
DICHTER SPRITZBETON FÜR DEN EINSCHALIGEN TUNNELBAUAUSBAU

WATERPROOF SHOTCRETE IN TUNNEL CONSTRUCTION

Prof. Dr.-Ing. Rolf **Breitenbücher**, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland
Prof. Dr.-Ing. Markus **Thewes**, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland
Dr.-Ing. Götz **Vollmann**, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland
Dipl.-Ing. Heiko **Rahm**, Ruhr-Universität, Bochum, Deutschland
Dipl.-Ing. Ingo **Kaundinya**, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, Deutschland

Für einschalige Tunnelausbauten ist die Wasserundurchlässigkeit des Betons von hoher Bedeutung. Ziel eines umfangreichen Untersuchungsprogramms war es u.a., für solche Konstruktionen in Spritzbetonbauweise den Werkstoff auf ein wasserundurchlässiges Gefüge hin zu optimieren. Eine signifikant verringerte Wassereindringtiefe zeigte sich bei einer Kombination von Stahlfasern und Kunststoffzusatz. In der Betonmatrix war keine fortschreitende Wassereindringfront mehr zu beobachten. Zusätzlich wurde entlang der Verbundzone Faser/Matrix ebenfalls kein Wasser mehr in den Beton eingeleitet. Insgesamt wurden die positiven Eigenschaften der langen Stahlfasern (Verringerung der Mikrorissbildung, Hemmung der Rissausdehnung) beibehalten, während durch die Zugabe des Polymers die negativen Eigenschaften (Wasserwegigkeit entlang der Faser) deutlich reduziert werden konnten.

For single tunnel linings the water impermeability of the concrete is of high importance. Goal of this research project was amongst others to optimize waterproof shotcrete for single tunnel constructions by experimental tests. With a combination of steel fibers and polymers the water penetration could be significantly decreased. At the front of the concrete matrix a progressive water penetration was no longer observed. In addition, the bonding zone along the fiber/matrix also initiated no more water in the concrete. In total, the positive characteristics of long steel fibers (reduction of micro cracking, inhibition of crack extension) is retained, while the addition of the polymer, the negative features (waterway along the fiber) could be reduced.

1. Einleitung

Im Normalfall werden Straßentunnel in zweischaliger Bauweise mit Abdichtung und Entwässerung errichtet, wobei in der Regel die äußere Schale zur vorläufigen Sicherung aus Spritzbeton und die innere Schale als endgültiger Ausbau aus Stahlbeton oder unbewehrtem Beton in Schalung hergestellt werden. Im Bereich von Rettungsstollen, aber auch bei Querschlägen und schalungstechnisch komplexen Bauwerksabschnitten (z.B. Nischen oder Kavernen), stellen einschalige Spritzbetonkonstruktionen aus wasserdichtem Spritzbeton eine einfache und wirtschaftliche Alternative dar.

Problematisch sind hierbei jedoch die bei außen anstehendem Grund-/Bergwasser häufig auftretenden punktuellen Zutritte von Wasser [7]. Diese finden vor allem im Bereich von Risszonen, in Abschnitten mit gestörtem Betongefüge (Stichwort Spritzschatten), sowie im Bereich von Felsankern statt. Die hieraus resultierenden Einschränkungen in der Nutzung verhindern nach wie vor eine planmäßige Anwendung dieser Bauweise [9].

Im Rahmen von Untersuchungen an der Ruhr-Universität Bochum sind verfahrenstechnische und materialtechnologische Verbesserungsansätze für solche dichte Spritzbetonkonstruktionen entwickelt und hinsichtlich ihrer problemspezifischen Funktionalität experimentell abgesichert worden.

2. Prinzip der einschaligen Bauweise

2.1 Allgemeines

Entgegen dem gängigen Grundsatz der zweischaligen Bauweise, bei der die erste Schale im Prinzip nur als vorläufige Sicherung fungiert und weder rechnerisch noch konstruktiv zur langfristigen Bauwerksicherung herangezogen wird, ist bei einschaligen Bauweisen die bestehende vorläufige Sicherung in das endgültige Sicherungskonzept integriert, mit allen sich hieraus ableitbaren Konsequenzen. Schon aus betrieblichen Gründen ergibt sich jedoch, dass auch solche einschalige Konstruktionen in verschiedenen, zeitlich versetzt applizierten Spritzbetonlagen hergestellt werden.

Ein einschaliges Bauwerk zeichnet sich somit auch dadurch aus, dass zwischen den verschiedenen Lagen des Ausbaus keinerlei Trennfolien, Geotextile oder ähnliches aufgebracht werden. Die einzelnen Lagen stehen daher in direktem Verbund miteinander, was aus statischer Sicht zur Kraftschlüssigkeit innerhalb des Baukörpers führt.

2.2 Konstruktive und verfahrenstechnische Merkmale

Für einschalige Konstruktionen ergeben sich a priori und angesichts der Erfahrungen aus dem Tunnelbau verschiedene Problemfelder, die für eine Umsetzung dauerhafter einschaliger Bauwerke eines verfahrenstechnisch-konstruktiven Aufwandes bedürfen [4].

Bei der Erstellung einschaliger Konstruktionen kommt es durch den unmittelbaren Kontakt zwischen den verschiedenen Lagen und durch die hieraus resultierende Verbundwirkung, zu Schubübertragungen an den Trennflächen, welche für zweischalige Baukörper in dieser Form nicht bekannt sind. Diesbezügliche frühere Untersuchungen an der Ruhr-Universität Bochum [2] haben ergeben, dass hierbei bis zu 80 % der Schubspannungen vergleichbarer monolithischer Baukörper aufgenommen, bzw. übertragen werden können. Daraus leitet sich aber auch ab, dass diese Eigenschaft, Verbundbeanspruchungen standhalten zu können, in die Dimensionierung mit einbezogen werden muss. Im Rahmen dieser Untersuchungen konnte weiter festgestellt werden, dass eine Zugabe von Stahlfasern die Verbundfestigkeit des einschaligen Baukörpers erhöht, dass somit auch weitere Schichten in eine Schubtragwirkung eingebunden werden können.

