

Zur Tragfähigkeit von Ultrahochleistungs-Faserbeton in flaschenförmigen Druckfeldern

Torsten Leutbecher, Ekkehard Fehling

Am Fachgebiet Massivbau der Universität Kassel wurde in einer Versuchsreihe das Tragverhalten von Ultrahochleistungs-Faserbeton in flaschenförmigen Druckfeldern experimentell untersucht. Flaschenförmige Druckfelder entstehen sehr häufig bei Einleitung konzentrierter Lasten. Dabei treten Querdruckspannungen unmittelbar unter der konzentrierten Last und Querzugspannungen in einer gewissen Entfernung von der Lasteinleitungsstelle auf. Sofern keine Querzugbewehrung angeordnet wird, limitiert häufig das Erreichen der Zugfestigkeit des Betons und damit Spaltrissbildung die aufnehmbare Kraft.

In filigranen Bauteilen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) wird nicht selten auf konventionelle Bewehrung verzichtet. Stattdessen übernehmen Fasern die Funktion der Bewehrung. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche zeigen, dass Fasern bereits in kleinen Dosierungen den als maßgebend identifizierten Versagensmodus „Spalten“ sehr wirkungsvoll verzögern bzw. im Anschluss den Spaltriss vernähen und sich auf diese Weise die Tragfähigkeit gegenüber vergleichbaren, faserfreien Probekörpern aus UHPC erheblich steigern lässt. Auch kann durch Faserzugabe der Bruchprozess duktiler gestaltet werden.

Neben Versuchsserien aus UHPC wurden zur Einordnung der Ergebnisse auch Probekörper aus normalfestem Beton (NSC) und faserfreiem bzw. faserverstärktem hochfesten Beton (HSC) geprüft, auf die in diesem Beitrag ebenfalls eingegangen wird.

1 Einleitung

Bei der Bemessung von Stäben und Knoten eines Stabwerkmodells unterscheiden Schlaich und Schäfer in ihrem Beitrag „Konstruieren im Stahlbeton“ /1/ drei Fälle von Druckspannungsfeldern:

- das fächerförmige Druckspannungsfeld (Bild 1a)
- das flaschenförmige Druckspannungsfeld (Bild 1b)
- das prismatische oder parallel Druckspannungsfeld (Bild 1c)

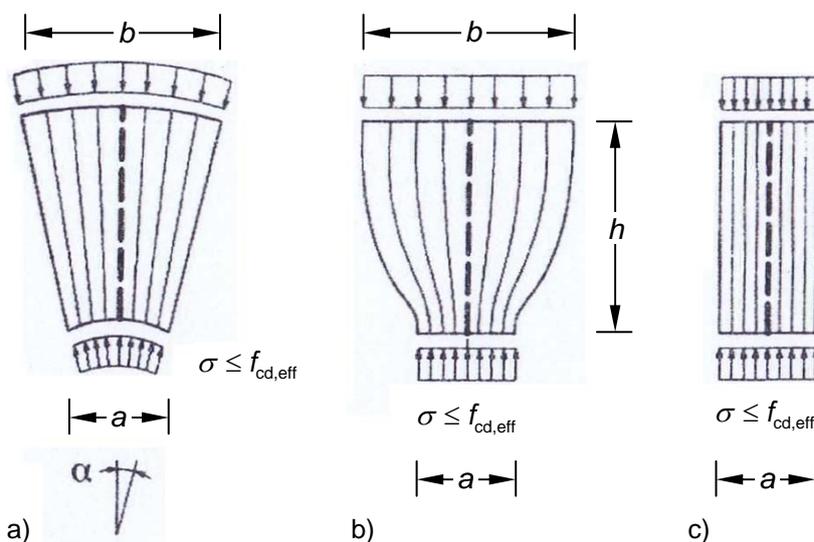


Bild 1: Arten von Druckspannungsfeldern /1/

a) fächerförmiges Druckfeld; b) flaschenförmiges Druckfeld; c) prismatisches Druckfeld

Fig. 1: Different shapes of compression fields /1/

a) fan-shaped stress field; b) bottle-shaped stress field; c) prismatic stress field

Während bei fächerförmigen bzw. prismatischen Druckspannungsfeldern aufgrund des geraden Verlaufs der Druckspannungstrajektorien theoretisch keine Querspannungen entstehen, entwickeln sich bei flaschenförmigen Druckspannungsfeldern durch die Umlenkung der Druckspannungstrajektorien Querspannungen am Flaschenhals (unmittelbar unter der Lasteinleitungsstelle) und Querspannungen in etwas größerer Entfernung von der Lasteinleitungsstelle, die bei Erreichen der Betonzugfestigkeit zu einer Spaltbildung führen und deshalb auch als Spaltzugspannungen bezeichnet werden. Das flaschenförmige Druckfeld stellt den Regelfall bei Einleitung konzentrierter Kräfte in den Beton dar. Ein typisches Beispiel ist der Einleitungsbereich der Vorspannkraft bei Spannbetonbauteilen.

Größe und Verteilung der Zugspannungen werden durch die Breite a der konzentrierten Belastung und die Breite b des Druckfeldes bestimmt (Bild 2). Für größere Verhältniswerte b/a nehmen die Querspannungen ab. Gleichzeitig wird der Bereich, in dem Querspannungen auftreten, kleiner.

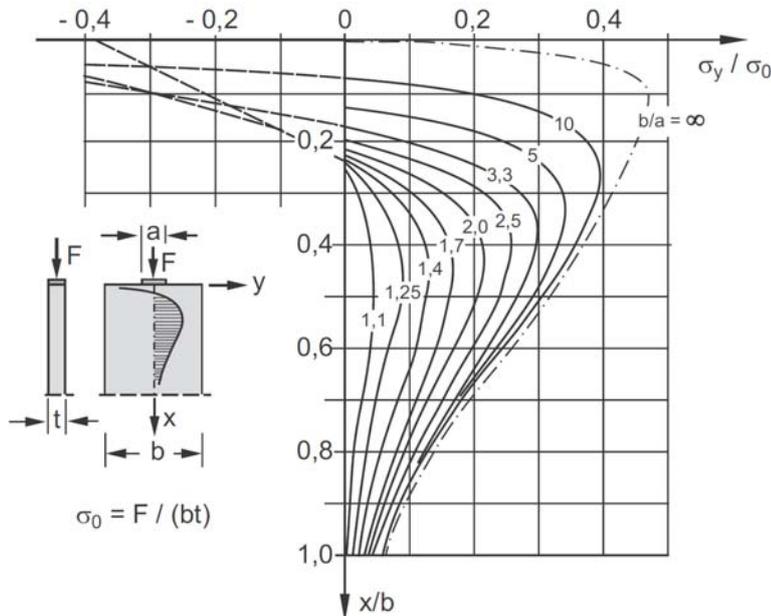


Bild 2: Verlauf und Größe der auf σ_0 bezogenen Querspannungen σ_y entlang der Lastachse für verschiedene Verhältnisse b/a (nach /2/, aus /3/)

Fig. 2: Distribution and magnitude of the relative stresses σ_y / σ_0 along the load axis for different ratios b/a (according to /2/, taken from /3/)

Gewöhnlich werden Querspannungen bei konstruktiven Betonbauteilen durch Spaltzugbewehrung in Form von Betonstahl abgedeckt. Der Einbau einer solchen konventionellen Bewehrung gestaltet sich bei filigranen Konstruktionen aus ultrahochfestem Beton (UHPC) unter Umständen schwierig, so dass nach Möglichkeit darauf verzichtet und die Spaltzugkraft durch die Fasern aufgenommen werden soll.

