
VERSTÄRKUNG VON MAUERWERK DURCH HOCHDUKTILEN SPRITZBETON

STRENGTHENING OF MASONRY USING HIGHLY DUCTILE SHOTCRETE

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor **Mechtcherine**, Technische Universität Dresden, Dresden
Dipl.-Ing. Arnd-Eike **Brüdern**, Technische Universität Dresden, Dresden, Deutschland

Als Verstärkungsmaterial für stark belastetes Mauerwerk ist ein hochduktiler Faserspritzbeton entwickelt worden. Die Konsistenz des Frischbetons ist unter Verwendung eines hochauflösenden Rheometers an die Erfordernisse des Spritzauftrages angepasst worden. Der aufgetragene Spritzbeton wies ein stabiles Verhalten nach dem Auftrag auf vertikalen Flächen auf. Zur Abschätzung der Verstärkungswirkung wurden Ziegeldrillinge hergestellt und mit einer 10 mm dicken Schicht aus hochduktiler Spritzbeton versehen. Die erhaltenen Ergebnisse aus Drei-Stein-Schubversuchen zeigen als Folge einer solchen Verstärkung eine sehr deutliche Zunahme der Lastaufnahmekapazität, des Verformungsvermögens und der Energieabsorption.

A sprayable, highly ductile, fibre-reinforced concrete has been developed for the strengthening of heavily loaded masonry. In order to adjust the rheological properties of the fresh concrete, so that it could have the proper consistency to be sprayable, a high-resolution rheometer was used. The sprayed concrete exhibited stable behavior after application onto a vertical substrate. The strengthening effect was estimated by testing specimens composed of three bricks reinforced by a 10 mm-thick sprayed concrete layer. Shear tests showed that the masonry's capacities for load-bearing, deformation and energy absorption all increased significantly due to such strengthening.

1. Einleitung

Die Verstärkung von Mauerwerk zur Steigerung der mechanischen Leistungsfähigkeit und zur gezielten Erhöhung des Erdbebenwiderstandes stellt besondere Anforderungen an das verwendete Material. Die derzeitigen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich konzentrieren sich hauptsächlich auf faserverstärkte Polymer-Strips [1]. Der vorliegende Beitrag beschreibt einen alternativen Lösungsansatz zur Verstärkung von Mauerwerk durch eine dünne Schicht aus hochduktiler Beton. Der große Vorteil dieser Methode besteht in der Möglichkeit, die Verstärkungsschicht unter Verwendung herkömmlicher Nassspritztechnologie schnell und einfach aufzutragen.

Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung sind zementgebundene Hochleistungswerkstoffe, die unter Zugbeanspruchung eine Verfestigung aufweisen und eine im Vergleich zu gebräuchlichen Betonen mehr als 300-mal höhere Bruchdehnung besitzen können [2, 3]. Die Form der Spannungs-Dehnungsbeziehung ähnelt der eines Stahls (siehe Bild 1a). Das hohe nicht-elastische Verformungsvermögen des Werkstoffes wird durch die Bildung einer Vielzahl von feinen, nahezu gleichmäßig verteilten Rissen herbeigeführt (vgl. Bild 1b). Neben einer hohen Verformungsfähigkeit und, im Vergleich zu konventionellem Beton, deutlich höheren Biegezug- und Schubfestigkeit [4, 5], weisen hochduktile Betone bis zur Bruchdehnung von bis zu 5 % immer noch sehr geringe Rissöffnungen auf (vgl. Bild 1). Bei einer stoßartigen Beanspruchung können hochduktile Betone große Energiemengen durch multiple Rissbil-

ung absorbieren. International werden solche Betone meist als „Strain-Hardening Cement-based Composites (SHCC)“ bezeichnet. Da sich diese Bezeichnung nur sehr umständlich ins Deutsche übersetzen lässt, wird hier die Abkürzung „SHCC“ bzw. der in Deutschland inzwischen geläufige Name „Hochduktiler Beton“ verwendet [6].

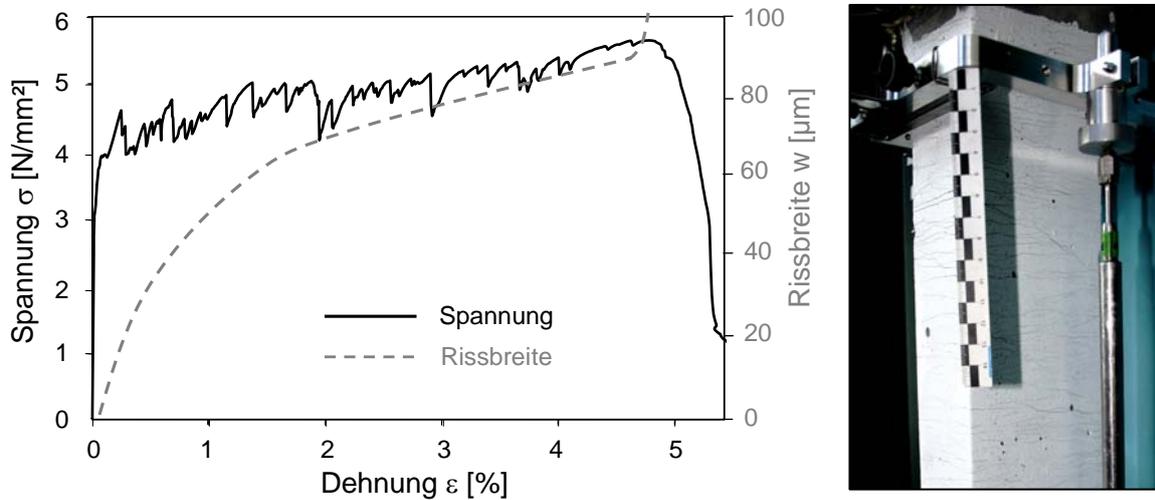


Bild 1: a) Typische Spannungs-Dehnungsbeziehung von hochduktilen Beton unter Zugbeanspruchung; die gestrichelte Linie zeigt die Entwicklung der Rissbreiten; b) Charakteristisches Rissbild beim Erreichen der Bruchdehnung

