

Einsatz von Fasern zur Verbesserung des Nachbruchverhaltens von ultrahochfestem Beton im Biegezugversuch

Unbewehrte ultrahochfeste Betone mit Druckfestigkeiten von rd. 200 N/mm² weisen ein schlagartiges sprödes Versagen und eine im Bezug zur Druckfestigkeit niedrige Biegezugfestigkeit auf. Dieses spröde Bruchverhalten macht bei der Bemessung eine deutliche Begrenzung der Betondehnungen erforderlich, was zu einer Reduzierung der ausnutzbaren Spannungen führt und somit den Einsatz des ultrahochfesten Betons nicht sinnvoll macht.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war es, eine für die Praxis ausreichende Duktilität durch die Zugabe von hochfesten Stahlfasern und Polypropylen-Fasern zu erreichen und die maßgebenden Parameter aufzudecken. Es wurden die Einflüsse aus der Faserlänge (2, 4, 6 mm), dem Fasergehalt (bis max. 10 Vol.-%), der Faserkombination sowie den betontechnologischen Merkmalen (Betonzusammensetzung, Verarbeitbarkeit des Frischbetons) auf das Nachbruchverhalten im weggesteuerten 3-Punkt-Biegezugversuch untersucht.

Versuchsmatrix, Frischbetonaufbereitung und Herstellung der Probekörper

Versuchsmatrix

Der Einfluss des Stahlfasergehaltes, der Stahlfaserlänge und der Kombination verschiedener Stahlfaserlängen wurde an der Mischung BI untersucht. Zur Überprüfung des Einflusses der Betonzusammensetzung auf das Nachbruchverhalten wurde den unterschiedlichen ultrahochfesten Betonen BI bis BIV mit den Zementen: CEM I 42,5 R-HS, CEM III B 42,5 NW/HS und CEM I 52,5 NA-HS eine ausgewählte Stahlfaserkombination zugegeben. Weiterhin wurden der Mischung BII, welche für Bauteilversuche ausgewählt wurde, zur Verbesserung des Brandwiderstandes zusätzlich zu den 2,5 Vol.-% Stahlfasern (Ø: 0,15 mm / L: 6 mm) noch dünne Polypropylenfasern (PP-Fasern Ø: 0,016 mm/ L: 4,9 mm) in unterschiedlichen Dosierungen (0,30 und 0,45 Vol.-%) zugegeben.

Tabelle 1: Versuchsmatrix mit den zu variierenden Parametern

Variationsparameter	Mischungsbez.	B I	B II	B III	B IV
	ZEMENT	CEM I 42,5 R-HS	CEM III B 42,5 NW/HS	CEM I 42,5 R-HS	CEM I 52,5 R-HS/NA
Stahlfasergehalt Länge: 6 mm Ø = 0,15 mm	4 mm	1,0 – 3,5 Vol.-%	---	---	---
	4 mm	1,5 – 10 Vol.-%	---	---	---
Stahlfaserlänge (3,5 Vol.-%)		6 – 4 – 2 mm	---	---	---
Kombination Stahlfaserlängen ⁽¹⁾		2+6, 4+6 mm	4+6 mm	4+6 mm	4+6 mm
PP-Faserdosierung ⁽²⁾		---	0,3 – 0,45 Vol.-%	---	---

(1) Kombination aus jeweils 2,0 Vol.-% kurzen und 1,5 Vol.-% langen Stahlfasern

(2) zusätzlich zu 2,5 Vol.-% von 6 mm langen Stahlfasern

Herstellung der Probekörper

Die Schalungen für die Probekörper zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurden an einer Seitenfläche mittig mit einem Kunststoffhalbrundprofil (Höhe 3 mm) versehen. Dieses Profil gewährleistete aufgrund der mittigen Betonquerschnittsverringering stets den Bruch am Ort des maximalen Biegemomentes. Als Trennmittel kam übliches Schalöl zum Einsatz.

Die Probekörperformen (siehe Tabelle 2) wurden sofort nach Mischende befüllt und mit einem Stahllineal abgezogen. Um ein Absetzen der Fasern bei weicheren Konsistenzen zu vermeiden, wurde auf eine Vibration während der Befüllung verzichtet.