Einen weiteren Fall, bei dem der Einsatz einer klassischen Spaltzugbewehrung praktisch ausscheidet, stellt die Anwendung von hochfestem Beton oder UHPC in sogenannte Grouted Connections bei Offshore-Windenergieanlagen dar. Bei diesen Anlagen schafft der Beton eine tragfähige Verbindung zwischen den in den Meeresgrund gerammten stählernen Gründungspfählen und der aufgehenden Stahlkonstruktion der Windenergieanlage, die auch den eigentlichen Turm mit Rotor beinhaltet (Bild 3). Der Verguss des Ringspalts zwischen diesen Bauteilen mit hochfestem Beton oder UHPC eröffnet gegenüber einer stahlbautypischen Verbindung die Möglichkeit eines einfachen Toleranzausgleichs (insbesondere Abweichungen der Pfahlachse gegenüber der Lotrechten).

Um bei zylindrischen Verbindungen Durchrutschen zu verhindern, werden sogenannte Shear-Keys eingesetzt. Diese werden in der Regel als umlaufende Schweißraupen ausgeführt. Neben der Aufnahme des Eigengewichts ermöglichen die Shear-Keys den Abtrag (eines Teils) der Momentenbeanspruchung aus Wind und Wellengang über ein vertikales Kräftepaar. Die konzentrierte Einleitung der Kräfte aus der Stahlkonstruktion in den Vergussbeton über Shear-Keys hat die Ausbildung eines flaschenförmigen Druckfeldes in der Grouted Connection zur Folge. Die Frage der Bemessung dieser Verbindungen – auch in Hinblick auf die Zugabe von Fasern – waren Auslöser für die Durchführung der hier vorgestellten Versuche.

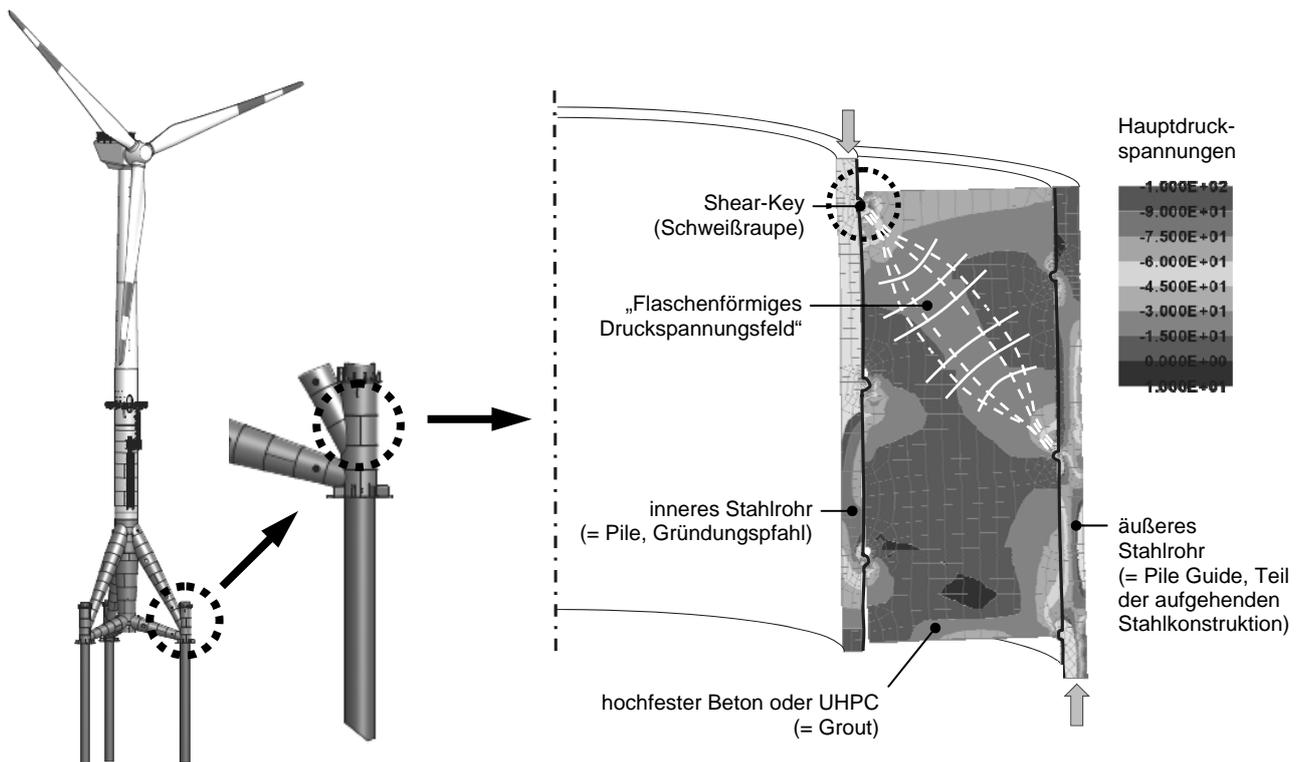


Bild 3: Offshore-Windenergieanlage des Windparks Global Tech I in der Nordsee (links) und FE-Modell der Grouted Connection (rechts)

Fig. 3: Offshore power plant of the wind farm Global Tech I in the Northern Sea (on the left) and FE-model of the grouted connection (on the right)

2 Tragfähigkeit unbewehrter flaschenförmiger Druckspannungsfelder

Als unterer Grenzwert der Tragfähigkeit ebener flaschenförmiger Druckfelder kann nach *Schlaich* und *Schäfer* /1/ die Risslast infolge Querkzug angenommen werden. Diese wird bei kleinen und mittleren Verhältniswerten b/a in der Regel vor dem Druckversagen des unmittelbaren Lasteinleitungsbereichs erreicht. Bei der rechnerischen Bestimmung der Risslast ist zu beachten, dass sich die effektive Rissspannung des Betons infolge des zweiachsialen Spannungszustands innerhalb des Druckfeldes (Druck-Zug-Beanspruchung) von der einaxialen Zugfestigkeit des Betons unterscheiden kann /4/. Dies gilt insbesondere für hochfesten Beton und UHPC, für die die Abminderung der Zugfestigkeit bei gleichzeitigem Querdruck bereits bei kleinen Druckspannungen sehr viel stärker als bei normalfestem Beton ausgeprägt ist /5/, /6/.

