

---

# GRUNDLAGENUNTERSUCHUNG ZU ULTRA-HOCHLEISTUNGS FASERVERSTÄRKTEM SPRITZBETON (UHFSB) FÜR DIE INSTANDSETZUNG UND VERSTÄRKUNG VON BETON- UND STAHLBETONBAUTEILEN

---

## ***BASIC RESEARCH ON SPRAYED ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED SHOTCRETE (UHPFRSC) FOR RETROFITTING AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES***

Andre **Strotmann**, Hochschule München, DE

Toni **Pollner**, Hochschule München, Institut für Material- und Bauforschung (IMB), DE

Andrea **Kustermann**, Hochschule München, Institut für Material- und Bauforschung (IMB), DE

Jörg **Jungwirth**, Hochschule München, DE

Aktuell kommt Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) für die Instandsetzung und/oder Verstärkung von Stahlbetonbauwerken im Infrastrukturbereich vermehrt zum Einsatz. UHFB zeichnet sich, neben seinen mechanischen Eigenschaften, vor allem durch ein sehr dichtes Gefüge und eine dementsprechend hohe Dauerhaftigkeit aus. Das Einbringen des Materials erfolgt bislang konventionell in Richtung der Schwerkraft. Im Rahmen des anwendungsorientierten Forschungsprojekts wird daher der Einsatz von Ultra-Hochleistungs Faserverstärktem Spritzbeton (UHFSB) für die Instandsetzung und/oder Verstärkung von Betonbauwerken untersucht. Erste Spritz- und Materialversuche haben bereits stattgefunden. Bei diesem Beitrag handelt es sich um eine Vorstellung des Forschungsprojektes sowie um eine abstrahierte Darstellung erster Untersuchungsergebnisse zur Verarbeitungstechnologie und den Festbetoneigenschaften.

*Nowadays the Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) is increasingly used for the repair and/or strengthening of reinforced concrete structures in the infrastructure sector. In addition to its mechanical properties, UHPFRC is characterised above all by a very dense microstructure and a correspondingly high durability. Up to now, the material has been conventionally placed in the direction of gravity. Within the scope of the application-oriented research project, the use of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Shotcrete (UHPFRSC) for the rehabilitation and/or strengthening of concrete structures is therefore being investigated. First spraying and material tests have already taken place. This article is a presentation of the research project as well as an abstracted presentation of the first results of the investigations on the processing technology and the hardened concrete properties.*

## **1. Einleitung**

Im Bereich der Infrastrukturbauwerke wie auch im Bereich des Hochbaus ist der heutige Baubestand meist 30 bis 80 Jahre alt. Viele dieser Bauwerke sind aufgrund der Exposition in chloridhaltiger Umgebung sowie durch hohe und häufige Lasteinwirkungen in einem geschädigten Zustand [1]. Eine aktuelle Auswertung der Schäden der Stahl- und Spannbetonbrückenbauwerke im Straßennetz des Bundes zeigt, dass rund 77 % der Schäden auf chloridinduzierte Korrosion zurückzuführen sind [2]. Es besteht aktuell ein sehr großer Bedarf an effizienten Instandsetzungs- und Verstärkungsmethoden, um den Baubestand den

heutigen Anforderungen anzupassen. Die heute etablierten Instandsetzungsmethoden sind in der Regel mit einem großen Eingriff in die Bausubstanz verbunden und daher meist kostenintensiv und zeitaufwendig. Dies führt u.a. zu langen Sperrzeiten dringend benötigter Verkehrsinfrastruktur während der Baumaßnahme. Die gebräuchlichen Abdichtungs- und Beschichtungssysteme sind darüber hinaus häufig nicht in der Lage, die Verkehrsbauwerke über die angestrebte Restlebensdauer vor erneuten Schädigungen zu schützen. Eine innovative Methode der Instandsetzung und/oder Verstärkung von Betonbauwerken besteht darin, eine Schicht mit einer Dicke von 25 - 80 mm aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) auf den vorher aufgerauten Altbeton aufzubringen [3]. Die Maßnahme zielt darauf ab, den Konstruktionsbeton vor dem Eindringen schädlicher Substanzen wie Chloriden zu schützen und zugleich die Tragfähigkeit sowie Gebrauchstauglichkeit dauerhaft wiederherzustellen bzw. zu verbessern. International wurden bereits eine Vielzahl von Projekten auf die Weise realisiert, beispielsweise [4–8]. Im Gegensatz dazu findet die Anwendung von UHFB im Rahmen der Instandsetzung bzw. Verstärkung in Deutschland nur zögerlich statt [9; 10].

Aufgrund des geringen Wasser-Bindemittelwerts, der optimierten Packungsdichte und der reaktiven Zusatzstoffe wird eine sehr dichte Mikrostruktur mit geringer Porosität erzeugt. Neben verbesserter mechanischer Eigenschaften führt dies im Vergleich zu normal- und hochfestem Beton zu einer deutlich höheren Dauerhaftigkeit [11]. Als Faserbewehrung werden meist hochfeste Stahldrahtfasern mit Zugfestigkeiten über 2000 MPa sowie mit einem Durchmesser  $D \leq 0,20$  mm und einer Länge von 8 bis 15 mm eingesetzt. Durch die Zugabe von Fasern wird neben der Erhöhung der Zugfestigkeit des Verbundbaustoffes ein duktileres Materialverhalten im Nachbruchbereich erreicht. Darüber hinaus kann durch die Stahlfasern unter bestimmten Voraussetzungen (Fasergehalt, Faserorientierung, etc.) ein nachverfestigendes Verhalten und eine damit einhergehende Multirissbildung, vergleichbar mit einer rissverteilenden Mindestbewehrung im Stahlbetonbau, erreicht werden. Somit öffnet sich ein Mikroriss nicht weiter, sondern es bilden sich Sekundärrisse. Der Rissabstand beträgt nur wenige Millimeter und die Rissweite ist im Vergleich zu Stahlbeton um etwa eine Größenordnung kleiner [12]. UHFB ist gemäß den Untersuchungen von Brühwiler und Kollegen, vgl. [3] und [13], aufgrund der geringen Rissbreiten im Gebrauchszustand flüssigkeits- und somit auch chloriddicht. Mechanische Kennzahlen des Materials lassen sich allgemein mit der Druckfestigkeit von 150 bis 250 MPa, der Zugfestigkeit von 9 bis 15 MPa und dem E-Modul von 45 bis 55 GPa beschreiben [11].

UHFB wird in der Regel mit einer fließfähigen Konsistenz hergestellt und der Schwerkraft folgend eingebaut. Damit UHFB gespritzt werden kann und nach der Applikation am Untergrund haftet, bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten: Einerseits kann dem fließfähigen UHFB ein Erstarrungsbeschleuniger an der Düse hinzugefügt werden, damit dieser umgehend erstarrt. Beschleuniger sind allerdings umwelttechnisch sowie hinsichtlich des Arbeitsschutzes nicht unbedenklich und können zudem Festigkeitsminderung oder geringere Nacherhärtung verursachen. Andererseits besteht die Möglichkeit, die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons anzupassen, so dass auf Beschleuniger verzichtet werden kann. Zu diesem Zweck muss der UHFB eine ausreichend hohe Fließgrenze aufweisen, um die Adhäsion auf dem Substrat Altbeton zu ermöglichen. Darüber hinaus sollte die plastische Viskosität nicht zu hoch sein, damit der Beton auch über längere Strecken gepumpt werden kann. Erste Studien und Pilotanwendungen für den Einsatz von UHFB als Spritzbeton und den beschriebenen rheologischen Anforderungen wurden bereits in Frankreich vorgestellt [14; 15].

## 2. Forschungsprojekt

An der Hochschule München (HM) wird die Verwendung von UHFB als Spritzbeton (UHFSB) für die Verstärkung und Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen untersucht [16]. Der Hochleistungswerkstoff UHFB wird dabei erstmalig als Spritzbeton mit wenigen Zentimetern Schichtdicke aufgebracht. Hierdurch wird die Instandsetzungsmaßnahme technisch vereinfacht sowie zeitlich optimiert. Die Besonderheit dieses Forschungsansatzes ist die enge Verzahnung der bemessungstechnischen und tragfähigkeitsrelevanten Fragestellungen mit den baustoffspezifischen und damit dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekten.

Im Zuge des laufenden FuE-Projekts wird die Entwicklung einer Instandsetzungsmethode angestrebt, bei welcher der chloridbelastete Beton im Bauwerk verbleiben kann und die aufgebrachte UHFSB-Schicht gleichzeitig die Tragfähigkeit des Bauwerks verstärkt sowie die Dauerhaftigkeit über die geplante Restnutzungsdauer sicherstellt. Die Dauerhaftigkeit betreffend kann der sehr dichte UHFSB im Optimalfall das Bauwerk bis zum Ende der Nutzungsdauer vor dem Eindringen von Chloriden schützen und ablaufende Korrosionsprozesse auf ein unschädliches Maß reduzieren. Hinsichtlich der statischen Wirkung wird das ultrahochfeste Material dort aufgebracht, wo es am effizientesten wirken kann, direkt auf den Oberflächen mit einem größtmöglichen Hebelarm.

In diesem Beitrag werden erste Ergebnisse aus dem Arbeitspaket 1 dargestellt. Die Aufgliederung des Forschungsprojekts in sieben Arbeitspakete (Bild 1) ergeben eine Definition der erforderlichen Untersuchungsgebiete und unterstreicht die Verzahnung der beiden Fachgebiete konstruktiver Ingenieurbau und Baustoffe. Die Einordnung der vorgestellten Ergebnisse in den Gesamtkontext aller Arbeitspakete (Bild 1) ermöglicht eine Bewertung der dargestellten Inhalte im Zusammenhang mit der frühen Projektphase.

