
ENTWICKLUNG EINES SPRITZBETONS MIT SEHR HOHEM FASERANTEIL ALS BAUWERKSSCHUTZ FÜR BRAND- UND EXPLOSIONSBELASTUNGEN

DEVELOPMENT OF A SPRAYED CONCRETE WITH HIGH FIBER CONTENT AS A COUNTERMEASURE FOR BUILDINGS UNDER FIRE AND EXPLOSIVE LOADS

Götz **Vollmann**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Markus **Thewes**, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Bochum, Deutschland

Eugen **Kleen**, MC Bauchemie, Bottrop, Deutschland

Extreme Einwirkungen – vor allem solche aus Explosionsereignissen oder starken Bränden – stellen bei kritischen Bauwerken der urbanen Infrastruktur eine valide Bedrohung dar. Derzeit sind hierfür nur wenige Gegenmaßnahmen vorhanden, die zudem zumeist gezielt für bestimmte Szenarien entwickelt wurden und daher eventuell Probleme bei hiervon abweichenden Einwirkungen bedingen. Zusätzlich sind viele Maßnahmen vor allem als flächige Schutzkonstruktionen verfügbar und stoßen daher bei komplexen Geometrien rasch an ihre Grenzen. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die Entwicklung eines spritzfähigen Hochleistungsbetons, der gleichermaßen eine Schutzwirkung gegen Brand- und Explosionsereignisse besitzt und aufgrund seiner verfahrenstechnischen Randbedingungen auch bei komplexen räumlichen Bedingungen eingesetzt werden kann.

Extreme impact, as it may result from scenarios like explosions or huge fires, has to be considered as a valid scenario especially when dealing with objects of our urban infrastructure. Currently there is only a limited amount of countermeasures available with most of them being developed for one specific threat – fire or explosion. Thus differing impact might expose weaknesses of the measure concerning other threats. Also, most of these products are provided as planar elements with additional problems if the surface to be secured shows a complex geometry. The following publication describes the development of a high-performance sprayed concrete that not only provides resilience against the mentioned threats but also has a high level of applicability even under difficult spatial conditions.

1. Einleitung

Schon heute werden neuralgische Bauwerke unserer baulichen und verkehrlichen Infrastruktur im Zuge des Entwurfsstadiums für Einwirkungen ausgelegt, die sich als Ergebnis von Ereignissen mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit aber sehr hohem Schadensmaß charakterisieren lassen. Beispielsweise werden Tunnelschalen deutscher Straßentunnel gemäß der derzeit gültigen ZTV-ING für Brandszenarien bemessen, die aufgrund der hohen Vollbrandtemperatur und der korrespondierenden Branddauer nur höchst selten zu erwarten sind und erhebliche thermische Einwirkungen auf die Konstruktion zur Folge haben [1].

Gleichwohl sieht sich unsere Gesellschaft zunehmend ganz neuen Szenarien im Hinblick auf die sicherheitstechnische Bauwerksbewertung konfrontiert. Diese resultieren aus zu-

nehmend großen Brandlasten bei den transportierten Gütern (bspw. bei Gefahrguttransporten) oder aus kriminellen Handlungen, die ein Einschränkung der Verfügbarkeit des Bauwerks bis hin zu seinem Verlust zum Ziel haben. Dies gilt insbesondere für Brücken und Tunnel der verkehrlichen Infrastruktur, welche aufgrund ihrer exponierten Lage zumeist eine Flaschenhalsfunktion in der Netzstruktur einnehmen. Schädigungen des Bauwerks können daher aufgrund des Rückkoppelungseffekts in das umgebende Netz einen großen Volkswirtschaftlichen Schaden nach sich ziehen. Daher besitzt die sogenannte „Security“-Forschung national wie international derzeit einen sehr hohen Stellenwert [2],[3]. Dabei sind speziell terroristische Anschläge keineswegs ein nur theoretisch zu betrachtendes Szenario, sondern müssen spätestens seit „Beinahe“-Ereignissen wie am Holland Straßentunnel in New York [4] oder konkreten Anschlägen wie in Madrid, London oder Tokio als valide und ernstzunehmende Bedrohungen angesehen werden.

Der Schutz von einzelnen Bauteilen gegen erhebliche Einwirkungen – bspw. resultierend aus derartigen Brand- oder Explosionsbelastungen – kann in der Regel durch Vorsatzschalen aus brandbeständigen, duktilen, hochfesten und/oder sehr zähen Materialien vorgenommen werden. Derartige Vorsatzschalen sind derzeit allerdings nur bei einfacher Geometrie des Bauteils und nur in Form von Fertigteilen herstellbar, was bei komplexeren räumlicheren Anforderungen (z.B. beim Übergang von einem Tunnel-Querschlag in den Hauptstollen oder einer mehrfach räumlich gekrümmten Oberfläche) gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand umsetzbar ist. Theoretisch könnte hier ein Spritzbeton, der sich aufgrund der Verfahrenstechnik seiner Herstellung perfekt der jeweiligen Kubatur anpasst und der mit einem hochdosierten Cocktail verschiedener Fasertypen versetzt ist, zum Schutz der Bauteiloberfläche eingesetzt werden. Jedoch zeigen Untersuchungen aus aktuellen Forschungsprojekten, dass eine signifikante Zunahme der Beanspruchbarkeit bei Explosionseinwirkungen nur bei ultrahochfesten Betonen und nur mit einer Fasermenge deutlich > 2 Vol.-% zu verzeichnen ist [5]. Zudem werden aus brandschutztechnischen Gründen signifikante Mengen an Polypropylenfasern (oder gleichwertigen) in der Matrix benötigt. Beides wurde als Spritzbeton bislang so nicht umgesetzt, vor allem nicht in Kombination, da hier die Grenze dessen, was als maximal verarbeitbare Fasermenge gilt, bei weitem überschritten wird.

Im Folgenden werden die Randbedingungen bzw. Anforderungen an einen solchen Spritzbeton skizziert und hieraus Vorgaben abgeleitet, die an eine Rezeptur zu stellen sind. Hernach werden aktuelle Forschungsergebnisse präsentiert, die erstmalig die erfolgreiche Herstellung von Probenkörpern aus duktilem, hochfestem Spritzbeton beschreiben und erste Ergebnisse aus Eignungsprüfungen dargelegt.