In Bild 4a /1/ ist ein Diagramm für die Risslast ebener flaschenförmiger Druckfelder angegeben. Charakterisiert wird das Spannungsfeld durch den Verhältniswert b/a . Der Abstand der Lasteinleitungsfläche von dem Schnitt, in dem die Spannungstrajektorien wieder parallel verlaufen, wird mit h bezeichnet. Bei Spannungsfeldern mit sehr großer bzw. theoretisch unbegrenzter Breite b ist bei der Auswertung des Diagramms die Breite b durch die wirksame Breite b_{ef} nach Bild 5 zu ersetzen. Damit wird berücksichtigt, dass die Druckspannungen im Abstand h von der Lasteinleitungsfläche nicht gleichmäßig verteilt über die gesamte Breite wirken.

Für den Fall, dass der (Bemessungs-)Wert der einaxialen Zugfestigkeit f_{ct} 1/15 der einaxialen Druckfestigkeit f_c beträgt und das in Bild 4c dargestellte Versagenskriterium im Druck-Zug-Bereich gilt, erhält man für die Risslast die dicke durchgezogene Linie. Für Druckfelder mit Querbewehrung werden in Abhängigkeit des mechanischen Bewehrungsgrades ω bei Fließen der Querbewehrung die weiteren Verläufe erhalten.

Wie Versuche und rechnerische Analysen gezeigt haben, kann die tatsächliche Versagenslast wegen der mit Spaltrissbildung einsetzenden Umverteilung der Zugspannungen über die Höhe des Druckfeldes höher liegen als die rechnerische Risslast /7/, /8/, /9/.

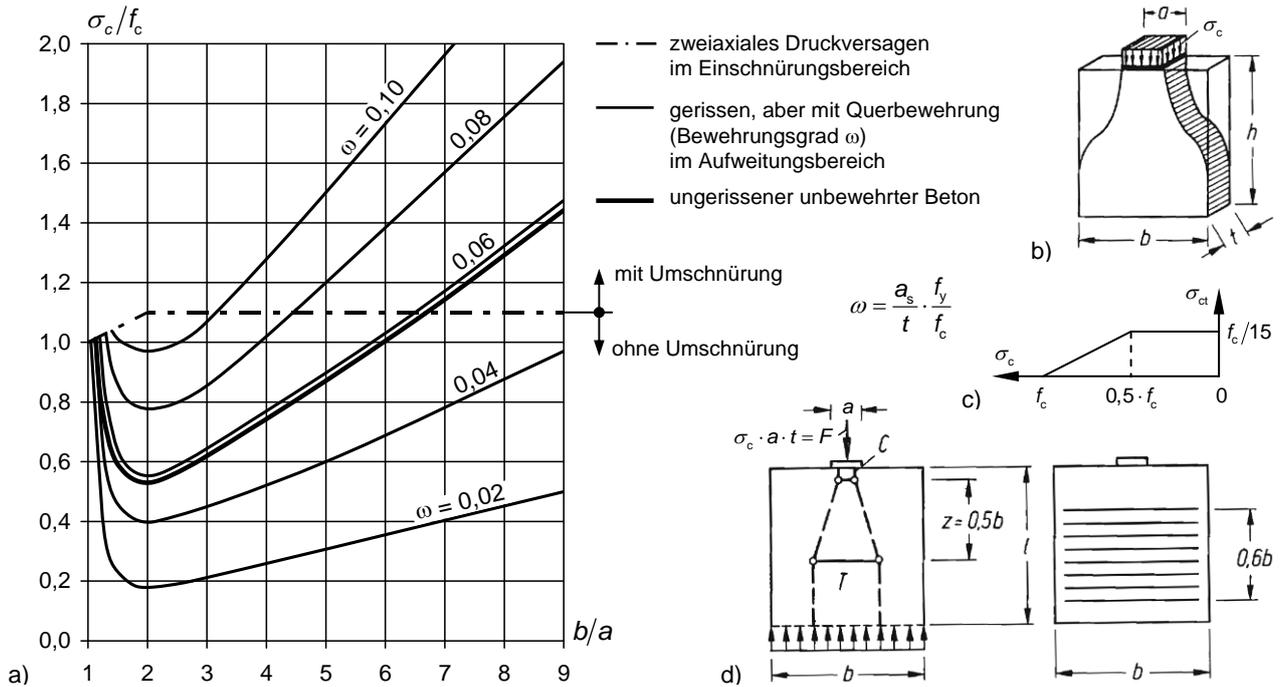


Bild 4: Ebenes flaschenförmiges Spannungsfeld nach Schlaich und Schäfer /1/

- a) Druckspannung an der Lasteinleitungsstelle, die zur Erstrissbildung (unbewehrter Beton, dicke Linie), zum Fließen der Spaltzugbewehrung (dünne Linien) bzw. zu zweiaxialem Druckversagen im Einschnürungsbereich (strichpunktiierte Linie) führt
- b) Geometrie des Spannungsfeldes
- c) angenommenes Versagenskriterium unter zweiaxialer Zug-Druck-Beanspruchung
- d) Stabwerkmodell für das Druckspannungsfeld mit Spaltzugbewehrung

Fig. 4: Two-dimensional bottle-shaped compression field according to Schlaich and Schäfer /1/

- a) compressive stress below the concentrated load causing a splitting crack (plain concrete, thick line), causing yielding of transverse reinforcement (thin lines) or causing biaxial compression failure at the bottle neck (dash-dotted line)
- b) geometry of the compression field
- c) failure criterion under biaxial tension-compression loading
- d) strut-and-tie model for the compression field with transverse reinforcement

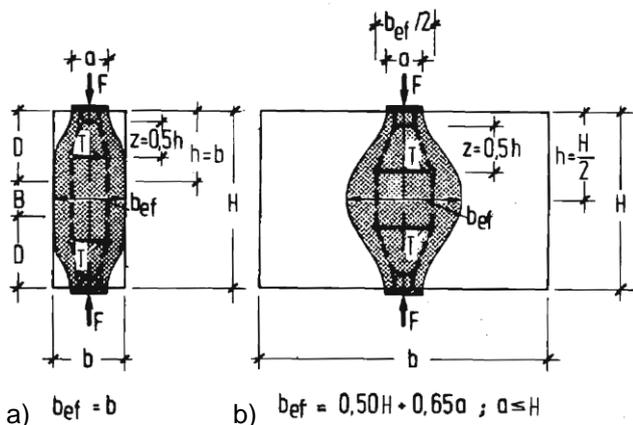


Bild 5: Effektive Breite b_{ef} von flaschenförmigen Druckspannungsfeldern nach Schlaich und Schäfer /1/

- a) Bauteil mit kleiner Breite b) Bauteil mit sehr großer bzw. unbegrenzter Breite

Fig. 5: Effective width b_{ef} of the bottle-shaped compression field according to Schlaich and Schäfer /1/

- a) structural member with small width b) structural member with very large or unlimited width

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsprogramm und Versuchskörper

Hochfester Beton und UHPC unterscheiden sich von normalfestem Beton u. a. durch eine höhere Sprödigkeit des Gefüges und durch die Verwendung eines meist kleineren Größtkorns. Andererseits wird insbesondere UHPC häufig mit Stahlfasern verstärkt, die in flaschenförmigen Druckfeldern als Spaltzugbewehrung wirken und damit Tragfähigkeit und Duktilität steigern können. Aus diesen Überlegungen heraus konzentrierten sich die experimentellen Arbeiten darauf, Unterschiede im Last-Verformungs-Verhalten unbewehrter Druckspannungsfelder aus normalfestem Beton, hochfestem Beton und UHPC zu identifizieren und die Wirksamkeit von Fasern als Spaltzugbewehrung zu untersuchen.