Bis zum Entschalen im Alter von 24 Stunden lagerten die Probekörper im Klima bei 20°C und 98% r.F.. Anschließend wurden die Probekörper für 24 Stunden (vor Feuchtigkeitsabgabe geschützt) wärmebehandelt. Der Klimaschrank wurde so gesteuert, dass sich die Lufttemperatur innerhalb von einer Stunde von Raumtemperatur auf 90 °C erwärmte. Diese Temperatur wurde für 22 Stunden gehalten und abschließend innerhalb von einer Stunde auf Raumtemperatur abgekühlt. Dies Wärmebehandlungsregime resultiert aus Vorversuchen, die zum Ziel hatten unter praxisnahen Bedingungen möglichst früh eine Druckfestigkeit von $\geq 200 \text{ N/mm}^2$ zu erreichen.

Tabelle 2: Probekörpergeometrie für die Festigkeitsprüfungen

Prüfung	Probekörper-Geometrie
Druckfestigkeit	Zylinder mit \varnothing/H : 50 mm/50 mm)
Biegezugfestigkeit	Prismen mit $B \times H \times L = 40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$

Unabhängig von dem Stahlfasergehalt (0 – 10 Vol.-%) konnten aufgrund der Entlüftung des Frischbetons in der letzten Minute der Mischphase alle Probekörper frei von Luftporen hergestellt werden (s. Abbildung 1).

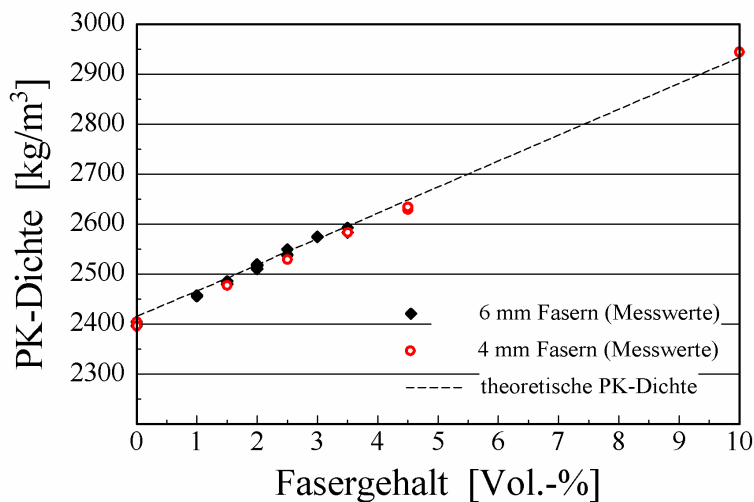


Abbildung 1: Probekörperdichten in Abhängigkeit vom Stahlfasergehalt

Untersuchungen

Frischbeton

Bei allen Mischungen wurde das Setzfließmaß mit dem Hägermann-Konus zehn Minuten nach Wasserzugabe bestimmt.

Druckfestigkeit

Vor dem Prüfen wurden die Stirnflächen der Probekörper planparallel geschliffen. Die Druckfestigkeit wurde an jeweils 6 Zylindern im kraftgeregelten, einaxialen Druckversuch (Laststeigerungsrate 0,5 N/(mm²×s)) ermittelt.

Äquivalente Biegezugfestigkeiten nach dem DBV-Merkblatt „Stahlfaserbeton“

Aus den im 3-Punkt-Biegezugversuch ermittelten Last-Durchbiegungs-Kurven wurde die Biegezugfestigkeit f_{ct}^f am Ende der Linearität, sowie in Anlehnung an das DBV-Merkblatt „Stahlfaserbeton“ /1/ die zwei äquivalenten Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) und $f_{eq,II}$ (Grenzzustand der Tragfähigkeit) bestimmt.