In einschaligen Konstruktionen stellen sich bedingt durch den mehrlagigen Spritzbetonauftrag in der Regel Zwangsbeanspruchung infolge abfließender Hydratationswärme und Schwinden des Spritzbetons ein. Dadurch hervorgerufene Risse ermöglichen einerseits den Zutritt von Wasser in das Tunnelinnere, andererseits kann die Dauerhaftigkeit der Konstruktion beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund ist an der Luftseite der einschaligen Konstruktion zusätzliche Bewehrung zur Rissminimierung vorzusehen, beispielsweise auch in Form rissbreitenbeschränkender Stahlfasern. Als Richtwert für eine derart gestaltete Bewehrung lässt sich der Literatur eine Mindestbewehrung von 0,2 % (Luftseitig) bzw. 0,1 % (bergseitig) entnehmen [1].

Desweiteren ist für eine Verminderung der Rissbildung eine solide Nachbehandlung des Betons von Bedeutung, was bei stark wechselnden Geometrien nicht über die üblicherweise im Tunnelbau verwendeten Nachbehandlungswagen gewährleistet werden kann.

3. Wasserundurchlässige Betone

Um einen entsprechend hohen Wassereindringwiderstand im Beton zu erzielen, ist nach DIN 1045-2 für Bauteile bis 40 cm Dicke ein Mindestzementgehalt von 280 kg/m^3 einzuhalten, der Wasserzementwert darf 0,60 nicht überschreiten. Darüber hinaus kann mit feinkörnigen Betonzusatzstoffen, teilweise aufgrund deren Feinheit, teilweise infolge puzzolanischer Reaktionen, das Betongefüge noch weiter verdichtet werden. Unter bestimmten Bedingungen sind Kunststoffdispersionen in der Lage auch feinste Wasserwegigkeiten im Betongefüge zu vermeiden [3].

Mit Fasern können – entsprechende Fasergehalte vorausgesetzt – ansonsten wasserundurchlässige Risse in ihrer Breite so schmal gehalten werden, dass – abhängig von anstehendem Wasserdruck und Bauteildicke – dennoch kein Wasser in das Bauwerk gelangen kann [11]. Allerdings ist auch bekannt, dass entlang von geraden Stahlfasern sich Wasser leicht voran bewegen kann.

4. Untersuchte Spritzbetonrezepturen

Zur Optimierung von Spritzbetonen mit entsprechend wasserundurchlässigem Gefüge wurden experimentelle Untersuchungen auf zwei Ebenen durchgeführt. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus vorangegangenen Recherchen [5] [6] [10] wurden auf der ersten Ebene zunächst neben einem Referenzbeton (NSB 1b) Varianten dazu mit verschiedenen Zusatzstoffen untersucht. Die Ergebnisse wurden untereinander und mit denen des Referenzbetons verglichen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde dann eine Optimierung durch die Kombination der als günstig befundenen Zusatzstoffe vorgenommen. Dabei wurden auch zusätzliche verfahrenstechnische Untersuchungen durchgeführt. Die Betonrezeptur des Referenzbetons ist in Tabelle 1 dargestellt, die darauf aufbauenden Variationen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Grundlage des Referenzbetons (NSB 1b) bildete eine Spritzbetonrezeptur, wie sie typischerweise in Skandinavien im einschaligen Tunnelbau, aufgrund des dort sehr standhaften Gebirges jedoch in vergleichsweise geringen Dicken, aber auch in anderen Ländern bei größeren Schichtdicken zur Anwendung kommt. Um eine Applikation auch in größeren Schichtdicken sicherzustellen, wurde zudem ein alkalifreier Beschleuniger verwendet. Als Gesteinskörnung wurde quarzitischer Kies verwendet. Charakteristisch für diese Referenzrezeptur war die Zugabe von Silikastaub. Aufgrund ihrer Gestalt und Größe sind die Silikapartikel in der Lage einen Teil des Porenraums zwischen den Zementkörnern auszufüllen (Mikrofüllereffekt). Da die Versuche ausschließlich im Nassspritzverfahren durchgeführt wurden, wurde eine Silika-Slurry (50 % Feststoff / 50 % Wasser) verwendet.

Tab. 1: Betonrezeptur NSB 1b (Referenzbeton)

Zement:	CEM I 42,5 R	430 kg/m^3
Gesteinskörnung:	0/2 mm: 43 % 2/4 mm: 23 % 4/8 mm: 34 %	1740 kg/m^3
Wasser:		190 l/m^3 (w/b = 0,41)
Silikastaub:	Centrilit Fume SX	30 kg/m^3 (7 M.-% v. Z.)
Beschleuniger:	Rapid Centrament 650	9,0 M.-% v. Z.

Tab. 2: Modifikationen des Referenzbetons

Modifikation		Dosierung
Referenzbeton	(NSB 1)	
Austausch Silikastaub gegen Flugasche	(NSB 2)	60 kg/m ³ (14 M.-% v. Z.) + Reduzierung der Gesteinskörnung um 30 kg/m ³
Austausch CEM I 42,5R gegen CEM III/A 42,5N	(NSB 3)	Zementanteil bleibt gleich
Zugabe von Stahlfasern l/d = 60	(NSB 4)	50 kg/m ³
Zugabe von Stahlfasern l/d = 40	(NSB 5)	50 kg/m ³
Austausch Silikastaub gegen Metakaolin	(NSB 6)	30 kg/m ³
Zugabe von Kunststoffzusatzstoff	(NSB 7)	43 kg/m ³
Zugabe von Mikrostahlfasern (l = 8 -12 mm, d = 0,15 – 0,20 mm)	(NSB 8)	50 kg/m ³
Kombination von NSB 5 und NSB 7 Zugabe von Stahlfasern l/d = 40 Zugabe von Kunststoffzusatzstoff	(NSB 9)	50 kg/m ³ 43 kg/m ³

Die Zugabe von Silikastaub als puzzolanischer Zusatzstoff erhöht zwar die Dichtigkeit der Mörtelmatrix, geht jedoch gleichzeitig mit einer erheblichen Zunahme der Steifigkeit und einer Versprödung des Betons einher. Dies kann schon bei kleinen Verformungen zu einer verstärkten Rissbildung im Beton führen, was für die angestrebte Dichtigkeit eher kontraproduktiv ist. Aufgrund dessen wurde einer Betonrezeptur (NSB 2) Flugasche anstelle Silikastaub als Betonzusatzstoff beigemischt, von der durch eine puzzolanische Reaktion ebenfalls ein dichteres Betongefüge erwartet wird. Aufgrund der höheren Partikelgröße von Flugasche gegenüber der von Silikastaub steigt die Steifigkeit des Betons im Prinzip nicht weiter an, so dass Verformungen im größeren Maße rissfrei aufgenommen werden können.

