübbing und Spritzbetonschale. Im Bereich der TBM (Bereich A1) wird ein Kopfschutz bestehend aus einem Netz und Bolzen über einen Öffnungswinkel von 111° in

der Firste angebracht. Am Beginn des Bereiches A2 findet das Auftragen des Faserspritzbetons statt. Im mittleren Bereich A2 des maschinellen Vortriebs werden die Sohlübbinge vom TBM-Nachläufer aus versetzt. Abschließend erfolgt die Herstellung einer Anschlussfuge zwischen Sohlübbing und Spritzbetonauskleidung [7].

5.1 Sohlübbing

Für die Tunnelsohle wird ein Sohlübbing (BE5 gem. BB, C30/37, XA1, XF1) vorproduziert. Dieser schmiegt sich entlang einer Öffnungsweite von rund 66° auf ein 3 cm dickes Mörtelbett in Form von Verpressmörtel an den Ausbruch. Bauweise und Abmessungen eines vorgefertigten Sohlübbings sind dem Bild 4 zu entnehmen [7].

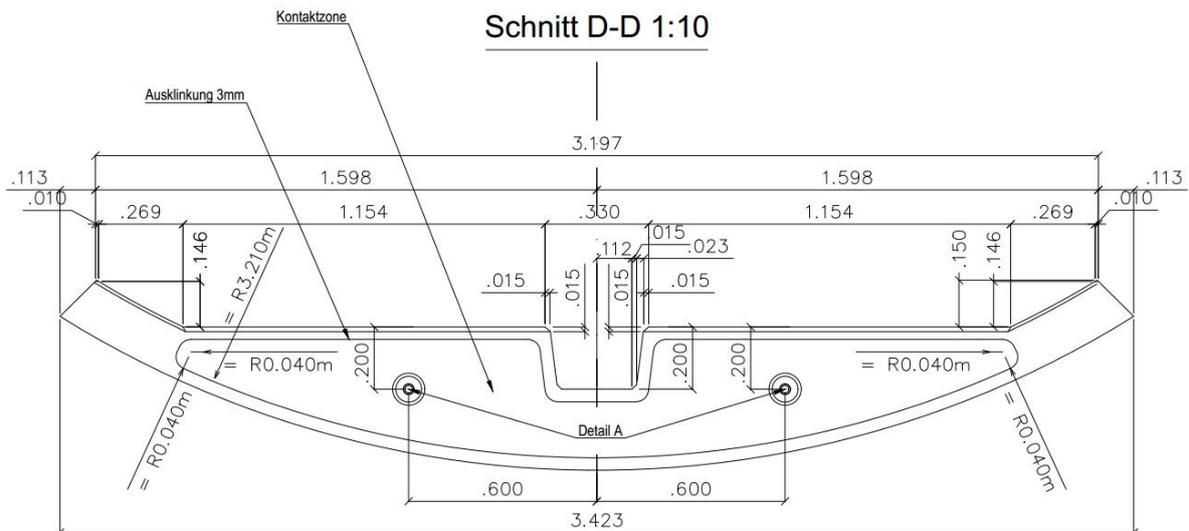


Bild 4: Vorgefertigter Sohlübbing, [6]

Der Sohlübbing wurde im vorliegenden Beispiel mit einer konventionellen Bewehrung ausgeführt. Es liegt ungefähr ein Bewehrungsgehalt von 105 kg/m^3 vor. Auf Basis der Angaben in Tabelle 3 soll im Folgenden ein Beispiel mit der Variante Faserbewehrung zu diesem Sohlübbing erläutert werden.

Die Querschnittsfläche des Sohlübbings beträgt $2,80 \text{ m}^2$. Die Preisdifferenz zwischen konventioneller Bewehrung und Faserbewehrung beträgt ca. 65 €/m^3 Beton. Zur Veranschaulichung wird mit einer Tunnellänge von 1.000 m gerechnet. Auf diese Tunnellänge ergibt sich demnach eine Reduktion der Kosten für die Bewehrung von $2,80 \text{ m}^2 \times 65 \text{ €/m}^3 \times 1.000 \text{ m} = 182.000 \text{ €}$. Bei vergleichbaren technischen Voraussetzungen bezogen auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit ergibt sich hier ein großes Kosteneinsparungspotential.