Die am Fachgebiet Massivbau der Universität Kassel durchgeführten zehn Versuchsserien umfassten normalfesten Beton (NSC) in zwei unterschiedlichen Druckfestigkeiten, faserfreien und faserverstärkten hochfesten Beton (HSC) sowie faserfreien und mit Fasergehalten zwischen 0,5 und 2,0 Vol.-% verstärkten UHPC. Tabelle 1 gibt einen Überblick über das Versuchsprogramm.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Table 1: Test program

Versuchsserie	Zylinderdruckfestigkeit f_c	Rohdichte	Größtkorn	Fasergehalt	Fasergeometrie l_f/d_f	Faserwirksamkeit σ_{cf0}	Wärmebehandlung
	[N/mm ²]	[kg/dm ³]	[mm]	[Vol.-%]	[mm]	[N/mm ²]	–
NSC1-0	19,7	2,087	8	–	–	–	nein
NSC2-0	31,3	2,174	8	–	–	–	nein
HSC-0	131	2,424	5	–	–	–	nein
HSC-0-HT	156	2,426	5	–	–	–	ja
HSC-1.9	115	2,491	5	1,9	12,5/0,40	3,82	nein
UHPC-0	169	2,305	0,5	–	–	–	nein
UHPC-0-HT	194	2,314	0,5	–	–	–	ja
UHPC-0.5-HT	199	2,352	0,5	0,5	17/0,175	5,39	ja
UHPC-1.0-HT	200	2,417	0,5	1,0	17/0,175	9,42	ja
UHPC-2.0-HT	201	2,418	0,5	2,0	17/0,175	11,9	ja

Der normalfeste Beton wurde nach eigener Mischungsrezeptur bzw. aus handelsüblicher Sackware hergestellt. Als hochfester Beton wurde das Produkt Ducorit[®] S5 der Fa. Densit verwendet, welches in Grouted Connections von Offshore-Windenergieanlagen sehr häufig zur Anwendung kommt. Der ultrahochfeste Beton wurde nach der Mischungsrezeptur M3Q des DFG-Schwerpunktprogramms „Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC)“ hergestellt.

Die Proben aus normalfestem Beton sowie einige Serien aus hochfestem Beton und UHPC wurden nach dem Ausschalen, welches zwei Tage nach der Herstellung erfolgte, bis zur Prüfung unter Raumklima gelagert. Die übrigen Serien (Kennzeichnung HT) wurden nach dem Ausschalen für 48 Stunden einer Wärmebehandlung bei 90 °C unterzogen, so dass die Endfestigkeit praktisch im Alter von vier Tagen erreicht wurde.

Als Versuchskörper dienten Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm (Bild 6a). Sie wurden in einer Stahlschalung hergestellt und auf dem Rütteltisch verdichtet. Lediglich für die Verdichtung der Würfel aus normalfestem Beton wurde ein Innenrüttler eingesetzt. Begleitend zu den Würfeln wurden aus jeweils derselben Mischung drei Betonzyylinder ($h/d = 200 \text{ mm}/100 \text{ mm}$) zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit und bei den Faserbetonmischungen zusätzlich je sechs Prismen ($a/b/l = 40 \text{ mm}/40 \text{ mm}/160 \text{ mm}$) zur Bestimmung der Faserwirksamkeit (zentrische Nachrisszugfestigkeit) hergestellt, die in gleicher Weise verdichtet und nachbehandelt wurden wie die Würfel. Die Prismen wurden nachträglich an zwei gegenüberliegenden Seiten mit einer jeweils 5 mm tiefen Kerbe versehen und in zentrischen Zugversuchen geprüft.

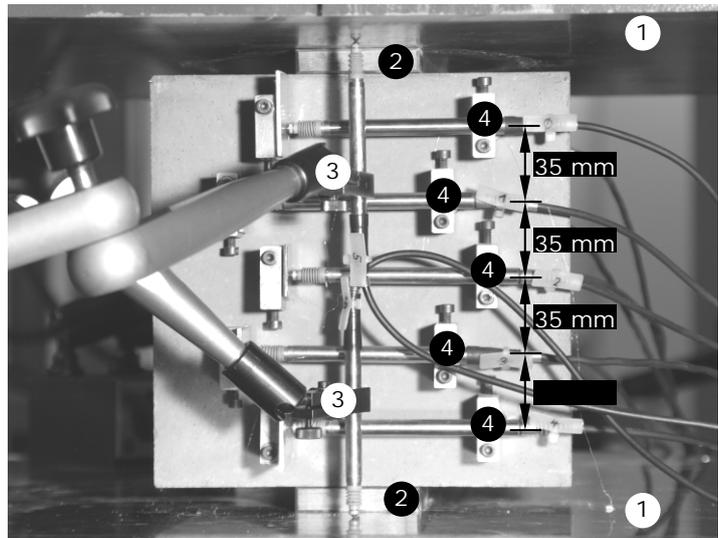
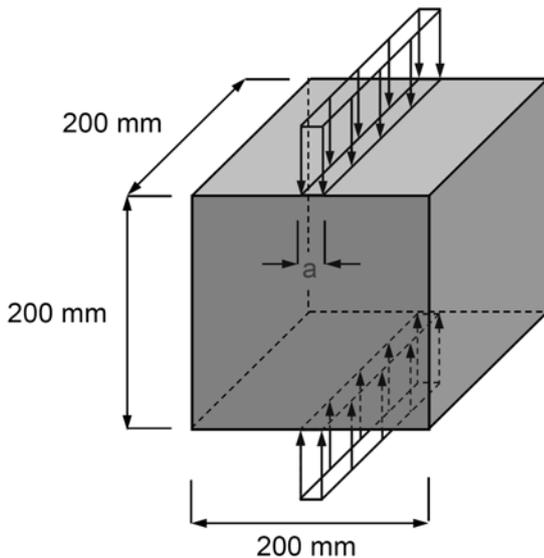
3.2 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in einer servohydraulisch gesteuerten Universalprüfmaschine im Zentrallabor des Instituts für konstruktiven Ingenieurbau durchgeführt. Die Proben wurden mittig zwischen den beiden Lastplatten der Maschine platziert (Bild 6b). Die obere Lastplatte war über ein sphärisches Gelenk an die Maschine angeschlossen. Die Probekörper wurden senkrecht zur Betonierichtung belastet. Die Lasteinleitung erfolgte linienförmig über 200 mm lange Stahlleisten, die an Ober- und Unterseite des Probekörpers jeweils mittig angeordnet wurden. Wegen der ebenen Betonoberflächen, die durch die verwendete Stahlschalung erhalten wurden, waren keine zusätzlichen Ausgleichsschichten notwendig.