Ein Schwerpunkt in diesem Projekt war die Weiterentwicklung der SHCC-Zusammensetzung mit dem Ziel, die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons im Hinblick auf seine Spritzbarkeit anzupassen und die sehr guten mechanischen Eigenschaften des erhärteten Betons, speziell die hohe Duktilität und Schubfestigkeit, beizubehalten. Die Grundlage der Rezepturgestaltung bildete eine SHCC-Zusammensetzung, welche in einem früheren Projekt entwickelt wurde [3]. Als Parameter wurden der Fasergehalt sowie die Art und Menge der Fließmittelzugabe variiert. Zur Realisierung spezieller Materialeigenschaften wurden außerdem weitere Betonzusätze verwendet. Die Untersuchungen zum rheologischen Verhalten des Betons und zu den mechanischen Materialeigenschaften erfolgten in zwei Phasen. In einem ersten Schritt wurden aussichtslose Mischungen mit einfachen Untersuchungsmethoden (Setzfließmaßversuch für Frischbeton, Drei-Punkt-Biegeversuch für erhärteten Beton) aussortiert. Anschließend fand unter Verwendung aufwendigerer Versuche eine Optimierung der geeigneten Rezepturen statt, aus denen die aussichtsreichsten Mischungen zur Verstärkung von Mauerwerksprüfkörpern ausgewählt worden sind.

Ein anderer Schwerpunkt des Projektes war die Abschätzung der Verstärkungswirkung einer dünnen Schicht aus hochduktilen, auf Mauerwerk appliziertem Spritzbeton. Hierzu wurde eine 10 mm dicke SHCC-Schicht auf kleine Mauerwerksprobekörper, Ziegeldrillings mit und ohne Mörtelfuge, aufgespritzt und nach deren Erhärtung das Schubkraft-Verformungsverhalten ermittelt.

2. Material, Prüfkörperherstellung und Methoden

2.1 Variation der Mischungszusammensetzung

Als Grundlage für die Formulierung unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen zur Mauerwerksverstärkung fand eine bereits früher von Mechtcherine und Schulze [3] entwickelte Rezeptur Anwendung. Diese Ausgangsrezeptur wurde verändert, um das gewünschte Materialverhalten des Betons sowohl im frischen als auch im erhärteten Zustand zu errei-

chen. Im ersten Schritt erfolgte eine Anpassung der Fließmittelzugabe und des Faseranteils an die, durch die Spritzvorrichtungen am Institut für Baustoffe an der TU Dresden vorgegebenen, Anforderungen. Der Gehalt von feinen PVA-Fasern wurde von 2,2 Vol.-% in der Referenzmischung [3] auf 1,8 Vol.-% reduziert. Höhere Fasergehalte hätten aufgrund der verwendeten, relativ kleinen Spritzdüse zu Verstopfungen geführt. Die Ergebnisse für noch kleinere Fasergehalte werden in diesem Aufsatz nicht explizit dargestellt, da die Duktilität dieser Mischungen als unzureichend angesehen wurde.

Des Weiteren wurden drei unterschiedliche Fließmittel auf ihre Eignung geprüft und deren Zugabemenge im Vergleich zur Referenzmischung jeweils soweit reduziert, dass der Beton gerade noch spritzfähig blieb. Die Variation der Fließmittelart führte für die jeweiligen Betone zu unterschiedlichem Ansteifverhalten, welches unter Verwendung eines Rheometers untersucht wurde. Die durch die Reduktion des Fließmittelgehaltes und der Faserzugabe entstandene SHCC-Rezeptur wird im Folgenden als Basismischung S1.8 bezeichnet. Diese Zusammensetzung ist in Tabelle 1 angegeben.

Bei der weiteren Rezepturentwicklung wurde zusätzlich ein geringer Teil des Portlandzementes durch Tonerdeschmelzzement (vgl. die Rezeptur S1.8-CA3 und S1.8-CA5 in Tabelle 1) bzw. ein Teil der Flugasche durch Kalksteinmehl (ist in dieser Publikation nicht expliziert vorgestellt) ersetzt und deren Einfluss auf die Betoneigenschaften untersucht. Die Zugabe von Tonerdeschmelzzement sollte zu einer schnelleren Erhärtung von SHCC führen, während die Zugabe von Kalksteinmehl die Haftung der aufgespritzten Schicht am Untergrund verbessern sollte. Bei einer SHCC-Mischung fand ein Luftporenbildner Verwendung. Die Luftporen sollten zum einen den Frostwiderstand des SHCC erhöhen und infolge ihrer Kapillarbrechenden Wirkung den Feuchtetransport durch das Material verringern. Andererseits stellen feine Luftporen Mikrodefekte dar, welche im Allgemeinen die multiple Rissbildung im SHCC begünstigen.

Tab. 1: Zusammensetzung ausgewählter SHCC-Mischungen

Mischungsbezeichnung	S1.8	S1.8-CA3	S1.8-CA5	S1.8-LP10
	[kg / m ³]			
Zement CEM I 42,5 HS	327	315	310	358
Tonerdeschmelzzement	-	10	16	-
Steinkohleflugasche	766	766	762	572
Quarz Sand 0,06/0,2 mm	546	546	544	598
Wasser	342	342	341	291
Fließmittel (PCE)	3,2	3,2	3,5	-
Fließmittel (Naphthalinsulfonat)	-	-	-	8,9
Stabilisierer (UW Compound)	3,2	3,2	3	3,5
PVA Fasern	23,4	23,4	23,4	23,4
Luftporenbildner	-	-	-	0,46

Die Verarbeitbarkeit der entwickelten Rezepturen wurde mit Hilfe des kleinen Setzfließmaßes (Trichterhöhe 70 mm, unterer Durchmesser 100 mm und oberer Durchmesser 60 mm) eingeschätzt. Ungeeignete Zusammensetzungen wurden aussortiert; die Spritzversuche erfolgten nur an Rezepturen, die geeignet erschienen. Eine Auswahl derer ist in Tabelle 1 aufgeführt ist. Die präzise Einstellung der rheologischen Frischbetoneigenschaften erfolgte mit Versuchen im Baustoff-Rheometer (vgl. Abschnitt 2.3). Des Weiteren wurden Dreipunkt-Biegezugversuche mit allen gespritzten SHCC-Varianten durchgeführt. Schließlich wurden einige repräsentative Rezepturen ausgewählt um zum einen weitere mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul) zu ermitteln und zum anderen die Verstärkungswirkung auf Mauerwerk (Dreisteinversuch) abzuschätzen.