5.2 Sicherungsklassen

Durch die Festlegung verschiedener Sicherungsklassen wird auf die vorherrschenden geologischen Verhältnisse eingegangen. In Tabelle 5 sind die fünf Sicherungsklassen SK 1 – SK 5 des vorliegenden Projektes angeführt. Die Tabelle gibt die festgelegten Dicken der Spritzbetonsicherung in Firste und Parament an. Dazu passend sind die eingebauten Stützmittel in den jeweiligen Klassen angeführt. Die letzte Spalte beschreibt das vorliegende Gebirge, welches mit der jeweiligen Klasse gesichert wird. Dieses reicht von standfest bis stark verwittert und nachbrüchig mit feuchten bis nassen Verhältnissen.

Tabelle 5: Sicherungsklassen „Sicherheitsstollen Gießbachtunnel“ [7]

Sicherungs- klasse	Spritzbeton- dicke Firste	Spritzbeton- dicke Parament	Eingebaute Sicherungsmittel	Gebirge
SK 1	5 cm	-	-	standfest
SK 2	15 cm	10 cm	Netze in der Firste, Reibanker	Geklüftet, weit bis mittlerer Trennflächenabstand
SK 3	15 cm	15 cm	Netze über gesamte Laibung, Reibanker	Geklüftet, enger Trennflächenabstand
SK 4	25 cm	25 cm	Netze über gesamte Laibung, Reibanker, Tunnelbögen UNP 120	Stark verwittert, nachbrüchig, enger Trennflächenabstand
SK 5	25 cm	25 cm	Verzugsbleche (3 mm) in der Firste, Netze im Parament, Tunnelbögen HEB 120	Stark verwittert, nachbrüchig, enger Trennflächenabstand, feucht bis nass

Liegt massiges, standfestes Gebirge vor, so kommt Sicherungsklasse SK 1 zum Einsatz. Der Ausbau erfolgt mit einem Stahlfaserspritzbeton der Klasse SC 4 (Enddruckfestigkeiten gemäß SN 531 198; Schweiz). Dieser weist eine Mächtigkeit von 5 cm auf. Der Regelquerschnitt zu diesem Aufbau ist in Bild 5 veranschaulicht [7].

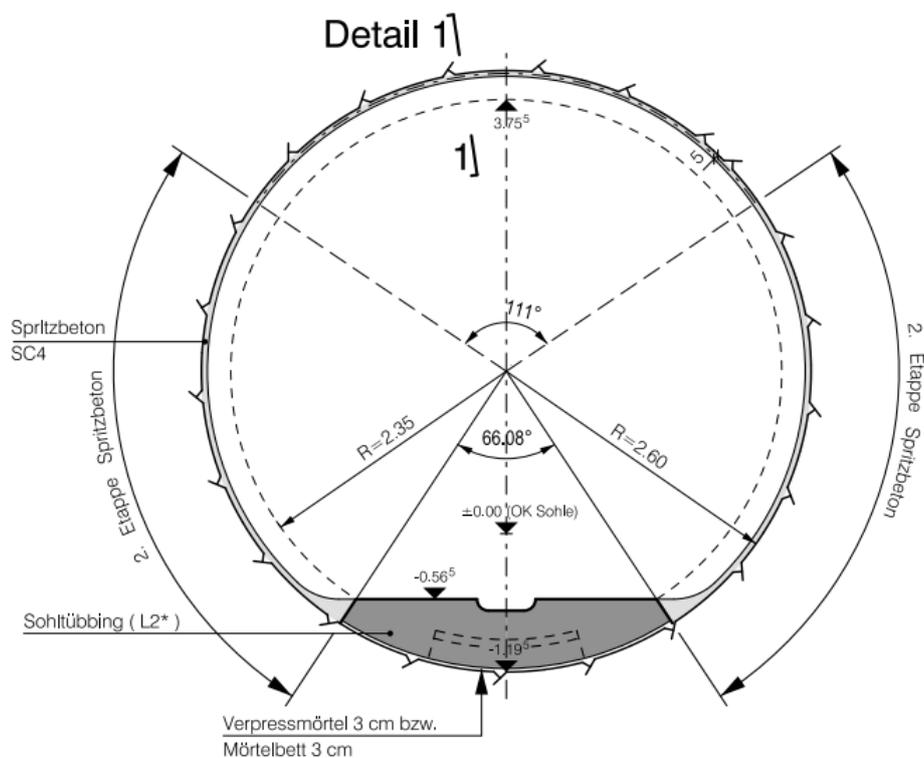


Bild 5: Planausschnitt Plan-Nr. (PV): 14.40601.51-3401, [7]

