Silke Scheerer · Ulrich van Stipriaan (Herausgeber)

Festschrift
zu Ehren von
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h.
Manfred Curbach

Dresden, 28. September 2016

Impressum

Herausgeber	Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan	
Redaktion	Silke Scheerer	
Autorenfotos	*Fotostudio Jünger*	*S. 124 oben*
	Edvard Krikourian	*S. 124 unten rechts*
	Kirsten J. Lassig	*S. 12*
	Bertram Lubiger	*S. 192*
	Juri Paulischkis	*S. 104*
	A. T. Schaefer, Stuttgart	*S. 62*
	Sylke Scholz, Dresden	*S. 256*
	Ulrich van Stipriaan	*S. 80, 90, 104, 124 Mitte rechts, 146, 150, 152, 160, 216, 228, 234 Mitte links und unten links/rechts, 292, 320*
	Nic Vermeulen	*S. 280*
	Irina Westermann	*S. 42 oben*
	Von Autoren zur Verfügung gestellt: S. 16, 24, 42 unten, 124 (2x), 178, 234 (3x)	
Layout, Satz	Ulrich van Stipriaan	
Titelbild	Ulrich van Stipriaan	
Korrektur	Birgit Beckmann, Angela Heller	
Druck	addprint AG, Bannewitz	

Redaktionsschluss für dieses Buch war der 28. August 2016.

GWT forschung+innovation

Inhalt

Silke Scheerer, Ulrich van Stipriaan und Wolfgang Leiberg
Zum Geleit 8

Teil I – Texte zum Kolloquium 11

Hans Müller-Steinhagen
Grußwort 12

Harald Budelmann
Laudatio 16

Konrad Bergmeister
Weniger ist manchmal mehr – ein Beitrag zur Mindestbewehrung 24

Harald S. Müller und Michael Haist
Opus Caementitium Optimum – Der nachhaltige Beton des 21. Jahrhunderts 42

Werner Sobek
Über die Gestaltung der Bauteilinnenräume 62

Teil II – Weitere Beiträge 79

Thomas Bösche
Mehr Mut im Ingenieurbau 80

Harald Budelmann und Sven Lehmberg
Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk –
Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton? 90

Luna Manolia Daga und Udo Wiens
Mehr als nur schwarze Buchstaben auf weißem Papier – Ein Essay 104

Ulrich Häußler-Combe
Aspekte der Modellierung von Stahlbetontragwerken 108

Josef Hegger, Norbert Will, Rostislav Chudoba, Alexander Scholzen und Jan Bielak
Bemessungsmodelle für Bauteile aus Textilbeton 124

Frank Jesse
Über die Länge der Leine 146

Peter Mark
Mit Leichtigkeit 150

Steffen Marx
Gute Lehre im Konstruktiven Ingenieurbau 152

Viktor Mechtcherine
Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton? 160

Karl Morgen
Deutschlands größte Kamera 178

Peter Offermann
Wie alles begann 188

Dirk Proske
Ist die Energiewende ein technischer Hype? 192

Mike Schlaich
Die Hommage als Quelle der Inspiration 216

Jürgen Schnell
Fashion Statement 228

Mario Smarslik, Christoph Kämper, Patrick Forman, Tobias Stallmann, Peter Mark und Jürgen Schnell
Topologische Optimierung von Betonstrukturen 234

Jürgen Stritzke
Leipziger Großmarkthalle – ein „Historisches Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland" 256

Luc Taerwe
Self-anchored suspension bridges with prestressed concrete deck: historic examples 280

Teil III – Institut für Massivbau 291

Silke Scheerer (Text) · Ulrich van Stipriaan (Fotos)
Massivbau an der TU Dresden gestern und heute 292

Angela Schmidt
Die eingeschlichenen Fehler 320

Manfred Curbach
Habilitation / Promotionen 326

Ulrich van Stipriaan (Fotos)
Institut für Massivbau | Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter 330

Teil II
Weitere Beiträge

Viktor Mechtcherine

Hochduktiler Beton – eine Konkurrenz zu Textilbeton?

Prof. Dr.-Ing.
Viktor Mechtcherine

Institut für Baustoffe,
TU Dresden

1 Einführung

Die im Titel dieses Aufsatzes gestellte Frage ist mit einem klaren Jain zu beantworten. Und zwar im gleichen Sinne, wie die Frage nach einer Konkurrenz zwischen, sagen wir, Leberwurst und Salami zu beantworten wäre. Ja, sie sind Nachbarn auf der Fleischertheke oder im Supermarktregal und konkurrieren dort formal um die Gunst von Nichtvegetariern. Und nein, denn die Unterschiede in den Eigenschaften sind nicht zu übersehen und nicht zu überschmecken: selbst ein kulinarischer Laie wird mangels Salami nicht versuchen, eine Pizza mit Leberwurst zu belegen (bzw. zu beschmieren). Selbstverständlich ließe sich eine passende Analogie auch im vegetarischen oder sogar veganen Bereich finden, dafür fehlt dem Autor dieser Zeilen jedoch die notwendige Kompetenz. Dagegen kennt er sich mit den beiden im Titel aufgeführten Betonarten – dehnungsverfestigender Kurzfaserbeton (einfachere, aber auch zutreffende Bezeichnung: hochduktiler Beton) und Textilbeton – aus und hat sie mehr als einmal in seinen Aufsätzen und Vorträgen gemeinsam behandelt, z. B. [1], [2], meist als zwei ausgezeichnete Beispiele für Fortschritte in Entwicklung, Erforschung und Anwendung von neuen faserverstärkten Hochleistungsbetonen.

Wer bewusst die Wahl einer dieser Betonarten für eine bestimmte Anwendung treffen will, muss viele Informationen haben und damit auch noch umgehen können, denn es geht hier um recht komplexe Systeme, deren einzelne Parameter je nach dem Anwendungsfall in Bezug auf einzelne Anforderungen sowohl negativ als auch positiv zu Buche schlagen können. Keine einfache Aufgabe, insbesondere in Anbetracht verhältnismäßig geringer Erfahrungen mit den neuen Baustoffen. Der Autor

hat sich fest vorgenommen, bis zu seinem nächsten runden Geburtstag einen Versuch zu unternehmen, eine schlüssige vergleichende Abhandlung beider Materialsysteme zu erstellen. In der aktuellen Abhandlung, die zu Ehren des hoch geschätzten Herrn Kollegen Manfred Curbach und anlässlich seines runden Geburtstags verfasst ist, beschränkt sich der Verfasser bewusst auf die Erwähnung des Textilbetons im Titel und in dieser Einleitung. Dafür will ich mich voll und ganz auf eine Überblicksdarstellung von hochduktilem Beton konzentrieren, in (hoffentlich) weiser Voraussicht, dass es mehr als einen Aufsatz in diesem Band geben wird, der sich dem Thema Textilbeton widmet. So überlasse ich den Vergleich und die Schlussfolgerungen dem verehrten Leser. Dem Jubilar und lieben Kollegen Manfred Curbach danke ich ganz herzlich für die sehr intensive, angenehme und überaus fruchtbare Zusammenarbeit und freue mich sehr auf deren Fortsetzung. Ich wünsche Dir, lieber Manfred, weiterhin viel Freude an der Forschung und noch weitere große Erfolge!