Um unterschiedliche geometrische Verhältniswerte b/a des flaschenförmigen Druckfeldes zu erhalten, wurden Stahlleisten mit vier unterschiedlichen Breiten verwendet (Bild 6a; $a = 10$ mm, 16 mm, 25 mm und 60 mm). Damit ergaben sich Verhältniswerte $b_{(eff)}/a$ von 10,7, 6,9, 4,7 und 2,3. Jeder dieser Verhältniswerte wurde an jeweils einem Probekörper jeder Serie untersucht.

Zur Erfassung der vertikalen Verformungen (in Druckrichtung) wurde an Vorder- und Rückseite mit jeweils zwei an Magnetstativen befestigten induktiven Wegaufnehmern gegen die Lastplatten der Maschine gemessen. Daneben wurde der Kolbenweg aufgezeichnet. Die horizontalen Verformungen (in Zugrichtung) wurden über den Bereich, in dem der Spaltriss erwartet werden konnte, mittels unmittelbar an der Probe befestigter induktiver Wegaufnehmer gemessen. An Vorder- und Rückseite der Proben waren jeweils fünf Messstrecken mit einer Länge von 100 mm vorgesehen. Von diesen blieben bei einigen faserfreien Proben jeweils zwei Messstrecken unbesetzt, da aus vorangegangenen Versuchen bereits bekannt war, dass es aufgrund des spröden Versagens bei diesen Proben nicht gelingen würde, aussagefähige Messwerte im Nachrissbereich zu gewinnen.

Die Belastung der Proben erfolgte weggesteuert mit einer konstanten Wegzunahme von 0,01 mm/s (Maschinenweg).



- (1) Lastplatten der Prüfmaschine
- (2) Stahlleisten für die Lasteinleitung (hier: $a = 60$ mm)
- (3) Wegaufnehmer zur Messung horizontaler Verformungen
- (4) Wegaufnehmer zur Messung vertikaler Verformungen

a)

b)

Bild 6: Versuchsaufbau
a) schematische Darstellung des Versuchskörpers und der Belastungssituation
b) Anordnung der Messtechnik

Fig. 6: Test setup
a) schematic sketch of the test specimen and load situation
b) arrangement of mess equipment

4 Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Angegeben ist für jeden Probekörper die durch das flaschenförmige Druckfeld aufnehmbare Druckspannung an der Lasteinleitungsstelle $\sigma_{c,max}$ als Absolutwert sowie als auf die Zylinderdruckfestigkeit f_c bezogene Größe. Erwartungsgemäß nimmt der Verhältniswert $\sigma_{c,max}/f_c$ mit steigendem b/a -Verhältnis zu (vgl. Bild 4). Andererseits nimmt $\sigma_{c,max}/f_c$ mit steigender Beton-
druckfestigkeit f_c signifikant ab. Als Ursachen hierfür können das niedrigere Verhältnis zwischen Zug- und Druckfestigkeit und die höhere Sprödigkeit von hochfestem Beton und UHPC genannt werden.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse

Table 2: Test results

Versuchsserie	Verhältniswert							
	$b/a = 2,3$		$b/a = 4,7$		$b/a = 6,9$		$b/a = 10,7$	
	$\sigma_{c,max}$	$\sigma_{c,max}/f_c$	$\sigma_{c,max}$	$\sigma_{c,max}/f_c$	$\sigma_{c,max}$	$\sigma_{c,max}/f_c$	$\sigma_{c,max}$	$\sigma_{c,max}/f_c$
NSC1-0	17,6	0,89	23,2	1,18	34,6	1,76	48,9	2,48
NSC2-0	29,6	0,95	38,0	1,21	42,6	1,36	72,0	2,30
HSC-0	79,4	0,61	77,2	0,59	95,3	0,73	151	1,15
HSC-0-HT	92,7	0,59	106	0,68	140	0,90	224	1,44
HSC-1.9	130	1,13	143	1,24	174	1,51	222	1,93
UHPC-0	64,2	0,38	91,6	0,54	71,9	0,43	157	0,93
UHPC-0-HT	78,9	0,41	74,2	0,38	109	0,56	158	0,81
UHPC-0.5-HT	157	0,79	202	1,02	258	1,30	253	1,27
UHPC-1.0-HT	173	0,87	207	1,04	256	1,28	347	1,74
UHPC-2.0-HT	193	0,96	284	1,41	334	1,66	457	2,27

Für einige ausgewählte Versuche sind in Bild 7 die Last-Verformungs-Beziehungen dargestellt. Die Verformungen sind jeweils Mittelwerte der an Vorder- und Rückseite der Probe gemessenen Werte. In vertikaler Richtung wurden von den Messwerten die elastischen Verformungen der Stahlleisten abgezogen.

Die Bilder 7a und b zeigen die Last-Verformungs-Beziehungen für das b/a -Verhältnis von 10,7. Abgesehen von anfänglichen Nichtlinearitäten, die durch die Versuchsanordnung bzw. Lasteinleitung verursacht wurden, war das Last-Verformungs-Verhalten der Proben sowohl in Belastungsrichtung (Druckrichtung) als auch senkrecht dazu zunächst linear. Das Bruchverhalten wurde dann maßgeblich durch die Geometrie des flaschenförmigen Druckfeldes und durch die Faserbewehrung bestimmt.

Bei den faserfreien Proben aus hochfestem Beton und UHPC trat das Versagen für große b/a -Verhältnisse (10,7; 6,9; z. T. auch 4,7) ohne nennenswerte Vorankündigung durch Spaltrissbildung (vollständige Durchtrennung des Probekörpers) ein (Bilder 7a und 8d), verbunden mit einem Kraftabfall auf Null. Dagegen war für kleine b/a -Verhältnisse (2,3; z. T. auch 4,7) die einsetzende Rissbildung lediglich durch einen vorübergehenden geringen Kraftabfall und eine fortan mehr oder weniger stark ausgeprägte Nichtlinearität der weiteren Verformungszunahme gekennzeichnet, bis es schließlich auf einem höheren Lastniveau auch hier zur vollständigen Durchtrennung des Probekörpers kam. Da der Riss in der Regel von den Kanten der Stahlleiste ausging, blieb der Lasteinleitungsbereich bei den mit der 60 mm breiten Stahlleiste geprüften Probekörpern ($b/a = 2,3$) auch nach dem Spalten weitgehend intakt (Bild 8a), sodass die Druckkraft noch weiter gesteigert und ein zweiter Spaltriss initiiert werden konnte (Bild 8b). Das verbleibende, durch die Rissbildung mehr oder weniger regelmäßig berandete „Prisma“ konnte dann einaxial bis zum Druckversagen (Bild 8c) weiter belastet werden. Bei der Auswertung der Versuche blieb dieses Szenario unberücksichtigt, da sich mit dem Spalten des Probekörpers die Beanspruchungssituation (prismatisches anstelle flaschenförmiges Druckfeld) grundlegend ändert. Für die faserfreien Proben ist also in Tabelle 2 stets die Druckspannung an der Lasteinleitungsstelle angegeben, die zum Spalten (vollständige Durchtrennung des Probekörpers) führte.