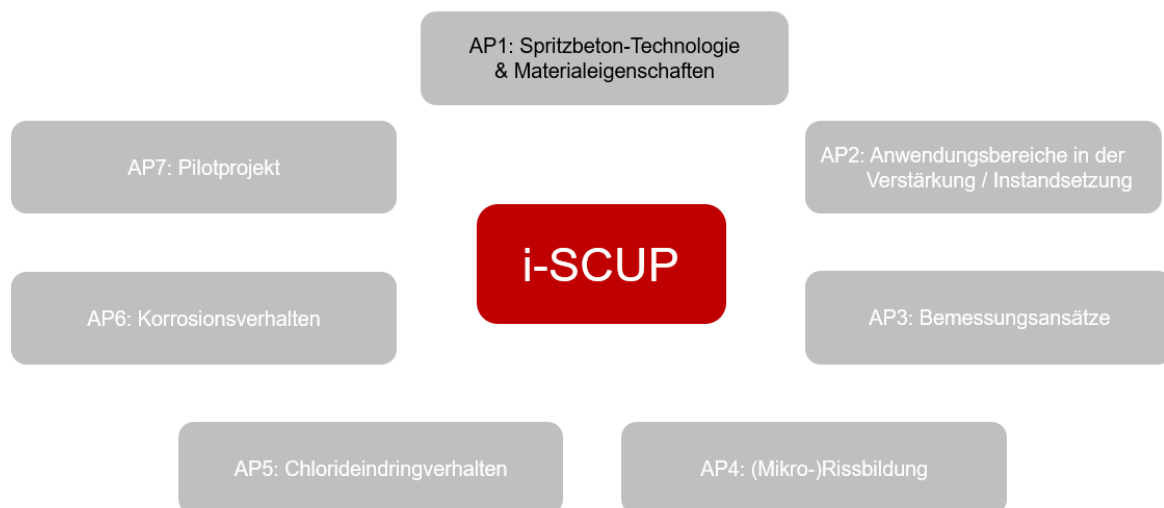
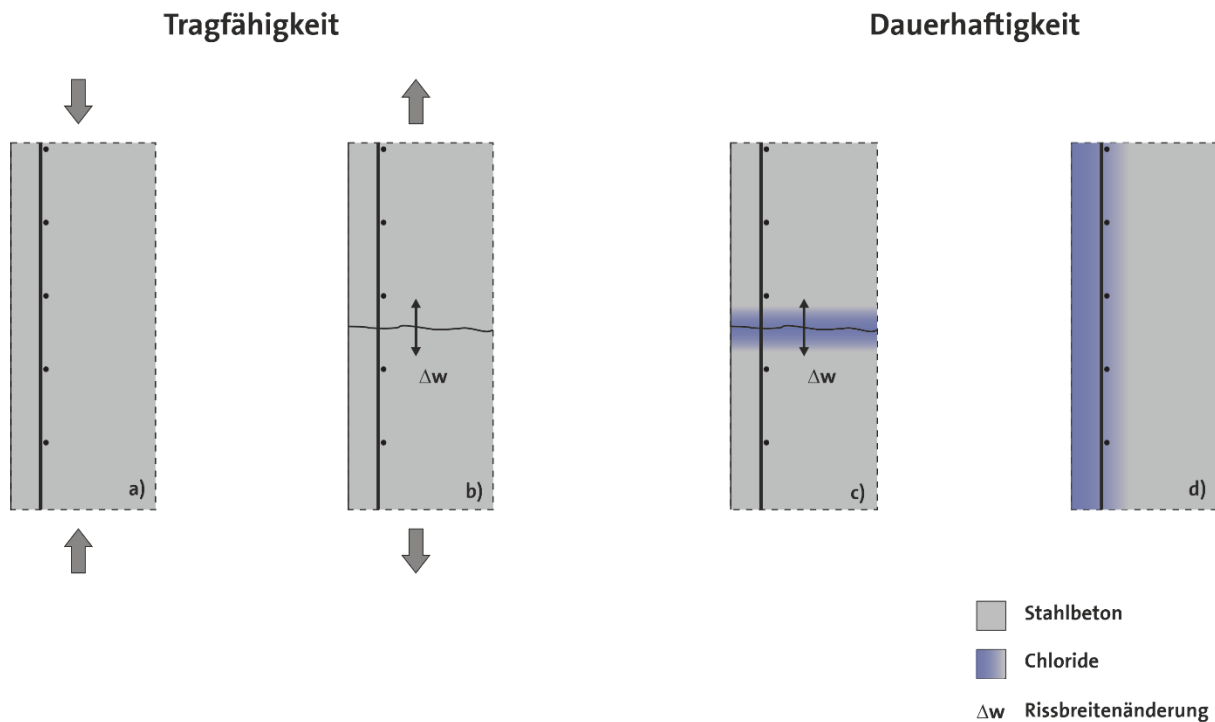


Bild 1: Arbeitspakete FuE Projekt iSCUP



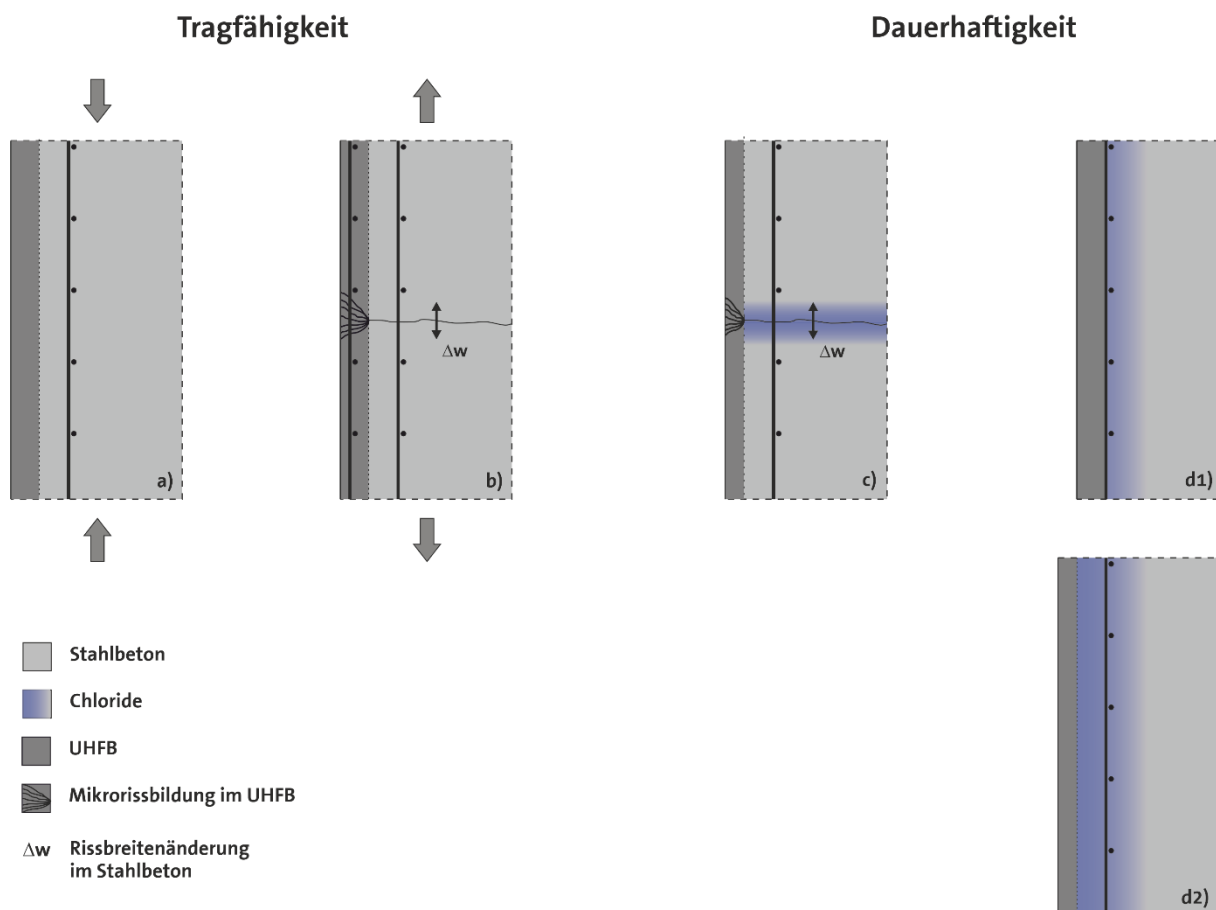
*Bild 2: Schädigungsszenarien von Stahlbeton (lokale Betrachtung am Ausschnitt): a) Druck- bzw. Biegedruckbelastung; b) Zug- bzw. Biegezugbelastung; c) lokale Chloridbelastung in weit geöffneten Einzelriss; d) flächige Chloridbelastung*

### 3. Instandsetzungs- und Verstärkungskonzept

Bild 2 zeigt die grundlegenden Schädigungsszenarien von Stahlbeton aufgrund einer Überbelastung und/oder infolge chloridinduzierter Korrosion. Diese werden getrennt in Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsaspekte dargestellt, können jedoch auch in Kombination auftreten. Bild 2a) stellt den Verstärkungsbedarf in der Druckzone eines biegebelasteten Bauteils aufgrund eines nicht ausreichenden Widerstandes gegen Druckbelastung dar. Die überlastete Zugzone eines Biegebauteils aus Stahlbeton wird in Bild 2b) dargestellt, hier ist der Bauteilwiderstand des Bestandsbauteils unter Zugbelastung nicht ausreichend und bedarf somit einer Verstärkung. Die Dauerhaftigkeitsproblematik einer lokalen Penetration von Chloriden entlang eines weit geöffneten Einzelrisses im Stahlbetonbauteil mit der eingehenden Gefahr einer chloridinduzierten Korrosion in der risskreuzenden Betonstahlbewehrung wird in Bild 2c) aufgezeigt. Bild 2d) zeigt eine flächige Chloridbelastung des Stahlbetons. Sowohl bei dem lokalen als auch dem flächigen Eindringen der Chloride besteht die Gefahr, einer unentdeckt ablaufenden chloridinduzierten Korrosion, welche aufgrund der hohen Abtragsraten zu einer schnell fortschreitenden Querschnittsminderung des Betonstahls führen kann. Daraus ergibt sich eine entsprechende Verringerung der Resttragfähigkeit [17].

Mögliche Verstärkungs- und Instandsetzungskonzepte unter Verwendung von UHFSB sind in Bild 3 dargestellt. Dem Verstärkungsbedarf in der Druckzone wird mit einer Ergänzung einer UHFSB-Schicht in der Druckzone, wie in Bild 3a) zu sehen, entgegengewirkt. Die hohe Druckfestigkeit des UHFSB ermöglicht eine effiziente Verstärkung in der Druckzone ohne eine gravierende Erhöhung des Eigengewichtes. Bild 3b) zeigt die Verstärkung der Zugzone mit UHFSB. Die erhöhte Zugfestigkeit des Materials ermöglicht die Steigerung der Tragfähigkeit, welche durch die Zulage von Bewehrungselementen noch weiter erhöht werden kann. Bezüglich der Rissbildung wird nach derzeitigem Erkenntnisstand angenommen, dass sich der

geöffnete Makroriss im Bestandsbeton im UHFSB bei weiterer Belastung in viele kleine Risse mit geringen Rissweiten auffächert, vgl. [18; 19]. Alternativ ist es vorgesehen Enthäftungsbänder vorzusehen, um eine fein verteilte Rissbildung zu erzielen, sowie es auch aktuell für Carbonbetonverstärkungen vorgesehen ist [20; 21]. Der lokalen Chloridpenetration entlang eines Makrorisses im Stahlbetonbauteil wird mit der in Bild 3c) dargestellten Ergänzung einer UHFSB-Schicht entgegengewirkt. Diese verschließt den Riss und verhindert weiteres Eindringen von Chloriden. Die im UHFSB entstehenden Mikrorisse gewährleisten aufgrund der geringen Rissbreiten den Schutz des darunter liegenden Stahlbetons, sofern die mittlere Dehnung im UHFSB 1 ‰ nicht übersteigt [13; 22]. Weitere Untersuchungen zur Auswirkung der Rissbreite auf die Transporteigenschaften, z.B. [23–25], zeigen ebenfalls, dass Rissbreiten unterhalb eines kritischen Werts keinen ausgeprägten Einfluss auf die jeweiligen Transportprozesse haben. Eigene Voruntersuchungen mit konventionell eingebautem UHFB [26], bei denen allerdings die genaue Dehnungsverteilung nicht bekannt ist, weisen auf ein nicht zu vernachlässigendes Eindringen der Chloride, trotz geringer verbleibender Rissbreiten um 30 µm, hin. Dieser Sachverhalt wird im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts weiter untersucht.