2. Anforderungen an den Spritzbeton

2.1 Brandszenarien

Weltweit existiert eine Vielzahl von Temperatur-Zeitkurven die zur Bemessung von Bauteilen mit thermischer Einwirkung herangezogen werden können. Aus Sicht des Brandverlaufs sind dabei die Innenraumbrände am kritischsten, da kein freier Abfluss der vom Brand freigesetzten Wärmemenge stattfindet und sich so die exponierten Bauteile sukzessive aufheizen. Eine Auswahl der für die Bemessung von Tunnelbauwerken wichtigsten T/t-Kurven ist im nachfolgenden Bild 1 dargestellt.

Speziell in Deutschland sind dabei die ZTV-ING (für den Straßenbereich) und die EBA-Kurve (für den Schienenbereich) maßgebend. Bei beiden Kurven steigt die Brandtemperatur innerhalb von 5 min auf den Maximalwert von 1200°C welcher die Vollbrandphase charakterisiert. Während bei der ZTV-ING Kurve nach 30 min bereits die Abkühlungsphase beginnt, verbleibt bei der EBA-Kurve das Temperaturniveau weitere 30 min auf dem

maximalen Level. Bei der Bemessung von derartig beanspruchten Bauteilen ist darauf zu achten, dass die zugkraftbeanspruchte Bewehrung nicht über 300°C erhitzt wird. In der Regel gelingt dies durch eine ausreichend hohe Betondeckung oberhalb der Bewehrungslage, bspw. von > 6 cm bei einer Bemessung gemäß ZTV-ING [1].

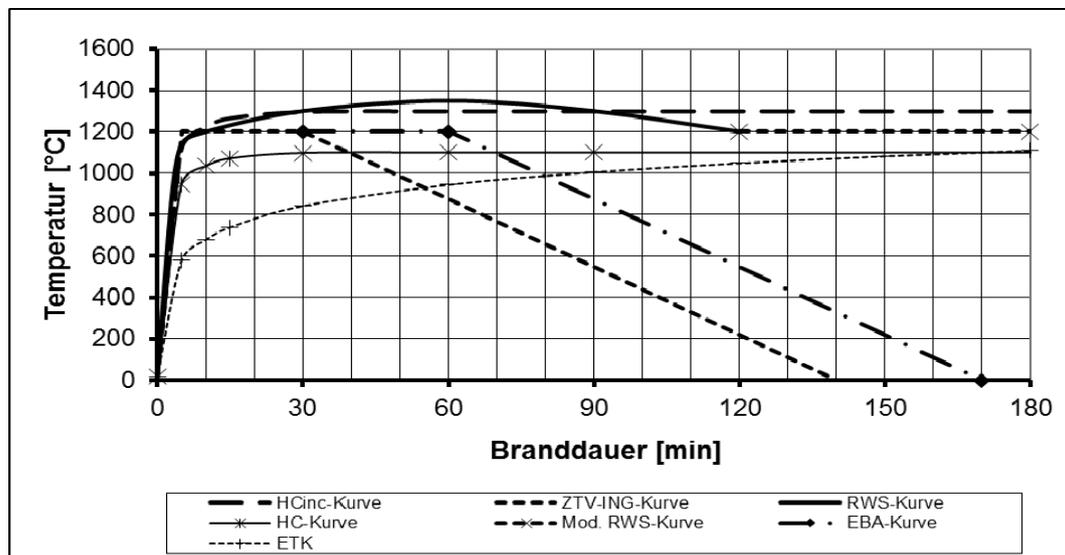


Bild 1: Einige wichtige Brandtemperatur/Zeit-Kurven zur Bauteilbemessung im Brandfall

Problematisch ist jedoch, dass aufgrund der thermischen Belastung und der steilen Gradienten der Temperaturzunahme i.d.R. mit Abplatzungen an der Betonoberfläche zu rechnen ist. Eine derart reduzierte Betondeckung führt zu einem rascheren Temperaturanstieg in tieferen Bauteilregionen und damit zu einer problematischen Erwärmung der Bewehrung. Die Vermeidung von derartigen Abplatzungen kann beispielsweise durch die Zugabe von Polypropylen-Fasern (PP-Fasern) oder gleichwertigen schmelzfähigen Fasertypen geschehen [6]. In der Vergangenheit wurde hier mit verschiedenen Fasergehalten experimentiert, wobei sich auch gemäß [1] für Neubauten mittlerweile einen Fasergehalt von 1,5 kg/m³ im Frischbeton empfiehlt. So dürfen Neubauten von Tunnelbauwerken in Deutschland, sowohl bei Bahn- wie auch bei Straßentunneln künftig nur noch mit derart fasermodifizierten Betonrezepturen ausgeführt werden. Da hochfeste Betone in der Regel zu einer höheren Sprödheit im Brandfalle neigen (siehe auch [7]), wurde auf der sicheren Seite liegend gemäß [6] ein Fasergehalt von **3 kg/m³** für die Rezepturentwicklung angestrebt.

2.2 Explosionsszenarien

Generell ist bei Detonationen im Umfeld von kritischen Bauteilen zwischen lokalen und globalen Phänomenen zu unterscheiden. Bei der lokalen Belastung werden Bauteile unter Nah- oder Kontaktdetonationen einer sehr komplexen Belastungsphänomenologie, bestehend aus Scher- und Durchstanzbeanspruchungen ausgesetzt. Aus der Explosion resultiert eine diskontinuierliche Stoßfront, welche Spitzenüberdrücke im Bereich mehrerer GPa in die Struktur einleitet. Auf der Lastseite des Bauteils (der Detonation zugewandt) kann dies zu Kraterbildungen mit völlig oder teilweise zerstörtem und ausgeworfenem Material führen. Zusätzlich rufen Wellenreflexionen an der Bauteilrückseite (der Explosion abgewandt) Spallationsbelastungen hervor, die ihrerseits Abplatzungen und Auswurf von Trümmerteilen nach sich ziehen, also ebenfalls einen Krater erzeugen können.

Sind Kratertiefe und Abplatzungstiefe groß genug so entstehen Durchbruchzonen im Bauteil und damit einhergehend erhebliche Undichtigkeiten (Bild 2).



Bild 2: Stahlbetonplatte mit Durchstanzung und Auswurf nach Detonationsbelastung [11]

Speziell letzteres kann bei Gewässerquerungen fatale Auswirkungen haben, auch ohne ein parallel einhergehendes globales strukturelles Versagen der Konstruktion.