2 Kann Beton duktil sein?

Zementgebundene Werkstoffe zeigen üblicherweise ein nahezu sprödes Materialverhalten. Mit dem Erreichen der Festigkeit versagt das Material durch Ausbildung von makroskopischen Trennrissen. Die Kurzfaserzugabe ist die effektivste Maßnahme zur Steigerung der Duktilität des Betons. Bei einer richtigen Faserwahl können diese eine rissüberbrückende Wirkung entfalten und dadurch die Sprödigkeit des zementgebundenen Materialverbundes deutlich verringern oder gar ein quasi-duktiles Verhalten herbeiführen. Typische Fasermaterialien für zementgebundene Werkstoffe sind Stahl, Carbon, AR-Glas sowie eine breite Palette an synthetischen Polymerfasern wie PAN, PE, PP, PVA etc.

Eine deutliche Steigerung der Duktilität des Werkstoffs Beton wirkt sich sehr positiv auf die Tragfähigkeit der Konstruktion bei statischer Beanspruchung aus. Als wesentliche Mechanismen sind hier Kräfteumlagerung und Spannungsumverteilung zu

Bild 1
Repräsentative Fasermaterialien für zementgebundene Werkstoffe, von oben links im Urzeigesinn: Basalt, PVA, PBO, Carbon, HDPE, Stahl
(Foto: Christof Schröfl)

nennen. Des Weiteren führt die Steigerung der Duktilität durch Vorankündigung des Versagens zu mehr Sicherheit. Noch deutlicher sind die Vorteile eines duktileren Betons im Falle einer stoßartigen Beanspruchung aufgrund einer hohen Verformungsfähigkeit und Energieabsorption. Ein weiterer Aspekt ist die Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Risse im Beton führen zu einem schnelleren Transport von Flüssigkeiten und Gasen, die sowohl die Stahlbewehrung als auch den Beton selbst angreifen. Die Duktilität des Betons führt zur Beschränkung der Rissbreiten infolge Zwangs- und Eigenspannungen sowie äußerer Kräfte. Als Folge wird das Eindringen von korrosiven Medien reduziert und die Dauerhaftigkeit der Beton- und Stahlbetonbauwerke verbessert.

Konventioneller Faserbeton weist im Vergleich zu unbewehrtem Beton in der Regel keine höhere Bruchdehnung, sondern lediglich ein gutmütigeres Entfestigungsverhalten auf und kann nicht als duktiler Werkstoff bezeichnet werden. Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung weisen dagegen unter Zugbeanspruchung eine Verfestigung auf und besitzen eine im Vergleich zu gebräuchlichen Faserbetonen mehr als einhundertmal höhere Bruchdehnung.

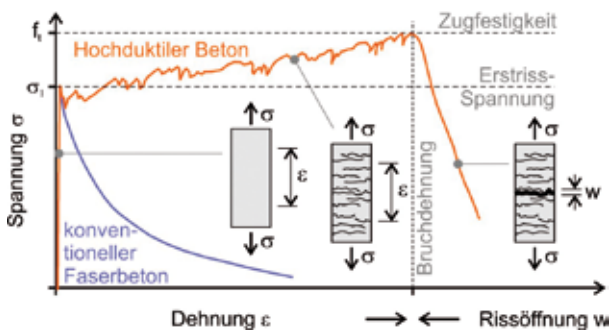


Bild 2 Typische Spannungs-Dehnungsbeziehung von konventionellem Faserbeton und hochduktilem Beton sowie Rissbilder von hochduktilem Beton (Grafik: Marko Butler)

Die ersten Arbeiten zum Thema hochduktiler Beton mit einem relativ geringen Gehalt an kurzen Kunststofffasern wurden von Li [3] veröffentlicht, der diese neue Werkstoffgruppe als *Engineered Cementitious Composites* (ECC) bezeichnete. International hat sich in den vergangenen Jahren der Begriff *Strain-Hardening Cement-based Composites* (SHCC) etabliert [4]. Da sich diese Bezeichnung nur sehr umständlich ins Deutsche übersetzen lässt, wird hier der einfachere, im deutschsprachigen Raum inzwischen geläufige Name „hochduktiler Beton" verwendet [5].

Im vorliegenden Aufsatz wird ein Überblick über die Konzeption, charakteristische Eigenschaften und erste Anwendungen dieses neuen Werkstoffes gegeben. Die Grundlage bilden dabei die am Institut für Baustoffe der TU Dresden durchgeführten Arbeiten der vergangenen Jahre. Des Weiteren wird auf eine vorangegangene Überblickspublikation in der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau verwiesen [6].

3 Werkstoffentwicklung

3.1 Baustoffliche Grundlagen

Eine rein empirische Vorgehensweise ist bei der Entwicklung hochduktiler Betone – aufgrund der großen Anzahl relevanter Variationsparameter – nicht zielführend. Vielmehr wird eine durchgehende Modellierung des Werkstoffes von der Makroebene über die Meso- bis zur Mikroebene benötigt [3], [7].

Auf der Makroebene werden Werkstoffe als homogen angesehen. Auf dieser Ebene, auf der Ingenieure üblicherweise arbeiten, kann Beton als duktil bezeichnet werden, wenn sich nach Bildung des ersten Risses keine Entfestigung einstellt, sondern eine Zunahme der Verformung bei gleichbleibender oder zunehmender Spannung erfolgt (engl.: *strain hardening*), siehe Bild 2. Hierzu müssen die Fasern in der Erstrissebene die einwirkende Spannung σ_1 vollständig übernehmen und eine weitere Steigerung der Beanspruchung und hiermit multiple Rissbildung ermöglichen. Diese multiple Rissbildung setzt sich fort, bis die rissüberbrückende Wirkung der Fasern in einer der Rissebenen erschöpft ist. Damit wird die Zugfestigkeit f_t des Betons erreicht und es tritt eine Lokalisierung des Versagens ein (Bild 2).

Um rissüberbrückende Mechanismen wirkungsvoll zu aktivieren, müssen die Fasern einen hinreichend hohen E-Modul und eine hohe Zugfestigkeit aufweisen. Der Durchmesser und die Länge der Fasern müssen den Größenverhältnissen der Strukturebene angepasst sein, auf der die Rissüberbrückung stattfinden soll. Dabei kann eine aktive Rissüberbrückung nur dann erfolgen, wenn ein hinreichend starker Verbund zwischen Matrix und Fasern vorhanden ist.

Auf der Mesoebene (Betrachtung der einzelnen Rissebenen) bildet ein stabiles Wachstum jedes einzelnen Risses die Voraussetzung für die Duktilität des Verbundwerkstoffes. Dazu sind die Wirkung der Fasern und die Zugfestigkeit bzw. Bruchzähigkeit der Matrix aufeinander abzustimmen.

Für das stabile Risswachstum auf der Mesoebene und damit ein duktiles Materialverhalten ist eine Aktivierung einer hohen Anzahl von den Riss kreuzenden Einzelfasern erforderlich. Bei Zugbelastung findet – beginnend von der Rissebene in der Matrix – zunächst eine partielle Ablösung der Fasermantelfläche von der Matrix statt [8], [9]. Der abgelöste Abschnitt der Faser erfährt eine Zugdehnung, deren Betrag von der Länge dieses Abschnittes und der durch den Faserschlupf in der Interphase aktivierten Scherspannungen abhängt und die sich in einer zunehmenden Rissöffnung manifestiert. Eine Steigerung der durch die Fasern übertragbaren Zugkraft ist in diesem Stadium möglich, was letztendlich zur Bildung neuer Risse und zu einer Dehnungsverfestigung auf Makroebene führt. Verlieren viele der Fasern in einem Riss ihre Veranke-

rung in der Matrix und werden ausgezogen, kommt es in diesem betroffenen Riss zur Lokalisierung des Versagens.

