

ORIGINAL ARTICLE



Faserbewehrter UHPC auf Basis von alkalisch aktivierten Bindemittel

Alexander Wetzel¹ | Janna Link¹ | Bernhard Middendorf¹

Korrespondenz

Dr. Alexander Wetzel
Universität Kassel
Institut für konstruktiven Ingenieur-
bau
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwe-
sens und Bauchemie
Mönchebergstraße 7
34125 Kassel
Email: alexander.wetzel@uni-kassel.de

¹ Universität Kassel, Kassel,
Deutschland

Kurzfassung

Die mechanische Leistungsfähigkeit von faserverstärktem Ultrahochleistungsbeton auf der Grundlage alkalisch aktivierter Schlacke wurde untersucht, wobei der Schwerpunkt auf der Verwendung von Stahlfasern lag. Die Biegezugfestigkeit ist im Vergleich zu UHPC auf der Basis Portlandzement als Bindemittel erhöht. Die Korrelation der Biegezugfestigkeitsprüfung mit Faserauszugsversuchen ergab eine Verbesserung des Verbundverhaltens in der Grenzflächen-Übergangszone des AAM-UHPC im Vergleich zum OPC-UHPC. Bei Vergleichen von Mehrfachfaserauszugsversuchen mit den Biegezugfestigkeiten zeigt sich eine Tendenz zu höheren Festigkeiten für Edelstahlfasern, während bei dem Faserauszug die messingbeschichteten Stahlfasern eine höhere Verbundstärke aufweisen. Zusätzliche Auszugsversuche unter Variation des Auszugswinkel zeigen jedoch eine Bestätigung der Biegezugfestigkeitsergebnisse. Bei schrägem Faserauszug weisen die Edelstahlfasern Vorteile auf. Mittels μ -CT durchgeführte in-situ Auszugsversuche weisen auf einen stärkeren Verbund von Edelstahlfasern im schrägen Auszug auf. Dies ist vermutlich auf einen stärkeren Reibungsverbund infolge einer stärkeren Topographie im Vergleich zu den messingbeschichteten Stahlfasern zurückzuführen. Im Vergleich zum geraden Auszug scheint die Topographie der Edelstahlfasern einen stärkeren Effekt zu bewirken.

Schlüsselwörter

Ultrahochleistungsbeton, Stahlfaser, Faserbewehrung, AAM, Biegezugfestigkeit, Faserauszug, μ CT, Hüttensandmehl, Silika Staub, Wasserglas,

1 Einleitung

Die wichtigsten Merkmale von Ultrahochleistungsbeton sind die geringe Kapillarporosität und die hohe Druckfestigkeit [1]. Beide Eigenschaften ergeben sich aus dem niedrigen Wasser-Bindemittel-Verhältnis und der Gefügeoptimierung durch den Einsatz reaktiver Feinstoffe, wie Silikastaub, sowie unreaktiver wie Quarzmehl. Aufgrund der Vorteile der hohen Druckfestigkeit wird weniger Beton benötigt, was sich positiv auf den CO₂-, Wasser- und Material-Fußabdruck auswirken kann [2]. Ziel ist es jedoch, diese Fußabdrücke durch Optimierung der Zusammensetzung weiter zu verringern. Alkali-aktiviertes Material basiert auf alumo-silikatischen Vorprodukten, meist Hüttensandmehl, Flugaschen oder Metakaolin und einem Aktivator, meist Alkali-Wasserglas oder Alkali-Hydroxid [3],[4], [5]. In früheren Arbeiten wurde berichtet, dass es möglich ist, einen UHPC ohne Portlandzement unter Verwendung von alkalisch-aktiviertem Material herzustellen [6]. Zwar weist dieser UHPC keinen Zement auf, wird aber nachfolgend aufgrund der vergleichbaren Eigenschaften als Beton bzw. als UHPC bezeichnet. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz von Sil-

kastaub in einer bestimmten Menge das rheologische Verhalten des AAM-UHPC verbessert werden kann und ein Wasser/Bindemittel-Verhältnis von weniger als 0,2 ohne Verwendung von Fließmitteln realisiert werden kann.

Ferner konnten die Zusammensetzung dieser AAM-UHPC-Formulierung im Hinblick auf die Abbindezeit und die Druckfestigkeit optimiert werden durch den Einsatz eines Wasserglases mit einem niedrigeren Modul, wodurch eine Kombination mit Kalium-Hydroxid nicht mehr nötig war [7]. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf den mechanischen Eigenschaften unter Variation der zugesetzten Stahlfasern. Aus diesem Grund wurden sowohl Biegeversuche als auch Faserauszugsversuche durchgeführt [6]. Es ist allgemein bekannt, dass Stahlfasern das Nachrissverhalten von UHPC verbessern [7]. Stahlfasern im Größenbereich von ca. 6-60 mm Länge und 0,15-0,50 mm Durchmesser werden für UHPC in einem Anteil von ca. 1-3 Vol% verwendet [9]. Neben dem Vorteil der höheren Biegezugfestigkeit und des verbesserten Nachrissverhaltens bewahren die Fasern den Beton vor Makrorissen durch Verzahnung und daraus resultierender gleichmäßiger Verteilung von Mikrorissen [10]. Stahlfasern weisen eine Zugfestigkeit im Bereich von 1000-2500 MPa auf und