Bei der globalen Belastung ist hinsichtlich der zu erwartenden Biegebeanspruchung zwischen der Druckwellenausbreitung im Freifeld und der einer Innenraumdetonation zu unterscheiden. Während im Freifeld die von der Detonation erzeugte Druckwelle ungehindert abfließen kann und hinter sich eine Zone partiellen Unterdrucks zurücklässt, nimmt im Innern, infolge des umschlossenen Raumes, der Einfluss der Welle vor allem zeitlich deutlich zu. Durch multiple Reflexionen wird der im Freifeld charakteristische plötzliche Abfall des Überdrucks reduziert und die dem Überdruck folgende Unterdruckphase bleibt daher aus. Genauere Hinweise zu dieser komplexen Thematik liefern beispielsweise [8] oder [9]. Bild 3 zeigt exemplarisch und vergleichend typische Druck/Zeit-Verläufe für eine Freifeld- (links) und eine Innenraumdetonation (rechts).

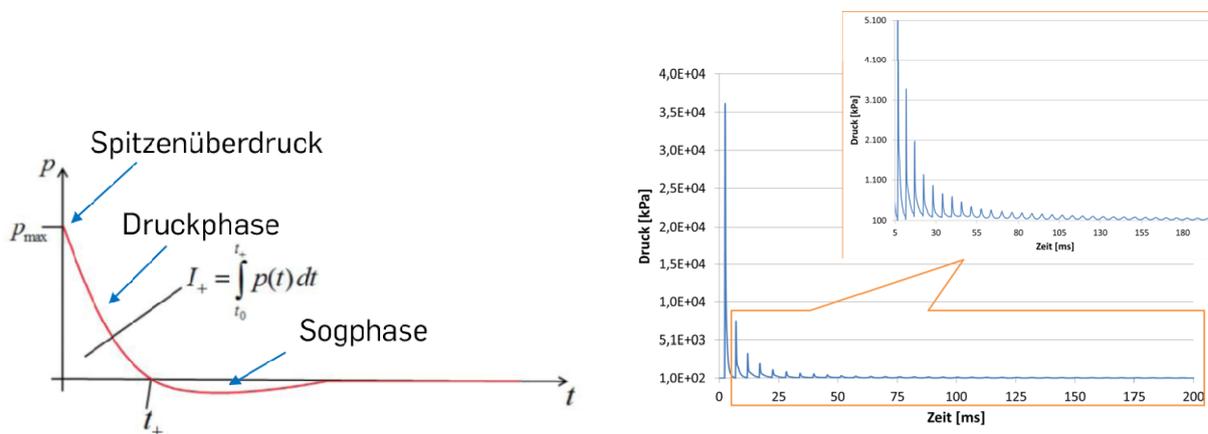


Bild 3: Exemplarische Druck/Zeit-Verläufe für eine Freifeld- (links) und eine Innenraumdetonation (rechts [9])

Im Extremfall überlagern sich auf diese Weise zwei Schädigungsszenarien, wenn die Druckwelle den aufgrund der lokalen Belastung vorgeschädigten Bauteilquerschnitt belastet.

Untersuchungen wie bspw. [10] haben gezeigt, dass sich gängige Bauwerkstypen bei bestimmten Ladungsmengen in der globalen Betrachtung durchaus widerstandsfähig zeigen, während vor allem der lokale Lastfall ein Problem darstellen kann. Um eine höhere Widerstandsfähigkeit eines Bauteils gegen die mit der lokalen Einwirkung korrespondierenden Scher- und Durchstanzbeanspruchungen zu entwickeln, werden einerseits eine höhere Druckfestigkeit der Matrix und andererseits ein hoher Stahlanteil im Betonquerschnitt benötigt, der besagter Scherbeanspruchung entgegen wirken kann. Als Zielsetzungen für den zu entwickelnden Spritzbeton wurden daher Druckfestigkeiten im Bereich $f_{ck,min} \geq 110 \text{ N/mm}^2$ und Fasergehalte in der Größenordnung $V_{s,min} \geq 140 \text{ kg/m}^3$ avisiert. Untersuchungen im Rahmen des AISIS-Projektes haben gezeigt, dass im Bereich dieser Größenordnung mit einer signifikanten Zunahme der Widerstandsfähigkeit der erhärteten Matrix zu rechnen ist [5]. Für den hier entwickelten Spritzbeton wurden verschiedene Fasercocktails angedacht, wobei sowohl hochfeste Drahtfasern mit Endaufbiegung als auch Microstahlfasern zum Einsatz gelangen sollten.

2.3 Verfahrenstechnische Anforderungen

Um eine Verarbeitbarkeit des zu entwickelnden Spritzbetons in der Baustellensituation sicherstellen zu können, musste die Rezeptur gewissen Anforderungen an den Frischbeton genügen. Dies betrifft einerseits seine Pumpfähigkeit angesichts der enormen Fasergehalte und andererseits den Zeitpunkt des Ansteifens der erhärtenden Mischung. Da gemäß den vorgenannten Zielvorgaben ein hochfester bis ultrahochfester Spritzbeton angestrebt wurde, war eine schnellere Hydratation des unbeschleunigten Frischbetons zu erwarten als bei herkömmlichen Mischungsrezepturen üblich. Als Zielvorgabe wurden daher ein Ausbreitmaß im Bereich von $490 \text{ mm} \leq a \leq 620 \text{ mm}$ über einen Zeitraum von min. 90 min nach Herstellung des Frischbetons festgelegt, verbunden mit dem nachrangigen Ziel, dieses Zeitfenster auf 3 h im späteren Verlauf der Rezepturentwicklung auszudehnen.

3. Rezepturentwicklung und Eignungsuntersuchungen

3.1 Versuchskonzept und Durchführung der Vorversuche

Aufgrund der Tatsache, dass die verschiedenen Anforderungen an den Hochleistungs-Spritzbeton teilweise als vollkommen gegenläufig betrachtet werden mussten (bspw. Faseranteil vs. Verarbeitbarkeit), wurde eine iterative Vorgehensweise zur Rezepturentwicklung gewählt. Ausgehend von einer typischen Rezepturvorgabe für einen UHPC wurden so Variationen der Rezeptur entwickelt, die sich in Schritten der Zielvorgaben annähern sollten, bei gleichzeitiger Dokumentation der Frischbetoneigenschaften und Identifizierung möglichen Optimierungspotentials. Da sich bekannter Maßen die Eigenschaften einer Rezeptur durchaus auch mit dem hergestellten Volumen an Frischbeton ändern können, mussten darüber hinaus sowohl Eignungsprüfungen im Labormaßstab (Vorversuche I) sowie auch im großmaßstäblichen Umfang vorgesehen werden (Vorversuche II). Das hierbei verfolgte „Best-way-out“-Prinzip sollte also idealtypisch in einer Rezeptur münden, mit der dann großmaßstäbliche Versuchskörper am Spritzstand der RUB hergestellt werden konnten. Diese Versuchskörper sollten dann geeigneten Untersuchungen zur Widerstandsfähigkeit des erhärteten Spritzbetons zugeführt werden, um auch die speziellen Anforderungen durch Brand und Explosion prüfen zu können. Das hierbei verfolgte Versuchsprinzip lässt sich schematisch wie in Bild 4 gezeigt darstellen.