Auch die Proben aus normalfestem Beton zeigten bis zum Erreichen der Höchstlast kein ausgeprägt nicht-lineares Verhalten. Der Bruch erfolgte jedoch nicht schlagartig. Vielmehr konnten diese Versuche bis zur vollständigen Durchtrennung der Würfel kontrolliert weggesteuert gefahren werden.

Bei den faserbewehrten Würfeln aus hochfestem Beton und UHPC folgte die Last-Verformungs-Beziehung zunächst der der entsprechenden unbewehrten Proben. Die Spaltrissbildung begann ebenfalls auf etwa demselben Lastniveau. Allerdings war damit, unabhängig vom b/a -Verhältnis, nur ein vorübergehender geringfügiger Lastabfall verbunden. Mit zunehmender Verformung konnte auch die Druckkraft weiter gesteigert werden, wobei fortan ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen Last und Verformung beobachtet werden konnte. Die fortschreitende Spaltrissöffnung konnte durch die horizontalen Wegaufnehmer sehr gut aufgelöst werden (Bild 7b). Das Versagen kündigte sich durch mehr oder weniger stark ausgeprägtes plastisches Verhalten vor Erreichen der Höchstlast an. Die Proben mit großem b/a -Verhältnis und höherem Fasergehalt zeigten hier ebenso wie im Nachbruchbereich das duktilere Verhalten (Bilder 7c und d). Bei kleinem b/a fiel die Kraft, selbst bei den Proben mit 2 Vol.-% Fasern, vergleichsweise rasch auf Null ab.

Die Bilder 8d bis f zeigen einige typische Versagensbilder der Versuchskörper aus UHPC. Für das b/a -Verhältnis von 2,3 stellten sich, wie bereits oben beschrieben, meist zwei Spaltrisse, ausgehend von den Kanten der Stahlleiste, ein (Bild 8f). Bei schmaler Lasteinleitungsbreite war dagegen nur ein Spaltriss zu beobachten (Bild 8e).

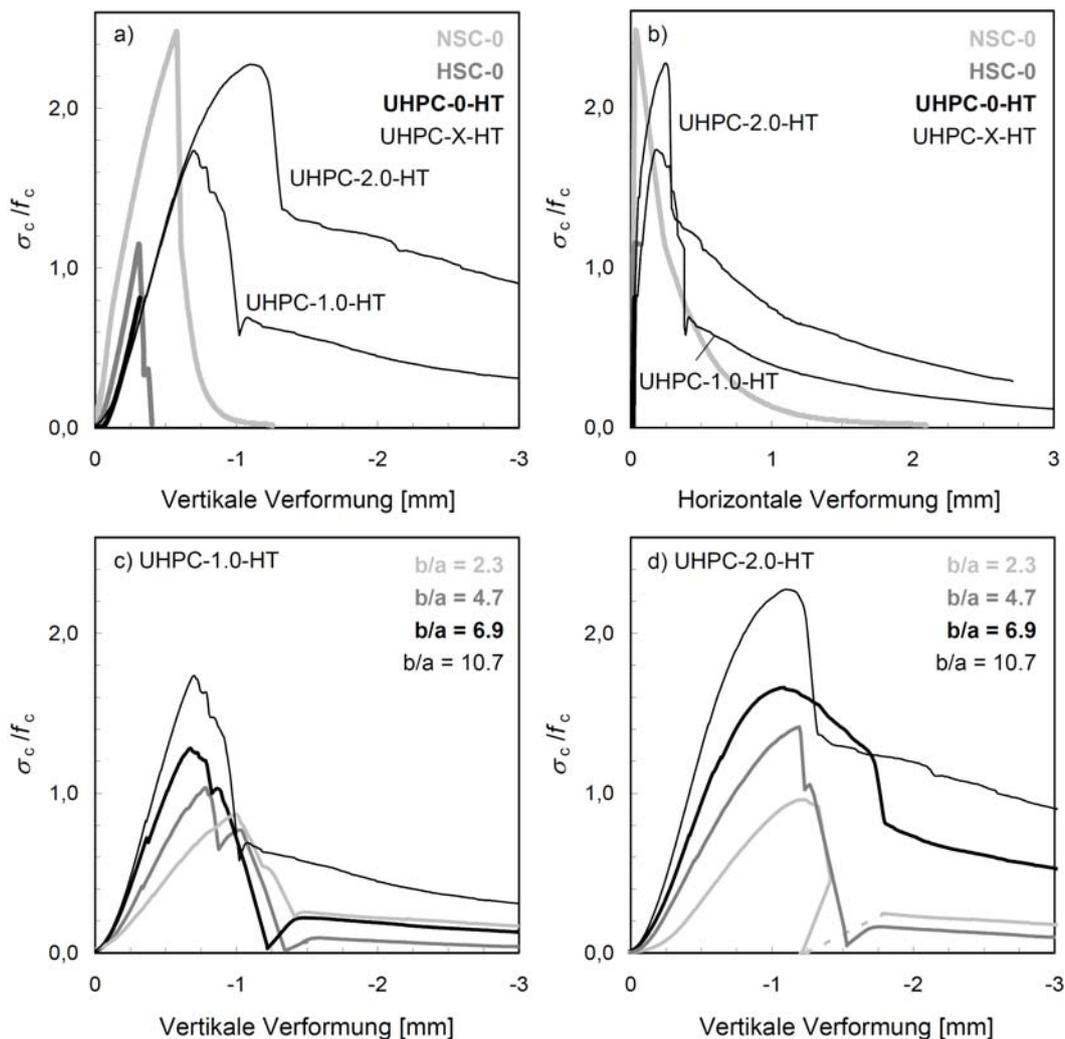


Bild 7: Last-Verformungs-Kurven
a) in Druckrichtung für fünf ausgewählte Serien und $b/a = 10,7$
b) in Querrichtung (Zugrichtung) für fünf ausgewählte Serien und $b/a = 10,7$
c) in Druckrichtung für Serie UHPC-1.0-HT und unterschiedliche b/a -Verhältnisse
d) in Druckrichtung für Serie UHPC-2.0-HT und unterschiedliche b/a -Verhältnisse

Fig. 7: Load-deformation curves
a) in compression direction for five selected series and $b/a = 10.7$
b) in transverse (tension) direction for five selected series and $b/a = 10.7$
c) in compression direction for series UHPC-1.0-HT and different ratios b/a
d) in compression direction for series UHPC-2.0-HT and different ratios b/a