Durch Verwendung eines Hochofenzements CEM III/A (NSB 3) anstelle eines Portlandzements CEM I kann u. U. auf der einen Seite durch eine geringere Hydratationswärmeentwicklung die Schwindneigung, und damit die Rissbildung, reduziert werden. Auf der anderen Seite wird eine intensivere Nacherhärtung, und damit ein dichteres Betongefüge erreicht. Des Weiteren wird aufgrund von Bestrebungen zur Reduktion von Schadstoffemissionen (CO₂) zunehmend auf Zumahlzemente zurückgegriffen.

Mit Stahlfasern können die sich einstellenden Risse in ihrer Breite kleiner gehalten werden. Dies erfolgt dadurch, dass auftretende Kerbspannungen bereits in der Risswurzel über die Rissufer hinweg übertragen werden [8] [12]. Folglich ist es möglich, den Anteil herkömmlicher Stab-, oder Mattenbewehrungen teilweise zu reduzieren, wodurch auch der Beton-einbau erleichtert und die Gefahr der Bildung wasserführender Spritzschatten vermindert wird.

Aus einschlägigen Untersuchungen ist hinlänglich bekannt, dass Stahlfasern mit einem hohem l/d-Verhältnis eine höhere Leistungsfähigkeit im Faserbeton aufweisen. Daher wurden in den hier beschriebenen Versuchsreihen primär Stahlfasern mit einer Schlankheit $\lambda = 60$ und vergleichsweise solche mit einer geringeren Schlankheit von $\lambda = 40$ eingesetzt.

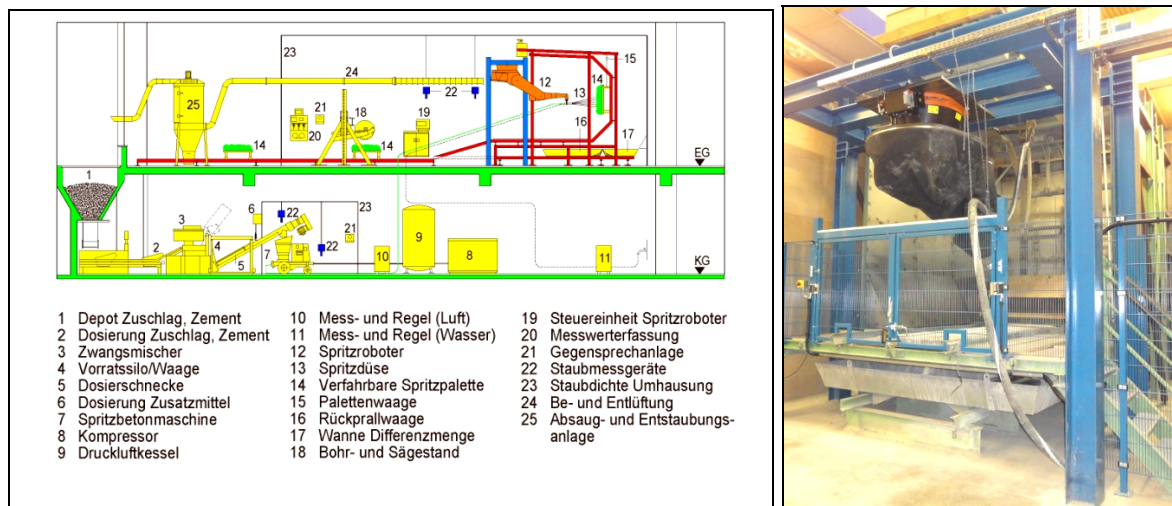
Der Einsatz von Metakaolin als puzzolanischer Zusatzstoff bietet ähnliche Vorteile wie Flugasche und Silikastaub. So kann u. a. die Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und die Dichtigkeit des Betongefüges nennenswert erhöht werden. Ebenso führt Metakaolin zu einer deutlich helleren Betonfärbung, was sich vor allem für die Nutzung in Verbindungs- und Rettungstunneln positiv zeigen könnte.

In einer weiteren Betonrezeptur wurde dem Beton ein Kunststoffzusatz auf Acrylatbasis, wie er u.a. in SPCC Anwendung findet, beigemischt. Durch die Zugabe des Kunststoffzusatzes in Beton wird zum einen aufgrund der geringen Partikelgröße von 0,1–0,3 µm ein Füllereffekt erzeugt. Zum anderen bewirkt eine entsprechende Menge an Polymerpartikel auch einen Verfilmungseffekt und somit eine zusätzliche abdichtende Wirkung im Betongefüge. Darüber hinaus kann durch diesen Polymerfilm auch der Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnern bzw. Stahlfasern verbessert werden.

5. Versuchsdurchführung

Die Herstellung der Probekörper erfolgte im Nassspritzverfahren im Spritzbetonversuchstand der Ruhr-Universität Bochum (Bild 1). Der Spritzstand beinhaltet generell einen modifizierten Industrieroboter (Bild 1, Nr. 12), mit dessen Hilfe kontrollierte und festgelegte Bewegungen der Spritzdüse (Bild 1, Nr. 13) vorgenommen werden können. Im Rahmen der hier durchgeführten Versuchen wurde allerdings, zu einer realitätsnäheren Herstellung des Spritzbetons, der Spritzbetonauftrag im händischen Verfahren durch einen erfahrenen Düsenführer vorgenommen.

Die Spritzpaletten bestanden aus mehreren Lagen 3 cm starker Fichtenholzbohlen, die auf einem fahrbaren Wagen montiert wurden. Die Oberfläche der Bohlen war sägerau und unbehandelt. Über ein Schienensystem können die Spritzpaletten innerhalb des Spritzstands bewegt und in unterschiedliche Positionen gefahren werden. Standardmäßig wird gegen eine senkrechte Palette in einem Abstand von rund 1,5 m gespritzt (Bild 2), es kann jedoch auch über Kopf gearbeitet werden.



*Bild 1: Spritzbetonversuchstand der Ruhr-Universität Bochum
(links: Schematische Darstellung; rechts: Fotografie des Spritzroboters)*



Bild 2: Probenherstellung

Entgegen der herkömmlichen Probekörperherstellung in Spritzkisten, bei denen sich oftmals in den Randbereichen der Kisten Probleme einstellen, können aus solchen großformatigen Platten auch praxisentsprechende, gleichmäßige Teilproben gewonnen werden.