3.2 Zusammensetzung

Die beste Eignung zur Steigerung der Duktilität des normalfesten Betons wiesen bisher mit öligen Substanzen beschlichtete Polyvinylalkoholmikrofasern (PVA) auf. Für hoch- und ultrahochfeste Matrices empfehlen sich hochmodulige Polyethylenmikrofasern (HDPE) oder Poly(p-phenylen-2,6-benzobisoxazol)fasern (PBO). Damit sich die Wirkung der Fasern voll entfalten kann, müssen sie sehr gleichmäßig in der Matrix verteilt sein. Dies ist durch Optimierung der rheologischen Eigenschaften der Matrix im Frischzustand und durch die geeignete Gestaltung des Mischvorgangs zu erreichen. Auch eine deutliche Reduktion des Größtkorns wirkt sich positiv auf die Gleichmäßigkeit der Faserverteilung über das Matrixvolumen aus.

Tabelle 1 gibt zwei Beispiele für die Zusammensetzung von hochduktilem Beton mit normaler (37 N/mm²) und sehr hoher (140 N/mm²) Würfeldruckfestigkeit. Bei normalfestem hochduktilem Beton (hier Kurzbezeichnung NF) besteht der Binder aus einer Kombination aus Portlandzement 42,5 R und Flugasche (FA). Als Gesteinskörnung fand bei dieser Mischung NF Quarzsand der Körnung 0,06–0,20 mm Verwendung. Des Weiteren wurden 2,25 Vol.-% PVA-Fasern mit einer Länge von 12 mm und einem Durchmesser von 40 µm zugegeben [10]. Zur Einstellung der rheologischen Eigenschaften wurden der Mischung Fließmittel (FM) und Stabilisierer (ST) zugesetzt. Das Bindemittel in der hochfesten Mischung (HF) besteht aus Portlandzement CEM I 52,5 R-HS und Silikastaub (SF). Neben dem Quarzsand 0,06/0,20 wurden 2 Vol.-% HDPE-Fasern mit einer Länge von 12 mm und einem Durchmesser von 20 µm eingesetzt [11].

4 Mechanische Eigenschaften, Verformungs- und Bruchverhalten

Das Verhalten von hochduktilem Beton unter Druckbeanspruchung unterscheidet sich nicht prinzipiell von dem konventioneller Faserbetone und kann daher im Allgemeinen anhand gängiger Druckprüfungen ermittelt werden. Beispielsweise betrugen die

Beton	**Zement**	**FA/SF**	**Quarzsand**	**Wasser**	**FM**	**ST**	**Faser**
NF	320	750 (FA)	535	335	16,1	3,2	29,3 (PVA)
HF	1533	307 (SF)	153	295	22,5	-	20,0 (HDPE) *oder* 31,0 (PBO)

Tabelle 1: Zusammensetzung hochduktiler Betone (Beispiele)

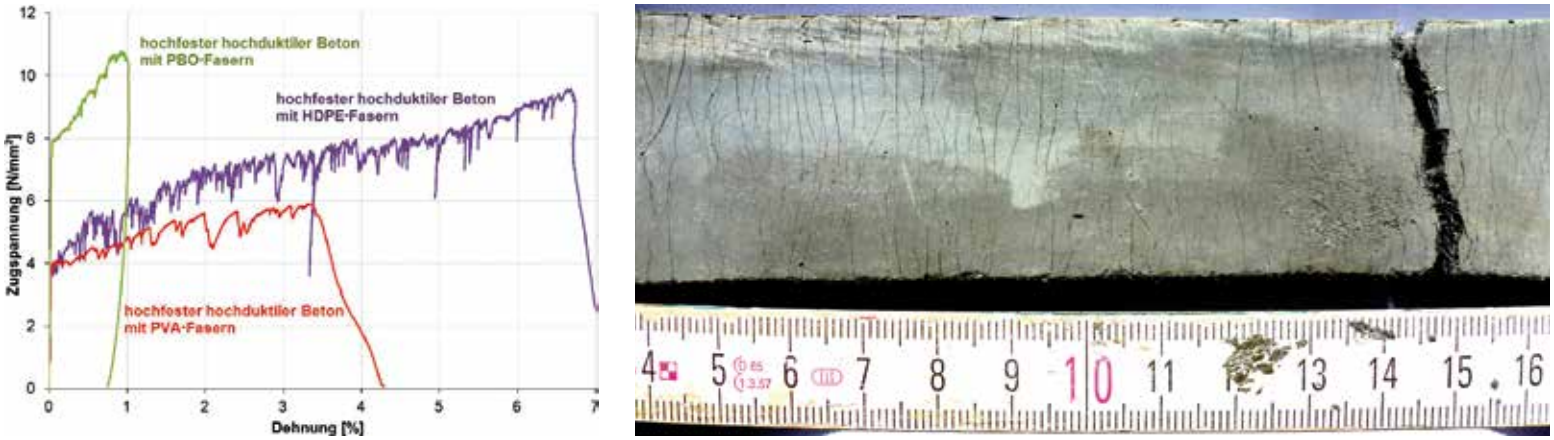


Bild 3 Typische Spannungs-Dehnungsbeziehung von normalfestem und hochfestem hochduktilem Beton unter Zugbeanspruchung sowie charakteristisches Rissbild von hochduktilem Beton beim Erreichen der Bruchdehnung (Grafik und Foto: Iurie Curosu)

Druckfestigkeit des Betons NF im Alter von 28 Tagen 37 N/mm², der E-Modul ca. 16.000 N/mm² und die Bruchdehnung 0,67 %.

4.1 Verhalten unter einachsiger monotoner Zugbeanspruchung

Die wichtigste und entscheidende Eigenschaft hochduktiler Betone ist eine Dehnungsverfestigung unter einaxialer Zugbeanspruchung, begleitet von einer multiplen Rissbildung und hierdurch bedingten großen nichtelastischen Verformungen. Bild 3 zeigt typische Spannungs-Dehnungskurven aus solchen Versuchen für die in Tabelle 1 angegebenen Betonzusammensetzungen. Nach der Erstrissbildung auf dem Niveau der Zugfestigkeit eines herkömmlichen normalfesten Betons erfolgt eine Verfestigung des Werkstoffes. Die leichten Sprünge der Kurven markieren die Bildung von neuen, mehr oder minder parallel zueinander verlaufenden Rissen. Das Foto in Bild 3 zeigt ein typisches Rissbild kurz vor dem Erreichen der Bruchdehnung.