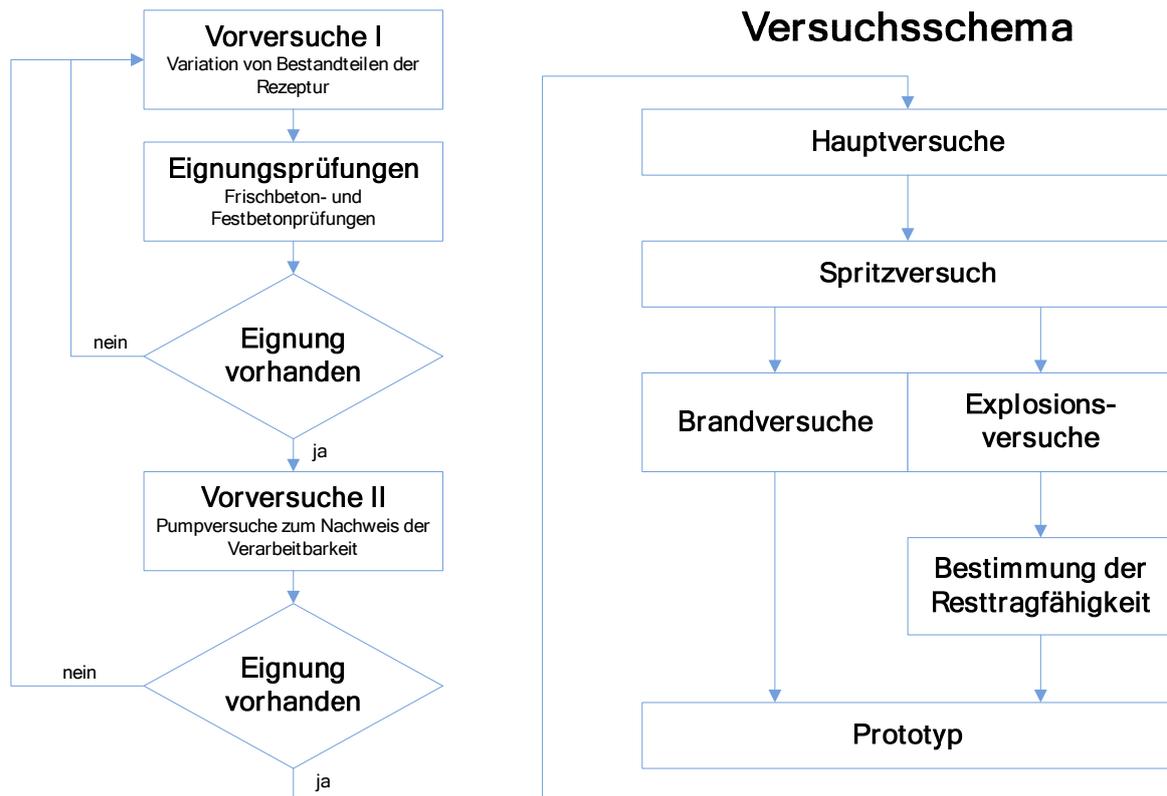


Bild 4: Ablaufschema der Versuchsserie

Die Eignungsprüfungen der Vorversuche I umfassten im Einzelnen Untersuchungen zum Ausbreitmaß zwecks Bestimmung der Konsistenzklasse, Würfeldruckfestigkeitsprüfungen, Untersuchungen zur Energieabsorption gemäß DIN EN 14488-5 [12] und Biegezugversuche an Probekörpern zur Bestimmung der möglichen Zugspannungsbelastung der Probekörper. Im Rahmen der Vorversuche II galt es, den großmaßstäblich hergestellten Frischbeton im Spritzbetonstand der RUB hinsichtlich seiner Pumpbarkeit zu untersuchen. Hierzu wurde die Pumpstrecke hinter der verwendeten Betonpumpe sukzessive verlängert, um eine Verarbeitbarkeit des Betons über die Versuchsdauer hinweg sicher stellen zu können und ein vermehrtes Auftreten von Stopfern und Faserigeln in den Pumpschläuchen auszuschließen. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die Basisrezeptur (Serie 0) und die rezepturspezifischen Iterationsschritte der Vorversuche I.

Tabelle 1: Verschiedene Mischungskonfigurationen im Rahmen der Vorversuche:

| Mischungsvariation | | | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Produkt | Serie 0 | Serie 1 | Serie 2 | Serie 3 | Serie 4 | Serie 5 |
| | [kg/m³] | [kg/m³] | [kg/m³] | [kg/m³] | [kg/m³] | [kg/m³] |
| Zementsorte | CEM I 52,5 R | CEM III 52,5 R |
| Fließmittel: PF 5100 | 1,7% ± 10,2 | 2,0% ± 12,0 | 2,0% ± 12,1 | 2,3% ± 13,8 | 2,4% ± 14,4 | 1,7% ± 10,2 |
| Stahlfasern | - | 79,00 | 79,00 | 79,00 | 79,00 | - |
| Microstahlfasern | - | - | - | 63,00 | 63,00 | - |
| PP - Fasern | - | - | - | - | 2,00 | - |
| Frischbetonroh- dichte | 2381,00 | 2367,00 | 2353,00 | 2332,00 | 2329,00 | 2366,00 |

3.2 Ergebnisse der Vorversuche und Rezepturmodifikationen

Wie zu erwarten hatte die sukzessive Steigerung der Fasergehalte einen deutlich negativen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, während parallel eine deutliche Zunahme der Leistungsfähigkeit zu verzeichnen war, beispielsweise im Hinblick auf die Energieabsorptionsfähigkeit des erhärteten Betons. Nachfolgende Tabelle 2 stellt die Ergebnisse für die Ausbreitversuche der in Tabelle 1 vorgestellten Rezepturmodifikationen dar.