*Bild 3: Instandsetzungs- und Verstärkungskonzept: a) UHFSB zur Verstärkung der Druckzone; b) bewehrte UHFSB zur Verstärkung der Zugzone; c) Mikrorissbildung im UHFSB verhindert Chlorideindringen und reduziert Korrosionsrate; d) UHFSB verhindert Chlorideindringen und reduziert die Korrosionsrate (Fall d1: Chloridhaltiger Beton muss entfernt werden; Fall d2: Chloridhaltiger Beton kann im Bauteil verbleiben)*

Aufgrund der dichten Mikrostruktur stellt UHFB im ungerissenen Zustand einen zuverlässigen Schutz vor Chlorideinwirkung dar [27–29]. Bei der Betrachtung der flächigen Chloridbelastung werden zwei Ansätze unterschieden: Zum einen wird der chloridbelastete Altbeton, wie in Bild 3d1) zu sehen, abgetragen und das Bauteil wird mit UHFSB reprofiliert. Zum anderen besteht die Möglichkeit den belasteten Bestandsbeton im Bauteil zu belassen und, wie in Bild 3d2) aufgezeigt, mit einer UHFSB-Schicht zu schützen. Bei dem Vorgehen d2) wird eine erhöhte Effizienz durch das Einsparen eines Arbeitsschrittes erreicht. Der mögliche Verbleib des chloridbelasteten Altbeton im Bauteil ist an den Grad der Chloridbelastung und den Fortschritt der Korrosion des Betonstahls abhängig. Zusätzlich zum Schutz vor Chloriden wird durch das Aufbringen des UHFSBs der Elektrolytwiderstand des Verbundbauteils soweit gesteigert, dass von einer Reduktion des Korrosionsprozesses auf ein unschädliches Niveau ausgegangen werden kann. Die Restlebensdauer des Bauteils kann somit wiederhergestellt oder verlängert werden. Beide Aspekte (Chloriddichtheit des gerissenen UHFSBs und Reduktion der Korrosionsrate) werden im Rahmen des FuE-Projekts detailliert untersucht, sind aber nicht Bestandteil dieses Artikels.

## 4. Baustoffe, Herstellung und Versuchsübersicht

### 4.1 Verwendete Baustoffe

Als Instandsetzungs- bzw. Verstärkungsmaterial wurde eine Fertigmischung der Firma LafargeHolcim Ltd. mit der Bezeichnung „Ductal® Grey Shotcrete“ verwendet. Diese enthält [14] zufolge Zement, Zusatzstoffe sowie Sand mit einem Größtkorn von 1 mm und ist nach Wissen der Autoren die einzig verfügbare Spritzbeton-Mischung mit Festbetoneigenschaften auf UHFB-Niveau. Die genaue Zusammensetzung kann aus patentrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden. Um die Verarbeitbarkeit sicherzustellen und die Pump- bzw. Spritzbarkeit zu ermöglichen, wird ein spezielles Betonzusatzmittel hinzugegeben. Als Faserbewehrung kommen hochfeste Stahldrahtfasern mit einem Durchmesser von 0,2 mm bei einer Länge von 14 mm zum Einsatz. Die Zugfestigkeit von Stahldrahtfasern für UHFB liegt typischerweise zwischen 2.000 und 3.000 N/mm<sup>2</sup>. Um ein verfestigendes Nachrissverhalten zu gewährleisten, wurde ein Stahlfasergehalt von 3,1 Vol.-% verwendet. Erstarrungsbeschleuniger wurden nicht hinzugegeben.

### 4.2 Maschinen und Herstellung

Eine Übersicht über das Feldlabor und die vorbereiteten Spritzboxen kann Bild 4 entnommen werden. Die Abmessungen der Spritzboxen wurden anhand der herzustellenden Probekörpergeometrie unter den Vorgaben nach DIN EN 144881:2005 [30] abgeleitet. Die maximale Höhe der Spritzboxen ist anhand des Instandsetzungskonzeptes unter der Verwendung von wenigen Zentimeter dicken Schichten auf 10 cm begrenzt. Für die Herstellung des UHFSBs wurde eine mobile Mischanlage der Firma Holcim (Deutschland) GmbH installiert. Die Anlage mit allen benötigten technischen Komponenten befindet sich auf dem Anhänger eines Sattelschleppers (Bild 5). Bei dem Mischwerk handelt es sich um einen Planetenmischer mit Wirbler und einer Leistung von 55 kW. Der Mischer verfügt über ein Fassungsvermögen von 1 m<sup>3</sup> Frischbeton. Als Betonpumpe kam eine Doppelkolbenpumpe P718 der Firma Putzmeister GmbH zum Einsatz. Die Beschickung der Pumpe mit Frischbeton erfolgte direkt aus dem Mischer. Die nachstehende Bild 6 zeigt die Pumpe neben der mobilen Mischanlage. Am linken Bildrand verlaufen vom Auslass der Pumpe die DN50 Förderleitungen. Diese sind direkt an einer Reihe von vier flexiblen 5 m langen DN50 Schlauchleitungen angeschlossen, an deren Ende die Spritzbetondüse montiert ist. Die für die Düse notwendige Druckluft wurde über einen Baustellenkompressor zur Verfügung gestellt. Der Kompressor liefert einen konstanten Volumenstrom von 11,5 m<sup>3</sup>/min bei einer Druckluft von 7 bar. Die Schlauchlänge bei der Betonage betrug 20 m. Am Ende des flexiblen Schlauchs befand sich eine Spritzbetondüse Putzmeister Betonspritzgerät SK65. Hier wurde auch die Druckluft des Kompressors

angeschlossen. Für die Spritzbetonarbeiten wurde das Dichtstromdüsenmodell – wie in Bild 7 dargestellt – genutzt. Als Reduzierung wurde ein SK65-3 auf SK50-3 verwendet. Das Material wurde im Nassspritzverfahren bei der geringstmöglichen theoretischen Förderleistung der verwendeten Pumpe von ca. 2 m<sup>3</sup>/h appliziert.

Für die Herstellung des UHFSBs wurden nach einer kurzen Trockenmischzeit von 2 Minuten Wasser und Zusatzmittel mit Hilfe der automatischen Dosiervorrichtung hinzugegeben. Mit jedem Mischvorgang wurden 610 Liter Frischbeton bei einer durchschnittlichen Mischdauer von 10 Minuten hergestellt. Durch Variation des Zusatzmittelgehalts wurde die Konsistenz so eingestellt, dass sowohl die Pump- als auch die Spritzbarkeit gewährleistet waren. Um die Spritzbarkeit sicherzustellen, wurde vor der Faserzugabe die statische Fließgrenze mit Hilfe einer handgeführten Flügelsonde bestimmt, welche zuvor von LafargeHolcim mit Hilfe von Laboruntersuchungen an einem Rotationsrheometer kalibriert wurde. Zusätzlich wurde die Konsistenz mit dem Ausbreitmaß festgestellt und als weich (F3) eingestuft. Sobald die gewünschte Konsistenz erreicht war, wurden die Stahlfasern in den Mischbehälter gegeben und weitere 5 Minuten mit dem Beton gemischt.

Bei der Verwendung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton ist die Wahl der Maschinenteknik von erheblicher Bedeutung. Das Mischen des verwendeten Materials kann noch mit konventionellen Mixchern erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese nur bis zur Hälfte des maximalen Füllvolumens befüllt werden, andernfalls sind leistungsfähigere, geschlossene Mischsysteme zu verwenden.



*Bild 4: Übersicht über das Feldlabor  
(© HM)*



*Bild 5: Mobile Mischanlage der Firma Holcim  
(Deutschland) GmbH (© HM)*



*Bild 6: Doppelkolbenpumpe P718 der Firma  
Putzmeister GmbH (© HM)*

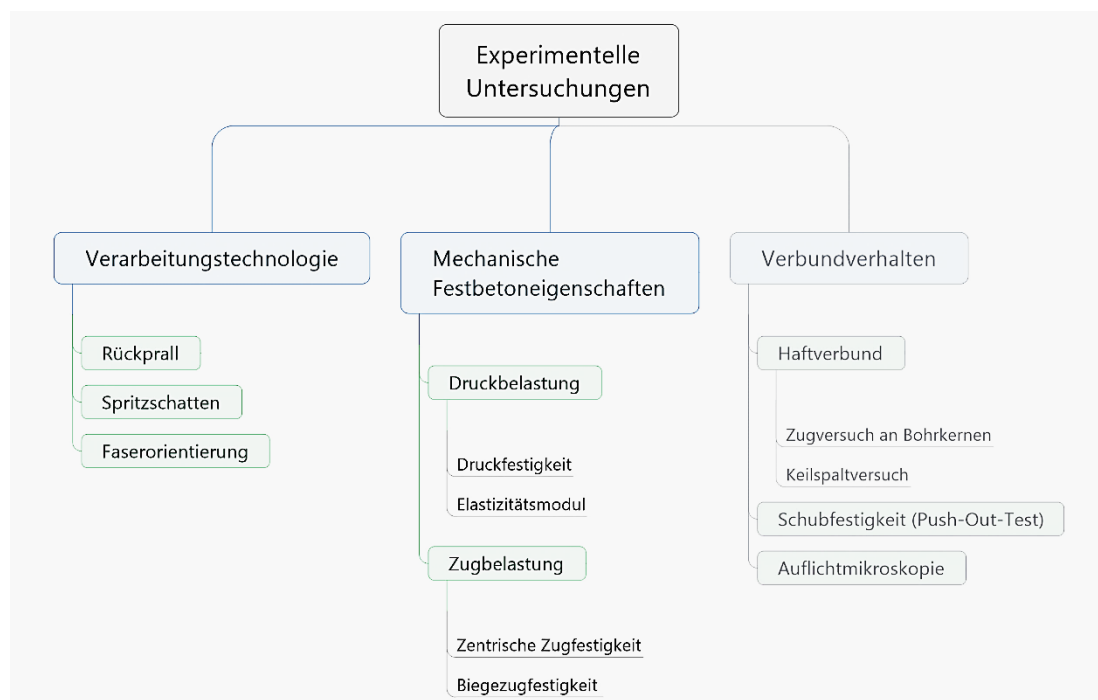


*Bild 7: Dichtstromdüse Putzmeister  
Betonspritzgerät SK65 (© HM)*

Zur Förderung des Frischbetons hat sich eine leistungsfähige Kolbenpumpe bewährt. Bei durchgeführten Pumpversuchen kam es bei der Verwendung einer Schneckenpumpe in Kombination mit der Stahlfaserbewehrung zur Verstopfung der Schnecke sowie zum vollständigen Mantelabrieb. Aufgrund der nur gering ausgeprägten Fließfähigkeit des Materials erfordert das Einbringen in die Pumpe einen erhöhten mechanischen Aufwand. Bei der Anwendung des UHFSBs müssen die üblichen Sicherheitsvorkehrungen wie im Umgang mit fließfähigem UHFB berücksichtigt werden: Verwendung von Atemschutzmasken zum Schutz vor Staubbelastung (Gefahr von Silikose), Tragen von stichfesten Handschuhen und Schutzbrillen zum Schutz vor spitzen Stahlfasern. Der Düsenführer hat darüber hinaus eine vollständige persönliche Schutzausrüstung, bestehend aus Sicherheitsschuhen, einer abriebfesten und stichfesten Arbeitshose und -jacke, einem Halstuch, einem Gehörschutz und einem Arbeitshelm mit Schutzvisier zu verwenden.