2.2 Spritzversuche

Die Untersuchung zur Spritzbarkeit der Mischungen wurden mit einer Mörtelspritze vom Typ DURAPACT 326S durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen fand das Nassspritzverfahren Anwendung, wobei dem Beton keine Additive über die Spritzdüse beigemischt wurden. Die Spritzversuche dienten gleichzeitig auch zur Probekörperherstellung für die nachfolgenden mechanischen Untersuchungen. Die Art der Probekörperherstellung hat, speziell beim Spritzbeton, einen signifikanten Einfluss auf die Materialeigenschaften.

Für die visuelle Prüfung des jeweiligen SHCC wurden spezielle Spritzkästen aus Holz mit Abmaßen von 800 mm x 500 mm x 60 mm genutzt. Zur Beurteilung der Betonhaftung am Untergrund wurden die Holzkästen vertikal positioniert und mit einer ca. 20 bis 30 mm dicken Betonschicht gefüllt. Die Bewertung des gespritzten Betons erfolgte sowohl bezüglich der Oberflächenbeschaffenheit (Geschlossenheit, Ebenheit, etc.) als auch der Formstabilität der SHCC-Schicht. Danach wurden die Kästen horizontal gelagert und der Spritzvorgang fortgesetzt, bis die Kästen gänzlich gefüllt waren. Die Betonoberfläche wurde glatt abgezogen und die gefüllten Spritzkästen zur Vermeidung von Wasserverlusten mit Plastikfolie umwickelt.

Für die mechanischen Untersuchungen wurden die erhärteten Betonblöcke in kleine Balken, Prismen, Würfel und Platten geschnitten.

2.3 Untersuchungen im Rheometer

Die Viskosität und deren Veränderung über die Zeit besitzen eine essentielle Bedeutung für die Spritzbarkeit von Beton. Die zeitliche Entwicklung der Viskosität der Mischungen wurde in der Baustoffzelle eines Modular Advanced Rheometer System HAAKE MARS untersucht. Die Prüfung erfolgte im Oszillationsregime mit einer Frequenz des paddelförmigen Rotors von 1 Hz. Das Rotationsmoment betrug 150 μNm . Die Temperierung der Baustoffzelle erfolgte auf Standardtemperatur von 20 °C. Als Maß für die Viskosität wird im Weiteren der Schubmodul G^* angegeben.

Zur besseren Gegenüberstellung der Ergebnisse zur zeitlichen Entwicklung der Viskosität bzw. des Schubmoduls, wurde die Zugabe von Fließmittel iterativ so eingestellt, dass die Konsistenz der untersuchten Mischungen zum Versuchsbeginn gleich war. Hierzu sind Setzfließversuche (siehe Kapitel 2.1) durchgeführt worden. Die Schubmodulveränderungen der untersuchten Mischungen wurden über eine Zeitspanne von 45 Minuten aufgezeichnet. In einigen Fällen musste der Versuch zu einem früheren Zeitpunkt abgebrochen werden, da der Beton zu schnell ansteifte.

Um etwaige Clusterbildung bzw. Separationen der Fasern durch die Oszillation des Messpaddels zu verhindern, wurden die Mischungen ohne Faserzugabe hergestellt. Aufgrund des inerten chemischen Verhaltens der PVA-Fasern kann davon ausgegangen werden, dass das Erhärtungsverhalten der untersuchten Zusammensetzungen ohne Fasern vergleichbar ist mit denen der gespritzten Betone mit Faserzugabe.

2.4 Mechanische Untersuchungen

Zur Abschätzung der mechanischen Eigenschaften der untersuchten Rezepturen sind kleine Prismen (160 mm x 40 mm x 40 mm) in Dreipunkt-Biegezugversuchen geprüft worden. Dazu fanden sowohl speziell in entsprechenden Formen hergestellte als auch aus dem gespritzten Material gefertigte Probekörper Verwendung (siehe auch Kapitel 2.3). Die Spannweite bei den Dreipunkt-Biegezugversuchen betrug 100 mm. Dieser einfache Versuchsaufbau ist gut für eine Vergleichsstudie geeignet, um schnell und einfach anhand der mechanischen Leistungsfähigkeit vielversprechende Zusammensetzungen herauszufinden.

Zur Ermittlung des Spannungs- Dehnungsverhaltens von SHCC bzw. auch zur Bestätigung der Tatsache, dass es sich bei dem entwickelten Werkstoff tatsächlich um hochduktilen Beton handelt, sind die Dreipunkt-Biegezugversuche nicht geeignet. Deshalb wurden für ausgewählte Mischungen anschließend einaxiale Zugversuche an Prismen mit den Abmessungen 290 mm x 40 mm x 40 mm durchgeführt. Diese Probekörper wurden ebenfalls aus den gespritzten Blöcken gewonnen und für die Versuchsdurchführung in die Maschine über nicht verdrehbare Adapter aus Stahl geklebt. Die Messlänge betrug 250 mm.

Außerdem wurden zur Ermittlung der Druckfestigkeit Würfel mit einer Kantenlänge von 40 mm aus den gespritzten Blöcken gewonnen und geprüft.

2.5 Drei-Stein-Schubversuch

Zur Abschätzung der Verstärkungswirkung einer dünnen SHCC-Schicht an Mauerwerk wurden Schubversuche in Anlehnung an die DIN EN 1052-3 [7] durchgeführt. Bei diesem Versuch wird ein Ziegeldrilling mit den äußeren Steinen auf Betonblöcken gelagert und der mittlere Ziegel bis zum Versagen des Verbundes herausgedrückt.