Die für die Berechnung herangezogenen Intervalle begannen bei der Durchbiegung δ_0 (Ende der Linearität) und erstreckten sich unter Berücksichtigung der PK-Geometrie und Lasteinleitung zum einen bis zu einer Durchbiegung von $\delta_I = \delta_0 + 0,046$ mm und zum anderen bis zu $\delta_{II} = \delta_0 + 0,411$ mm (s. Abbildung 2). Nach Berechnung der entsprechenden Integrale $D_{fl,I}^f$ und $D_{fl,II}^f$ wurden die äquivalenten Biegezugfestigkeiten nach folgenden Formeln berechnet.

$$F_{eq,i} = \frac{D_{fl,i}^f}{Länge_{Intervall}}$$

Gleichung 1

$$f_{eq,i} = \frac{3}{2} * \frac{F_{eq,i} * l_{Stütz}}{b * h_{eff}^2}$$

Gleichung 2

$D_{fl,i}^f$:	Flächenintegral in Nmm (siehe Abbildung 2)
Länge _{Intervall} :	in Abhängigkeit des Grenzzustandes 0,046 bzw. 0,411 mm
$l_{Stütz}$:	Stützweite, hier 100 mm
b:	Breite des Probekörpers in mm
h_{eff} :	Querschnittshöhe des Probekörpers im Bereich der Einkerbung in mm

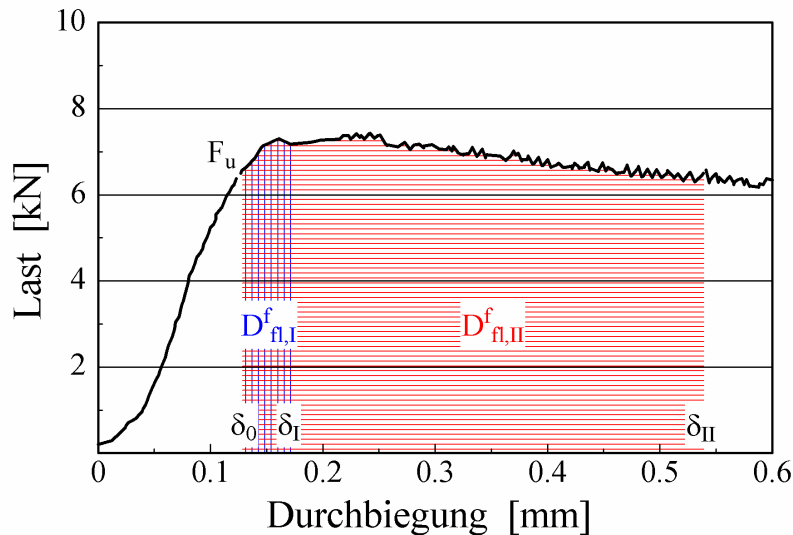


Abbildung 2: Exemplarische Last-Durchbiegungs-Kurve mit den Integralen zur Ermittlung der äquivalente Biegezugfestigkeiten

In /1/ werden die äquivalenten Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ und $f_{eq,II}$ in die äquivalenten Zugfestigkeiten $f_{eq,ctm,I}$ und $f_{eq,ctm,II}$ mit den Faktoren 0,45 und 0,37 (Zustand der Gebrauchstauglichkeit bzw. Tragfähigkeit) umgerechnet. In Abhängigkeit von diesen äquivalenten Zugfestigkeiten werden die Faserbetone in Klassen eingeteilt.

Untersuchungen von Weis /2/ an unbewehrtem ultrahochfesten Beton ergaben für die Umrechnung der Biegezug- in die Spaltzugfestigkeit am Ende der Linearität (schlagartiges Versagen) einen Faktor von 0,41 bzw. 0,52 (Mischungen mit Portlandzement bzw. Hochofenzement). Unter Vernachlässigung des Unterschiedes zwischen Spaltzug- und zentrischer Zugfestigkeit, liegen diese Faktoren in der Größenordnung der im DBV-Merkblatt /1/ angesetzten Umrechnungsfaktoren, welche für Faserbetone der Druckfestigkeitsklasse bis C60/65 gelten.