4.2 Verhalten unter zyklischer Zugbeanspruchung

Jun und Mechtcherine [10] führten eine Reihe verformungs- und lastgesteuerter zyklischer Zugversuche durch. Die unter verformungsgesteuerter zyklischer Belastung ermittelte Zugfestigkeit war etwas kleiner als der entsprechende Wert aus den

Versuchen mit monotoner Belastung. Bei Anwendung einer relativ geringen Anzahl von Lastzyklen (wenige Dutzend) unterschied sich die Bruchdehnung bei zyklischer Beanspruchung nicht von der bei monotoner Belastung. Die mittlere Anzahl der Lastzyklen in den kraftgesteuerten Versuchen war zwar etwas größer (ca. 2.000) als bei den verformungsgesteuerten Versuchen, es konnte aber auch hier kein Unterschied zur Bruchdehnung unter monotoner Belastung festgestellt werden. Die definierten Oberspannungen in den kraftgesteuerten Zugversuchen lagen deutlich unter der Zugfestigkeit des Materials.

In den laufenden Untersuchungen an der TU Dresden wird das Verhalten von angerissenem hochduktilem Beton unter hochzyklischer Wechselbeanspruchung Zug-Druck untersucht. Die ersten Ergebnisse zeigten, dass mit zunehmender Lastwechselzahl sowohl die Zugfestigkeit als auch die Bruchdehnung deutlich abnahmen [12]. Außerdem konnte eine Verringerung der Rissanzahl beobachtet werden. Als Ursache dafür wurde die Schädigung der Fasern und der Kontaktzone im Rissbereich identifiziert, siehe Bild 4.

4.3 Verhalten unter stoßartiger Beanspruchung

Wie sich eine zunehmende Belastungsgeschwindigkeit auf die bei statischer Belastung nachgewiesenen positiven Eigenschaften (hohe Bruch-

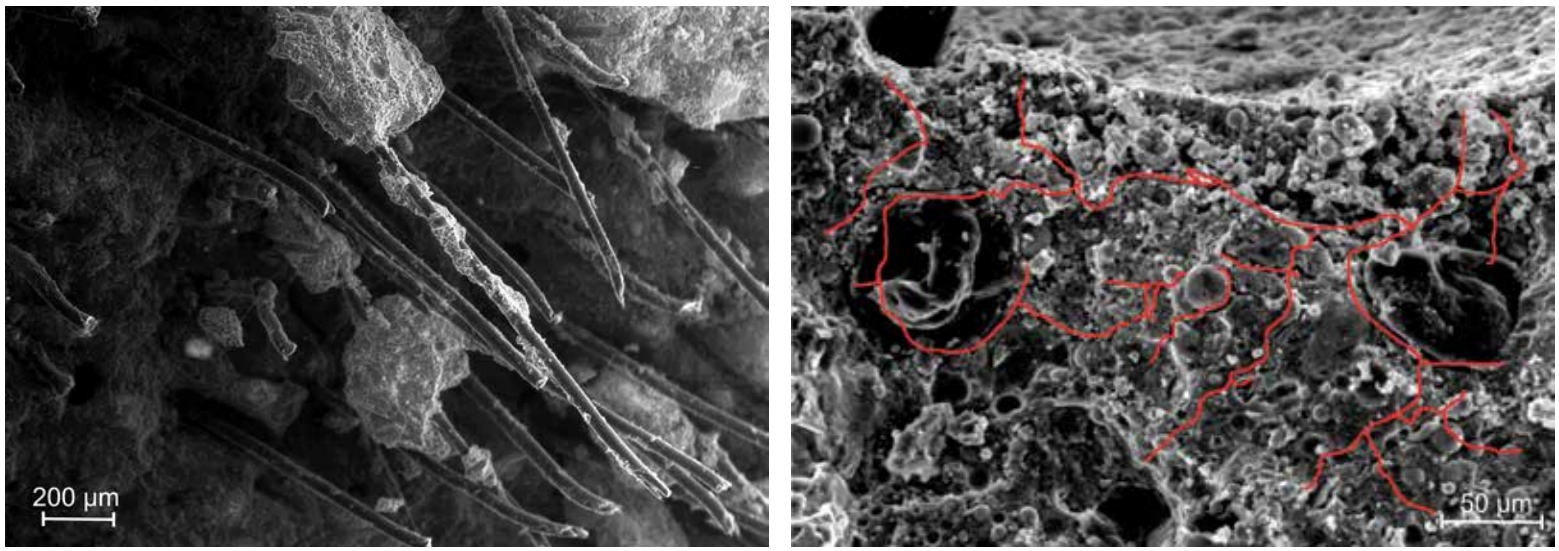


Bild 4
Bruchflächen von Prüfkörpern aus SHCC, links mit wenigen Zug-Druck-Belastungszyklen vor dem Versagen und rechts nach hoher Anzahl der Belastungszyklen, rot gekennzeichnet sind Risse in der SHCC-Matrix.
(Fotos: Steffen Müller)

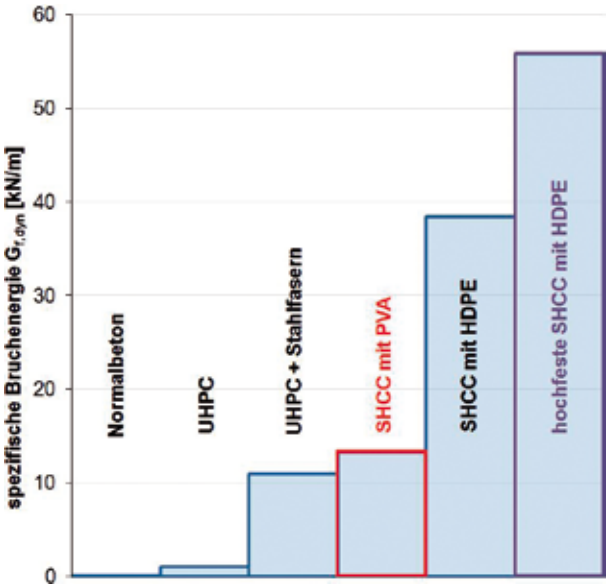
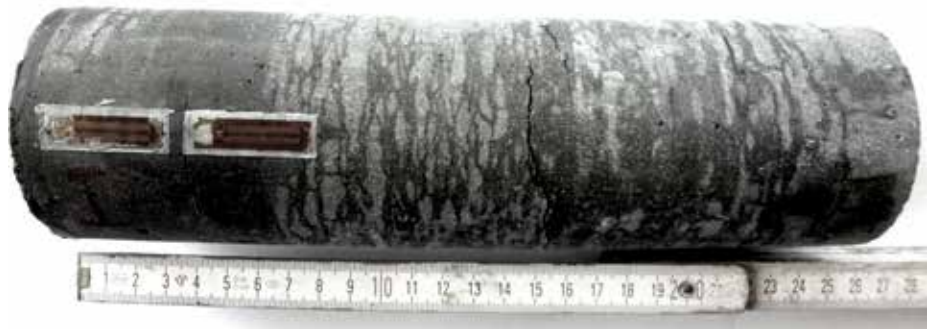


Bild 5
Spezifische Bruchenergie unterschiedlicher Betone aus den Versuchen im Hopkinson-Bar: normalfester Beton (NB), UHPC ohne Fasern, UHPC mit 2,5 % Stahlfasern (l/d = 9 mm/0,15 mm), normalfester SHCC mit PVA-Fasern, normalfester SHCC mit HDPE-Fasern und hochfester SHCC mit HDPE-Fasern [11]

dehnung, feine Rissverteilung, hohe Bruchenergie) von SHCC auswirkt, wurde von Mechtcherine et al. [13], [14], [15] erforscht. Sie untersuchten das Materialverhalten von SHCC mit PVA-Fasern bei hochdynamischer Belastung (Verzerrungsraten bis 150 s^{-1}). Mit zunehmender Dehnrate wurden zunächst eine Steigerung der Zugfestigkeit und eine Abnahme der Bruchdehnung bzw. multiplen Rissbildung gemessen. Ab Dehnraten von ca. 1 s^{-1} nahm jedoch die Bruchenergie durch die Änderung des Versagensmodus zu [13].