### 4.3 Versuchsprogramm

Mit dem Versuchsprogramm wurden in der ersten Projektphase Materialeigenschaften des UHFSBs sowie die Verbundeigenschaften an kleinformatigen Probekörpern untersucht. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage weiterer Untersuchungen und der Entwicklung von Bemessungsansätzen. Die ersten – bereits abgeschlossenen – experimentellen Untersuchungen gliedern sich in die drei Abschnitte Verarbeitungstechnologie, Festbetoneigenschaften und Verbundverhalten (Bild 8). In diesem Beitrag wird nur auf die ersten beiden Abschnitte eingegangen. Die Verarbeitungstechnologie betreffend wurde der Rückprall beurteilt und der Spritzschatten hinter Bewehrungslagen untersucht. Die herstellungsbedingte Faserorientierung wurde mit Hilfe der Computertomographie (CT) an Bohrkernen mit 53,8 mm Durchmesser analysiert. Für die spätere Anwendung wurden die mechanischen Festbetonkennwerte des UHFSBs untersucht. Die Anisotropie, welche sich aus der jeweiligen Spritzrichtung ergibt, wurde im Zuge der Ermittlung der Druckfestigkeit analysiert.



*Bild 8: Versuchsprogramm - Verarbeitungstechnologie, Festbetoneigenschaften und Verbundverhalten (grau: wird in dieser Veröffentlichung nicht thematisiert)*



## 5. Verarbeitungstechnologie

Zu Beginn der Spritzarbeiten wurde zunächst die optimalen Maschineneinstellungen getestet. Die Förderung erfolgte anfangs noch recht unregelmäßig. Daraufhin wurde die Hubfrequenz von ca.  $7 \text{ min}^{-1}$  auf  $2,4 \text{ min}^{-1}$  reduziert. Dies entspricht bei einem Zylindervolumen von 12,4 L, einer theoretischen vollständigen Füllung und unter Vernachlässigung der Umschaltzeiten zwischen den Kolben einer Reduktion der Förderleistung von  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  auf  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . Die anfänglichen Probleme der unregelmäßigen Förderung wurden durch die Anpassung behoben.

Bei der Applikation des Materials – sowohl in der senkrechten als auch über Kopf – wurde quasi kein Rückprall festgestellt. Der geringe Anteil des UHFSBs, der außerhalb der Spritzkisten verzeichnet werden konnte, resultierte aus dem Bespritzen des Schalungsrandes. Dies ist in erster Linie auf das kleine Größtkorn von 1 mm und den hohen Gehalt an Feinanteilen sowie die daraus resultierende ‚klebrige‘ Konsistenz des Materials zurückzuführen und wurde bereits in anderen Veröffentlichungen über vergleichbare Feinkornmischungen berichtet, z.B. [31].

Die Untersuchung der Spritzschattens erfolgte an einer Spritzkiste mit den Abmessungen  $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , in der zwei sich kreuzende Betonstahlstäbe mit einem Durchmesser  $D = 10 \text{ mm}$  und einer Betondeckung von 35 mm bzw. 45 mm angeordnet wurden (Bild 9). Beim Einbau des UHFSB wurde überwiegend senkrecht auf die Spritzbox gespritzt. Hinter dem Kreuzungspunkt entstanden entsprechend umfangreiche Spritzschatten (Bild 10). Einflüsse wie Düsenteknik, Materialrheologie, Auftragsgeschwindigkeit und unterschiedliche Aufprallwinkel werden im weiteren Projektverlauf näher betrachtet.

Die Untersuchung der Faserorientierung erfolgte an zwei Bohrkernen mit einem Durchmesser von  $D = 53,8 \text{ mm}$ , die aus UHFSB-Platten mit einer Dicke von 120 mm entnommen wurden. Der Bohrkern BK1 wurde aus der Mitte der Spritzkiste in Spritzrichtung entnommen, der Bohrkern BK2 auf halber Höhe und senkrecht zur Spritzrichtung. Die Entnahme beider Bohrkern ist in Bild 11 dargestellt. Beide Bohrkern wurden vor der Analyse auf eine Höhe von  $50 \pm 1 \text{ mm}$  gekürzt. Die Analyse erfolgte am Institut für Werkstoffe des Bauwesens an der Universität der Bundeswehr München mit einem 3D-Röntgenmikroskop der Firma Bruker (Bild 12), welches auf der Mikro-Computertomographie-Technologie (Micro-CT) basiert.



Bild 9: Vorbereitete Spritzkiste zur Untersuchung des Spritzschattens (© HM)

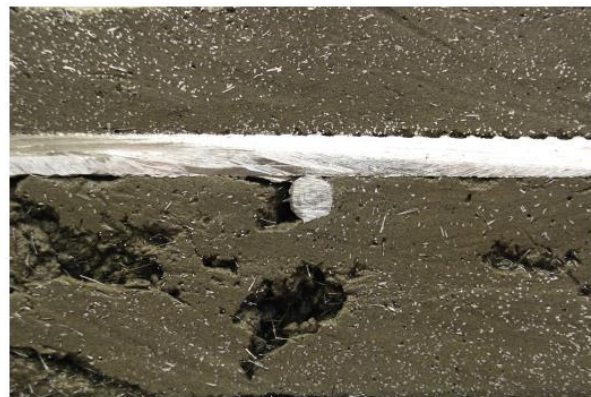
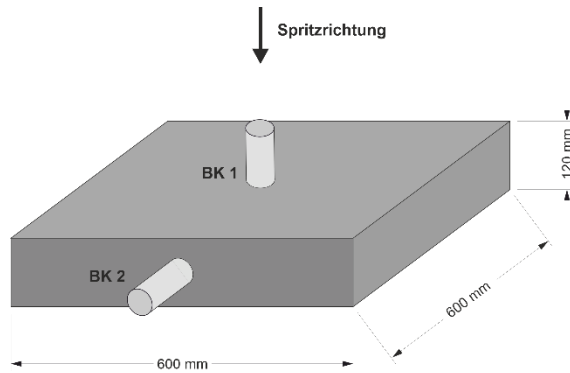


Bild 10: Spritzschatten im Kreuzungspunkt der Betonstahlstäbe mit  $D = 10 \text{ mm}$  (© HM)



*Bild 11: Probenentnahme zur Untersuchung der Faserorientierung*



*Bild 12: 3D-Röntgenmikroskop der Firma Bruker (© HM)*

In Bild 13 ist die Rekonstruktion des CT-Scans von Bohrkern 1, welcher in Spritzrichtung entnommen wurde, in zwei Schnitten dargestellt. In Bild 13a) wird ein senkrechter Schnitt durch den aufgerichteten Kern gezeigt. Die Ausrichtung entspricht demzufolge der Ebene Spritzrichtung. Die ursprüngliche Schalungsunterseite befindet sich am unteren Rand und die Applikation erfolgte von oben (vgl. weißer Pfeil in Bild 13). Gut zu erkennen ist hierbei eine überwiegend horizontale Ausrichtung über die gesamte Höhe des Bohrkerns. Im Bild 13b) wird ein Schnitt durch denselben Bohrkern 1 auf halber Höhe gezeigt. Der weniger gefüllte Faserbereich in der Mitte des Kerns resultiert aus der hohen Dichte des Materials und dem durch die einzelnen Fasern geworfenen Scanschatten. Die zweidimensionale Faserorientierung lässt keine Vorzugsrichtung erkennen. Die Rekonstruktion des Bohrkerns 2 ist in Bild 14 abgebildet. Auch hier zeigt das Bild 14a) einen senkrechten Schnitt durch den aufgerichteten Kern und das Bild 14b) einen horizontalen Schnitt auf halber Höhe. Die Ausrichtung in Bild 14a) entspricht der senkrechten Ebene zur Spritzrichtung. Die Faserorientierung ist dabei willkürlich und es ist keine Vorzugsrichtung zu erkennen. Im Vergleich dazu, kann anhand der Darstellung in Bild 14b) – auch hier befindet sich die gedachte Schalungsseite unten – von einer überwiegend horizontalen Ausrichtung der Fasern gesprochen werden.

Die Faserorientierung der beiden Proben wurde zudem mit der Software VGSTUDIO analysiert, mit deren Hilfe die mittlere Neigung aller Fasern gegen die Grundfläche der Prüfkörper bestimmt werden kann. Die Analyse ergab eine Abweichung bei den mittleren projizierten Winkeln von ca. 80° zwischen den Bohrkernen und bestätigt somit die visuelle Einschätzung. Die zur Spritzrichtung orthogonale Faserausrichtung wurde z.B. auch von Li et al [31] beschrieben und dort auf den Spritzvorgang zurückgeführt. Eine Ausrichtung der Fasern am Schalungsrand ist eher unwahrscheinlich, da der Abstand mehrere Zentimeter beträgt. Wie auch anhand von Bild 13a) und Bild 14b) gut zu sehen ist, ist die Faserorientierung nahezu unabhängig von der Schichtdicke, da die horizontale Ausrichtung hier über die gesamte Probenhöhe zu erkennen ist. Da die Höhe der Prüfkörper der mittleren angedachten Instandsetzungs- bzw. Verstärkungsschichtdicke (30 bis 80 mm) entspricht, werden die Einflüsse der Schichtdicken- und Randzoneneffekte für diesen Fall als vernachlässigbar eingeschätzt. Bei der Verstärkung und Instandsetzung der Zugzone von Stahlbetonstrukturen kann von einer primären Zugbelastung der UHFSB-Schicht senkrecht zur Spritzrichtung ausgegangen werden. Die zuvor dargestellte Orientierung der Fasern parallel zur Schalungshaut entspricht somit dieser Wirkungsrichtung. Die gleichmäßige multidirektionale Faserverteilung senkrecht zur Spritzrichtung wirkt somit in alle Richtungen parallel zur Auftragsfläche. Bei einer zweidimensionalen Belastung der Zugzone (bspw. zweiachsige gespannte Platte) kann der Verteilungseffekt der Faser am effizientesten ausgenutzt werden.