Bei schwieriger werdenden Verhältnissen wird in erster Linie die Spritzbetondicke erhöht. Im vorliegenden Beispiel wurde zudem partial ein Netz B 500 A in den Spritzbeton eingebaut, um der Geologie gerecht zu werden. Im nächsten Schritt folgt die Erweiterung zur umfänglichen Netzeinlage und die zusätzliche Einbringung einer partialen oder vollumfänglichen Systemankerung mit Reibanker S 275 JR. In der schwierigsten geologischen Sicherungskategorie SK 5 wird als letzte Maßnahme auch der Einbau von Tunnelbögen in Form von HEB 120-Profilen mit einem Achsabstand von 1,00 m gewählt. Dies ermöglicht es allen vorgefundenen geologischen Situationen gerecht zu werden [7].

5.3 Stahlfaserspritzbeton

Der Stahlfaserspritzbeton ist ebenfalls modifizierbar. Mit dem Drehen der richtigen Stellschrauben gelingt es, ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erzielen. In Tabelle 6 sind verschiedene Fasertypen aufgelistet. Ihnen zugehörig sind die Kosten pro Tonne, das Länge/Dicke-Verhältnis und die Zugfestigkeit angegeben.

Tabelle 6: Marktkonforme Stahlfasern, Produktsortiment von Bekaert

Faser Typ	Kosten	L/D Verhältnis	Zugfestigkeit [N/mm ²]
Standard	900 €/t	45	1.000 – 1.300
Mittelklassig	1.000 €/t	65	1.300 – 1.500
Hochfest	1.300 €/t	65	1.500 – 2.000
Ultrahochfest	1.600 €/t	80	>2.000

Die oft eingesetzte Standardfaser weist Kosten von ca. 900 €/t auf. Sie ist demnach um 700 € billiger als die ultrahochfeste Stahlfaser-Tonne. In Tabelle 7 wird die Betrachtung der Stahlfasertypen um die Spalten Dosierung und Kosten pro Kubikmeter Beton erweitert. Wird nur die Dosierung betrachtet, so hat die Standardfaser mit größer 30 kg/m³ meist den Vorzug in den Ausschreibungspositionen. Versuchsreihen im Feld zeigen, dass für die ultra-hochfeste Stahlfaser eine Dosierung von 18 kg/m³ notwendig ist. Wird in diese Eruiierung die Zugfestigkeit miteinbezogen, so würde sich beim Einsatz der ultrahochfesten Faser nochmals ein Kostenvorteil bieten. Konkret liegt hier eine Kostendifferenz von 31,50 €/m³ - 28,80 €/m³ = 2,70 €/m³ vor.

Tabelle 7: Stahlfaserdosierung und -kosten für gleiches Energieabsorptionsvermögen aus Feldversuchen mit zertifizierten Baumaterialprüfer

Faser Typ	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Dosierung für 1.000 Joule (EN 14 488-1) [kg/m ³]	Kosten [€/m ³]
Standard	1.000 – 1.300	35	31,50
Mittelklassig	1.300 – 1.500	30	30,00
Hochfest	1.500 – 2.000	23	29,90
Ultrahochfest	>2.000	18	28,80

Die Anwendung hochfester Stahlfasern bietet also das Potential, die Dosierung zu reduzieren. Im Umkehrschluss bedeutet dies wiederum, dass durch eine höhere Stahlfaserdosierung eine vermehrte Aufnahme von Absorption möglich wird. Dadurch kann beispielsweise der Einsatz von Netzen erst in einer höheren Sicherungskategorie notwendig werden.

6. Aktuelle Projekte

Die vorgestellte Variante findet derzeit bei weiteren Bauprojekten auf Grund der beschriebenen Vorteile ihre Anwendung. Im Folgenden sollen zwei weitere Projekte in der Schweiz kurz beschrieben werden.