Curosu et al. [11] untersuchten die Bedeutung des Faser-Matrix-Verbundes hinsichtlich des Verhaltens von SHCC unter höheren Verzerrungsraten anhand zweier verschiedener SHCC mit hydrophoben Hochleistungspolymerfasern (HDPE). Die analysierten SHCC wiesen auch unter Impaktbelastungen eine sehr hohe Duktilität und eine hervorragende Energiedissipation auf. Die spezifische Bruchenergie des SHCC betrug je nach Mischungszusammensetzung das 300- bis 500fache der Werte für herkömmlichen Beton und mindestens das 3fache im Vergleich zum in [13] und [15] beschriebenen SHCC mit hydrophilen PVA-Fasern, siehe Bild 5. Die Steigerung der gesamten Bruchenergie (*work-to-fracture*) unter Berücksichtigung der multiplen Rissbildung in ungekerbten SHCC-Proben (siehe Bild 6) dürfte noch deutlich hö-

Bild 6
Multiple Rissbildung einer SHCC-Probe nach einem Zugversuch am Hopkinson-Bar [11]



her liegen. Es fehlt jedoch bisher die Methodik, um diesen Kennwert zu ermitteln.

4.4 Einfluss der Stahlbewehrung und *size effect*

Der alleinige Einsatz von Fasern als Bewehrung ist im konstruktiven Ingenieurbau bislang auf wenige Anwendungsgebiete beschränkt, sodass in vielen tragenden Bauteilen eine Kombination von hochduktilem Beton und konventioneller Stahlbewehrung erforderlich wird. Das Zusammenwirken beider Bewehrungsarten soll ein günstiges Trag- und Verformungsverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen herbeiführen. Die rissüberbrückende Wirkung der Fasern führt dabei zu einer deutlichen Steigerung der Tragfähigkeit und hat durch die geringen Verformungen im Zustand II einen günstigen Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit. Des Weiteren werden durch das Zusammenwirken von Fasern und Stahlbewehrung die Rissbreiten deutlich reduziert und dadurch eine wesentliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit erzielt. Um diese Zusammenhänge im bauwerkrelevanten Maßstab nachzuweisen und zu analysieren, wurden am Institut für Baustoffe der TU Dresden einaxiale Bauteilzugversuche durchgeführt, auf deren Basis das globale und lokale Zugtragverhalten der großformatigen Verbundkörper beschrieben werden kann [16]. Die Bauteile hatten eine Länge von 3 m, eine Breite von 1 m und eine Höhe von 0,24 m, siehe auch Bild 7.

Bild 7
Versuchsstand für die großformatigen einaxialen Zugversuche im Otto-Mohr-Laboratorium
(Foto: Eric Mündecke)

Bild 8 zeigt das Spannungs-Dehnungsverhalten der zweilagig bewehrten Bauteile im Vergleich zu den rechnerisch ermittelten Werten für die entsprechende Stahlbewehrung (ohne Berücksichtigung von Beton). Daraus lassen sich drei Bereiche für das Spannungs-Dehnungs- bzw. Kraft-Verformungsverhalten von stahlbewehrten Scheiben aus hochduktilem Beton ableiten [16]. Im ersten Bereich verbleibt der Querschnitt im Zustand I, wobei die Kraft mit zunehmender Dehnung linear bis zum Erreichen der Erstrissbildung ansteigt. Diese setzt bei einer Dehnung von ungefähr 0,01 bis 0,02 % ein, wobei die Erstrissspannung im Bauteil zwischen 1,5 und 2,0 N/mm² variiert. Diese relativ geringen Werte sind auf die Abnahme der Zugfestigkeit des

Dehnelements aus hochduktilem Beton durch Maßstabs- bzw. Größeneffekte zurückzuführen.

Im zweiten Bereich geht der Dehnkörper in den Zustand II über, was durch eine multiple Rissbildung im hochduktilen Beton gekennzeichnet ist. Dabei gleicht sich der Anstieg der Dehnungskurve an die Steifigkeit der Stahlbewehrung an. Die Steifigkeit des gesamten Bauteils wird dabei kleiner, während die Betonzugkraft konstant bleibt. Das Letztere ist auf die rissüberbrückende Wirkung der Fasern zurückzuführen, die auch während der fortschreitenden Rissbildung in der Lage sind, Zugspannungen zu übertragen. Dabei konnte eine feine Verteilung der Risse auf der Bauteiloberfläche mit einer durchschnittlichen Rissweite von 50 µm gemessen werden [17]. Dieses quasi-elastische Verhalten, in dem sich die elastische Dehnung des Stahls mit der quasi-plastischen Dehnung des Betons überlagert, setzt sich bis zum Erreichen der Fließgrenze des Stahls fort. Diese liegt bei einer Dehnung von ca. 0,3 % und markiert die erreichte Höchstkraft. Mit dem Erreichen der Höchstkraft setzt die Lokalisierung des Versagens durch die Öffnung eines einzigen Risses ein, der die geringste Zugkraft übertragen kann. Das Nachrissverhalten zeigt eine Entfestigung bis zur Fließgrenze des Stahls.

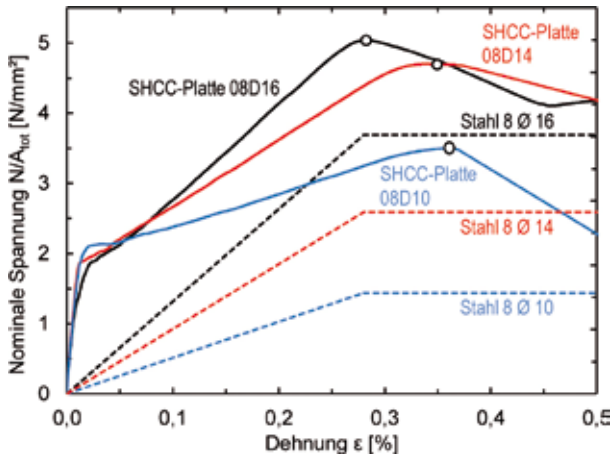


Bild 8 Spannungs-Dehnungsverhalten der zweilagig bewehrten Bauteile aus hochduktilem Beton; durchgezogene Linien: Versuchswerte, gestrichelte Linien: bekannte Spannungs-Dehnungsbeziehungen für den Bewehrungsstahl (hier bilinear approximiert), nach [16]

5 Dauerhaftigkeit

Der Sachstandbericht des RILEM-Komitees 208-HSC [18] liefert eine umfassende und detailliertere Darstellung des Sachstandes bezüglich der Dauerhaftigkeit von SHCC. Der derzeit in der Schlussphase der Vorbereitung befindliche neue Bericht des RILEM-Komitees 240-FDS wird ergänzende Informationen beinhalten. Des Weiteren wird auf die Literaturstellen [19] und [20] verwiesen. Insbesondere ist hier die positive Wirkung der geringeren Rissbreiten in hochduktilem Beton im Vergleich zu herkömmlichem Beton hervorzuheben, die zur Reduktion des Eindringens von korrosiven Medien und damit zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit der Beton- und Stahlbetonbauwerke führt. Außerdem weisen die feinen Risse ein ausgesprochenes Selbstheilungsvermögen auf.