Bei einer eindimensionalen Zugbelastung (bspw. Träger) kann nur ein Anteil der Fasern wirksam für die Zugtragfähigkeit genutzt werden.

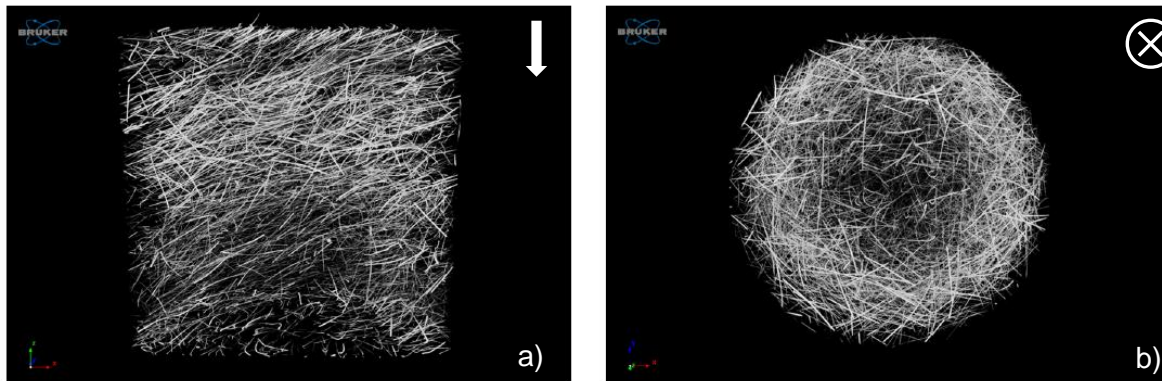


Bild 13: Rekonstruierter CT-Scan des Bohrkerns 1, der in Spritzrichtung (Pfeil) entnommen wurde; links: senkrechter Schnitt; rechts: horizontaler Schnitt

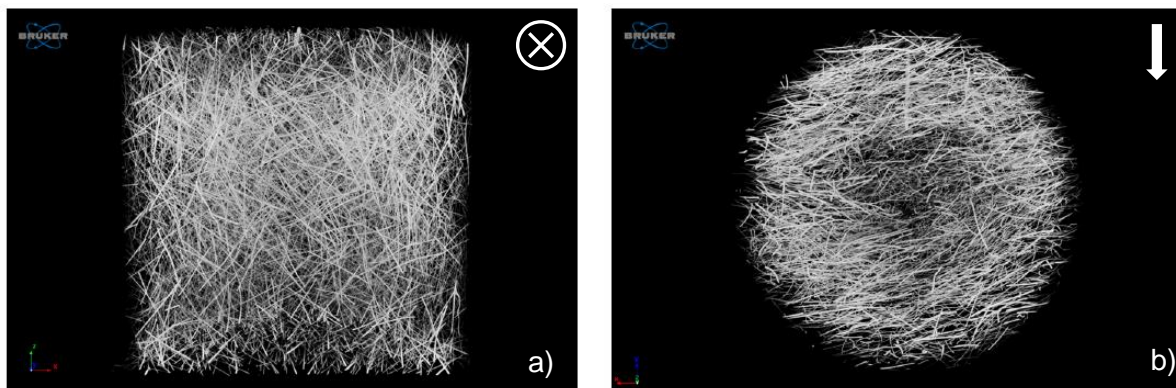


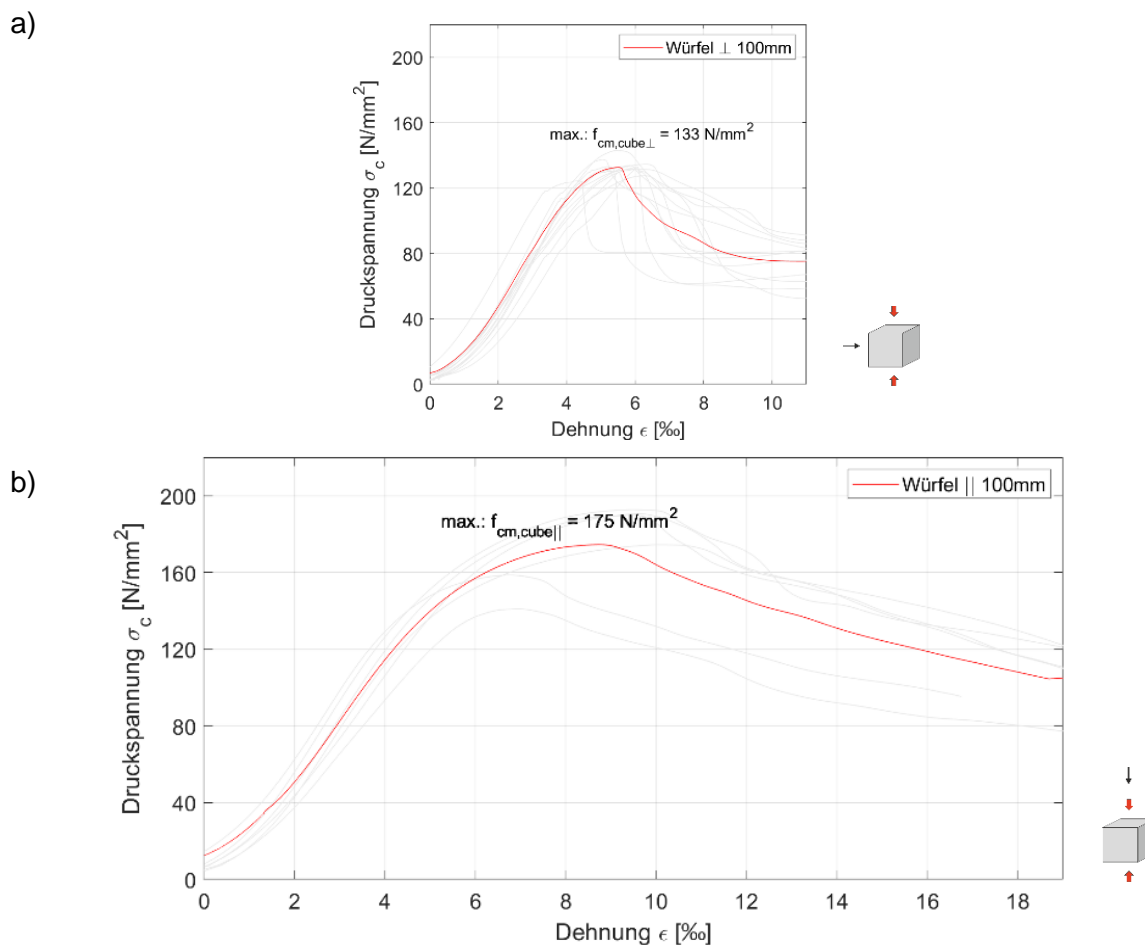
Bild 14: Rekonstruierter CT-Scan des Bohrkerns 2, der senkrecht zur Spritzrichtung (Pfeil) entnommen wurde; a) senkrechter Schnitt; b) horizontaler Schnitt

## 6. Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeit wurde aufgrund der variablen Ausrichtungsmöglichkeit an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm bestimmt. Die Prüfkörper wurden aus UHFSB-Platten mit einer Höhe von 120 mm herausgesägt. Zur Veranschaulichung der Anisotropie wird im Weiterem zwischen der Druckfestigkeit in Spritzrichtung  $f_{c,\parallel}$  und der Druckfestigkeit senkrecht zur Spritzrichtung  $f_{c,\perp}$  unterschieden. Zusätzlich zu den Würfelproben wurden auch Druckzylinder mit  $H/D = 200 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$  senkrecht zur Spritzrichtung entnommen und geprüft. Hierfür wurden die Zylinder aus UHFSB-Platten herausgebohrt und ihre Stirnflächen eben, parallel und auf Maß geschliffen. Die Prüfung erfolgte bei allen Prüfkörpern mit einer konstanten Spannungszunahme von  $0,5 \text{ N}/(\text{mm}^2\text{s})$ . Die angegebenen Festigkeiten verstehen sich als Mittelwerte der maximalen Festigkeiten der einzelnen Prüfkörper. Für die angegebenen Mittelwertkurven wurden die einzelnen Kraftwerte  $F_1(\delta)$  in Abhängigkeit der Verformung gemittelt. Die in Bild 15 genannten Dehnungen wurden im linear-elastischen Bereich mit Hilfe von 30 mm langen Dehnmessstreifen in der Prüfkörpermitte ermittelt und darüber hinaus über den Kolbenweg unter Berücksichtigung der maschinellen Verformungen bestimmt.

Die gemittelte Druckfestigkeit senkrecht zur Spritzrichtung  $f_{cm,cube100,\perp}$  wurde an 12 Prüfkörper ermittelt und beträgt  $133 \text{ N}/\text{mm}^2$ . Nach Überschreiten der maximal aufnehmbaren Last wurde ein duktileres Versagen beobachtet. Das Prüfungsende wurde nach 20 mm Verformung durch den maximalen Maschinenweg der Traverse bestimmt. In Bild 15a) werden die Spannung-

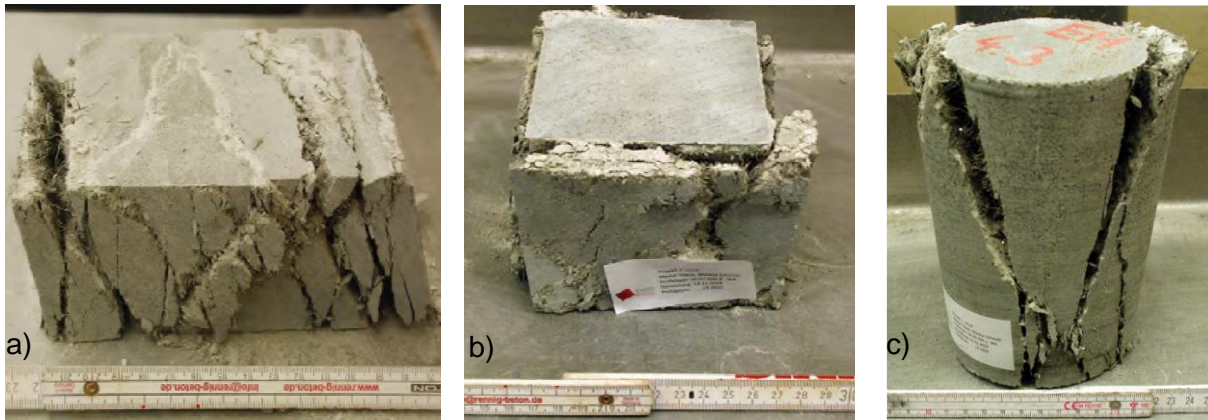
Dehnungs-Diagramme der einzelnen Prüfkörper sowie der gemittelte Kurvenverlauf dargestellt. Für die Prüfkörper, die senkrecht zur Spritzrichtung geprüft wurden, konnte ein gleichmäßiges Bruchbild festgestellt werden. Dabei fächerten sich die bereits entstandenen Risse nach der Höchstlast immer weiter auf (Bild 16a). Diese einzelnen Schichten verlaufen ausschließlich senkrecht zur gespritzten Richtung und sind am auffälligsten an den Randbereichen von Schalung und oberster Lage zu finden. Zum Vergleich und zur Darstellung des anisotropen Verhaltens wurden ebenfalls Würfel in Spritzrichtung geprüft, wobei die untere Auflagefläche die Schalungsseite war. Die Risse nach dem Bruch verliefen hauptsächlich auf allen senkrechten Würfelseiten in Prüfrichtung parallel zueinander. Die mittlere Druckfestigkeit in Spritzrichtung  $f_{cm,cube100,||}$  wurde an sechs Prüfkörpern ermittelt und liegt bei  $175 \text{ N/mm}^2$ , wobei hier eine größere Streubreite zu verzeichnen ist. Die zugehörigen Spannungs-Dehnungskurven sind in Bild 15b) dargestellt.