Im Rahmen dieser Versuchsreihen wurden alle Rezepturen in je 2 Spritzversuchen untersucht. Der Beton wurde über die Betonpumpe im Dichtstromverfahren zur Spritzdüse gefördert, wo unter der Druckluftzuführung auch der Erstarrungsbeschleuniger zudosiert wurde. Der Beton wurde auf die mit Wasser vorbenetzte Spritzpalette in Dicken zwischen 25 cm und 30 cm aufgetragen, wobei Platten mit Abmessungen von 2,0 m x 1,0 m entstanden. Aus diesen wurden nach der Erhärtung die eigentlichen Probekörper durch Nasssägen bzw. Nassbohren gewonnen.

Während des Spritzverlaufs wurden verfahrensrelevante Daten gemessen und in Echtzeit im Steuerstand überwacht. Dies betraf vor allem die Massenzunahme auf der Spritzpalette und die Rückprallmenge. Diese Werte wurden über Wägezellen an den Palettenhalterungen bzw. Rückprallwannen erfasst.

Neben den betontechnischen Varianten wurden auch verfahrenstechnische Parameter einbezogen. Hierzu zählten Untersuchungen zum Verbundverhalten des Spritzbetons mit dem Untergrund bzw. mit einer ggf. eingelegten Bewehrung. Des Weiteren wurde die Möglichkeit des Überkopfspritzens überprüft.

Da dem Einbau einer einschaligen Tunnelschale in Spritzbetonbauweise auch weiterhin eine vorläufige Sicherung des Gebirges mit Spritzbeton vorangeht, liegt als Oberflächenstruktur für den Einbau der endgültigen Sicherung eine spritzraue Oberfläche vor. Zum Aufbau der endgültigen Tunnelschale und um im Vorfeld mögliche Wasserwegigkeiten möglichst gering zu halten, ist eine gute, hohlraumarme Verbundzone der applizierten Spritzbetonschichten unabdingbar. Zur Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen zwei unterschiedlich alten Spritzbetonen wurden daher auch Spritzpaletten im Vorfeld mit einer ca. 5 cm dicken Spritzbetonschicht versehen. Diese erste Spritzbetonschicht wurde mit einer Betonstahlmatte bewehrt und mit der Spritzpalette rückverankert. So konnte im weiteren Versuchsverlauf ein Abstürzen des Spritzbetonauftrags durch Versagen der Verbundzone Spritzbeton-Holz, vor allem während der Überkopfspritzversuche, vermieden werden.

Zur weiteren Absturzsicherung wurde über Bügel zusätzlich eine weitere Mattenbewehrung in der nachfolgend aufzubringenden Spritzbetonschicht des zu konzipierenden Betons eingelegt.

6. Ergebnisse

Maßgebliche Bewertungskriterien für die verschiedenen Spritzbetone waren neben der Wassereindringtiefe bei einem Prüfdruck von 5 bar die Festigkeitsentwicklung von den ersten Minuten bis zum Alter von 28 Tagen, sowie der statische E-Modul. Zusätzlich wurden die Verarbeitbarkeit, das Verbundverhalten, die Einspritzbarkeit der Bewehrung und die Fähigkeit des Betons zum Überkopfspritzen überprüft.

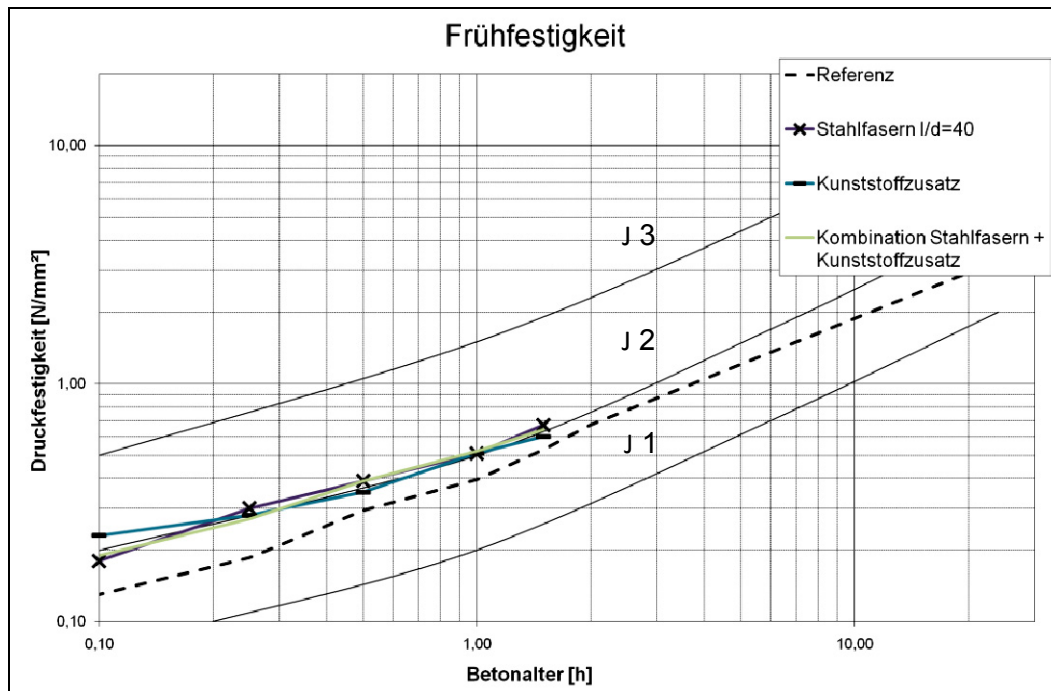


Bild 3: Frühfestigkeit ausgewählter Mischungen

6.1 Frühfestigkeit

Die Entwicklung der Frühfestigkeit des Spritzbetons wurde entsprechend DIN EN 14488-2 mit dem Verfahren A (Eindringnadel) geprüft. Mit Ausnahme des Betons mit CEM III/A (NSB 3) zeigte sich bei allen Mischungen erwartungsgemäß ein in etwa identisches Frühfestigkeitsverhalten (oberer J1 bzw. unterer J2 Bereich). Bei dem Beton mit CEM III/A war eine „Ruhephase“ in der Frühfestigkeitsentwicklung nach etwa 1 h zu beobachten. Exemplarisch ist die Entwicklung der Frühfestigkeit für die Betone mit Stahlfasern (NSB 5), Kunststoffzusatz (NSB 7) und der kombinierten Mischung (NSB 9) in Bild 3 dargestellt.