Zur Vorbereitung der Probekörper wurden Vollziegel auf das Maß von 115 mm x 71 mm x 90 mm geschnitten und mit normalem Mauermörtel bei einer Fugenstärke von ca. 10 mm zu Steindrillingen vermauert. Nach der Erhärtung der Mörtelfugen wurden die Prüflinge zum Auftrag der SHCC-Schicht in speziellen Halterungen platziert und durch Spritzen mit einer dünnen Betonlage verstärkt. Die Oberfläche wurde abgezogen und dabei überschüssiges Material entfernt, sodass eine Schichtdicke von 10 mm erzielt wurde. Zur Nachbehandlung wurden die Prüfkörper in Kunststoffolie eingeschlagen und bei 20 °C bis zur Prüfung im SHCC-Alter von 28 Tagen gelagert.

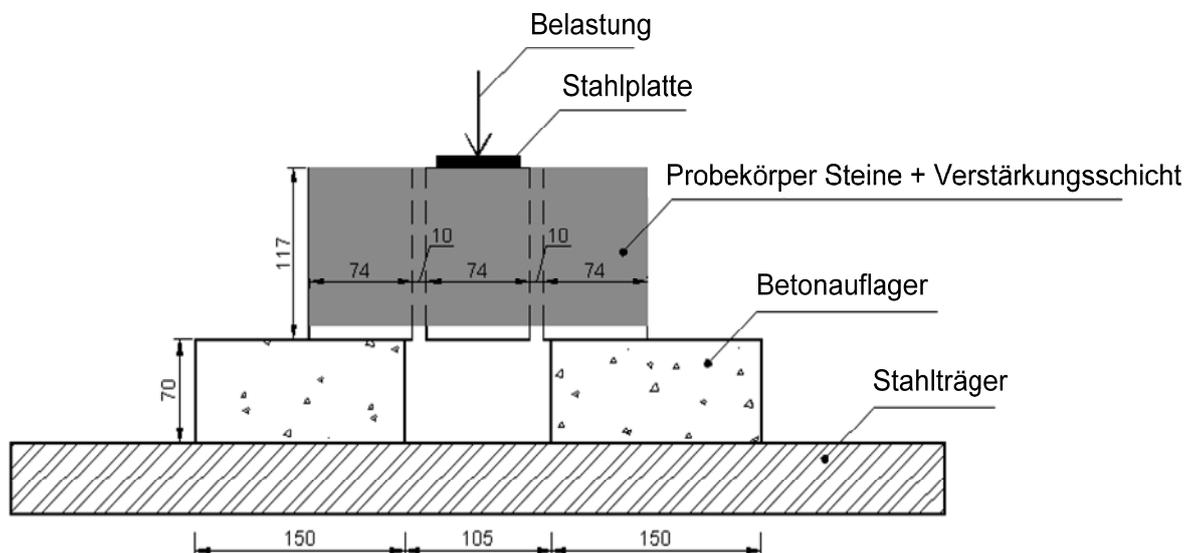


Bild 2: Schematische Darstellung des Aufbaus von Drei-Stein-Versuchen (Abmaße in mm; die graue Fläche markiert die frontseitig aufgetragene SHCC-Verstärkungsschicht)

Bild 2 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau zur Ermittlung des Schubverhaltens. Die Spannweite betrug 105 mm. Die jeweils äußeren Steine des Steindrillings wurden auf den Betonblöcken durch vertikale Schrauben fixiert. Zur Lasteinleitung diente eine Stahlplatte, welche etwas kleiner dimensioniert war als der mittlere Stein und so positioniert wurde, dass sie keinen Kontakt zur Verstärkungsschicht hatte. Die Prüfgeschwindigkeit des Querhauptes der Prüfmaschine betrug 0,0056 mm/s.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Ergebnisse der Spritzversuche

Die Spritzversuche wurden mit den als gut verarbeitbar eingestuften Mischungen durchgeführt. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die besten Spritzeigenschaften (Spritzbarkeit, Formstabilität, Oberflächenbeschaffenheit) besaßen SHCC-Mischungen mit Setzfließmaßen von 150 mm bis 160 mm, ermittelt unter Verwendung des kleinen Auslauftrichters.
- Die Mischungen mit Kalksteinmehlanteil wiesen die schlechtesten Spritzeigenschaften auf. Es konnte außerdem ein größerer Porenanteil bzw. eine höhere Heterogenität im Vergleich zu anderen SHCC-Mischungen festgestellt werden.
- Mischungen, bei denen 5 % Portlandzement durch Tonerdeschmelzzement ausgetauscht wurden, steiften zu schnell an. Obwohl diese Mischungen zu Beginn des Spritzvorganges gute Setzfließmaße besaßen, war es nicht möglich, mit diesen Mischungen die Spritzkästen gänzlich zu füllen. Der Austausch von 3 % Portlandzement durch Tonerdezement führte dagegen zu einem sehr günstigen Ansteifverhalten.
- Der maximal spritzbare Faseranteil ist vom Typ und der Konfiguration der Spritztechnik abhängig. Bei den durchgeführten Untersuchungen war ein Faseranteil von 1,8 Vol.-% gut spritzbar. Bei Verwendung leistungsfähigerer Spritztechnik sollte es möglich sein, den Faseranteil im Beton zu erhöhen.

3.2 Ergebnisse der rheologischen Untersuchungen

Um ein fehlerfreies Spritzen ohne Verstopfungen in der Pumpe oder den Leitungen zu gewährleisten, sollte der Frischbeton in den ersten Minuten nach dem Mischen eine geringe dynamische Viskosität bzw. einen geringen Schubmodul besitzen. Nach dem Auftrag auf das Mauerwerk ist es vorteilhaft, wenn der Beton schnell ansteift, damit ein Verlaufen des Betons verhindert wird. Das bedeutet, dass die ideale Kurve einer Schubmodulentwicklung mit einem flachen Ast (geringer Schubmodul) beginnt und nach einer bestimmten Zeit, die durch die Dauer des Materialauftrages determiniert ist (ca. 10 min während der durchgeführten Experimente), stark ansteigt.