**Bild 15:** Spannungs-Dehnungsdiagramme der Druckfestigkeitsprüfung mit  $n$  Prüfkörpern und vertikal gemitteltem Kurvenverlauf. Geprüft wurden Würfeln mit einer Kantenlänge von  $100 \text{ mm}$ ; a) Belastung senkrecht zur Spritzrichtung;  $n = 12$ ,  $f_{cm,cube100,\perp} = 133 \text{ N/mm}^2$ ; b) Belastung parallel zur Spritzrichtung;  $n = 6$ ,  $f_{cm,cube100,||} = 175 \text{ N/mm}^2$  [16].

Im nachfolgenden Bild 16b) wird ein Würfel der Prüfserie nach der Versuchsdurchführung repräsentativ gezeigt. Das Bruchbild ähnelt dem einer Sanduhrform, welches in nahezu gleicher Form bei allen Prüfkörpern der Serie festgestellt wurde. Der Mittelwert der Druckfestigkeit aus sechs Zylinderproben beträgt  $f_{cm,cyl100,\perp} = 121 \text{ N/mm}^2$ , was einem Verhältnis  $f_{c,cyl100} / f_{c,cube100}$  von  $0,91$  entspricht. Das Bruchbild der Zylinder (Bild 16c) stellte sich bei allen Proben nahezu gleich ein. In der Mitte des Zylinders bildete sich, ähnlich

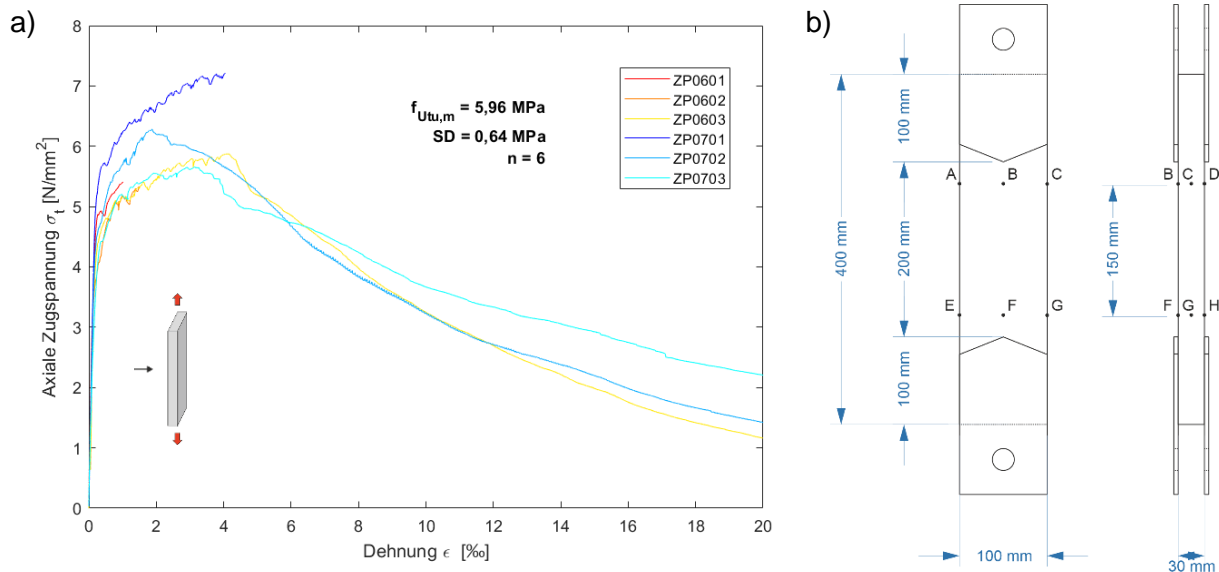
wie bei den Druckwürfeln, ein keilförmiger Ausbruch. Die Risse verliefen entweder vom oberen Außendurchmesser der Stirnfläche des Zylinders bis zur unteren Mittellinie der unteren Stirnfläche oder aber auch spiegelverkehrt hierzu.



*Bild 16: Proben nach Versuchsdurchführung mit exemplarischen Bruchbild:  
a) Würfel wurde senkrecht zur Spritzrichtung belastet; b) Würfel wurde axial zur Spritzrichtung belastet, c) Zylinder wurde senkrecht zur Spritzrichtung belastet (© HM)*

Zur Charakterisierung des elastischen Verformungsverhaltens bei Druckbeanspruchung wurde der stabilisierte Elastizitätsmodul  $E_{c,s}$  (Sekantenmodul), ebenfalls an Bohrkernen mit den Abmessungen  $H/D = 200 \text{ mm} / 100 \text{ mm}$ , nach dem Verfahren B der DIN EN 12390-13:2013 [32] ermittelt. Der Mittelwert aus sechs Prüfkörpern beträgt  $41,5 \text{ kN/mm}^2$  und liegt damit etwas unter dem für UHFB üblichen Bereich von  $45$  bis  $55 \text{ kN/mm}^2$  [11].

Die Untersuchung des Zugtragverhaltens und insbesondere der Rissbildung (Multirissbildung) erfolgte anhand zentrischer Zugprüfungen an gelenkig gelagerten, ungekerbten, prismatischen Prüfkörpern. Die Prüfkörper mit Abmessungen  $400 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  ( $L \times B \times H$ ) wurden am Tag vor der Prüfung senkrecht zur Spritzrichtung aus  $40 \text{ mm}$  hohen UHFSB-Platten herausgesägt und anschließend auf  $30 \pm 1 \text{ mm}$  abgeschliffen. Die Lasteinleitung erfolgte über flächig geklebte, spitz zulaufende Stahlbleche, die über eine runde Öffnung mit einer Schraube M20 und einem Schäkel verbunden waren. Zur Bestimmung der Längenänderung wurden bei allen Prüfkörpern vier Wegaufnahmen zwischen den Punkten B-F, D-H, A-E und C-G angebracht (b). Die Dehnung wurde aus der mittleren Längenänderung der Wegaufnehmer und der Ausgangslänge  $l_0 = 150 \text{ mm}$  berechnet. Die Prüfung erfolgte in Anlehnung an die schweizerischen UHFB Richtlinie SIA 2052 [22]. In dieser wird eine größere Ausgangslänge vorgesehen, die jedoch prüfmaschinenbedingt verkürzt wurde. Die mittlere zentrische Zugfestigkeit nach [22] aus sechs Einzelwerten ergab sich zu  $f_{U_{t,m}} = 6,0 \text{ N/mm}^2$ . In Bild 17a) ist die Zugspannung  $\sigma_t$  mit der zugehörigen Längsdehnung  $\varepsilon$  abgebildet. Bei den nicht vollständig aufgenommenen Belastungskurven öffnete sich der Riss außerhalb des Messbereichs. Die Kurven sind daher nicht vollständig abgebildet. Erste Abweichungen vom anfänglich linearen Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie, welche mit der initialen Rissbildung einhergehen, können etwa bei  $3$  bis  $4 \text{ N/mm}^2$  erkannt werden. Die Auswertung nach [22] ergab eine mittlere elastische Grenzzugfestigkeit von  $f_{U_{te}} = 2,4 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund der im Vergleich zur Zugfestigkeit der Matrix höheren Faserauszugsfestigkeit der rissüberbrückenden Fasern kommt es zu einer Mehrfachrissbildung. Hierbei findet eine Verfestigung statt, in deren weiteren Verlauf sich die Rissbildung stabilisiert, sobald sich alle möglichen Risse ausgebildet haben. Wird die maximale Zugfestigkeit des UHFSBs erreicht, lokalisiert sich die weitere Verformung in diesem Riss. Der Mikroriss öffnet sich und wird zu einem Makroriss [12]. Die Fasern werden anschließend sukzessive ausgezogen und gewährleisten so die Duktilität.



**Bild 17: Zentrische Zugprüfung: a) Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit verschmierter Dehnung über den Rissbereich nach der maximalen Zugfestigkeit (Kurven 601,602 und 701 unvollständig, da Rissöffnung außerhalb des Messbereichs) und b) Prüfkörper und Anordnung der Wegaufnehmer**

Bei den hier dargestellten Spannungs-Dehnungslinien erstreckt sich das Plateau in etwa bis zu einer Dehnung von  $\epsilon = 4 \text{ ‰}$  und nimmt dann stetig ab. Bei einer verschmierter Dehnung  $\epsilon > 40 \text{ ‰}$  – die Rissöffnung ist hierbei bereit weit fortgeschritten – werden die letzten noch verbleibenden Fasern aus der Betonmatrix herausgezogen. Alle Versuche der Serie versagten nach dem gleichen Bruchbild. Es wurde jeweils nur ein kritischer Hauptriss lokalisiert, der sich langsam keilförmig öffnete. Im weiteren Verlauf der Rissöffnung, waren schon bereits auf einer Seite der Probe die Fasern völlig herausgezogen, während auf der anderen – noch nahezu geschlossenen Seite – die Fasern ihre rissüberbrückende Wirkung zeigten.