Tabelle 2: Zeitliche Entwicklung der Ausbreitmaße der verschiedenen Versuchsserien

| Zeit [min] | 0 | 15 | 30 | 60 | 90 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Serie | | | | | |
| 0 | 52,00 | 53,00 | 55,00 | 57,00 | 58,50 |
| 1 | 65,00 | 61,00 | 60,00 | 57,00 | 54,00 |
| 2 | 52,00 | 53,00 | 55,00 | 54,00 | 55,00 |
| 3 | 36,00 | 35,00 | 35,00 | 33,00 | 30,00 |
| 4 | 39,00 | 33,00 | 30,00 | 29,00 | 28,50 |
| 5 | 61,00 | 60,00 | 63,50 | 64,50 | 64,00 |

Trotz einer verhältnismäßig hohen Zugabe von Fließmittel, sowie dem ebenfalls die Verarbeitbarkeit des Frischbetons positiv beeinflussenden Betonzusatzstoffes Centrilit NC, erreichten die Mischungen mit hohem Faseranteil (bspw. Serie 4 mit 79 kg/m³ Drahtfaser, zuzüglich 63 kg/m³ Microstahlfaser und weiteren 2 kg/m³ Kunststofffaser) nur etwa 50 % des Ausbreitmaßes der Serie 0. Umgekehrt stieg die aufnehmbare Energie des bewehrten Betons um mehr als das 200-fache im Vergleich zur unbewehrten Serie 0 (Bild 5).

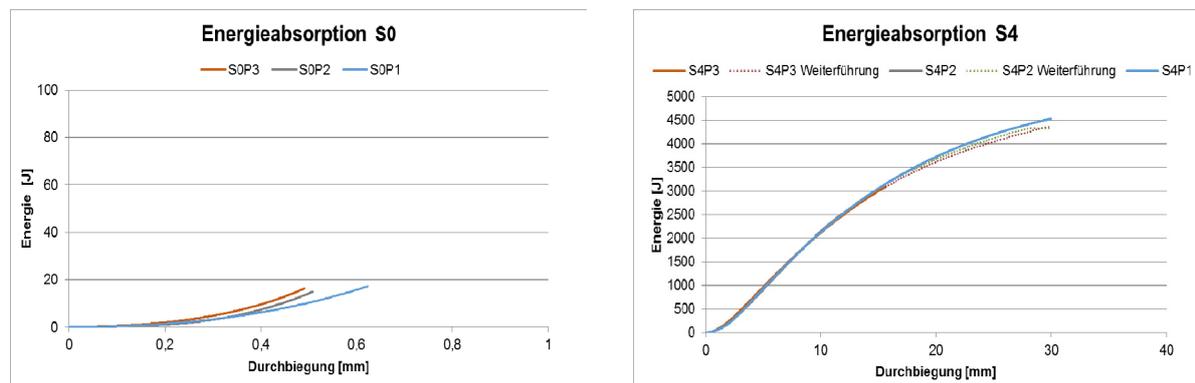


Bild 5: Vergleichende Gegenüberstellung der Energieabsorptionsrate für die Serie 0 (links) und die Serie 4 (rechts) gemäß DIN EN 14488-5 [12]

Alle weiteren durchgeführten Modifikationen lieferten vor diesem Hintergrund erwartbare und vergleichbare Ergebnisse. Es war daher zu konstatieren, dass für die Rezepturen mit hohem Faseranteil eine Verarbeitbarkeit sowohl als Pump- aber vor allem als Spritzbeton aus rein technischen Gründen ausgeschlossen werden musste. Auch weitere Modifikationen der Rezeptur lieferten unter diesem Aspekt keinen Zugewinn an Verarbeitbarkeit. So brachte beispielsweise weder ein stark erhöhter Fließmittelgehalt, noch anderen Fasergeometrien oder weitere Zusatzmitteln den gewünschten Erfolg im Hinblick auf die Fließfähigkeit und Pumpbarkeit des Frischbetons.

Der Durchbruch gelang schließlich durch den Einsatz eines Luftporenbildners, mit dessen Hilfe der LP-Gehalt im Frischbeton in einem eigentlich unüblichen Maß erhöht wurde. Die Autoren gehen dabei davon aus, dass der für Luftporen typische Effekt der „Kugellagerbildung“ (Bild 6 links) sich auch auf die in der Mischung befindlichen Fasern auswirkte

und so zu einer deutlichen Erhöhung der Fließfähigkeit und somit des Ausbreitmaßes beim Frischbeton führte (Bild 6 rechts).

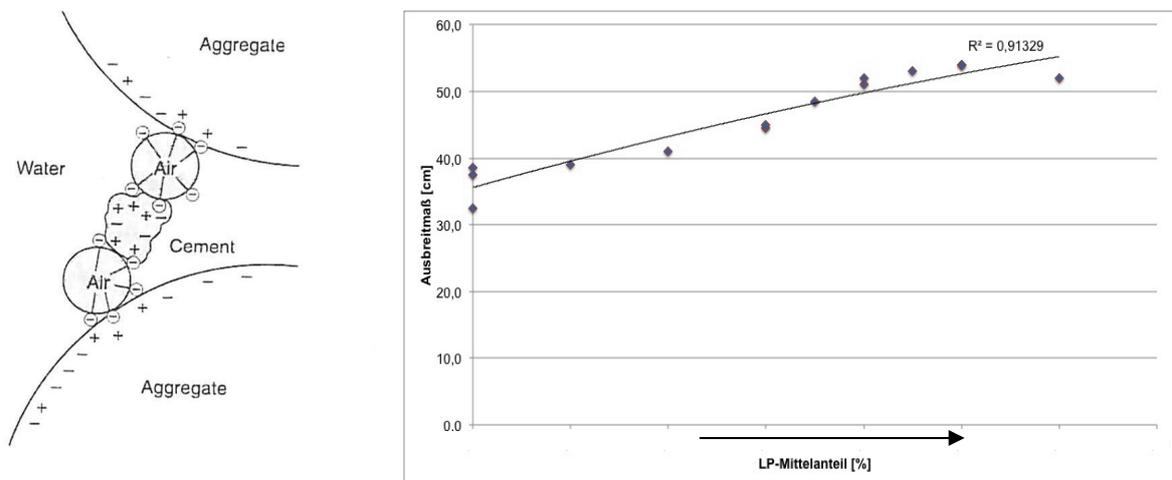


Bild 6: Theoretischer „Kugellagereffekt“ von Luftporen im Frischbeton (links) und Auswirkung auf die Verarbeitbarkeit bzw. das Ausbreitmaß des Frischbetons (rechts)

Im Laborexperiment wurde so der natürlich vorhandene Anteil an Luftporen (bei dem hier dargestellten Frischbeton i.d.R. in einem Bereich zwischen 2-4 %) sukzessive angehoben und bis zu einem Wert, bei dem keine weitere Zunahme des Ausbreitmaßes mehr festzustellen war, gesteigert. Hier begann der Beton zusätzlich deutliche Tendenzen zur Entmischung zu entwickeln.