In einer ersten Serie wurde der Einfluss unterschiedlicher Fließmittel in der Grundmischung S1.8 (jedoch ohne Faserzugabe) untersucht, wobei gleiche Setzfließmaße eingestellt wurden. Drei Fließmittel auf Polycarboxylat-Ether-Basis fanden Verwendung, sie werden hier als PCE 1, PCE 2 und PCE 3 bezeichnet. Beim Fließmittel PCE 2 blieb der Schubmodul über den gesamten Versuchszeitraum von 45 Minuten relativ niedrig. Da das zu langsame Ansteifverhalten, das mit diesem Fließmittel versetzten Betons, zu einem ungünstigen Auftragverhalten führt, wurde dieses Fließmittel nicht weiter verwendet. Dagegen war beim Fließmittel PCE 3 ein deutlicher Viskositätsanstieg ca. 40 Minuten nach dem Mischvorgang zu erkennen, der den Anforderungen zumindest tendenziell besser gerecht wird.

Der Effekt des teilweisen Austausches (3 %) von Portlandzement durch Tonerdeschmelzzement wurde in einer nächsten Serie mit den Fließmitteln PCE 1 und PCE 3 (S1.8-CA3-PCE1 bzw. S1.8-CA3-PCE3) untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss von zusätzlichen Luftporen (S1.8-LP10-NS) geprüft. Bild 3 zeigt die Entwicklung des Schubmoduls dieser Mischungen über die Zeit.

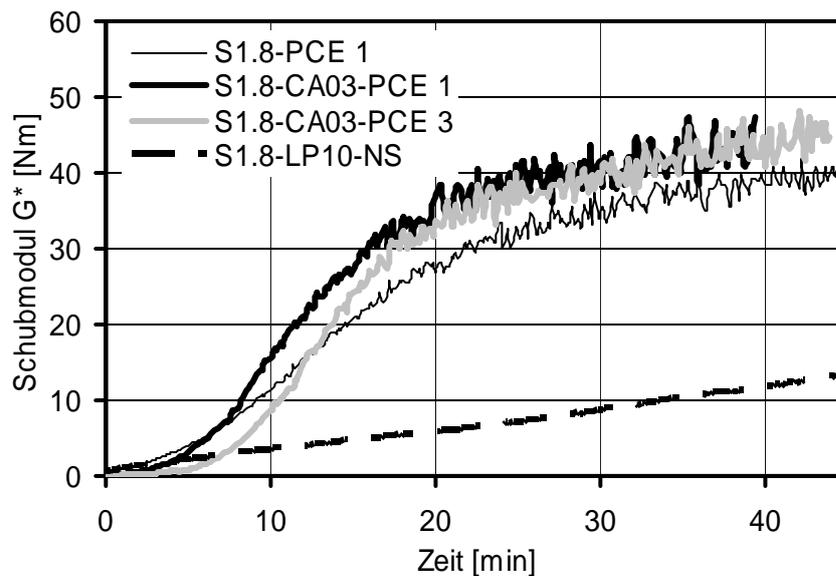


Bild 3: Ergebnisse der Rheometermessungen; zeitliche Entwicklung des Schubmoduls ausgewählter SHCC-Mischungen

Die Zugabe von Tonerdeschmelzzement hat, wie erwartet, einen schnellen Schubmodulanstieg zur Folge. Die Veränderung des Schubmoduls konnte durch die Wahl des Fließmittels weiter eingestellt werden. Der Vergleich der Kurven für S1.8-CA3-PCE1 und S1.8-CA3-PCE3 zeigt ca. 20 Minuten nach dem Prüfungsbeginn (die Messung begann unmittelbar nach dem Mischen) einen ähnlich hohen Schubmodul. Das rheologische Verhalten der beiden Mischungen in den ersten 20 Minuten ist dagegen sehr unterschiedlich. Während die Mischung mit PCE 1 schon etwa 3 bis 4 Minuten nach dem Messbeginn einen sehr schnellen Anstieg des Schubmoduls zeigt, ist ein vergleichbarer Anstieg bei der Rezeptur mit PCE 3 als Fließmittel erst 6 bis 7 Minuten nach dem Mischen zu erkennen. Demnach zeigt die letztere Mischung ein günstigeres rheologisches Verhalten mit einer längeren ruhenden Phase, gefolgt durch einen schnellen Schubmodulanstieg.

Der Schubmodul der Mischung (S1.8-LP10-NS) mit Luftporenbildner als Additiv stieg nur sehr langsam. Da trotz dessen die Formstabilität hinreichend gut war (was vermutlich auf eine höhere Fließgrenze dieser Betonzusammensetzung zurückzuführen ist), wurden auch mit dieser Mischung weitere Untersuchungen angestellt.

3.3 Dreipunkt-Biegezugversuche

Das Entstehen multipler Risse und deren Charakteristik (Rissanzahl, Rissabstände) waren die Hauptkriterien bei der Ergebnisauswertung der Biegezugversuche am erhärteten SHCC. Wenn keine multiple Rissbildung zu beobachten war, wurde die entsprechende Rezeptur als ungeeignet eingestuft und nicht weiter untersucht. Bei Mischungszusammensetzungen mit einem Faseranteil von 1,8 Vol.-% wurden stets feine, gut verteilte Risse im Bereich des Momentenmaximums registriert.

Die Biegezugfestigkeiten und die Verformungen bei Lastmaximum korrespondierten gut mit dem Fasergehalt bzw. mit den an einzelnen Probekörpern beobachteten Bruchbildern. Einige Prismen hatten mehrere parallele Risse quer zur Prismenlängsachse. Bei Anderen verliefen die Risse, wie bei einem Schubversagen, schräg von der Lasteinleitung zu einem Auflager. Mit Zunahme des Faseranteils in der Mischung verlagerte sich die Versagensart vom reinen Biegeversagen hin zu Schubversagen.

Bilder 4 und 5 zeigen eine Auswahl der Ergebnisse von den Biegezugversuchen. Alle fünf Mischungen enthielten einem Faseranteil von 1,8 Vol.-%. Neben der Basismischung S1.8 sind die Ergebnisse von Mischungen mit 5 % Kalksteinmehl (S1.8-K05), mit 3 % und 5 % Tonerdeschmelzzement (S1.8-CA03 bzw. S1.8-CA05) sowie die Mischung mit 10 % künstlich eingetragener Luftporen (S1.8-LP10) aufgezeigt. Die dargestellten Werte für die Biegezugfestigkeit und die Durchbiegung beim Erreichen der Maximallast sind die Mittelwerte aus mindestens 3 Messungen für die jeweiligen Betonalter 7 bzw. 28 Tage.