6.2 Rohdichte

Die niedrigste Rohdichte wurde mit 2.230 kg/m^3 bei dem Spritzbeton mit Kunststoffzusatz festgestellt. Sie lag damit um 40 kg/m^3 niedriger als die Rohdichte der Referenzmischung (2.270 kg/m^3).

Dem gegenüber wurden bei den Betonen mit Stahlfasern mit Rohdichten von 2.300 kg/m^3 bzw. 2.290 kg/m^3 um 30 kg/m^3 bzw. 20 kg/m^3 höhere Festbetonrohden bestimmt.

Bei allen untersuchten Betonen waren nur geringe Streuungen zwischen den jeweiligen Einzelwerten festzustellen, was auf ein relativ gleichmäßiges Gefüge und eine gute Verdichtung der Spritzbetone hindeutet.

6.3 Festigkeitsentwicklung

Die Druckfestigkeiten im Alter von 2, 7 und 28 Tagen sind in Bild 4 dargestellt. Der Referenzbeton zeigte einen für Spritzbeton typischen Erhärtungsverlauf. Nicht zuletzt aufgrund der Beschleunigerzugabe wurde nach 2 Tagen mit ca. 33 N/mm² eine relativ hohe Druckfestigkeit erreicht. Als Folge davon entwickelte sich die weitere Festigkeit vergleichsweise langsam, mit ca. 39 N/mm² im Alter von 28 Tagen war diese nur geringfügig höher als nach 2 Tagen. Aufgrund des darin enthaltenen Silikastaubs wäre allerdings eine deutlich stärkere Festigkeitsentwicklung und dementsprechend eine höhere 28-Tage-Festigkeit zu erwarten gewesen.

Im Vergleich zum Referenzbeton zeigt sich bei dem Spritzbeton mit Flugasche (NSB 2) eine für Puzzolane typische Festigkeitsentwicklung. Da die Partikel der Flugasche zeitverzögert mit dem Calciumhydroxid in der Porenlösung zu festigkeitsbildenden C-S-H-Phasen reagieren, wurde nach 2 Tagen eine um 6 N/mm² niedrigere Druckfestigkeit gegenüber dem Referenzbeton erreicht. Im weiteren Verlauf der Hydratation nahm die Druckfestigkeit der Mischung NSB 2 jedoch deutlich stärker zu, als die der Referenzmischung. Nach 7 Tagen erreichten beide Mischungen eine in etwa gleiche Druckfestigkeit. Nach 28 Tagen konnte aufgrund der puzzolanischen Reaktion der Flugasche bei NSB 2 eine um 4 N/mm² höhere Druckfestigkeit gegenüber dem Referenzbeton gemessen werden.

In der Versuchsserie NSB 3 wurde anstelle eines Portlandzements (CEM I) ein Hochofenzement (CEM III/A) verwendet. Hochofenzemente reagieren im Allgemeinen langsamer und unter geringerer Wärmeentwicklung. Jedoch sollten Betone auch mit diesem Zement in vertretbarer Zeit eine ausreichende Festigkeit erreichen. Dies war im vorliegenden Fall aus näher bekannten Gründen nicht gegeben. Nach 2 Tagen konnte dieser Beton noch nicht einmal gebohrt werden. Bei diesem Prozess traten Ausspülungen entlang der Bohrkernoberfläche auf, so dass es zu einem lagenweisen Abscheren der Bohrproben im Bohrloch kam und sie somit nicht prüfbar waren.

Es wird angenommen, dass eine teilweise Unverträglichkeit des Beschleunigers (Wirkstoff oder Dosiermenge) mit dem verwendeten Zement vorlag und es so zu einer nicht ausreichenden Festigkeitsentwicklung kam. Nach 7 Tagen konnte an diesem Beton eine Druckfestigkeit von 24 N/mm² bestimmt werden. Die jeweiligen Einzelwerte wiesen mit 15 N/mm² bis 36 N/mm² (Standardabweichung: 7,5 N/mm²; Variationskoeffizient: 31 %) jedoch eine beträchtliche Streuung auf. Diese Streuung wurde sogar innerhalb einer Versuchspalette festgestellt und deutet so weiter auf Störungen im Erhärtungsverlauf des Betons.

Nach 28 Tagen wies der Beton NSB 3 mit im Mittel 50,5 N/mm² die höchste Druckfestigkeit aller Versuchsserien auf, was die allgemeine Kenntnis einer hohen Nacherhärtung bei langsamer Frühfestigkeitsentwicklung bestätigt. Die hier festgestellte Festigkeitsentwicklung eines Betons mit CEM III/A entspricht nicht generell den Erfahrungen mit solchen Betonen. Möglicherweise haben sich hier versuchsspezifische Randbedingungen besonders ungünstig auf die Festigkeitsentwicklung dieses Betons ausgewirkt, sodass daraus noch keine allgemeingültigen Folgerungen gezogen werden dürfen.