ERGEBNISSE

Frischbeton - FM-Bedarf in Abhängigkeit von der Stahlfaserlänge und -dosierung

Um den Einfluss der Fasergehaltes auf das Nachbruchverhalten zu untersuchen, wurde ausgehend von einer faserfreien Referenzmischung der Sand (0,1 – 0,5 mm) volumetrisch durch Stahlfasern ausgetauscht. Um den Einfluss der Frischbetonkonsistenz zu eliminieren, wurde versucht, das Setzfließmaß durch eine FM-Anpassung auf 26 ± 1 cm einzustellen.

Während eine Stahlfaserlänge von 2 mm keine nennenswerte FM-Erhöhung erforderte, musste bei den längsten Fasern (6 mm) die FM-Dosierung bei einem Stahlfasergehalt von 3,5 Vol.-% um knapp 30 % (vgl. Abbildung 3) erhöht werden.

Eine Stahlfaserlänge von 6 mm führte ab einem Fasergehalt von 3,5 Vol.-% zu einer deutlich erhöhten Leistungsaufnahme des Mischwerkzeuges, so dass bei dieser Faserlänge der Gehalt nicht weiter erhöht wurde. Von den 4 mm langen Stahlfasern konnte ein wesentlich höherer Stahlfasergehalt von bis zu 10 Vol.-% noch gemischt und verarbeitet werden.

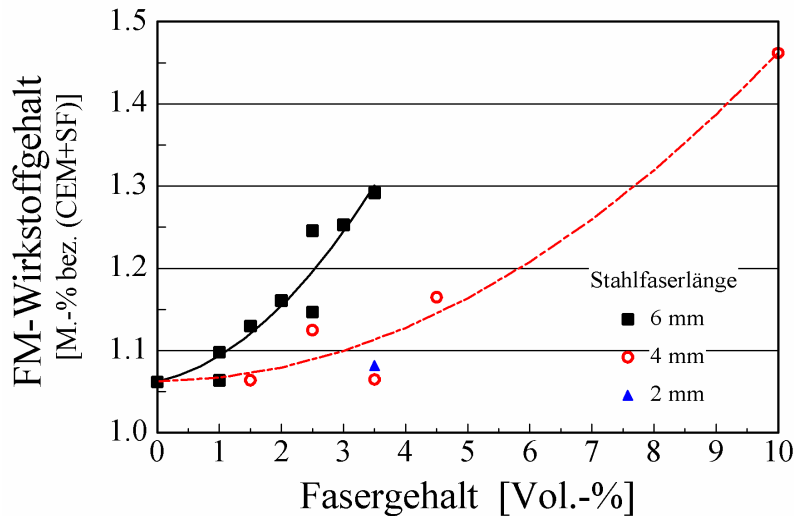


Abbildung 3: FM-Bedarf in Abhängigkeit von der Faserlänge und -dosierung (Setzfließmaß 26 ± 1 cm)

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Mischung B I lag unabhängig vom Stahlfasergehalt im Bereich von 200 N/mm^2 (s. Abbildung 4). Die Druckfestigkeiten der Mischungen B II – B IV lagen bei einem Stahlfasergehalt von 3,5 Vol.-% im Bereich von $185 - 215 \text{ N/mm}^2$.

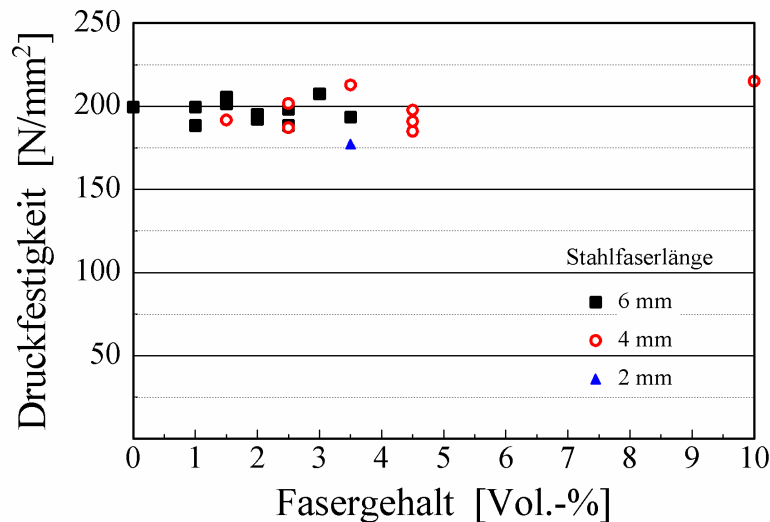


Abbildung 4: Mittlere Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Stahlfaserlänge und dem Stahlfasergehalt (Mischung B I)