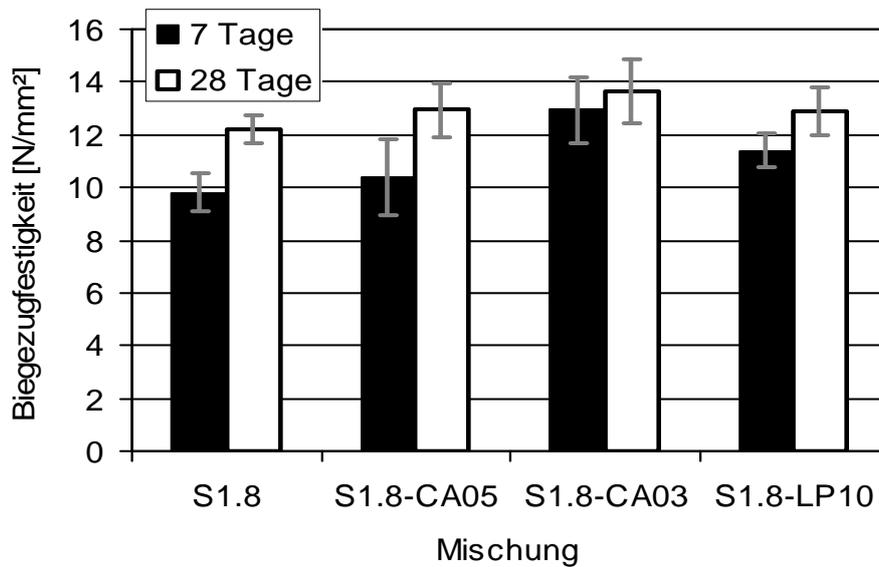


Bild 4: Mittlere Biegezugfestigkeit ausgewählter gespritzter SHCC-Mischungen im Betonalter von 7 und 28 Tagen

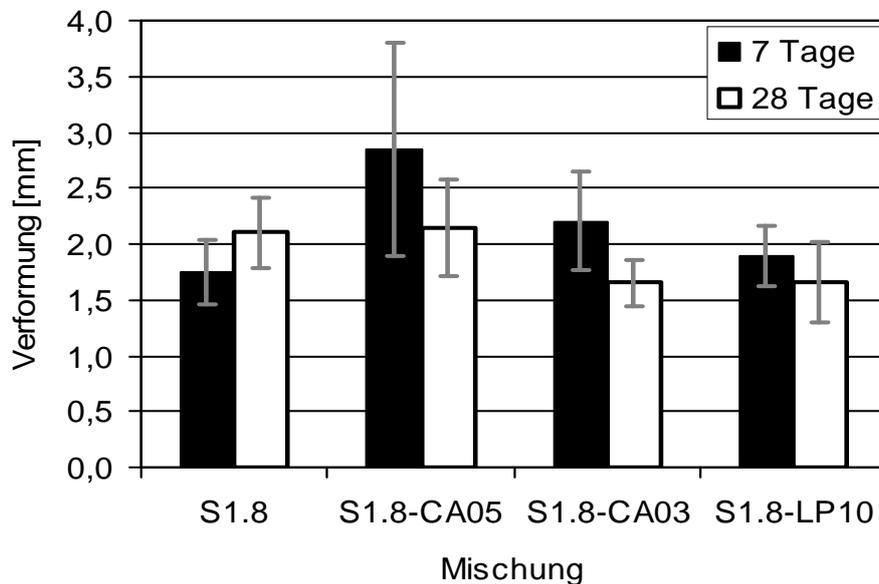


Bild 5: Mittlere Durchbiegungen beim Erreichen der Maximallast für ausgewählte gespritzte SHCC-Mischungen im Betonalter von 7 und 28 Tagen

Wie in Bild 4 zu erkennen ist, haben alle Mischungen außer SHCC mit Kalksteinmehl sehr ähnliche Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen. Die Werte für das Betonalter von 7 Tagen

weisen dagegen deutlichere Unterschiede auf: Die höchste Biegezugfestigkeit zeigte der SHCC mit 3 % Tonerdeschmelzzement, was auf die schnellere Erhärtung dieses Zementes im Vergleich zum Portlandzement zurückzuführen ist. Während eine Steigerung der Biegezugfestigkeit über die Zeit bei allen Mischungen beobachtet werden konnte, verringerte sich tendenziell die Durchbiegung bei Maximallast. Die Ausnahme stellte hier die Basismischung S1.8 dar. Die schlechtesten Ergebnisse erbrachte wiederum die Rezeptur S1.8-K05 mit Kalksteinmehl. Gründe hierfür sind die bereits diskutierte höhere Heterogenität der Mischung (u. a. weniger gleichmäßige Faserverteilung) und der größere Porenanteil.

3.4 Ergebnisse der Druck- und Zugprüfungen

Die Ergebnisse der Druckfestigkeits- und Zugprüfungen können Tabelle 2 entnommen werden. Darin sind nur Werte von SHCC-Mischungen enthalten, welche anschließend im Drei-Steinversuch (siehe Kapitel 3.5) geprüft worden sind.