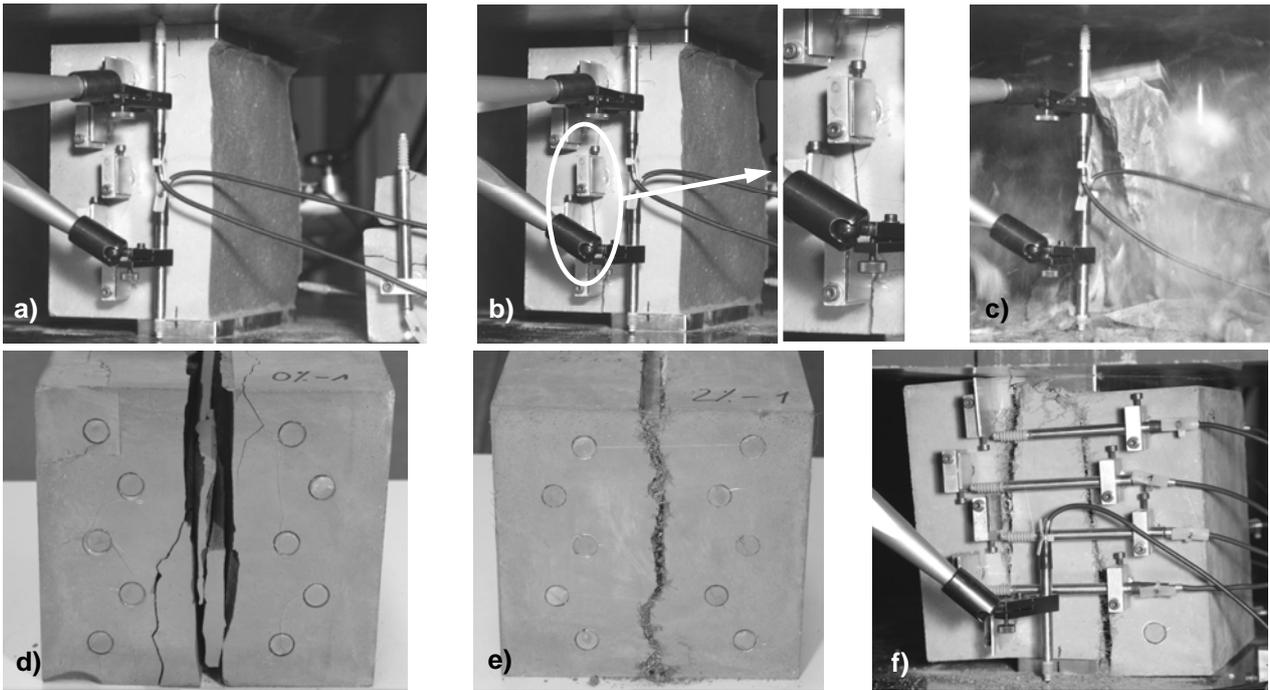


Bild 8: Versagen der UHPC-Probekörper

- a) - c) Bruchvorgang bei 60 mm breiter Stahlleiste ($b/a = 2,3$): erstes Aufspalten am Rand der Lasteinleitungsstelle (a), Entstehung des zweiten Spaltrisses am anderen Ende der Lasteinleitungsstelle (b) und Druckversagen des verbleibenden „Prismas“ (c)
 d) $b/a = 10,7$ – ohne Fasern; e) $b/a = 10,7$ – 2 Vol.-% Fasern; f) $b/a = 2,3$ – 1 Vol.-% Fasern

Fig. 8: Failure of UHPC specimens

- a) - c) fracture process using 60 mm wide steel stripe ($b/a = 2,3$): first split at the edge of the loading area (a), development of a second splitting crack at the other edge of the loading area (b), and compressive failure of the remaining “prism” (c)
 d) $b/a = 10.7$ – w/o fibers; e) $b/a = 10.7$ – 2 % fibers by vol.; f) $b/a = 2.3$ – 1 % fibers by vol.

5 Diskussion und Ausblick

In Bild 9 sind die durch das flaschenförmige Druckfeld an der Lasteinleitungsstelle aufnehmbaren, auf die Zylinderdruckfestigkeit bezogenen Pressungen $\sigma_{c,max}/f_c$ in Abhängigkeit des rechnerischen b/a -Verhältnisses dargestellt. Zur Orientierung sind auch die von *Schlaich* und *Schäfer* ermittelten Versagenskurven angegeben.

Die Ergebnisse der Proben aus normalfestem Beton können etwa den Kurven $\omega = 0,08$ bis $0,09$ zugeordnet werden. Für den hochfesten Beton ohne Fasern erhält man etwa $\omega = 0,04$ bis $0,05$. Die Ergebnisse des faserfreien UHPC ordnen sich zwischen den Kurven $\omega = 0,02$ und $\omega = 0,04$ ein. Rechnerisch ergeben sich hieraus Verhältniswerte der wirksamen Betonzugfestigkeit $f_{ct,eff}$ zur einaxialen Betondruckfestigkeit f_c von etwa $1/10$ für normalfesten Beton, $1/20$ für hochfesten Beton sowie $1/30$ für UHPC. Die Verhältniswerte für hochfesten Beton und UHPC erscheinen zunächst etwas niedrig. Allerdings sind diese Ergebnisse vor dem Hintergrund des vorherrschenden zweiaxialen Spannungszustands (Druck-Zug) und der damit verbundenen Abminderung der Zugfestigkeit zu bewerten (vgl. Abschnitt 2) /5/, /6/.

Für den wärmebehandelten hochfesten Beton (HSC-0-HT) liegen die auf die Zylinderdruckfestigkeit bezogenen Pressungen $\sigma_{c,max}/f_c$ etwas höher als bei Erhärtung unter Raumklima. Für UHPC ergibt sich diesbezüglich kein eindeutiges Bild, sodass hieraus noch kein systematischer Einfluss abgeleitet werden kann.

Durch die Zugabe von Fasern konnte die Tragfähigkeit von hochfestem Beton und UHPC wesentlich gesteigert werden. Bei UHPC wurden bereits mit einem Fasergehalt von $0,5$ Vol.-% Druckspannungen unter der konzentrierten Last von mindestens 80 % der einaxialen Druckfestigkeit erreicht. Für hochfesten Beton mit $1,9$ Vol.-% Fasern lagen die Ergebnisse durchweg höher als die Zylinderdruckfestigkeit f_c .

Eine Erhöhung des Fasergehalts von 0,5 bis auf 2,0 Vol.-% brachte für UHPC nur eine unterproportionale Zunahme der Tragfähigkeit. Von einer Ausnahme ($b/a = 10,7$) abgesehen, lagen die Ergebnisse für 0,5 und 1,0 Vol.-% Fasern (UHPC-0.5-HT und UHPC-1.0-HT) etwa in der gleichen Größenordnung. Die Tragfähigkeitsteigerung gegenüber den faserfreien Proben lag, abhängig vom b/a -Verhältnis für UHPC überwiegend zwischen rund 100 und 200 % und für hochfesten Beton zwischen rund 50 und 100 %. Auffallend, und in Hinblick auf die praktische Anwendung besonders interessant, ist die Wirksamkeit von bereits sehr niedrigen Fasergehalten.