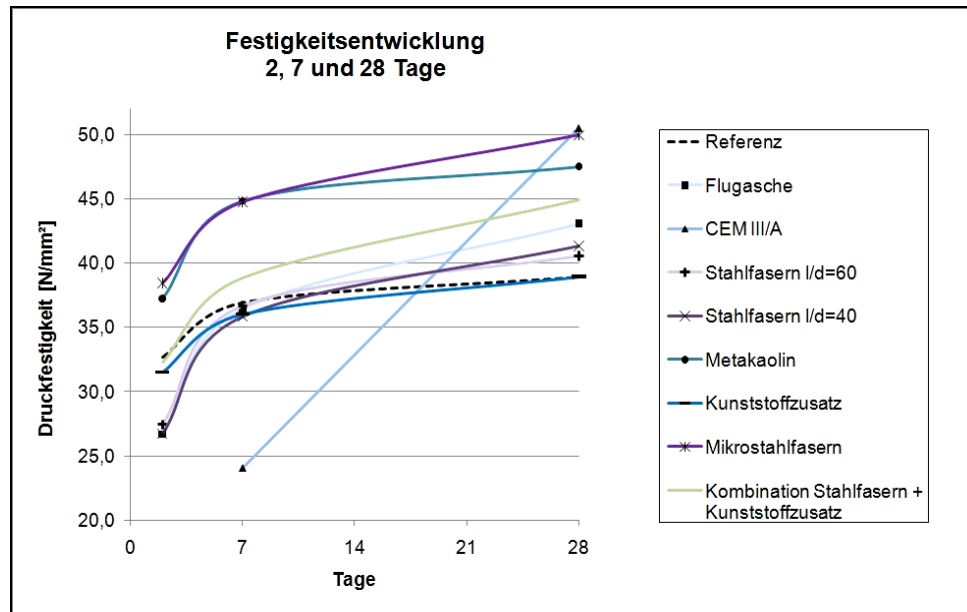


Bild 4: Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Betonrezepturen

In den weiteren Versuchsserien mit Stahlfaserbeimischung entsprach das Ausgangsgemisch der Referenzmischung. Aufgrund ihrer inerten Eigenschaften hatten die Stahlfasern keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung des Betons. Die Druckfestigkeit lag nach 2 Tagen im Mittel um 5 N/mm² bzw. 6 N/mm² unter den Druckfestigkeiten der Referenzmischung. Der Grund hierfür liegt in der Temperatur des angelieferten Frischbetons, der witterungsbedingt bei der Referenzmischung um ca. 10 °C höher lag. Da die anschließende Lagerung für alle Spritzpaletten bei konstanter und gleichbleibender Temperatur erfolgte, wirkte sich die unterschiedliche Frischbetontemperatur auf die Druckfestigkeiten im Alter von 7 und 28 Tagen nicht weiter aus.

Durch die Zugabe von Metakaolin (NSB 6) wurde in allen 3 Prüfaltern eine signifikante Erhöhung der Druckfestigkeit erreicht. Sie stieg gegenüber der Referenzmischung um 5 N/mm² (2 Tagen) bis 9 N/mm² (28 Tagen) an. Der Erhärtungsverlauf war allerdings mit dem der Referenzmischung vergleichbar.

Die Verwendung einer Kunststoffdispersion hatte auf die zeitliche Entwicklung und Höhe der Druckfestigkeit gegenüber der Referenzmischung keine Auswirkungen. Dies entspricht den Erwartungen, da die Polymerpartikel zum einen nicht mit Betonbestandteilen reagieren und somit auch keine festigkeitssteigernden Reaktionsprodukte bilden, und zum anderen bei den hier vorliegenden niedrigen Dosierungen die Hydratation des Zements nicht beeinträchtigen.

Um eine große Wassereindringtiefe entlang der Stahlfaseroberfläche zu vermeiden, wurden Mikrofasern mit einer maximalen Länge von 12 mm analog zu der bisherigen Versuchsdurchführung verwendet (NSB 8). Die hier ermittelten Betondruckfestigkeiten lagen zu allen Prüfzeitpunkten um ca. 10 N/mm² höher als es aufgrund der verwendeten Betonzusammensetzung (Referenzbeton) und der Stahlfasermenge zu erwarten gewesen wäre.

6.4 Wassereindringtiefe

In wasserundurchlässigen Konstruktionen sind Wasserdurchtritte stets problematisch. Solche können durch Risse, größere Inhomogenitäten sowie durch das Betongefüge selbst auftreten. Um Wasserdurchtritte durch Risse zu verhindern, ist deren Breite abhängig vom Druckgefälle h/d durch Bewehrung entsprechend zu begrenzen. Stahlfasern ergänzen die rissbreitenbeschränkende Wirkung der Bewehrung. Größere Inhomogenitäten können durch

eine entsprechende Beton- und Spritztechnik minimiert werden. Diese führen gleichzeitig auch zu einem dichten Mikrogefüge des Spritzbetons. Auf die beiden letzteren Aspekte waren die hier beschriebenen Versuche primär ausgerichtet.

Im Alter von 28 Tagen wurde an Probekörpern, gewonnen aus Bohrkernen mit einem Durchmesser von 150 mm, die Wassereindringtiefe bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Bei der Referenzmischung ergab sich im Mittel (insgesamt 6 Probekörper, 3 je Spritzbetonpalette) eine maximale Wassereindringtiefe von 16 mm. Die Streuung der Messwerte war bei der durchgeführten Prüfung verfahrensbedingt relativ groß und reichte von 10 mm bis 25 mm. Damit wurde jedoch für jeden untersuchten Probekörper die Vorgabe der ZTV-ING für wasserundurchlässige Betonkonstruktionen (maximale Wassereindringtiefe 30 mm) erfüllt.

Bei dem Spritzbeton mit CEM III/A (NSB 3) wurde eine gemittelte Wassereindringtiefe von 14 mm festgestellt, also eine geringfügige Reduzierung gegenüber der Referenzmischung. Jedoch erhöhte sich gleichzeitig die Streuung der Messergebnisse, sodass man diese beiden Betonrezepturen als gleichwertig hinsichtlich des Wassereindringwiderstands betrachten kann.