*Tab.2: Mechanische Eigenschaften ausgewählter Rezepturen
(Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen; Standardabweichungen sind in Klammern angegeben)*

Rezeptur	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit	Bruchdehnung
	N/mm ²	N/mm ²	%
S1.8	48,4 (1,84)	3,02 (0,02)	1,3 (0,10)
S1.8-CA03	47,7 (4,60)	2,93 (0,32)	0,8 (0,21)
S1.8-LP10	43,7 (2,79)	3,11 (0,22)	1,2 (0,44)

Unter Berücksichtigung der Streuung der Testergebnisse ist kein deutlicher Unterschied bei der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung bei den modifizierten SHCC-Zusammensetzungen zu erkennen. Lediglich die Druckfestigkeitswerte der Rezeptur S1.8-LP10 (mit Zugabe des Luftporenbildners) nehmen, wie erwartet, ab. Die ermittelte Bruchdehnung weist im Vergleich zu den Referenzrezepturen aus [3] relativ kleine Werte auf. Als Erklärung dafür können mehrere Gründe angegeben werden. Erstens wurden als Probekörper Prismen verwendet, die aus gespritzten Platten durch Sägen herausgeschnitten worden sind. Einerseits ist die Faserorientierung bei gespritzten Prüflingen ungünstiger als bei schlanken, in Formen gegossenen Probekörpern. Andererseits werden durch das Sägen viele Fasern zerschnitten. Zweitens wurden in den früheren Untersuchungen hantelförmige Probekörper verwendet, bei denen i. d. R. eine gleichmäßigere Rissverteilung über die Prüflänge erzielt wird, und, daraus resultierend, größere Bruchdehnung. Letztlich war auch der aus Verarbeitungsgründen als günstig ermittelte Fasergehalt von 1,8 Vol.-% niedriger als in vorangegangenen Projekten (üblicherweise 2 bis 2,25 Vol.-%).

3.5 Drei-Stein-Schubversuche

Zur Abschätzung einer geeigneten Dicke der Verstärkungsschicht für die Drei-Stein-Schubversuche wurden insgesamt vier Probekörper mit der Grundmischung S1.8 verstärkt, jeweils zwei mit einer Schichtdicke von 10 mm und zwei mit einer Dicke von 20 mm. In den statischen Schubversuchen konnte duktiler Versagen nur bei den Stein-Drillungen mit einer 10 mm dicken SHCC-Schicht beobachtet werden. Die Proben mit einer 20 mm dicken Verstärkungsschicht hingegen zeigten eher sprödes Versagen, wobei die Ziegel abgeschert wurden. Deshalb sind für weitere Untersuchungen Verstärkungsschichten mit einer Dicke von 10 mm gewählt worden. Für jede Parameterkombination wurden 3 Versuche durchgeführt. Tabelle 3 gibt die Mittelwerte und Standardabweichungen der ermittelten Maximallasten und der Versagensverformungen aus den Drei-Stein-Versuchen. Die Werte dieser beiden Parameter nehmen durch eine SHCC-Verstärkung deutlich zu.

Tab.3: Ergebnisse der Drei-Stein-Schubversuche (Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen; Standardabweichungen sind in Klammern angegeben)

Probenart und Rezeptur der Verstärkung	Maximallast	Verformung bei Versagen
	kN	mm
ohne Verstärkungsschicht	2,2 (0,6)	0,25 (0,04)
mit 10 mm S1.8	18,4 (1,5)	3,50 (0,66)
mit 10 mm S1.8-CA03	16,5 (2,0)	2,20 (0,60)
mit 10 mm S1.8-LP10	13,1 (2,0)	2,10 (0,50)

Bild 6 zeigt Kraft-Verformungskurven aus Drei-Stein-Versuchen mit bzw. ohne Verstärkungsschicht. Deutlich zu erkennen sind die Steigerungen sowohl des Lastaufnahmevermögens unter Schub als auch des Energieabsorptionsvermögens infolge des Applizierens der Verstärkungsschicht.

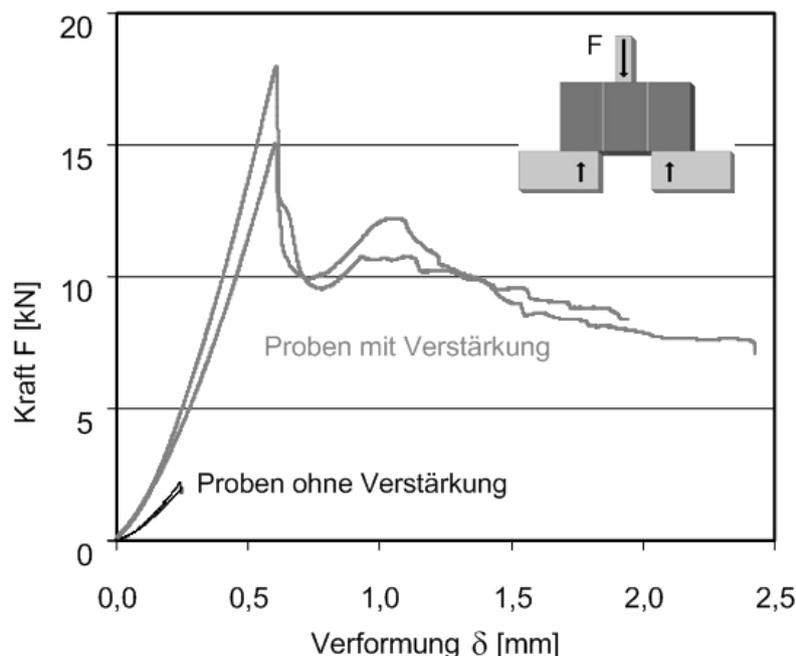


Bild 6: Typisches Kraft-Verformungsverhalten von Steindrillingen mit und ohne Verstärkung

Nachdem die erste Fuge versagt hat (der große Sprung in der Kurve für die Drei-Stein-Proben mit Verstärkungsschicht gleich nach dem Erreichen der Maximalkraft, siehe Bild 6), übernimmt die SHCC-Schicht lokal vollständig den Lastabtrag. Von diesem Zeitpunkt an verhält sich das Verbundsystem duktil. Die Verstärkungsschicht delaminiert partiell um die geschädigte Fuge und erste Schubrisse entstehen. Die Anzahl der Risse und deren Breite nehmen mit steigender Verformung zu. Das gleiche Verhalten kann im weiteren Versuchsverlauf auch im Bereich der zweiten Fuge nach deren Versagen (siehe auch den deutlichen Kraftabfall nach dem zweiten Kraftmaximum) beobachtet werden. Bild 7 zeigt ein typisches Rissbild beim Schubversagen von verstärkten Steindrillingen.