Anders als die faserfreien Referenzproben (explosionsartiger Sprödbruch) versagten die Probekörper mit Stahlfasern deutlich duktiler. Lediglich bei den Mischungen mit niedrigen Fasergehalten bis ca. 2,0 Vol.-% zeigte sich oft ein durchgehender, vertikaler Riss. Auch bei hohen Stahlfasergehalten (bis 10 Vol.-%) konnte keine nennenswerte Steigerung der Druckfestigkeit durch den Effekt einer Querdehnungsbehinderung, ähnlich einer Umschnürungsbewehrung, festgestellt werden. Es ist an Probekörpern mit einer höheren Schlankheit (> 3) zu überprüfen, ob dieser Effekt durch die gewählte Probekörpergeometrie unterdrückt wurde.

Nachbruchverhalten im 3-Punkt-Biegezugversuch

Einfluss der Frischbetonkonsistenz

Untersuchungen an unterschiedlichsten Mischungen haben gezeigt, dass sich das Nachbruchverhalten im Biegezugversuch mit steigender FM-Dosierung und damit höherem Setzfließmaß bei sonst identischer Zusammensetzung verschlechtert (s. Abbildung 5).

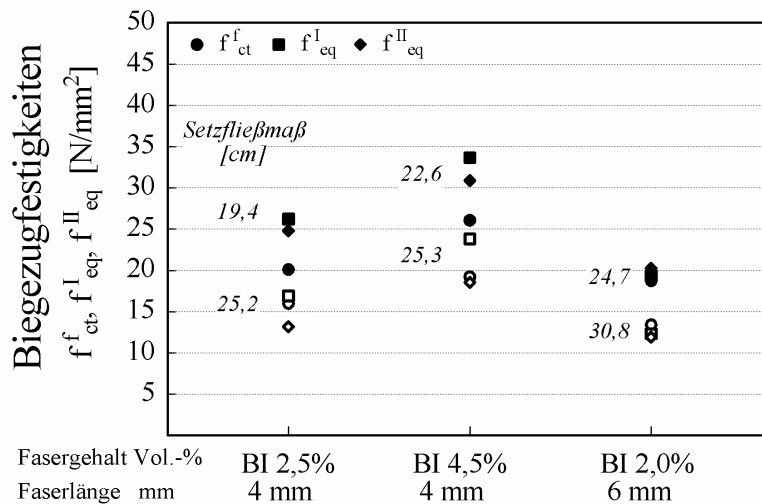


Abbildung 5: Äquivalente Biegezugfestigkeiten von Betonen mit unterschiedlichem Fasergehalt und –länge in Abhängigkeit vom Setzfließmaß

Einfluss der Betonzusammensetzung

Die Betonzusammensetzung hatte bei ähnlichen Druckfestigkeiten (183 – 216 N/mm²) und einem Stahlfasergehalt von 3,5 Vol.-% keinen signifikanten Einfluss auf die beiden äquivalenten Biegezugfestigkeiten (21 – 23 N/mm², s. Abbildung 6).