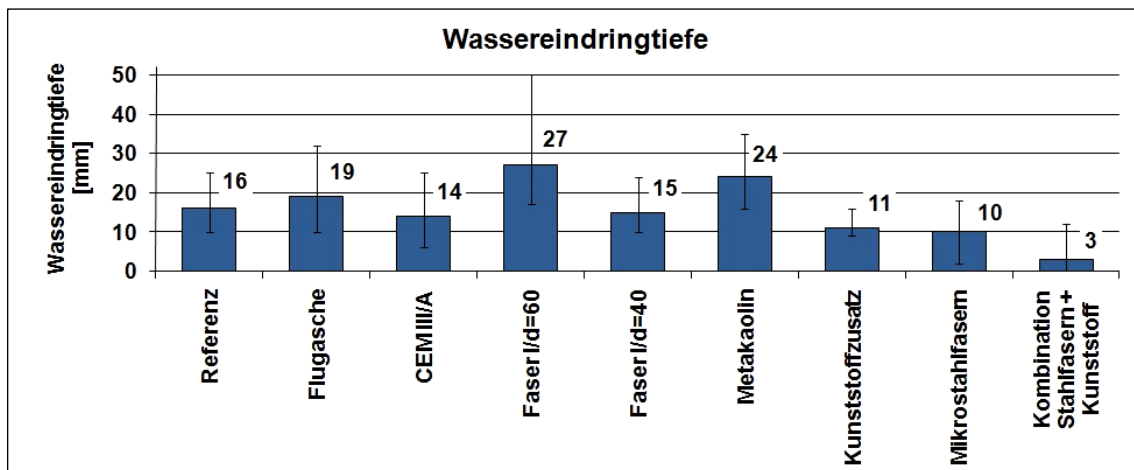


Bild 5: Wassereindringtiefen der untersuchten Betonrezepturen

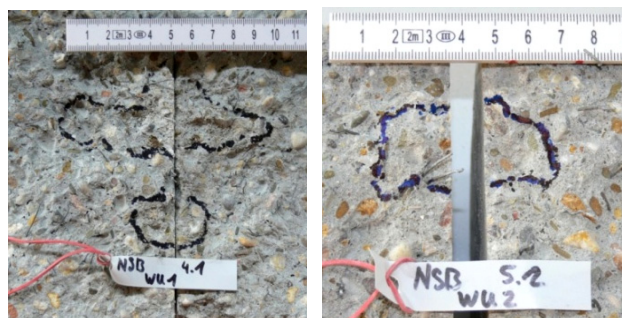


Bild 6: Wassereindringfronten der Mischungen mit Fasern
(links: Stahlfasern l/d=60; rechts: Stahlfasern l/d=40)

Bei der weiteren Variation der Betonzusatzstoffe (Flugasche, Metakaolin) wurden gegenüber der Verwendung von Silikastaub (Referenzmischung) etwas größere Wassereindringtiefen ermittelt. Diese lagen im Mittel mit 19 mm und 24 mm dennoch unterhalb der nach ZTV-ING vorgegebenen maximalen Wassereindringtiefe.

Bei der Verwendung von Stahlfasern wurde vor allem bei der Betonrezeptur mit den Fasern mit einem l/d -Verhältnis von 60 eine deutliche Erhöhung der Wassereindringtiefe auf durchschnittlich 27 mm festgestellt (Bild 6). Ebenfalls waren hier deutlich höhere Streuungen innerhalb der 6 Einzelwerte festzustellen. Ursächlich hierfür war eine erhöhte Wasserwegigkeit entlang der Stahlfaseroberflächen. Daher waren die großen Wassereintritte auch eher punktuell vorzufinden.

Bei den Fasern mit einem l/d -Verhältnis von 40 zeigten sich gegenüber der Referenzmischung keine signifikanten Veränderungen in der Wassereindringtiefe. Die Unterschiede zur Betonrezeptur mit den anderen Fasern lagen ausschließlich in der Variation der Stahlfasergeometrie. Daher lag aufgrund der deutlich geringeren Schlankheit und der gleichzeitig geringeren Faserlänge die Faseranzahl in der Betonrezeptur bei gleicher Dosiermenge um mehr als das 5-fache höher.

Der Einsatz von Mikrofasern (NSB 8) zeigte mit 10 mm eine deutlich geringere Wassereindringtiefe als bei den beiden Spritzbetonen mit den dickeren und längeren Stahlfasern. Entlang der kurzen und feinen Mikrofasern konnten keine verstärkten Wasserwegigkeiten festgestellt werden.

Hinsichtlich der Wassereindringtiefe wiesen die mit dem Kunststoffzusatz modifizierten Spritzbetone (NSB 7) im Vergleich zu allen anderen faserfreien Betonen die geringsten Werte auf (Bild 7). Diese lagen mit 11 mm deutlich unter denen des Referenzbetons. Dabei waren auch die Streuung zwischen den Einzelwerten mit 7 mm vergleichsweise gering.

Durch die Kombination von Stahlfaser mit dem Kunststoffzusatz konnte bei der Prüfung des Wassereindringwiderstands eine deutliche Verbesserung sowohl der Wasserundurchlässigkeit der Matrix, als auch der Konvergenzzone Matrix/Faser erzielt werden. Es konnte keinerlei Wassereinleitung entlang der Faseroberfläche bestimmt werden (Bild 7). Es ist daher davon auszugehen, dass die in Wirkung des Kunststoffzusatzes entlang der Stahlfasern zu einer zusätzlichen Abdichtung führte.

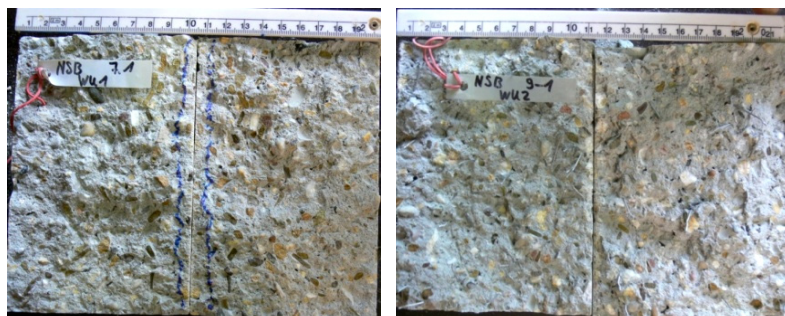


Bild 7: Wassereindringfronten (links: Kunststoffdispersion; rechts: Kombination von Stahlfasern $l/d = 40$ und Kunststoffdispersion)

6.5 E-Modul

Im Alter von 28 Tagen wurde an 3 Probekörpern je Spritzpalette der E-Modul geprüft. Der Referenzbeton erreichte im Mittel einen Elastizitätsmodul von 24.000 N/mm². Bei Zugabe von Stahlfasern veränderte sich dieser nicht wesentlich, da der Beton hinsichtlich seiner Basisrezeptur weiterhin mit der des Referenzbetons identisch war. Durch den Austausch des Silikastaub der Referenzmischung gegen Flugasche (NSB 2) bzw. Metakaolin (NSB 6) wurde mit 26.400 N/mm² bzw. 27.000 N/mm² ein geringfügig höherer E-Modul ermittelt. Bei Verwendung eines CEM III anstelle des CEM I der Referenzmischung wurde mit 30.000 N/mm² dagegen ein deutlich höherer E-Modul beobachtet. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit mit der deutlich abweichenden Erhärtungscharakteristik dieses hier unter-

suchten Spritzbetons in Zusammenhang zu bringen (s.o.). Demgegenüber führte die Verwendung eines Kunststoffzusatzes (NSB 7) zu einer geringeren Steifigkeit des Spritzbetons. Die ermittelten E-Moduli korrelieren mit den Ergebnissen der Druckfestigkeitsuntersuchungen (6.3).