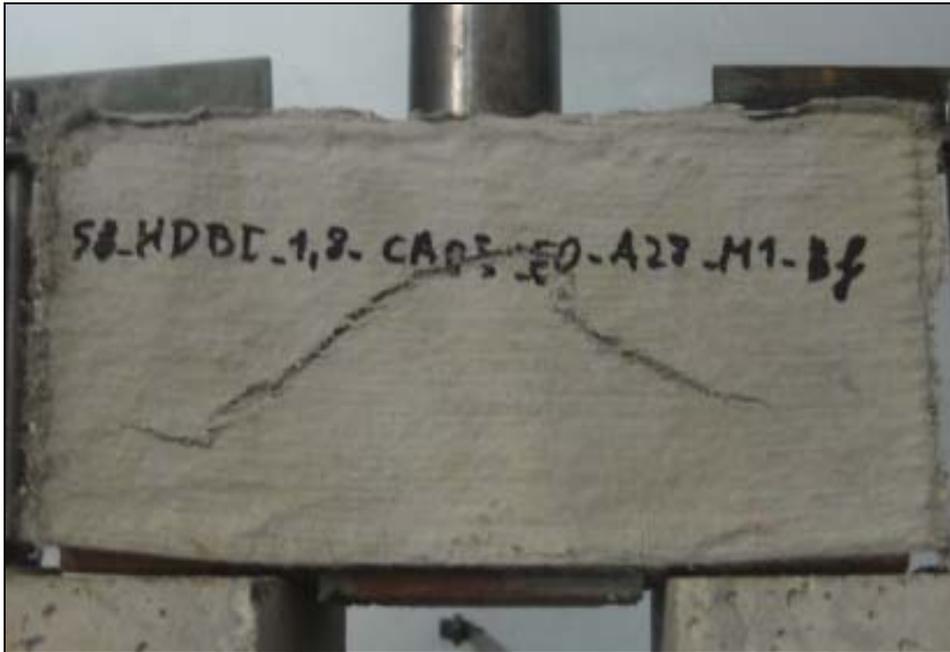


Bild 7: Typisches Versagensbild in den Versuchen an verstärkten Steindrillingen

In einigen Fällen delaminierte die gesamte Verstärkungsschicht bevor die zweite Fuge versagte bzw. die maximale Verformung erreicht war. Dies deutet auf die Notwendigkeit hin zu prüfen, ob und wie eine Verankerung der Verstärkungsschicht am Mauerwerk erzielt werden sollte. Insgesamt wird durch das Aufbringen einer Verstärkungsschicht aus SHCC eine wesentlich höhere Belastbarkeit realisiert und gleichzeitig das Kraft- Verformungsverhalten deutlich verbessert.

4. Zusammenfassung

In der vorgestellten Arbeit wurden verschiedene Zusammensetzungen hochduktilen Betons für die Verstärkung von Mauerwerk entwickelt und untersucht. Alle diese Mischungen besitzen einen Faseranteil von 1,8 Vol.-% und sind gut spritzbar. Zur Anpassung der zeitlichen Entwicklung der Viskosität an die Erfordernisse des Spritzvorganges wurde im Vergleich zur Referenzrezeptur ein kleiner Teil des Portlandzementes durch Tonerdeschmelzzement ersetzt. Außerdem wurde die Art und Menge des Fließmittels variiert. In eine der Mischungen wurden durch eine Luftporenbildnerzugabe künstliche Poren eingetragen. Es wurden die Spritzbarkeit sowie die Formstabilität und die Oberflächenbeschaffenheit des gespritzten Materials beurteilt. Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Charakterisierung des spezifischen Materialverhaltens im frischen und erhärteten Zustand durchgeführt. Die mechanische Leistungsfähigkeit der entwickelten SHCC-Rezepturen wurde durch Drei-Punkt-Biegezugversuche abgeschätzt. Zusätzlich erfolgten einaxiale Zug- und Druckversuche an ausgewählten SHCC-Zusammensetzungen. Die Ergebnisse zeigten, dass die entwickelten und geprüften Mischungen dehnungsverfestigende Materialeigenschaften besitzen. Die Verstärkungswirkung einer dünnen SHCC-Schicht auf Mauerwerk wurde mittels Drei-Stein-Versuchen nachgewiesen. Die Versuche zeigten einen deutlichen Anstieg des Lastaufnahmevermögens unter Schub sowie des Energieabsorptionsvermögens als Folge des Auftrages einer 10 mm starken Verstärkungsschicht aus hochduktilen Beton.

5. Literatur

- [1] Krevaikas, T. D.; Triantafillou T. C.:
Computer aided strengthening of masonry walls using fibre-reinforced polymer strips. *Materials and Structures*, 2006, 93-98.
- [2] Li, V. C.:
From micromechanics to structural engineering – The design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering*, 10 (1993), 2, 37-48.
- [3] Mechtcherine, V.; Schulze, J.:
Ultra-ductile concrete – material design concept and testing. *CPI Concrete Plant International*, 5 (2005), 88-98.
- [4] Mechtcherine, V.; Schulze, J.:
Testing the behaviour of strain hardening cementitious composites in tension. In: Fischer, G.; Li, V. C. (Hrsg.): *Int. RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications*, RILEM Publications S.A.R.L., PRO 49, Honolulu, May 2005.
- [5] Kanda. T.; Watanabe, S.; Li, V. C.:
Application of pseudostrain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements. In: Mihashi, H., Rokugo, K. (Hrsg.): *Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraM-CoS-3)*, AEDIFICATIO Verlag Freiburg, Gifu, Oktober 1998.
- [6] Mechtcherine, V. (Hrsg.):
Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung – Entwicklung, Prüfung, Anwendung. ibidem Verlag, 2005.
- [7] DIN EN 1052-3:
Prüfverfahren für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit (Haftfestigkeit), 2002.

Die Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine

Promotion an der Universität Karlsruhe, Professor für Baustofftechnologie und Bauschadensanalyse an der TU Kaiserslautern, seit 2006 Direktor des Instituts für Baustoffe und Inhaber des Lehrstuhls für Baustoffe an der Technischen Universität Dresden
mechtcherine@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Arnd-Eike Brüdern

Studium des Bauingenieurwesens an der Bauhaus Universität Weimar, seit 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der Technischen Universität Dresden
amd-eike.bruedern@tu-dresden.de