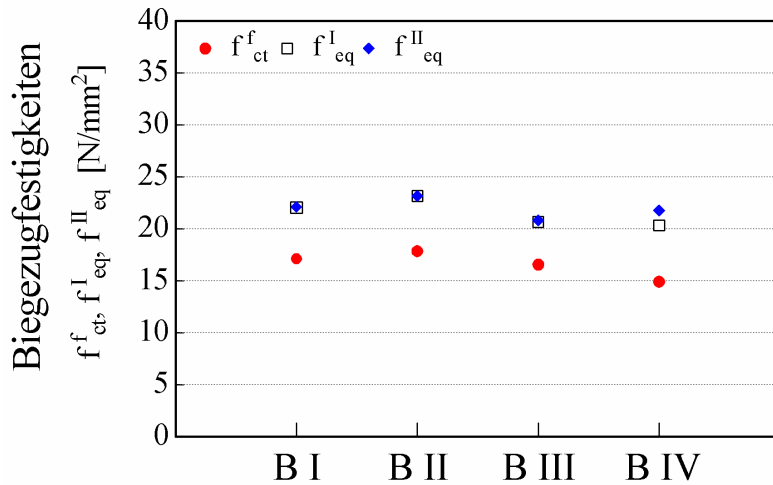


Abbildung 6: Äquivalente Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung

Einfluss der Stahlfaserlänge

Bei einer Stahlfaserlänge von nur 2 mm konnte aufgrund der geringen Verbundlänge keine befriedigende Tragwirkung (siehe Abbildung 7) im Bereich größerer Durchbiegungen mehr erzielt werden. Die Einbindelänge beträgt nach Kützing /3/ lediglich $\frac{1}{4}$ der Faserlänge.

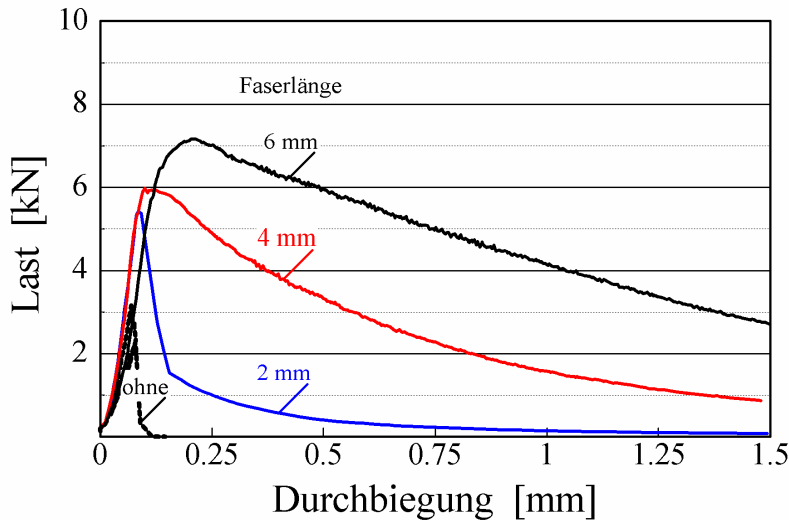


Abbildung 7: Nachbruchverhalten der Probekörper in Abhängigkeit von der Faserlänge (Fasergehalt 3,5 Vol.-%, Setzfließmaß 26 ± 1 cm)

Die Biegezugfestigkeit f_{ct}^f am Ende der Linearität betrug bei allen Faserlängen rd. 17 N/mm^2 . Die äquivalente Biegezugfestigkeit $f_{eq,I}$ (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) fiel bei den 4 und 6 mm langen Stahlfasern mit 19 N/mm^2 bzw. 18 N/mm^2 größer aus als bei den 2 mm langen Fasern (13 N/mm^2).

Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit, bei dem größere Durchbiegungen erlaubt sind, fiel die äquivalente Biegezugfestigkeit $f_{eq,II}$ mit abnehmender Faserlänge (6, 4, 2 mm) von 18 auf 15 bzw. 4 N/mm² ab (vgl. Abbildung 8).

Um die Effekte der größeren Faseranzahl bei kürzeren Fasern und der Einbindelänge der langen Fasern zu nutzen, wurden Betone mit einer Kombination aus 2,0 Vol.-% 4 mm Fasern und 1,5 Vol.-% 6 mm Fasern untersucht. Mit dieser Kombination wurden die höchsten äquivalenten Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I} = f_{eq,II} = 22$ N/mm² erreicht (s. Abbildung 8).