7. Zusammenfassung

Bei den einschlägigen technologischen Untersuchungen verschiedener Spritzbetone für einen einschaligen, wasserundurchlässigen Tunnelausbau mit Spritzbeton stellte sich der Einsatz von Stahlfasern als günstig heraus. Dieser führt ganz generell zu einer Verringerung von Mikrorissen im Betongefüge und damit zu einer Erhöhung des Wassereindringwiderstands. Des Weiteren kann bei Zugabe von (längeren) Stahlfasern im gerissenen Zustand davon ausgegangen werden, dass die Rissweiten von Makrorissen im Beton minimiert sind und so die Möglichkeit einer Selbstheilung des Betons durch Versinterung der Risse gegeben ist.

Weiterhin wurde durch die Zumischung eines Kunststoffzusatzes (Acrylatbasis) ein deutlich erhöhter Wassereindringwiderstand im Beton experimentell nachgewiesen, welcher sich aufgrund der Vernetzung der Polymerpartikel untereinander zu einem Polymerfilm einstellt.

Bei einer Kombination der beiden vorgenannten Variationen konnte die Wassereindringtiefe nochmals signifikant verringert werden, sodass in der Betonmatrix keine fortschreitende Wassereindringfront mehr zu beobachten war. Zusätzlich wurde entlang der Verbundzone Faser/Matrix ebenfalls kein Wasser mehr in den Beton eingeleitet, sodass der Spritzbeton als wasserundurchlässig angesehen werden konnte. Auf diese Weise konnten die positiven Eigenschaften der langen Stahlfasern (Verringerung der Mikrorissbildung, Hemmung der Rissausdehnung) beibehalten werden, während durch die Zugabe des Polymers die negativen Eigenschaften (Wasserwegigkeit entlang der Faser) deutlich reduziert werden konnten. Bei der Festlegung, mit welchen Zusätzen die Wasserundurchlässigkeit des Spritzbetons verbessert werden soll, spielen auch die wirtschaftlichen Aspekte, d.h. das Verhältnis zwischen technischer Verbesserung zu Mehrkosten, eine Rolle. Aus diesem Grund wurden die Mikrofasern, die durchaus eine entsprechende Verbesserung bewirkten, in den Kombinationsuntersuchungen nicht weiter verfolgt, sondern zunächst die günstigeren herkömmlichen Stahlfasern berücksichtigt.

8. Literatur

- [1] Brux, G.:
Einschaliger Tunnelausbau mit Spritzbeton. Tiefbau 7 (1996), S. 440-447.
- [2] Dietrich, J.:
Zur Qualitätsprüfung von Stahlfaserbeton für Tunnelschalen mit Biegezugbeanspruchung. Technisch-wissenschaftliche Mitteilung des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 1992.
- [3] Dimmock, R.H.; Melbye, T.A.:
Modern Advances and Applications of Sprayed Concrete. Proceedings of the international Conference on engineering developments in shotcrete, Hobart, Australia, 2001.
- [4] Heimbecher, F.; Decker, W.; Faust, H-G.: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen. – Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Brücken- und Ingenieurbau Heft B 46 (2004).
- [5] Honnefelder, N.; Theimer, G. U.:
Einschalige Spritzbetonbauweise im Münchener U-Bahn-Bau. Bauingenieur 67 (1992), S. 393-399.
- [6] Kusterle, W.; Lukas, W.:
Einschalige Spritzbetonbauweise, Einsatz beim U-Bahn-Bau München. Beton 3/1992, S. 135-140.

- [7] Laue, G.; Schreyer, J.:
Einschalige Spritzbetonbauweise – Probleme der Wasserundurchlässigkeit. *Forschung + Praxis* 29, S. 51-54.
- [8] Peters, H. L.:
Einschaliger Tunnel in Stahlfaser-Spritzbetonbauart. *Beton- und Stahlbetonbau* 4/1984, S. 97-101.
- [9] Ruffert, G.:
Einschalige Tunnelbauweise mit Spritzbeton? *TIS* 5/95, S. 367-368.
- [10] Schreyer, J.:
Forschungsvorhaben „Einschalige Spritzbetonbauweise“ – Nennenswerte Ergebnisse und Empfehlungen. *Bochumer Querschnitte*, (Dokumentation des Stadtbahnbaus in Bochum von 1973 bis 1989) 1990, S. 144-153.
- [11] Teutsch, M.:
Einsatz von Stahlfasern im Tunnelbau. *Beton und Stahlbeton* 1001 (2006), Heft 5, S. 311-321.
- [12] Westhaus, K-H.; Flöttmann, H.:
Einschaliger Tunnel in Stahlfaserspritzbetonbauweise – Erfahrungsbericht und Empfehlung für weitere Ausführungen. *Forschung + Praxis* 29, S. 46-50.

Zu den Autoren

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Studium Bauingenieurwesen und Promotion TU München; 1992-2002 Leiter Zentrales Baustofflabor Phillip Holzmann AG; seit 2003 Professur für Baustofftechnik Ruhr-Universität Bochum
rolf.breitenbuecher@rub.de

Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes

Studium Bauingenieurwesen RWTH Aachen; Promotion Universität Wuppertal; 1993-2005 verschiedene Tätigkeiten in Planung, Bau und Forschung für den Tunnelbau; seit 2006 Professur für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb Ruhr-Universität Bochum
markus.thewes@rub.de

Dr.-Ing. Götz Vollmann

Studium Bauingenieurwesen und Promotion Ruhr-Universität Bochum; 1999-2001 Bau- und Projektleitung im SF-Bau, seit 2005 Oberingenieur Lehrstuhl Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb
goetz.vollmann@rub.de

Dipl.-Ing. Heiko Rahm

Studium Bauingenieurwesen Ruhr-Universität Bochum; 2007-2010 wiss. Mitarbeiter Lehrstuhl für Baustofftechnik; seit 2010 wiss. Mitarbeiter im Bereich für Konstruktionsteilprüfung an der RUB
heiko.rahm@rub.de

Dipl.-Ing. Ingo Kaundinya

Studium Bauingenieurwesen Ruhr-Universität Bochum; 1999-2005 Projektleiter bei Maidl & Maidl; seit 2005 stellv. Leiter des Referates „Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb, Zivile Sicherheit“ BAST
kaundinya@bast.de