Die erfolgreiche Anwendung jedes neuen Baustoffes, und dies bezieht sich in vollem Maße

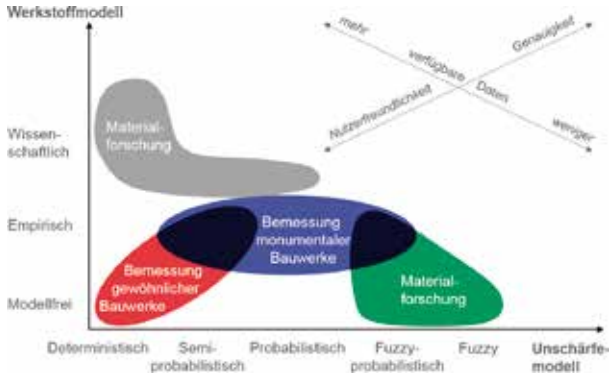


Bild 9
Kombinationen von Schädigungs- und Unschärfemodellen als Basis der Dauerhaftigkeitsbemessung, nach [20]

auch auf hochduktilen Beton, ist jedoch erst dann gesichert, wenn ein gut begründetes Dauerhaftigkeitskonzept vorliegt, welches eine hohe Ausnutzung des Materialwiderstandes ermöglicht und gleichzeitig die Schadensgefahr gering hält. Geringe Erfahrung mit einem neuen Baustoff und eine meist sehr eingeschränkte Datenbasis erfordern neue Herangehensweisen bei der Vorhersage der Dauerhaftigkeit, vgl. Bild 9. Da für den neuen Baustoff keine ausreichenden Daten zur Aufstellung von rein probabilistischen Nachweiskonzepten vorliegen, muss der probabilistische Ansatz mit erweiterten Unschärfemodellen kombiniert werden [20]. Ein solches Dauerhaftigkeitskonzept ermöglicht unter anderem auch die Einbindung von Expertenwissen, welches sich nicht in Zahlen fassen lässt. Auf der Grundlage von nur wenigen Daten gelingt die Vorhersage einer Bandbreite möglicher Lebensdauern eines Bauwerkes. Dies wurde exemplarisch bereits für chloridbeaufschlagte stahlbewehrte Bauteile aus hochduktilem Beton demonstriert [21], [22]. Außerdem ermöglichen fuzzy-probabilistische Analysen eine gezielte Planung von experimentellen Untersuchungen, die eine Zuschärfung der Daten für maßgebliche Einflussparameter herbeiführen.

6 Anwendungen

Die Anwendungen von hochduktilem Beton sind aufgrund der Neuheit dieses Werkstoffes noch rar. Die im Folgenden dargestellten Beispiele sollen jedoch einige wichtige Einsatzgebiete bzw. auch das mögliche Anwendungsspektrum aufzeigen.

6.1 Ingenieurbau

Die Verwendung hochduktiler Betone führt zu einer deutlich höheren Tragfähigkeit und Sicherheit von Betonbauwerken, insbesondere bei stoßartiger Belastung. In hoch beanspruchten Bereichen von Stahlbetonkonstruktionen könnten Bauelemente aus hochduktilem Beton für ein hohes Verformungsvermögen bzw. eine hohe Energieabsorption sorgen. Diese Idee wurde vor kurzem in Japan an zwei Stahlbetonhochbauten in Tokio und Yokohama umgesetzt. Die Kupplungselemente aus mit Stabstahl bewehrtem hochduktilem Beton werden zwischen schubsteifen Wandelementen angeordnet und wirken im Falle eines Erdbebens als Energieabsorber [23].

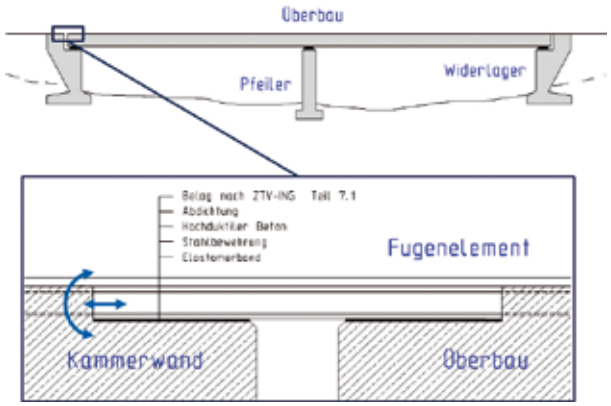


Bild 10 Schematische Darstellung der Anwendung von hochduktilem Beton für fugenlose Konstruktionen im Brückenbau

(Grafik: Eric Mündecke)

An der TU Dresden werden in einem laufenden Forschungsvorhaben stahlbewehrte Bauteile aus hochduktilem Beton für fugenlose Konstruktionen im Brückenbau untersucht [16], siehe Bild 10. Durch den Einsatz des neuen Werkstoffes im Bereich von Fahrbahnübergängen können seine besonderen Materialeigenschaften für eine effiziente und dauerhafte Bauweise genutzt werden. Die dazu gehörenden Zugversuche an großformatigen Betonscheiben mit unterschiedlichen Bewehrungskonfigurationen wurden in Abschnitt 4.4 vorgestellt.

6.2 Instandsetzung und Verstärkung von Bauwerken

Der Einsatz hochduktiler Betone für die Instandsetzung bzw. Verstärkung von Bauwerken erscheint besonders vielversprechend. Bild 11 zeigt, dass sich die im Altbeton vorliegenden groben Risse durch hochduktilen Beton in eine große Anzahl sehr feiner, unschädlicher und sich bei hinreichendem Feuchteangebot komplett selbstheilender Risse aufteilen.

Bild 11 Rissentwicklung in einer Reparatur- bzw. Verstärkungsschicht aus hochduktilem Beton auf einem gerissenen Stahlbetonuntergrund

(Fotos: Iurie Curosu)

Das an der TU Dresden entwickelte Material wurde im Sommer 2011 erfolgreich für die Ertüchtigung eines Teils des Oberbeckens des Pumpspeicherkraftwerks Hohenwarte II in Thüringen eingesetzt. Es ging in diesem Projekt darum, die Dichtheit der Betonwände dauerhaft wiederherzustellen, was durch die Reprofilierung der abgewitterten Betonoberfläche und die damit einhergehende Schließung der Risse und undichten Fugen erzielt wurde. Der hochduktile Beton wurde – je nach Untergrundunebenheit – in einer Dicke von ein bis fünf Zentimeter durch Nassspritzverfahren aufgebracht. Die im Sommer 2015 durchgeführte Zustandserfassung zeigte eine sehr gute Risskontrolle durch die Reparaturschicht aus hochduktilem Beton. Das Verhalten des neuen Reparatursystems wird in den nächsten Jahren weiterhin intensiv beobachtet.