6.1 Hochwasserentlastungstollen Sarnen

Aktuell findet dieses System – Stahlfaserspritzbeton und Sohlübbing aus Stahlfaserbeton – bei der Baumaßnahme des Hochwasserstolles in Sarnen, Schweiz, seine Anwendung. Dort wird ein vorproduzierter Sohlübbing mit Stahlfaserarmierung in Kombination mit einer TBM-O eingesetzt. Hier wird auf die beschriebenen Vorteile dieser Bauweise abgezielt. Das Projekt befindet sich aktuell in der Bauausführung [4].

Der Querschnitt des Bohrkopfes beträgt 6,53 m, die Vortriebsstrecke der TBM-O erstreckt sich über 6,3 km. Die Innenschale wird zweischalig mit Stahlfaserbeton, ohne Abdichtung ausgeführt. Der ausgeführte Querschnitt ist in Bild 6 dargestellt.

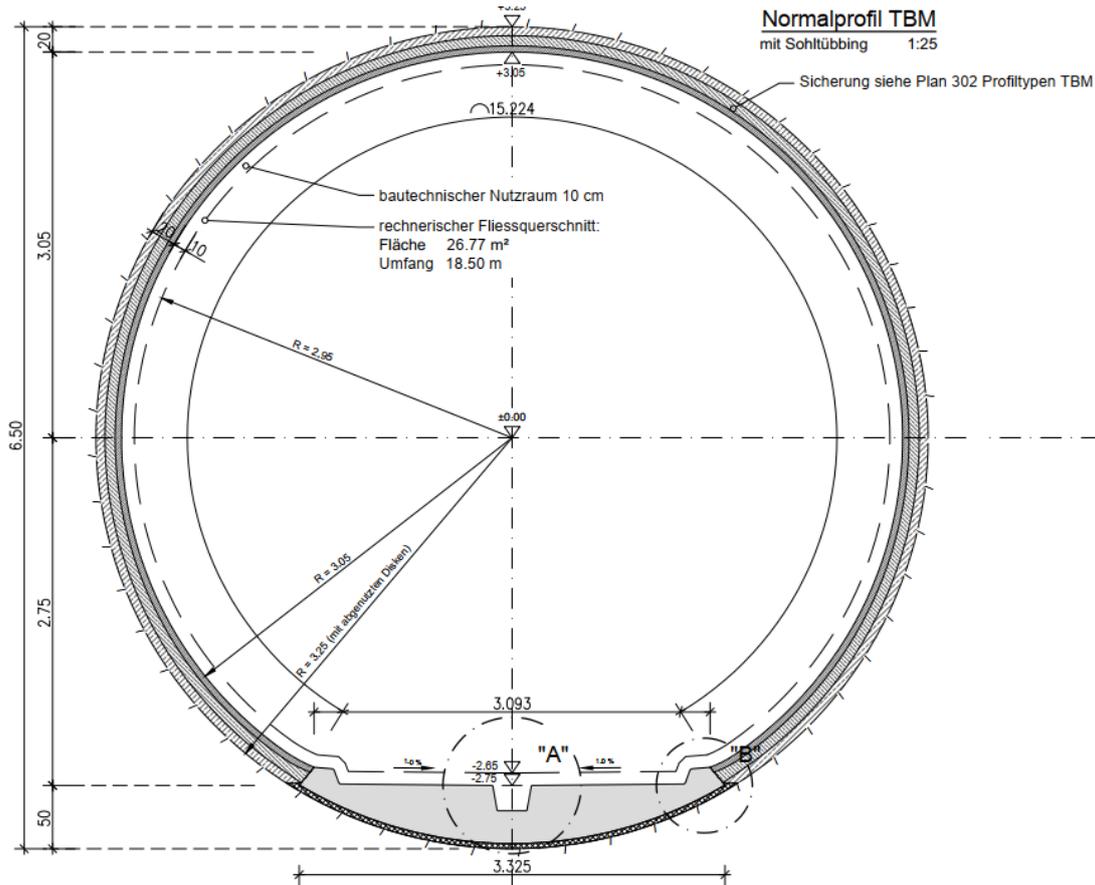


Bild 6: Projekt Hochwasserentlastungstollen Ost, Sarnen, [4]