Das Materialverhalten des UHFSB unter Biegebeanspruchung wurde anhand zweier genormter Verfahren für Faserbetone geprüft: einem 4-Punktbiegezugversuch an ungekerbten, prismatischen Prüfkörpern nach der einschlägigen Spritzbetonnorm für faserbewehrte Spritzbetone [33] sowie einem 3-Punktbiegezugversuch an gekerbten, prismatischen Prüfkörpern nach der EN 14651 [34]. Es wurden in beiden Fällen die Abmessungen der Spritzbetonnorm von  $500 \text{ mm} \times 125 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  ( $L \times B \times H$ ) angewendet, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen und um dem Anwendungsziel – der Applikation einer dünnen Aufbetonschicht – gerecht zu werden. Aufgrund der Kerbe an den Prüfkörpern für den 3-Punktbiegezugversuch verringerte sich die Höhe im maßgebenden Querschnitt um  $12,5 \text{ mm}$ . Hergestellt wurden jeweils sechs Prüfkörper, die in zwei Serien unterteilt wurden. Bei der Serie SO befand sich die Schalungsseite oben, also unter Druckspannung, und bei der Serie SU unten, somit unter Zugspannung. Die Spritzkisten wiesen eine Höhe von  $100 \text{ mm}$  auf. Die gespritzte Oberfläche wurde auf  $75 \pm 1 \text{ mm}$  abgesägt. Die Ergebnisse sind in Form von Spannungs-Durchbiegungs- bzw. Spannungs-CMOD-Kurven in Bild 18 und Bild 19 dargestellt sowie in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengefasst. Mit ‚Spannung‘ wird jeweils die äquivalente elastische Biegezugspannung am unteren Rand des Prüfkörpers bezeichnet.

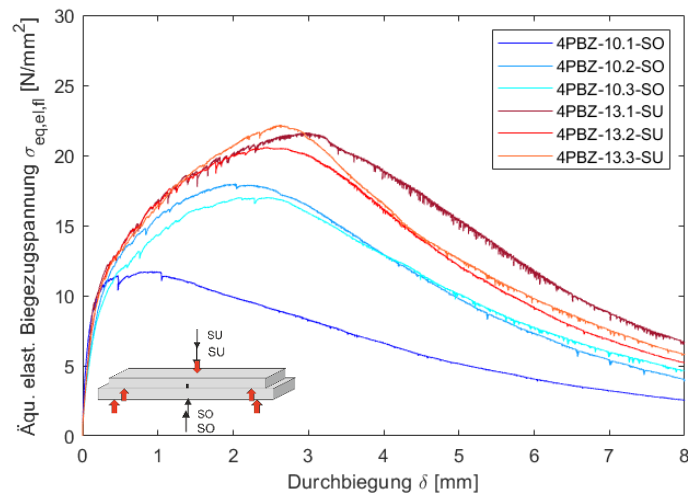


Bild 18: Äquivalente elastische Biegezugspannung  $f_{eq,el,fl}$  in Abhängigkeit der Durchbiegung  $\delta$  ermittelt im 4-Punktbiegezugversuch ohne Kerbe nach [33]; zwei Serien SO (Schalseite oben, Blautöne) und SU (Schalseite unten, Rottöne).

Tab.1: Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeiten nach [33]; angegeben sind die Mittelwerte aus drei Einzelwerten für die zwei Serien SO (Schalseite oben) und SU (Schalseite unten).

Größe	$f_{fp}$	$f_{ult}$	$f_{r1}$	$f_{r2}$	$f_{r4}$
Einheit	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Mittelwert SO	10,2	15,6	11,8	11,4	10,4
Mittelwert SU	11,2	21,5	13,3	13,3	13,3

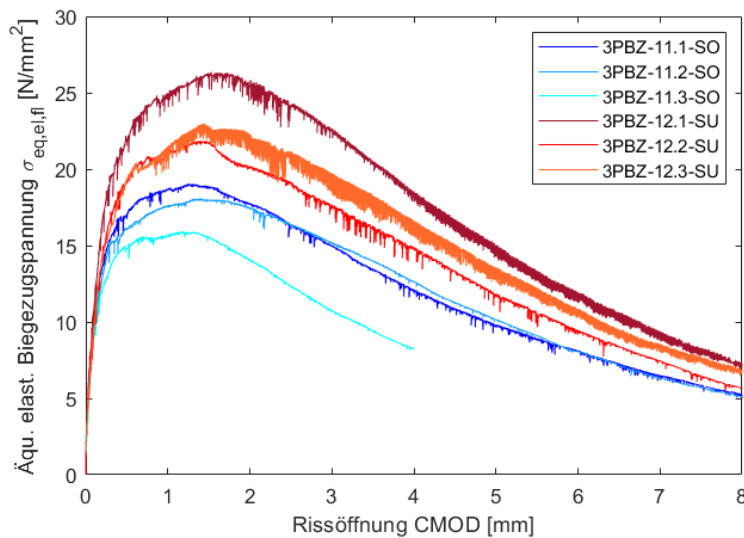


Bild 19: Äquivalente elastische Biegezugspannung  $f_{eq,el,fl}$  in Abhängigkeit der Verschiebung am Grunde der Rissöffnung CMOD ermittelt im 3-Punktbiegezugversuch mit Kerbe nach [34]; zwei Serien SO (Schalseite oben, Blautöne) und SU (Schalseite unten, Rottöne).

Tab.2: Proportionalitätsgrenze und residuelle Biegezugfestigkeiten in Anlehnung an [34]; angegeben sind die Mittelwerte aus drei Einzelwerten für die zwei Serien SO (Schalseite oben) und SU (Schalseite unten); die Prüfkörper haben die Abmessungen nach [33].

Größe	$f_{ct,L}^f$	$f_{ult}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
Einheit	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Mittelwert SO	6,64	17,6	15,9	18,8	15,7	12,3
Mittelwert SU	6,82	23,5	20,1	23,3	21,2	18,3

Wie zu erwarten, weisen die Prüfkörper der Serien SO mit der Spritzoberfläche unter Zugbeanspruchung die kleineren Festigkeiten auf, da die Fasern durch das Sägen abgetrennt wurden. Sowohl bei dem 4-Punkt- als auch bei dem 3-Punktbiegezugversuch ist eine deutliche Verfestigung nach dem Übergang in Zustand 2 zu erkennen. Im 4-Punkt-Biegezugversuch (Bild 18) der Serie SO steigt die äquivalente elastische Biegezugspannung infolge der Multirissbildung von 10,2 N/mm<sup>2</sup> ( $f_{p,m,SO}$ ) auf 15,6 N/mm<sup>2</sup> ( $f_{ult,m,SO}$ ) und bei der Serie SU sogar von 11,2 N/mm<sup>2</sup> ( $f_{p,m,SU}$ ) auf 21,5 N/mm<sup>2</sup> ( $f_{ult,m,SU}$ ). Das Nachbruchverhalten kann mit den Restfestigkeiten nach [33] nicht ausreichend genau beschrieben werden, da die Restfestigkeiten  $f_{r2}$  und  $f_{r4}$  – mit Ausnahme bei der Probe 10.1-SO – immer größer sind, als  $f_{r1}$ . Besser eignet sich dahingegen das Verfahren nach DIN EN 14651 [34], da hier die Restfestigkeiten bzw. die residuelle Biegezugfestigkeiten an definierten Punkten und nicht über einen größeren Bereich bestimmt werden. Aufgrund der von der Norm abweichenden Geometrie sind die ermittelten Restfestigkeiten jedoch nur bedingt vergleichbar. Der Vergleich mit den zentrischen Zugversuchen (Bild 17) zeigt, dass die ermittelten Biegezugfestigkeiten erwartungsgemäß deutlich über den Ergebnissen der zentrischen Zugversuche liegen. Dies trifft auch auf das Ende des linear elastischen Bereichs zu.

Die Ergebnisse der mechanischen Festbetoneigenschaften sind, mit Ausnahme der Biegezugfestigkeiten, in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab.3: Übersicht Materialkennwerte

Größe	$f_{c,cube100,\perp}$	$f_{c,cube100,\parallel}$	$f_{c,cyl100,\perp}$	$E_{c,s}$	$f_{ct}$
Einheit	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
Mittelwert	132,7	174,6	121,1	41,5	5,96
Anzahl	12	6	6	6	6

## 7. Zusammenfassung & Ausblick

Der untersuchte UHFSB konnte mit konventionellen Baumaschinen verarbeitet werden. Die Pump- und Spritzbarkeit des Materials wurde durch eine gezielte Anpassung des Zusatzmittelgehalts ermöglicht und mit Hilfe eines baustellengeeigneten Frischbetontests sichergestellt, bevor der Frischbeton gepumpt wurde. Maßgeblich für die Förderung des Spritzmaterials ist die Hubfrequenz der Kolben. Um Förderschwierigkeiten aufgrund der Viskosität des Materials zu vermeiden, sind geringe Hubfrequenzen in der Größenordnung von 2 bis 4 min<sup>-1</sup> zu wählen. Ein bedeutender Rückprall konnte nicht festgestellt werden. Das wenige Material am Boden fiel verarbeitungsbedingt durch Bespritzen des Schalungsrandes an. Der in den Untersuchungen festgestellte Spritzschatten kann vermutlich auf die Verarbeitung zurückgeführt werden und wird im weiteren Projektverlauf untersucht.

Die experimentelle Untersuchung der Materialkennwerte zeigte für ultrahochfeste Betone geforderte Eigenschaften, wenn auch mit signifikanten Unterschieden in Abhängigkeit der



Belastungsrichtung. Trotz einer eindeutigen Anisotropie durch den Herstellungsvorgang konnten Druckfestigkeiten senkrecht zur Spritzrichtung von über 120 N/mm<sup>2</sup> bei Zylindern und über 130 N/mm<sup>2</sup> bei Würfeln festgestellt werden. In Spritzrichtung wurden Druckfestigkeitswerte bis 190 N/mm<sup>2</sup> gemessen. Infolge der Faserwirkung konnte ein duktileres Materialverhalten bei Druckbelastung festgestellt werden. Der Mittelwert des Elastizitätsmoduls beträgt 41,5 kN/mm<sup>2</sup>. Bezüglich der Zugfestigkeit konnten Werte von 6,0 N/mm<sup>2</sup> bei prismatischen Prüfkörpern mit einer gelenkigen Lagerung gemessen werden. Die Biegezugfestigkeit liegt je nach Orientierung und Art des Versuchs zwischen 15,6 N/mm<sup>2</sup> und 23,5 N/mm<sup>2</sup>. Für den UHFSB weist ein verfestigendes Verhalten unter axialer Zugbelastung auf, welches mit einer ausgeprägten – und für die Dauerhaftigkeit vorteilhaften – Multirissbildung einhergeht.

Basierend auf diesen grundlegenden Untersuchungen zur Verarbeitung und Materialeigenschaften am konkreten Werkstoff Ductal® Grey Shotcrete werden aktuell im Projekt weiterführenden Untersuchungen zur Werkstoffspezifizierung und insbesondere des Einflusses durch den Herstellungs- und Spritzprozess durchgeführt. Hierbei werden auch allgemeine herstellerunabhängige Anforderungen für UHFSB formuliert. Aktuell werden in Kooperation mit Betreibern von Infrastrukturbauwerken wie den bayerischen Autobahndirektionen, dem Baureferat der Landeshauptstadt München und der Bundesanstalt für Wasserbau Schadensbilder von Bestandsbauwerken und potentielle Anwendungsgebiete des UHFSBs erörtert. Bei den Untersuchungen des Verbundsystems Bestandsbeton-UHFSB steht neben der Ermittlung der dauerhaftigkeitsrelevanten Materialeigenschaften, wie dem Chlorideindringwiderstand, und dem lastunabhängigen Verformungsverhalten besonders die Rissbildung des Materials sowie die Verbundeigenschaften im Fokus. Daran anknüpfend werden die Versuche in Simulationen nachgebildet, Bemessungsmodelle entworfen und das Chlorideindringverhalten bei vorhandenen Mikrorissen analysiert.