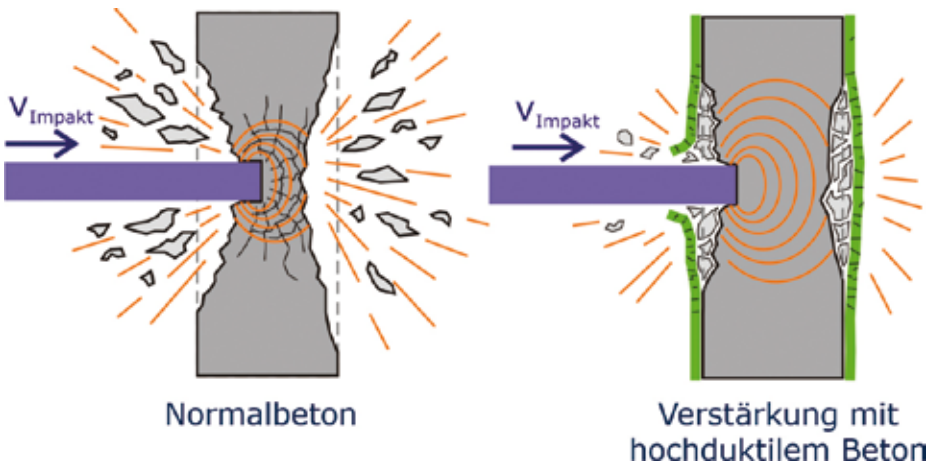


Bild 12
Impaktwiderstand eines Betonbauteils ohne (links) und mit Verstärkung (rechts) durch hochduktilen Beton
(Grafik: Marko Butler)

In Gifu (Japan) wurde eine durch AKR geschädigte Betonstützwand (18 m lang und 5 m hoch) mit einer 50–70 mm starken Schicht aus hochduktilem Beton instandgesetzt. Seit dem Ende der Reparaturmaßnahmen im April 2003 wird die Stützmauer kontinuierlich beobachtet. Nach 24 Monaten wurden in der Reparaturschicht Rissbreiten von 100 µm gemessen, während die Risse in einer mit einem konventionellen Reparaturmörtel instandgesetzten Referenzfläche 0,2 mm bzw. 0,3 mm breit waren [23]. Weitere gute Erfahrungen wurden in Japan bei der Sanierung von Aquädukten gesammelt [23]. In den USA wurden zwei Brückendecken mit hochduktilem Beton erfolgreich instand gesetzt [25].

In einigen Fällen könnte die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen durch hochduktilen Beton eine adäquate Lösung darstellen. In jedem Fall erscheint der Einsatz von hochduktilem Beton zur Verstärkung von Bauteilen sinnvoll, die im Hinblick auf energiereiche, stoßartige Beanspruchungen wie z. B. Erdbeben, Anprall oder Beschuss zu ertüchtigen sind, siehe Bild 12. Die Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden plant, mit der Unterstützung durch weitere Fakultäten, ein Graduiertenkolleg der DFG zum Thema „Impaktsicherheit von Baukonstruktionen durch mineralisch gebundene Komposite“ einzurichten.

Des Weiteren wurde am Institut für Baustoffe der TU Dresden ein hochduktiler Spritzbeton als

Bild 13
Einbau des hochduktilen Betons mittels Walzenfertiger (links) bzw. Asphaltfertiger (rechts) (Fotos: Steffen Müller)

Verstärkungsmaterial für Mauerwerk entwickelt und erprobt. Die ersten Ergebnisse aus Schubversuchen an Mauerwerkelementen zeigen eine sehr deutliche Zunahme der Schubfestigkeit, des Verformungsvermögens und der Bruchenergie als Folge der Verstärkung mit einer 10 mm dicken Schicht aus hochduktilem Beton [1].

6.3 Betonfertigteile

Ein weiteres mögliches Anwendungsgebiet ist die Herstellung von dünnwandigen Bauteilen (Fassadenelemente, Rohre, integrierte Schalungen etc.), bei denen eine konventionelle Bewehrung wenig wirksam und gegen Korrosion nicht hinreichend geschützt ist.

6.4 Straßenbelag

Im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Straßenbau (BASt) finanzierten FuE-Projektes wurde an der TU Dresden das Potential des hochduktilen Betons als Straßenbaustoff im Hinblick auf eine fugenlose Bauweise sowie auf die Verringerung der Dicke der Befestigungsschicht untersucht [23]. Nach erfolgreichen großmaßstäblichen Laborversuchen wurden in einem sich anschließenden Feldversuch auf einer 100 m langen und 3 m breiten Demonstrationsfläche Befestigungen mit einer Plattendicke von 15 cm eingebaut, siehe Bild 13. Hochduktiler Beton wurde hierbei mit einem 3-Kubikmeter-Freifallmischer hergestellt. Der mit verschiedenen Einbautechniken gefertigte Demonstrator zeigt, dass

sich SHCC in der Praxis produzieren und einbauen lässt. Nach einjähriger Liegezeit sind trotz Schwerverkehrsbelastung noch keine Schäden erkennbar. Die bisherigen Ergebnisse lassen erwarten, dass unter Verwendung von SHCC eine fugenlose Betonbauweise für den Straßenbau erfolgreich realisiert werden kann.

7 Zusammenfassung

Die Duktilität des Betons hat einen ausgeprägten positiven Einfluss auf die Trag- und Gebrauchsfähigkeit von Betonkonstruktionen sowohl bei statischer als auch bei dynamischer Beanspruchung. Auf der Basis mehrskaliger Modellierungsansätze können hochduktile Betone gezielt entwickelt und optimiert werden. Diese weisen bei einem Kunststofffasergehalt von ca. 2 Vol.-% unter Zugbeanspruchung ein ausgeprägtes Verfestigungsverhalten und eine Bruchdehnung von ca. 2 bis 7 % auf.

Das Verhalten von hochduktilem Beton unter Druckbeanspruchung unterscheidet sich nicht prinzipiell von dem konventioneller Faserbetone und kann daher im Allgemeinen anhand gängiger Druckprüfungen ermittelt werden. Für die Erfassung des charakteristischen Verhaltens hochduktiler Betone unter Zugbeanspruchung erwiesen sich die Zugversuche an ungekerbten, taillierten Prüfkörpern mit unverdrehbaren Lasteinleitungsplatten als am besten geeignet. Für die Bemessung und Schnittgrößenermittlung kann das Materialverhalten unter monotoner Belastung mit bi-linearen stoffgesetzlichen Beziehungen beschrieben werden.

Erste Ergebnisse zum hochzyklischen Ermüdungsverhalten von hochduktilem Beton zeigten, dass seine Zugfestigkeit und Bruchdehnung im Vergleich zu der statischen, monotonen Belastung reduziert werden. Mit steigender Verzerrungsrate nehmen die Bruchenergie und die Bruchdehnung von hochduktilem Beton bei Dehnungsraten $< 1\ s^{-1}$ ab, während die Zugfestigkeit zunimmt. Das Versagen wird spröder. Bei höheren, hochdynamischen Belastungen nehmen die Bruchenergie und die Bruchdehnung wieder deutlich zu. Eine besonders starke Zunahme ist aber für die Zugfestigkeit zu verzeichnen.