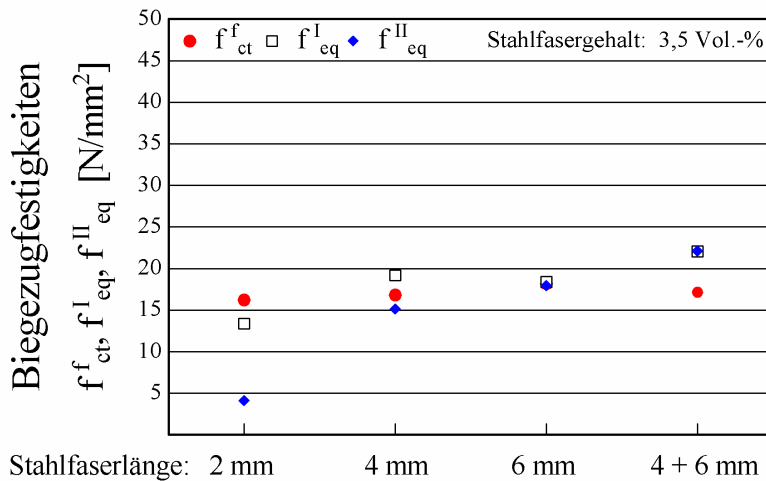


Abbildung 8: Äquivalenten Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von der Stahlfaserlänge

Einfluss des Stahlfasergehaltes

Mit steigendem Stahlfasergehalt stiegen die äquiv. Biegezugfestigkeiten unabhängig von der Faserlänge linear an. Während im Falle der 6 mm Fasern die beiden äquiv. Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ und $f_{eq,II}$ aufgrund der langen Einbindelänge (ca. 1,5 mm \cong $\frac{1}{4}$ Faserlänge) immer identisch waren, fiel $f_{eq,II}$ bei den 4 mm Fasern unabhängig von Fasergehalt niedriger aus (s. Abbildung 9).

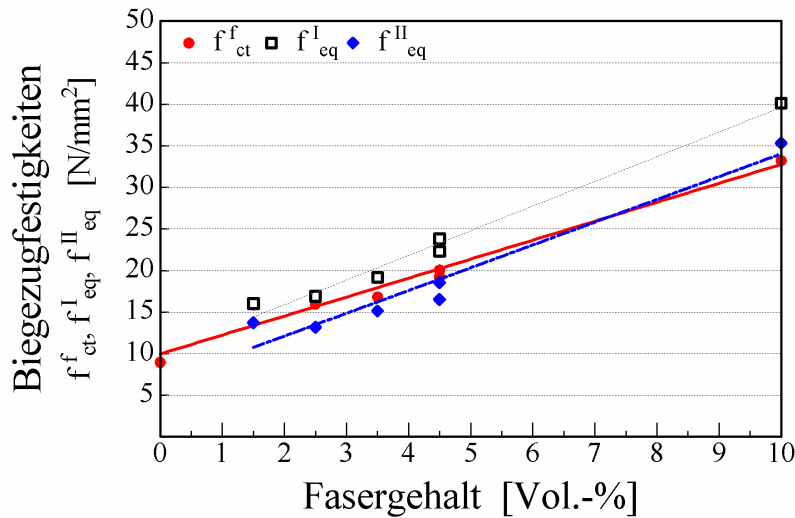


Abbildung 9: Äquivalente Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit vom Fasergehaltenes (Stahlfaserlänge 4 mm)

Einfluss von PP-Fasern

Durch den Einsatz von feinen PP-Fasern ($\varnothing = 0,016$ mm) konnte aufgrund der eingebrachten vielen „Mikro-Fehlstellen“ ein weicherer Bruch festgestellt werden. Die Stahlfasern wurden infolge der ausgeprägten Mikrorissbildung früher und kontinuierlicher aktiviert [3], so dass die äquivalente Biegezugfestigkeiten von rd. 21 auf 34 N/mm² im Falle des PP-Fasergehaltes von 0,45 Vol.-% gesteigert werden konnte (s. Abbildung 10). Diese Steigerung trat parallel mit einer Minderung der Setzfließmaße auf.