6.2 Vorbereitungsarbeiten Large Hadron Collider (LHC), CERN

Das Ausbauprojekt am Europäischen Kernforschungsinstitut CERN, der High Luminosity LHC ist ein Upgrade des bestehenden Large Hadron Collider (LHC). Die Baumaßnahmen sind zurzeit in Planung, das Projekt wird voraussichtlich bis 2035 fertiggestellt sein. Die Vorarbeiten für den High Luminosity LHC werden gegenwärtig bereits ausgeführt. Die aktuellen Baumaßnahmen sind in zwei Lose geteilt und inkludieren je einen Schacht und einen Tunnel mit einer Länge von 300 m entlang der in blau eingezeichneten Tunnelröhre aus Bild 7. In einem Los wird die vorgestellte Kombination aus Stahlfaserspritzbeton und stahlfaserarmierten Sohlübbing ausgeführt. Im Vergleich zum Nachbarbaulos, welches sich einer konventionellen Ortbetonsohle bedient, konnte mit diesem Verfahren durch die vorgefertigten Sohlübbinge ein Bauzeitvorsprung von 3 Monaten herausgearbeitet werden.

Die in grün und orange gehaltenen Verbindungsstollen aus Bild 7 werden ebenfalls mit Stahlfaserspritzbeton ausgekleidet.

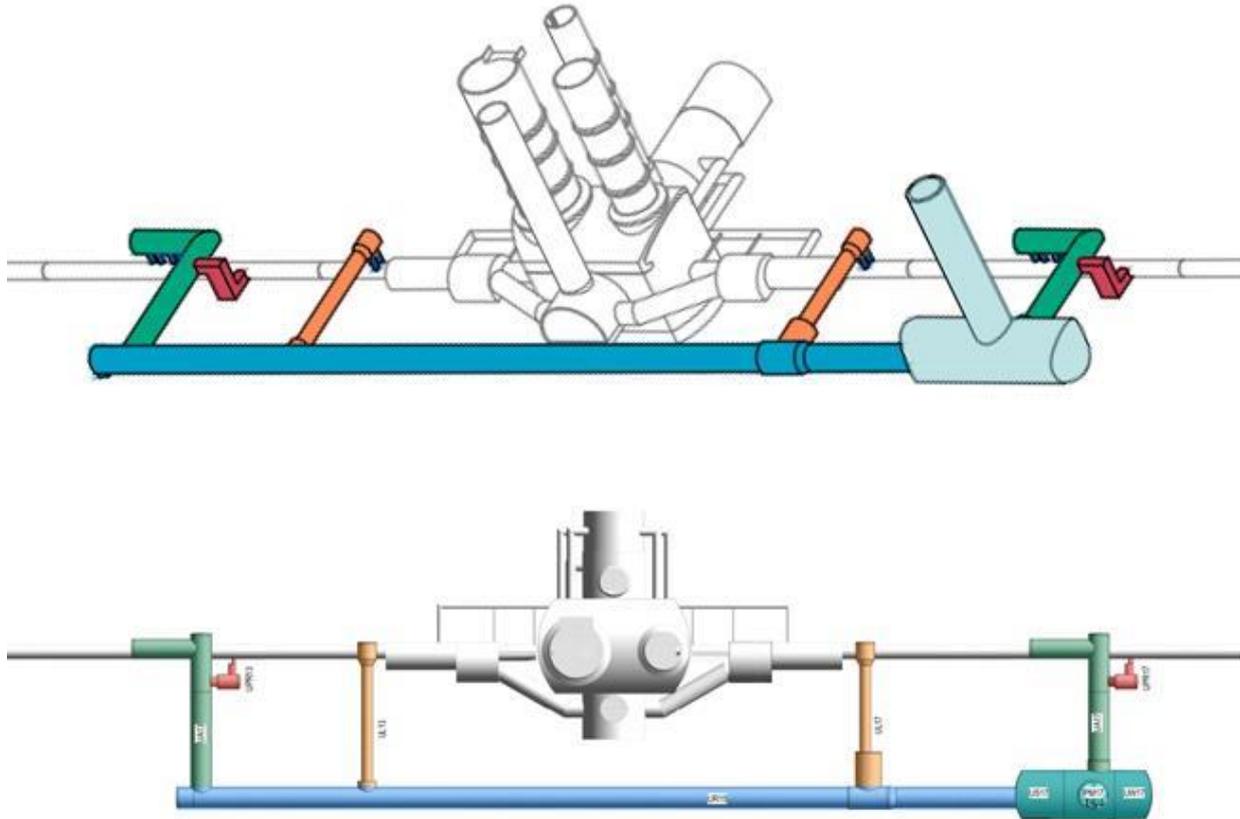


Bild 7: Vorbereitungsarbeiten High Luminosity LHC, Europäisches Kernforschungsinstitut CERN [7]

Die Anwendung beider möglichen optimierten Herangehensweisen (Faserspritzbeton und Sohlübbing mit Stahlfaserarmierung) führt zu Kostenoptimierung und Zeiteinsparungen. Dieser Sachverhalt wirkt sich in weiterer Folge auf die anberaumten Projektkosten positiv aus.

7. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Verwendung von stahlfaserbewehrtem Beton im Tunnelbau großes Potential in den baubetrieblichen Abläufen als auch den Kostenfaktoren bietet. Hinsichtlich der Spritzbetonapplikation kann die konventionelle Bewehrung mittels Matten entweder reduziert oder ganz weggelassen werden. Dies bietet deutliche Vorteile im baubetrieblichen Ablauf und verkürzt die Bauzeit.

Die vorgefertigten Sohlübbinge bieten ebenfalls große Vorteile im Bezug auf Einbauzeit im Vergleich zu einer Sohle aus Ortbeton. Werden die Tübbinge aus faserbewehrtem Beton hergestellt, so entstehen im Anwendungsfall gesenkte Herstellungskosten, da die Faserbewehrung einen niedrigeren Bewehrungsgrad aufweist. Höheren Materialkosten pro eingesetzter Tonne Stahl können zumeist damit ausgeglichen werden.

Beim Einsatz einer offenen Tunnelbohrmaschine werden die gegenständlichen Sicherungs- und Ausbaumaßnahmen in den Arbeitsprozess integriert. Die mechanisierten Abläufe aus dem Versetzen des Tübbings und der Aufbringung des Spritzbeton reduzieren die Arbeitszeit der Mannschaft und erhöhen die Arbeitssicherheit.

Die vorgestellten Projekte zeigen, dass sich diese Ausbaurverfahren in Zukunft stetig weiterentwickelt und das Einsatzpotential beim maschinellen Tunnelvortrieb ausgeschöpft werden kann.

8. Literatur

- [1] Fa. Heidelberg Cement:
Ausschalfristen; URL: <https://www.betontechnische-daten.de/de/10-6-ausschalfristen>;
Zugriff am 10.12.2020.
- [2] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik:
Richtlinie Spritzbeton, 2009.
- [3] Fa. Marti Tunnelbau; Seedorffeldstrasse 21; CH-3302 Moosseedorf.
- [4] Fa. Marti Tunnelbau:
Projektunterlagen zu Hochwasserentlastungstollen Sarnen, 2018.
- [5] Fa. Bekaert:
Tunneling applications: Concrete Segment Reinforcement. Seite 12, 16.07.2020.
- [6] Fa. Sika:
TBM Systeme: Spritzbetonsysteme, <https://aliva.sika.com/de/spritzbeton-maschinen-produkte/betonspritzsysteme/tbm-systeme.html> Zugriff am 16.07.2020.
- [7] IG N8 c/o IUB Engineering, Belpstrasse 48, 3007 Bern; 10.03.2014; Bern.
- [8] ÖNORM B 2203-2:
Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm, Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb. Österreichisches Normungsinstitut, 2005.
- [9] SIA 198:
Untertagebau, Ausführung; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2004.
- [10] Bender A.:
Leistungsbetrachtung anhand projektspezifischer Prozessdaten im maschinellen Tunnelbau, Diplomarbeit, Wien, 2020.
- [11] ÖNORM EN 14889-1:
Fasern für Beton - Teil 1: Stahlfasern - Begriffe, Festlegungen und Konformität; Österreichisches Normungsinstitut, 2006.

Zu den Autoren

Dipl. Bauingenieur, Martin, Eberli
Studium an der Fachhochschule Zürich, Key Account bei Sika, Abteilungsleiter bei Dätwyler Rubber, Sales Manager bei Amberg Engineering und seit 2016 bei Bekaert Underground Solution
Martin.Eberli@bekaert.com

Dipl.-Ing. Alexander Bender
Studium Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Wien,
Universitätsassistent am Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement, TU Wien
alexander.bender@tuwien.ac.at