Die Dauerhaftigkeit hochduktiler Betone bzw. der Schutz der Stahlbewehrung durch hochduktilen Beton werden maßgeblich durch die spezifische multiple Rissbildung mit kleinen Rissbreiten beeinflusst. Hochduktiler Beton weist einen deutlich höheren Widerstand gegenüber dem Eindringen korrosiver Medien auf als gerissener herkömmlicher Beton. Die adäquaten Konzepte zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Bauteilen aus hochduktilem Beton sind noch zu entwickeln.

Die genannten Anwendungsbeispiele demonstrieren das große Potential hochduktilen Betons. Aufgrund des vorteilhaften, leicht beschreibbaren Spannungs-Dehnungsverhaltens könnte die Ver-

wendung dieser Betonart sowohl den Neubau als auch die Instandsetzung von Betonbauwerken in speziellen Anwendungsgebieten revolutionieren.

Literatur

[1] Mechtcherine, V.: Novel cement-based composites for the strengthening and repair of concrete structures. Construction and Building Materials 41 (2013) 365–373

[2] Mechtcherine, V.: Towards a durability framework for structural elements and structures made of or strengthened with high-performance fibre-reinforced composites. Construction and Building Materials 31 (2012) 94–104

[3] Li, V. C.: From micromechanics to structural engineering – The design of cementitious composites for civil engineering applications. JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering 10 (1993) 37–48

[4] Toledo Filho, R. D.; Silva, F. A.; Koenders, E. A. B.; Fairbairn, E. M. R. (eds.): Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2-Rio) – RILEM Proceedings PRO 81, 12.–14.12.2011 in Rio de Janeiro (Brazil), Bagneux: RILEM Publications S.A.R.L., 2011

[5] Mechtcherine, V. (Hrsg.): Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung – Entwicklung, Prüfung, Anwendung. Stuttgart: ibidem, 2005

[6] Mechtcherine, V.: Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung: Baustoffliche Grundlagen und bautechnische Anwendungen. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 1, 50–58

[7] Naaman, A. E.: Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. In: Naamann, A. E.; Reinhardt, H. W. (eds.): Proceedings pro030: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber-Reinforced Cement Composites (HPFRCC4), 16.–18.6.2003 in Ann Arbor (Michigan, USA), Bagneux: RILEM Publications, 2003, 95–104

[8] Boshoff, W. P.; Mechtcherine, V.; Van Zijl, G. P. A. G.: Characterising the Time-Dependant Behaviour on the Single Fibre Level of SHCC – Part 1: Mechanism of Fibre Pull-out Creep. Cement and Concrete Research 39 (2009) 779–786

[9] Boshoff, W. P.; Mechtcherine, V.; Van Zijl, G. P. A. G.: Characterising the Time-Dependant Behaviour on the Single Fibre Level of SHCC – Part 2: The rate-effects in Fibre Pull-out Tests. Cement and Concrete Research 39 (2009) 787–797

[10] Jun, P.; Mechtcherine, V.: Behaviour of strain-hardening cement-based composites (SHCC) under monotonic and cyclic tensile loading – Part 1: Experimental investigations. Cement and Concrete Composites 32 (2010) 801–809

[11] Curosu, I.; Mechtcherine, V.; Millon, O.: Effect of fiber properties and matrix composition on the tensile behavior of strain-hardening

cement-based composites (SHCCs) subject to impact loading. Cement and Concrete Research 82 (2016) April, 23–35

[12] Mueller, S.; Mechtcherine, V.: High-cycles fatigue of strain-hardening cement-based materials (SHCC). In: Schlangen, E.; Sierra Beltran, M. G.; Kukovic, M.; Ye, G. (Eds.): Strain Hardening Cementitious Composites – Book of Proceedings of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3), 3.–5.11.2014 in Dordrecht (The Netherlands), Bagneux: RILEM S.A.R.L. Publications, 2014, 137–144

[13] Mechtcherine, V.; Silva, F. A.; Butler, M.; Zhu, D.; Mobasher, B.; Gao, S.-L.; Mäder, E.: Behaviour of strain-hardening cement-based composites under high strain rates. Journal of Advanced Concrete Technology 9 (2011) 51–62

[14] Mechtcherine, V.; Silva, F.; Müller, S.; Jun, P.; Toledo Filho, R. D.: Coupled strain rate and temperature effects on the tensile behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) with PVA fibers. Cement and Concrete Research 42 (2012) 1417–1427

[15] Mechtcherine, V.; Millon, O.; Butler, M.; Thoma, K.: Mechanical behaviour of strain-hardening cement-based composites under impact loading. Cement and Concrete Composites 33 (2011) 1–11

[16] Mündecke, E.; Mechtcherine, V.: Untersuchung zum Tragverhalten von zugbeanspruchten Bauteilen aus hochduktilem Beton und Stahlbewehrung. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) 3, 220–227

[17] Mündecke, E.; Mechtcherine, V.: Crack development in SHCC elements reinforced with steel bars and subjected to tensile loading. In: Schlangen, E.; Sierra Beltran, M. G.; Kukovic, M.; Ye, G. (Eds.): Strain Hardening Cementitious Composites – Book of Proceedinghs of the 3rd International RILEM Conference on SHCC (SHCC3), 3.–5.11.2014 in Dordrecht (The Netherlands), Bagneux: RILEM S.A.R.L. Publications, 2014, 401–408

[18] Van Zijl, G. P. A. G.; Wittmann, F. H. (Eds.): Durability of Strain-Hardening Fibre-Reinforced Cement-Based Composites. RILEM State-of-the-Art Report 4, Springer, 2010

[19] Van Zijl, G. P. A. G.; Wittmann, W. H.; Oh, B. H.; Kabele, P.; Toledo Filho, R. D.; Fairbairn, E. M. R.; Slowik, V.; Ogawa, A.; Hoshiro, H.; Mechtcherine, V.; Altmann, F.; Lepech, M. D.: Durability of strain-hardening cement-based composites (SHCC). Materials and Structures 45 (2012) 1447–1463

[20] Altmann, F.; Mechtcherine, V.: Durability design strategies for new cementitious materials. Cement and Concrete Research 54 (2013) 114–125

[21] Altmann, F.; Sickert, J.-U.; Mechtcherine, V.; Kaliske, M.: A fuzzy-probabilistic durability concept for strain-hardening cement-based composites (SHCCs) exposed to chlorides – Part 1: Concept development. Cement and

Concrete Composites 34 (2012) 754–762
[22] Altmann, F.; Sickert, J.-U.; Mechtcherine, V.; Kaliske, M.: A fuzzy-probabilistic durability concept for strain-hardening cement-based composites (SHCC) exposed to chlorides – Part 2: Application example. Cement and Concrete Composites 34 (2012) 763–770
[23] Rokugo, H.: Applications of Strain Hardening Cementitious Composites with multiple cracks in Japan. In: Mechtcherine, V. (Hrsg.): Hochduktile Betone mit Kurzfaserbewehrung – Entwicklung, Prüfung, Anwendung. Stuttgart: ibidem, 2005, 121–133
[24] Müller, S.; Mechtcherine, V.: Use of strain-hardening cement-based composites (SHCC) as pavement material. In: Proceedings of the 9th International Symposium on Fibre Reinforced Concrete BEFIB 2016, 19.–21.9.2016 in Vancouver (Canada), zur Veröffentlichung angenommen
[25] Lepech, M. D.; Li, V. C.: Application of ECC for bridge deck link slabs. Materials and Structures 42 (2009) 1185–1195