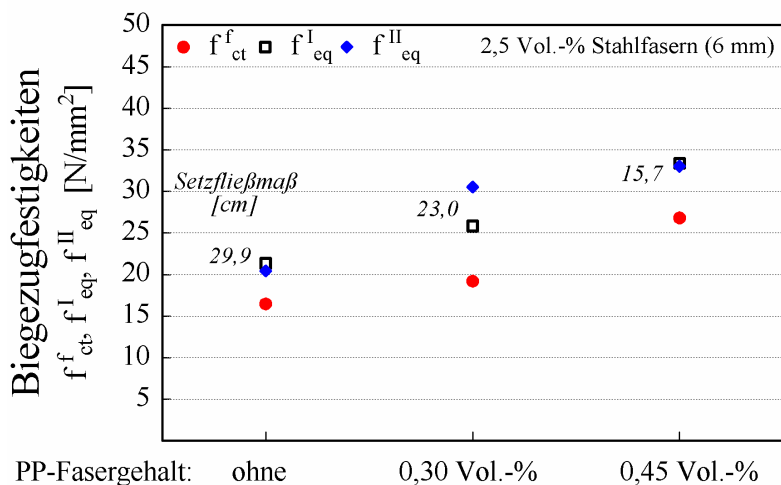


Abbildung 10: Äquivalente Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit vom PP-Fasergehalt

Nach Bestimmung der Faserbetonklasse, gemäß dem DBV-Merkblatt /1/ durch Umrechnung der äquiv. Biegezugfestigkeiten $f_{eq,I}$ und $f_{eq,II}$ in die äquiv. Zugfestigkeiten $f_{eq,ctm,I}$ und $f_{eq,ctm,II}$ unter Berücksichtigung der Serienstreuungen konnte im Bezug auf die Druckfestigkeit von 183 N/mm² eine hohe Faserbetonklasse von F 10,4/10,4 im Falle der Kombination aus 2,5 Vol.-% Stahlfasern (6 mm) und 0,3 Vol.-% PP-Fasern erreicht werden.

Zusammenfassung

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Stahlfaserlänge von 2 mm aufgrund der kurzen Verbundlänge nicht ausreicht.

Ein Stahlfasergehalt von 2,5 bis 3,5 Vol.-% führt insbesondere in Kombination mit feinen Polypropylen-Fasern (0,3 - 0,45 Vol.%) zu einem guten Nachbruchverhalten.

Eine Kombination aus 4 und 6 mm langen Stahlfasern hat bei gleichem Anteil eine bessere Verarbeitbarkeit und ein etwas besseres Nachbruchverhalten bewirkt. Dies ist auf das Abstimmen der beiden Effekte, basierend auf der größeren Faseranzahl bei kürzeren Fasern und der guten Einbindelänge der langen Fasern, zurückzuführen.

Während sich der Einfluss aus vier unterschiedlichen Betonrezepturen mit drei Zementen kaum bemerkbar machte, führte die durch eine erhöhte FM-Dosierung erreichte weichere Konsistenz zu einem deutlich ungünstigeren Nachbruchverhalten und größeren Streuungen innerhalb einer Serie.

Literatur

- /1/ Deutscher Beton-Verein e.V.: DBV Merkblatt „Stahlfaserbeton“, Wiebaden Okt. 2001
- /2/ Weis, M.: Einfluss des w/z-Wertes und des Silikastaubgehaltes auf Frisch- und Festbetoneigenschaften von Hochleistungs-Feinkorn-Beton. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TUM, München 2000.
- /3/ Kützing L.: Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone. Dissertation an der Universität Leipzig, 2000, ISBN 3-519-05267-9.

Verfasser:

Dipl.-Ing. Ingo Schachinger und
Dipl.-Ing. Thorsten Stengel
Lehrstuhl für Baustoffkunde und
Werkstoffprüfung
Materialprüfungsamt für das Bauwesen -
Abteilung Baustoffe
Baumbachstraße 7

D-81245 München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
Fachgebiet Gesteinshüttenkunde
Materialprüfungsamt für das Bauwesen -
Abteilung Baustoffe
Baumbachstraße 7

D-81245 München