Mit dieser modifizierten Rezeptur konnten dann die Pumpversuche der Vorversuche II erfolgreich durchgeführt werden, wobei zwei verschiedenen Fasercoktails im Fokus standen. Dabei erwies sich ein Cocktail aus PP- und reinen Drahtfasern (ohne Microstahlfasern) als zwar am Ausbreittisch ausreichend fließfähig, jedoch nicht über längere Strecken pumpbar. Bereits nach weniger als zwei Metern Pumpstrecke bildeten sich Faserigel und Stopfer im Pumpschlauch. Eine Mischung aus 80 kg/m^3 Drahtfaser, 60 kg/m^3 Microstahlfasern und 3 kg/m^3 PP-Fasern konnte ohne Probleme über die gesamte Pumpstrecke im Spritzbetonversuchsstand der RUB gepumpt werden. Hierbei wurde auch versuchsweise der Pumpvorgang unterbrochen und nach wenigen Minuten die Pumpe erneut angefahren, ohne jedoch zu Stopfern oder Igel zu führen.

Problematisch an dieser Lösung war, dass sowohl aus betontechnologischer Sicht wie auch vor dem Hintergrund der formulierten Zielstellungen, ein Beton mit einem derart erhöhten Anteil an Luftporen als kontraproduktiv anzusehen war. Weder die benötigten hohen Druckfestigkeiten des erhärteten Betons (aufgrund der Lufteinschlüsse in der Matrix) noch ein Einsatz des Frischbetons als Spritzbeton (aufgrund der deutlich verlangsamten Erhärtung infolge der Luftporen) waren unter diesen Voraussetzungen realistisch. Ein Austreiben der Poren infolge des Spritzvorgangs war aufgrund des extrem hohen LP-Anteils ebenfalls nicht zu erwarten. Daher wurde in zusätzlichen Laborversuchen überprüft, welche Dauer ein Entschäumungsvorgang des Frischbetons hat, um Ideen für eine verfahrenstechnische Lösung dieses erneuten Problems entwickeln zu können. Hierbei konnte gezeigt werden, dass bereits direkt nach Zugabe des Entschäumers der Anteil der Luftporen auf ein sehr niedriges Niveau zurückging. In einer zweiten Versuchsserie wurde daher untersucht, ob eine Verträglichkeit zwischen Entschäumer und Beschleuniger gegeben ist. Da bei den verwendeten Produkten keine chemische Reaktion stattfand, wurde eine gemeinsame Einmischung von Entschäumer und Erstarrungsbeschleuniger an der Spritzdüse vorgesehen

und die Machbarkeit durch einen weiteren, großmaßstäblichen Versuch überprüft. Die Ergebnisse, der in der Folge durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen an Probekörpern aus der Versuchspalette weisen aus, dass beispielsweise hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung keine Einbußen durch das Mischen von Beschleuniger und Entschäumer zu verzeichnen war (Tabelle 3).

Tabelle 3: Würfeldruckfestigkeiten des gespritzten Betons

| Würfeldruckfestigkeit | | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Serie | Festigkeit | Mittelwert | Korrekturfaktor | Korr. Fest. | Mittelwert | Rohdichte |
| | [N/mm ²] | [N/mm ²] | | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [kg/dm ³] |
| Spritzversuch (entschäumt) | 129,20 | 130,50 | 0,92 | 118,80 | 120,00 | 2,435 |
| | 129,50 | | 0,92 | 119,10 | | 2,421 |
| | 132,80 | | 0,92 | 122,10 | | 2,411 |

4. Hauptversuche

4.1 Herstellung der Prüfkörper und Versuchsprogramm der Hauptversuche

Der Spritzstand der Ruhr-Universität Bochum ermöglicht aufgrund seiner Konzeption und der technischen Umsetzung die Herstellung von weitestgehend reproduzierbaren Ergebnissen und Prüfkörpern. Bild 7 stellt die spritztechnisch relevanten Details des Versuchstandes dar.

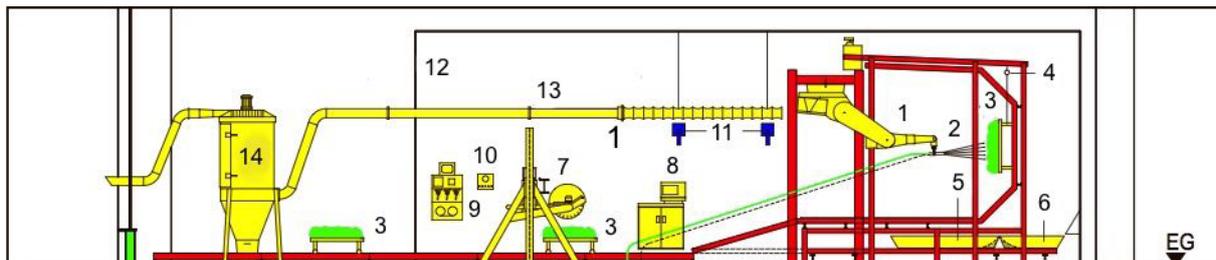


Bild 7: Systemskizze der spritzrelevanten Details des Spritzstandes der RUB

Herzstück der Anlage ist ein moderner Industrieroboter (1), der normalerweise in der Automobilindustrie eingesetzt wird und der aufgrund seiner Programmierung stets identische Düsenbewegungen vollführt. Auf diese Weise können alle variierenden Einflüsse aus Düsenbewegung, Düsenabstand etc. eliminiert werden. Gespritzt wird dabei auf eine Unterkonstruktion (3), die i.d.R. aus einer Holzpalette besteht und auf der dann ein Prüfkörper aus Spritzbeton aufgebaut wird. Aus diesem Prüfkörper können dann mit Hilfe der Säge- und der Kernbohrungseinrichtung (7) weitestgehend beliebige Prüfkörper aus der Spritzpalette ausgesägt bzw. gebohrt werden. Dieses Vorgehen vermeidet die typischen Probleme der sogenannten Spritzkisten, bei denen verfahrensbedingt stets ein Teil des Rückpralls mit eingespritzt wird.