Trotz der zum Teil sehr hohen lokalen Pressungen unter der Stahlleiste war in allen Fällen Spalten und nicht Druckversagen im Einleitungsbereich maßgebende Versagensart. Wegen der Querdehnungsbehinderung des Betons durch die zur Lasteinleitung verwendete Stahlleiste herrschte in diesem Bereich kein ebener Spannungszustand sondern dreiaxiale Druckbeanspruchung vor. Dies erklärt die insbesondere für normalfesten Beton zum Teil weit über der einaxialen Betondruckfestigkeit liegenden Pressungen.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse werden aktuell dazu verwendet, ein Bruchmodell für faserverstärkten hochfesten Beton und UHPC zu kalibrieren. Erste nichtlineare Finite-Element-Berechnungen mit dem Programm ATENA (Cervenka Consulting) wurden bereits durchgeführt. Um dabei die Faserwirkung realitätsnah zu erfassen und die Ergebnisse auch auf Betone mit anderen Fasergehalten und mit abweichender Fasergeometrie übertragen zu können, werden optische Analysen der Faserorientierung im Würfel durchgeführt. Nach Abschluss dieser Arbeiten sollen die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für die Bemessung der Grouted Connections von Offshore-Windenergieanlagen aufbereitet und nutzbar gemacht werden.

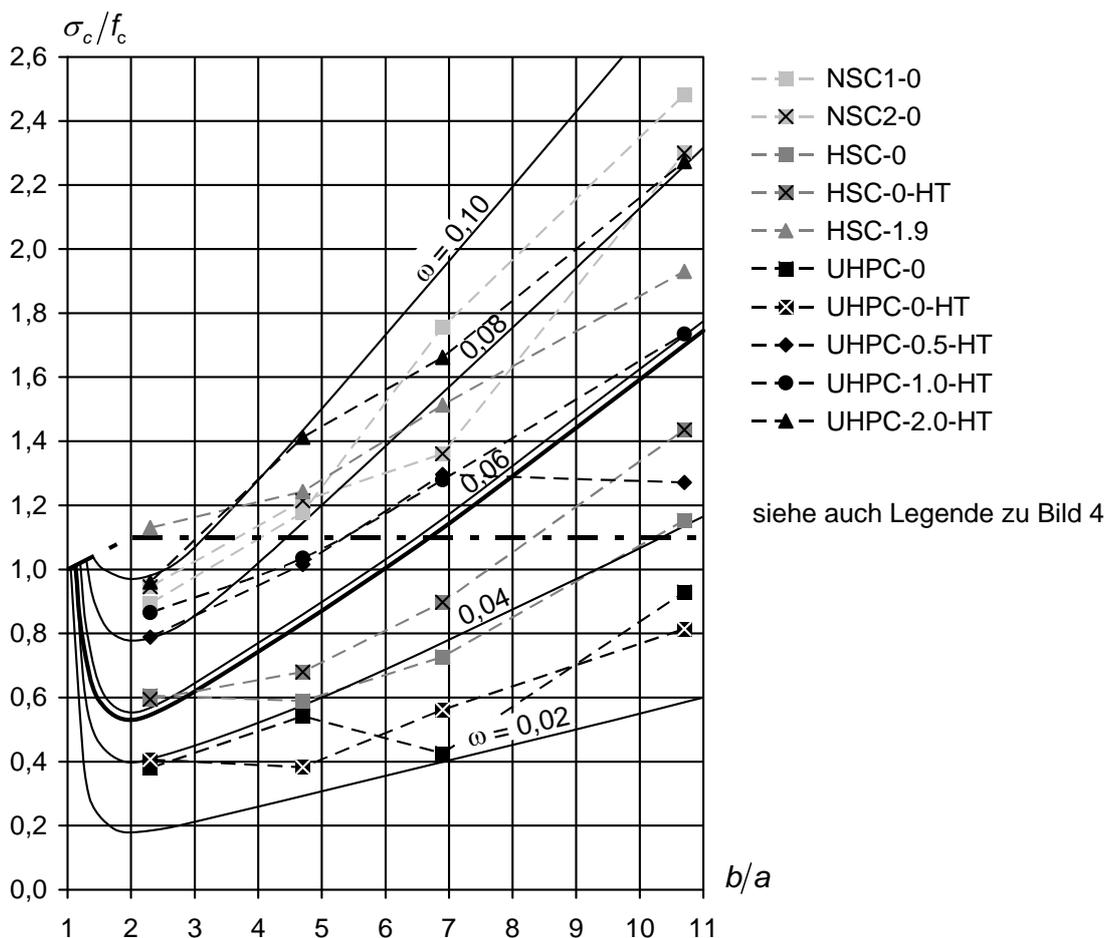


Bild 2: Druckspannung an der Lasteinleitungsstelle bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit im Vergleich zur rechnerischen Rissspannung nach /1/ (siehe Bild 4)

Fig. 2: Compressive stress under the concentrated load related to the uniaxial concrete compressive strength and compared with the theoretical cracking stress according to /1/ (see Fig. 4)

6 Literatur

- /1/ Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. Beton-Kalender 1998, Teil II, S. 721-895, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1998.
- /2/ Jyengar, K. T. S. R.: Der Spannungszustand in einem elastischen Halbstreifen und seine technischen Anwendungen. Dissertation, TH Hannover, 1960.
- /3/ Zilch, K; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- /4/ Kupfer, H. B.: Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 229, Beuth Verlag, Berlin, 1973.
- /5/ Curbach, M.; Hampel, T.: Verhalten von Hochleistungsbeton unter zweiaxialer Druck-Zug-Beanspruchung. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11011 B, DBV 198, Institut für Tragwerke und Baustoffe der Technischen Universität Dresden, 1999.
- /6/ Speck, K.; Curbach, M.: Mehraxiale Festigkeit von UHPC – Druck-Zug- und Zug-Zug-Festigkeit. Zwischenkolloquium des DFG Schwerpunktprogramm SPP1182 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton (UHPC)“, Kassel, 12.4.2011, Präsentation.
- /7/ Fehling, E.: Zum Tragverhalten von Druckfeldern in scheibenartigen Betonbauteilen – Nichtlineare Berechnungen und Vergleich mit Versuchen. Materialmodelle und Methoden zur wirklichkeitsnahen Berechnung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen, Mehlhorn-Festschrift, S. 236-247, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universität Kassel, 1997.
- /8/ Colombo, M.; Di Prisco, M.: D-zones in HPFRCC. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 (Hrsg.: Parra-Montesinos, G. J.; Reinhardt, H. W.; Naaman; A. E.), Proceedings of the Sixth International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC6), S. 197-204, Ann Arbor, MI, USA, 2011.
- /9/ Pujol, S.; Rautenberg, J. M.; Sozen, M. A.: Compressive Strength of Concrete in Nonprismatic Elements. Concrete International 33 (9), S. 42-49, 2011.

Dr.- Ing. Torsten Leutbecher
Akademischer Rat

Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

Tel. +49 0561 804 2669
Fax +49 0561 804 2803

E-mail leutbecher@uni-kassel.de

Forschungsschwerpunkte:

- **Zugtragverhalten von UHPC mit Fasern und Stabstahl**
- **Druck-Zug-Festigkeit von (faserverstärktem) Stahlbeton**
- **Kombinierte Beanspruchung aus Last und Zwang**