## Danksagung

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Projektes „Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbetonbauwerken mittels dünner UHPC-Spritzbeton-Schichten: Einsatzgebiete, Bemessung, Dauerhaftigkeit, Verarbeitungstechnologie“ (Förderkennzeichen 13FH6761X6) im Rahmen des Forschungsprogramms „Forschung an Fachhochschulen“. Weiterhin gilt unser Dank den beteiligten Industriepartnern Implemia Instandsetzungs GmbH (München) und LafargeHolcim Ltd. (Jona, Schweiz) sowie dem Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München für die Unterstützung. Auch möchten wir den gesamten am Projekt i-SCUP beteiligten Forscherteam insbesondere den leitenden Professoren Frau Prof. Dr.-Ing. Andrea Kustermann sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt für die gute und anregende Zusammenarbeit danken. Im Rahmen seiner Masterarbeit hat Herr Markus Schmidt einige der dargestellten Versuche durchgeführt. Für die ausgezeichnete Arbeit sei ihm hier nochmal ausdrücklich gedankt!

## 8. Literatur

- [1] Marzahn, G., Mertzsch, O., Kramer, L.: Der Traglastindex - ein neuer Kennwert zur Bewertung struktureller Eigenschaften von Straßenbrücken. Bauingenieur 95 (2020), S. 271–278.
- [2] Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt. Grenzwerte, Empfehlungen. München 26.09.2019.
- [3] Brühwiler, E., Denarié, E.: Stahl-UHFB - Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB). Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), S. 216–226.

- [4] Methner, R., Müller, R.:  
Brückeninstandsetzung, Ertüchtigung und Abdichtung mit Ultrahochfestem-Faserbeton (UHFB). *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), S. 126–133.
- [5] Hadl, P., Della Pietra, R., Hoang, K. H., Tue, N. V., Pilch, E.:  
Anwendung von UHPC als direkt befahrener Aufbeton bei der Integralisierung eines bestehenden Brückenbauwerks in Österreich. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), S. 162–170.
- [6] Brühwiler, E.:  
Strengthening of existing structures using R-UHPFRC: principles and conceptual design. In: Toutlemonde, F., Resplendino, J. (Hg.): *Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2-4 October 2017, Montpellier, France. UHPFRC 2017 Designing and building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards.* Bagnoux: RILEM publications, S. 993–1002.
- [7] Denarié, E., Jacomo, D., Fady, N., Corvez, D.:  
Rejuvenation of maritime signalisation structures with UHPFRC. In: Toutlemonde, F. (Hg.): *Designing and building with UHPFRC. From innovation to large-scale realizations ; RILEM-fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete ; UHPFRC 2013, Marseille, France, October 1 - 3, 2013.* Bagnoux: RILEM Publ, S. 157–166.
- [8] Manabe, H., Huang, C.-W., Kosaka, Y., Mitamura, H., Matsumoto, T., Imai, T.:  
Verification of repair effect of bridge deck using UHPFRC (J-THIFCOM). In: Braml, T., Fischer, O., Mensinger, M., Ohyama, O., Siebert, G., Taras, A. (Hg.): *Proceedings of the 12th Japanese German Bridge Symposium. September 4 to September 7, 2018. Munich, Germany.* Neubiberg: Förderverein Konstruktiver Ingenieurbau der UniBW München e.V., S. 151–152.
- [9] Pelke, E., Jaborek, A., Berger, D., Brühwiler, E.:  
Überführungsbauwerk der L3378 bei Fulda-Lehnerz. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), S. 831–841.
- [10] Sagmeister, B., Pahl, G.:  
Verschleißfeste Schutzschichten aus UHPC. *Bauingenieur* 94 (2019), S. 179–183.
- [11] Schmidt, M., Bunje, K., Dehn, F., Droll, K., Fehling, E., Greiner, S., Horvath, J., Kleen, E., Müller, C., Reineck, K.-H., Schachinger, I., Teichmann, T., Teutsch, M., Thiel, R., Tue, N. V.:  
Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. Berlin: Beuth 2008.
- [12] Jungwirth, J.:  
Zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus Ultra-Hochleistungs-Faserbeton. Dissertation. ETH Lausanne 2006.
- [13] Charron, J.-P., Denarié, E., Brühwiler, E.:  
Permeability of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concretes (UHPFRC) under High Stresses. *Materials and Structures* 40 (2007), S. 269–277.
- [14] Trucy, L., Dobrusky, S., Bonnet, E.:  
Ultra High Performance Shotcrete: Yes we can! In: Toutlemonde, F., Resplendino, J. (Hg.): *Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2-4 October 2017, Montpellier, France. UHPFRC 2017 Designing and building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards.* Bagnoux: RILEM publications, S. 154–163.
- [15] Bernardi, S., Trucy, L.:  
Sprayed UHPC with Glass Fibres for 3D Panels. In: Toutlemonde, F., Resplendino, J. (Hg.): *Proceedings of the AFGC-ACI-fib-RILEM International Conference on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, 2-4 October 2017, Montpellier, France. UHPFRC 2017 Designing and building with UHPFRC: New large-scale implementations, recent technical advances, experience and standards.* Bagnoux: RILEM publications, S. 145–152.
- [16] Jungwirth, J., Kustermann, A., Dauberschmidt, C., Pollner, T., Strotmann, A.:  
Retrofitting and Strengthening of Reinforced Concrete Structures by Using Thin UHPFRC Shotcrete Layers. *Fields of Application, Design, Durability, Construction Technology* 2020.
- [17] Baumgartner, A., Fraundorfer, A., Dauberschmidt, C., Kustermann, A.:  
Veränderung der mechanischen Kenngrößen von Betonstabstählen durch chloridinduzierte Korrosion. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), S. 409–418.
- [18] Kamal, A., Kunieda, M., Ueda, N., Nakamura, H.:  
Evaluation of crack opening performance of a repair material with strain hardening behavior. *Cement and Concrete Composites* 30 (2008), S. 863–871.
- [19] Mechtcherine, V.:  
Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), S. 50–58.

- [20] Büttner, T., Raupach, M.:  
Des Bauwerks neue Kleider. Funktionsprinzipien und Einsatzmöglichkeiten von Textilbetonschichten zum Schutz von Bauwerken. Bauen im Bestand 35 (2012), S. 70–75.
- [21] Rempel, S., Erhard, E., Schmidt, H.-G., Will, N.:  
Die Sanierung des Mariendomedaches in Neviges mit carbonbewehrtem Spritzmörtel. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), S. 543–550.
- [22] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein:  
Ultra-Hochleistungs-Faserbeton. Baustoffe, Bemessung und Ausführung. Zürich, Schweiz: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein (2016).
- [23] Sahmaran, M., Li, M., Li, V. C.:  
Transport Properties of Engineered Cementitious Composites under Chloride Exposure. ACI Materials Journal 104.
- [24] Jang, S. Y., Kim, B. S., Oh, B. H.:  
Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. Cement and Concrete Research 41 (2011), S. 9–19.
- [25] Ma, Z., Zhao, T., Yao, X.:  
Influence of Applied Loads on the Permeability Behavior of Ultra High Performance Concrete with Steel Fibers. Journal of Advanced Concrete Technology 14 (2016), S. 770–781.
- [26] Pollner, T.:  
Ultra-Hochleistungs-Faserbeton als Instandsetzungsmaterial für chloridbeanspruchte Bauwerke aus Stahlbeton. Untersuchung des Chlorideindringwiderstands von UHFB-Stahlbeton-Verbundbalken unter mechanischer Beanspruchung. Master Thesis. München 2019.
- [27] Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B.:  
Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Kassel: Kassel Univ. Press 2005.
- [28] Scheydt, J. C.:  
Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton. Dissertation. Karlsruhe, Baden: KIT Scientific Publishing 2013.
- [29] Provete Vincler, J., Sanchez, T., Turgeon, V., Conciatori, D., Sorelli, L.:  
A modified accelerated chloride migration tests for UHPC and UHPFRC with PVA and steel fibers. Cement and Concrete Research 117 (2019), S. 38–44.
- [30] Deutsches Institut für Normung e.V.: Prüfung von Spritzbeton - Teil 1:  
Probenahme von Frisch- und Festbeton. Deutsche Fassung EN 14488--1. Berlin: Beuth (11/2005).
- [31] Li, V. C., Fischer, G., Lepech, M. D.:  
Shotcreting with ECC. In: Kusterle, W. (Hg.): Spritzbeton-Tagung 2009.
- [32] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Prüfung von Festbeton – Teil 13:  
Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Deutsche Fassung EN 12390-13:2013. Berlin: Beuth.
- [33] Deutsches Institut für Normung e.V.: Prüfung von Spritzbeton – Teil 3:  
Biegefestigkeiten (Erstriss-, Biegezug- und Restfestigkeit) von faserverstärkten balkenförmigen Betonprüfkörpern. Deutsche Fassung EN 14488-3. Berlin: Beuth (09/2006).
- [34] Deutsches Institut für Normung e.V.:  
Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern - Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit). Deutsche Fassung EN 14651:2007. Berlin: Beuth.

## Zu den Autoren

M.Eng. Andre Strotmann

Bachelorstudium des Bauingenieurwesens bis 2017 an der Fachhochschule Bielefeld; Masterstudium des Bauingenieurwesens bis 2019 an der Hochschule München; seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter

*andre.strotmann@hm.edu*

M.Eng. Toni Pollner

Studium des Bauingenieurwesens bis 2019 an der Hochschule München; seit 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Material- und Bauforschung der Hochschule München

*toni.pollner@hm.edu*

Prof. Dr.-Ing Andrea Kustermann

Studium des Bauingenieurwesens an der TU München, wissenschaftliche Laborleiterin am Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München, eigenes Ingenieurbüro für Bauschadensgutachten und Materialanalyse sowie Teilhaberin am Bauunternehmen Kustermann & Herz GbR, seit 2013 Professorin für Bauchemie, Baustoffe und Bauen im Bestand an der Hochschule München.

*andrea.kustermann@hm.edu*

Prof. Dr. Jörg Jungwirth

Studium des Bauingenieurwesens an der TU München und ETH Lausanne, Dissertation an der ETH Lausanne, konstruktiver Ingenieurbau und internationale Projekte bei SSF Ingenieure AG, seit 2016 Professor für Massivbau und konstruktiver Ingenieurbau an der Hochschule München

*joerg.jungwirth@hm.edu*