In den Hauptversuchen wurden nun zunächst Prüfkörper für die geplanten Brand- und Explosionsversuche betoniert. Zur Simulation einer Tunnelschale wurde hierzu eine Unterkonstruktion aus Schalbeton hergestellt, die mit einer schlaffen Biegebewehrung ausgeführt wurde. Als Bemessungseinwirkung für diese Bewehrung wurden hierbei lediglich Eigengewicht und Montagelasten herangezogen, welche bei einseitigem Anhängen der Platte an eine Kranflasche entstehen. Die Platten wurden im Spritzstand der RUB auf die

typischen Spritzpaletten montiert und in der Folge mit einem gespritzten Coating des Hochleistungsbetons versehen.

Für die Durchführung der Brandversuche wurden auf der Oberfläche der Betonunterkonstruktion zusätzlich Temperaturfühler montiert, die eine Aufzeichnung der Durchwärmung des gespritzten Querschnitts in der Brandkammer ermöglichen sollten. Nachfolgendes Bild 8 zeigt die Unterkonstruktion vor dem Einspritzen im Spritzstand (links) und in einer Großaufnahme die eingebauten Temperatursonden (rechts)



Bild 8: Unterkonstruktion des Prüfkörpers (links) und Großaufnahme der im Weiteren eingespritzten Temperaturfühler (rechts)

Die Schichtdicke bei den Prüfkörpern für Brand- und Explosionsversuche betrug jeweils etwa 10-12 cm. Eine genaue Schichtdicke ist aufgrund der Verfahrenstechnik beim Spritzen nur begrenzt bestimmbar.

Die Prüfkörper für die Brandversuche wurden bei der MFPA in Leipzig im Weiteren einem Standard-EBA-Brand exponiert (siehe auch Bild 1). Hierzu wurden an zwei gespritzten Prüfkörpern Untersuchungen durchgeführt.

Die Prüfkörper für die Explosionsversuche wurden in das Fraunhofer Ernst-Mach-Institut (EMI) in Freiburg verbracht und dort unter Zuhilfenahme einer Kontaktladung im Zuge eines skalierten Versuchs angesprengt. Die genaue Ladungsstärke unterliegt einer sicherheitstechnischen Einstufung und kann an dieser Stelle daher leider nicht näher ausgeführt werden. Insgesamt wurden zwei Betonunterkonstruktionen mit gespritztem Aufbeton und eine nicht angespritzte Unterkonstruktion angesprengt.

4.2 Vorläufige Ergebnisse

Da das zugrunde liegende Forschungsprojekt zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Veröffentlichung noch nicht vollständig abgeschlossen ist konnten auch noch nicht alle Untersuchungen vollständig ausgewertet werden. Vor allem vergleichende Untersuchungen zur Bestimmung der Resttragfähigkeit der angesprengten Prüfkörper sind derzeit noch nicht abgeschlossen und ausgewertet. Gleichwohl liefern die bislang gewonnenen Ergebnisse ein durchaus aussagekräftiges Bild.

Die Untersuchungen in der Brandkammer der MFPA Leipzig haben ergeben, dass der entworfene Spritzbeton nur in äußerst geringem Maße zur Bildungen von Abplatzungen neigt. Beide gespritzten Prüfkörper zeigten wenige Abplatzungen und eine homogene

Durchwärmung des Prüfkörpers. Nachfolgendes Bild 9 zeigt eine Aufnahme der Oberfläche des Spritzbetons nach Beflammung mit einem Brand nach EBA-Kurve.



Bild 9: Prüfkörper nach Beanspruchung durch einen Brand gemäß der EBA-Brandkurve

Es sind offensichtlich keine deutlichen Abplatzungen zu beobachten, was auch durch den Prüfbericht der MFPA unterstützt wird [12]. Die Oberfläche ist partiell verrußt jedoch ohne die ansonsten typische Bildung von Abplatzungskratern. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die Ergebnisse der Temperaturmessung und des Oberflächenscans der Prüfkörper noch geeignet veröffentlicht. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2 formulierten Zielstellungen erfüllt der Spritzbeton damit im Hinblick auf die Brandbeanspruchbarkeit die an ihn gestellten Anforderungen.

Im Hinblick auf die Explosionsbeanspruchung zeigt das nachfolgende Bild 10 die Rückseite der unbehandelten Unterkonstruktion (links) und einer Unterkonstruktion mit 10-12 cm Schutzcoating (rechts).

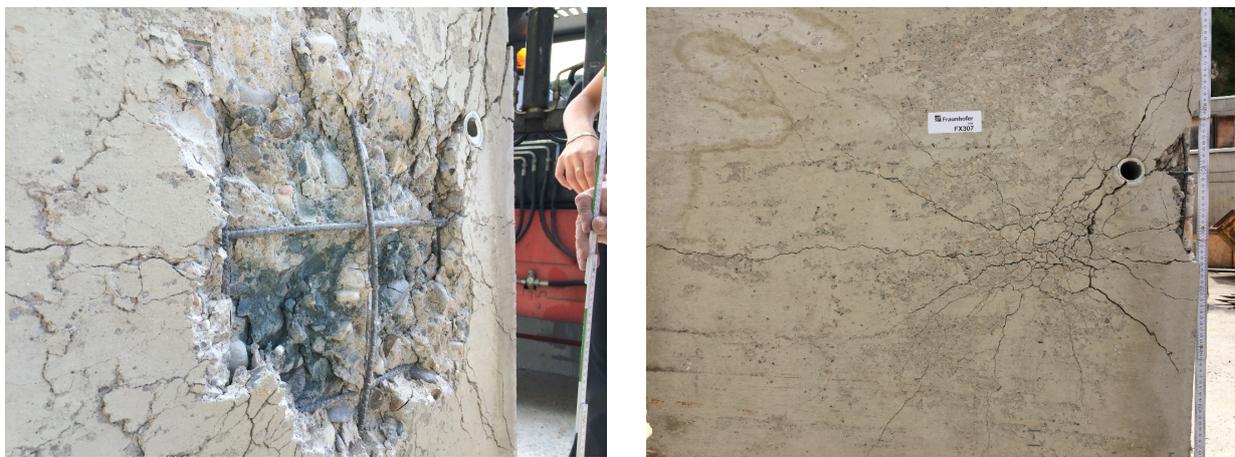


Bild 10: Rückseite der Betonunterkonstruktion ohne Schutzcoating (links) und mit Schutzcoating (rechts)

Erkennbar sind sowohl die (in beiden Fällen) in Querrichtung verlaufenden Biegerisse der Unterkonstruktion, als Ergebnis der globalen Beanspruchung, wie auch die sternförmig vom Ort der Detonation weglaufenden Risse aus der Spallationsbeanspruchung der lokalen Belastung. Darüber hinaus zeigt die ungeschützte Konstruktion einen deutlichen Spallationskrater auf der Rückseite (Durchmesser etwa 40 cm), mit verbogener Bewehrung und Bereichen gelöster Betonmatrix. Die geschützte Konstruktion hingegen zeigt zwar eine partielle Rissbildung, jedoch keinen Krater bzw. keine Durchstanzung. Bei der ungeschützten Konstruktion war auch auf der Frontseite ein tiefer Krater mit gerissener Bewehrung zu beobachten. Der reduzierte Querschnitt in Kratermitte besaß keine feste Bindung mehr zum umliegenden Beton. Anstehender Wasserdruck hätte in diesem Falle zweifelsfrei den nur noch lose im Krater befindlichen Beton gelöst und damit einen Durchlass in der Schalenskonstruktion ermöglicht. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die Ergebnisse der Resttragfähigkeitsuntersuchungen noch geeignet veröffentlicht. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2 formulierten Zielstellungen erfüllt der Spritzbeton damit die an ihn gestellten Anforderungen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier dargestellten Untersuchungen haben die Entwicklung einer Rezeptur für einen faserbewehrten Hochleistungsbeton skizziert, welcher in dieser Form und mit dem gezeigten Gehalt an Stahl- und Kunststoffasern sowohl einer Brand- wie auch einer Explosionsbelastung einen sehr großen Widerstand entgegengesetzt. Hierbei ist es erstmalig gelungen, Fasergehalte zu spritzen, die deutlich über den bisher baustellenüblichen Mengen liegen und so bislang als nicht beherrschbar galten. Dies ist durch einen gezielten Einsatz von Luftporen gelungen, die dem Beton ausschließlich zum Zweck der Herstellung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit zugegeben und vor Beginn der Erstarrung dem Frischbeton wieder entzogen werden. Die auf diese Art entstandene Rezeptur stellt einen Prototyp dar, der weiteres Potential im Hinblick auf die Verbesserung der Rezeptur besitzt, vor allem die Verarbeitbarkeit der Mischung betreffend. Mit dieser Rezeptur ist es jedoch erstmals möglich, auch komplexe Geometrien bei kritischen Bauwerken bei Bedarf eines strukturellen Upgrades zu beherrschen. Ein weiteres Einsatzgebiet könnte die Instandsetzung und der bauliche Schutz in ihrem Zuge sein. Dies ist durch weitere Untersuchungen abzusichern.

6. Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt):
ZTV-ING: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5 Tunnelbau.
- [2] Vollmann, G.; Heimbecher, F.; Thewes, M.:
Ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln: Methoden und Beispiele für Bauwerks- und Nutzersicherheit. Forschung + Praxis 44: STUVA Tagung 2011, Bauverlag, Gütersloh, 2011, S. 106-110.
- [3] Vollmann, G.; Thewes, M.; Kamarianakis, S.:
Quantitative risk and criticality assessment for tunnels under explosive and fire threat scenarios. Proceedings of the 6th International Symposium on Tunnel Safety and Security (ISTSS), 03/2014, Marseille, France.
- [4] Noeldgen, Markus; Stolz, Alexander:
Ein deterministisches Beurteilungsverfahren zur lokalen und globalen Standsicherheit von Tunnelkonstruktionen bei Explosionsereignissen. Tagungsband „Vergangenheit trifft Zukunft“ anlässlich des 50jährigen Jubiläums der STUVA 2010, Köln.
- [5] Automatisierte Informationsgewinnung und Schutz kritischer Infrastruktur im Katastrophenfall (AISIS):
Abschlussbericht des Teilvorhabens 13N9609, verfügbar unter <http://www.bmbf.de/de/22429.php>

- [6] Glatzl, Johann; Nischer, Peter; Steigenberger, Johannes; Wagner, Oliver:
PP-Faserbeton für erhöhte Brandbeständigkeit. Zement+Betón 03/2004, S.24-32.
- [7] Phan, L.T., Carino, N.J.:
Mechanical Properties of High-Strength Concrete at Elevated Temperatures. NIST Report, 2001.
- [8] Baker, W. E.; Cox, P. A.:
Explosion hazards and evaluation. Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- [9] Stolz, A.; Muellers, I.; Vollmann, G.:
Quantitative Kritikalitätsbeurteilung von Tunneln bei kombinierter Brand- und Explosionsbelastung. Tagungsband Baustatik-Baupraxis 12, 2014, TU München.
- [10] Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen (SKRIBT):
Abschlussbericht des AP3 (Bereich Tunnel) des gleichnamigen Forschungsvorhabens. 2011, verfügbar auf der Homepage www.skribt.org
- [11] Hauser, S.; Sadegh Azar, H.:
Duktiler Beton für außergewöhnliche Einwirkung. BauPortal. 09/2011. S.9-11.
- [12] DIN EN 14488-5:
Prüfung von Spritzbeton - Teil 5: Bestimmung der Energieabsorption bei faserverstärkten plattenförmigen Prüfkörpern. Beuth-Verlag, Berlin, 2006.

Zu den Autoren:

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

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 2005 Professur für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb Ruhr-Universität Bochum
markus.thewes@rub.de

Dipl.-Min. Eugen Kleen

Diplom an der TU Clausthal-Zellerfeld mit Schwerpunkt „Chemische Verfahrenstechnik“. Anschließend Auslandstätigkeit in Südafrika und Südamerika bei Bergbau-Gesellschaften. Seit 1984 Mitarbeiter bei der MC-Bauchemie und heute verantwortlich für den Bereich „Mineralische Baustoffe und Betontechnik“
eugen.kleen@mc-bauchemie.de