übernehmen eine Bewehrungsfunktion im Beton, dessen Zugfestigkeit unbewehrt unter einem Zehntel der Druckfestigkeit liegt. Unter Belastung entsteht im Beton ein Riss, der sich aufweitet, die Fasern werden herausgezogen und durch Reibungskräfte entsteht das verbesserte Nachbruchverhalten. Bei einem Versagen der Fasern geht das Nachbruchverhalten, das man auch als pseudoduktile bezeichnen kann, verloren. Daher sind die Geometrie der Fasern und die Bindungsstärke zwischen Fasern und anorganischer Bindemittelmatrix von entscheidender Bedeutung. Die vorliegenden Untersuchungen konzentrieren sich daher auf das Verbundverhalten von Stahlfasern in ultrahochfestem Beton auf Basis alkalisch aktivierter Schlacke. Es soll geprüft werden, ob das Nachbruchverhalten verbessert wird, wie es für UHPC auf Basis von OPC bekannt ist. Bei Untersuchungen an UHPC auf OPC-Basis wurden Einzel- und Mehrfach-Faserauszugsversuche unter schräger Einbettung untersucht [11]. Auf Basis dieser Methodik wurden auch hier Mehrfachfaserauszugsversuche bei unterschiedlichen Einbettungswinkeln untersucht. Zudem wurden einzeln eingebettete Fasern unter verschiedenen Einbettungswinkel kombiniert mit -Messungen mittels hochauflösender μ -CT-Untersuchungen an iterativen Auszugsstufen vorgenommen um charakteristische Rissentwicklungen und andere mikrostrukturelle Aspekte während des Faserauszugs zu untersuchen.

2 Methoden und Materialien

2.1 AAM-UHPC

Der in diesen Untersuchungen verwendete UHPC basiert auf Hüttensandmehl Silika-Staub welche durch eine Lösung aus Kaliumwasserglas aktiviert werden. In früheren Arbeiten wurde eine Mischung aus Alkalihydroxid und einer anderen Art von Wasserglas verwendet [6]. Hier wurde abweichend eine Kaliwasserglaslösung verwendet, deren Modul ($\text{SiO}_2:\text{K}_2\text{O}$; mol%) einen Wert von 1,0 aufweist. Die Korngrößenverteilung und die spezifischen Oberflächen aller Ausgangsstoffe sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die zementbasierte UHPC-Formulierung, welche dem Vergleich dient ist ebenso aufgeführt. Detaillierte Informationen zur Herstellung und Eigenschaften dieser UHPC-Formulierung kann Wiemer et al. [9] entnommen werden.

Tabelle 1 Mischungszusammensetzung von UHPC basierend auf alkalisch aktivierten Bindemitteln (AAM-UHPC) und auf Portlandzement (OPC-UHPC).

		AAM-UHPC	UHPCref (OPC)
Quarzsand	[M%]	50	41,2
Quarzmehl	[M%]	8	8,5
Hüttensandmehl	[M%]	27	
CEM I 52.5R SR/NA	[M%]	-	34
Silikastaub	[M%]	15	7,2
Fließmittel (PCE)	[M% bwoc]	-	1,3
w/b-Verhältnis *	[M/M]	0,23	0,21

* Wasser/Bindemittel-Verhältnis

Die Mischungen (Tabelle 1) wurden in Intensivmischern mit einem Volumen von entweder 1 dm^3 oder 3 dm^3 hergestellt. Die Mischungen erfolgten in einem klimatisierten Labor bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit und $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Beim Mischvorgang des AAM-UHPC wurden zunächst die trockenen Komponenten ohne Sand 60 s lang gemischt, dann wurde die Wasserglaslösung zugegeben und 180 s lang weitergemischt. Nach einer Mischpause, in der die restlichen trockenen Komponenten auf dem Mischwerkzeug und dem Behälter entfernt wurden, erfolgte die Zugabe des Sandes und nach weiteren 150 s konnte die Mischung direkt in die Formen gegossen werden. Wurden Fasern verwendet, so erfolgte die Zugabe direkt nach der Zugabe des Sandes, wobei darauf zu achten ist, dass die Fasern nicht agglomerieren. Nach dem Abdecken wurden die Proben bei 20°C und 65% r. F. gelagert. Nach einem Tag werden die Proben entformt und in geschlossenen Plastikbeuteln bei 20°C bis zur Prüfung gelagert. Neben der Abbindezeit wurde das Ausbreitmaß direkt nach dem Mischen sowie der Erstarrungszeitpunkt unter Standardbedingungen ($20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.F.}$) gemessen (Tabelle 2). Schwindmessungen wurden an ausgewählten Prismen durchgeführt. Die Biegezugfestigkeiten (4-Punkt) wurden an Prismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ nach 7 und 28 Tagen gemessen.

2.2 Faserbewehrung

Zwei verschiedenen Fasertypen und ihr Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von faserverstärktem AAM-UHPC wurden charakterisiert. Es wurden sowohl messingbeschichtete Stahlfasern (SF), die üblicherweise in UHPC zur Verbesserung des Nachbruchverhaltens eingesetzt werden, als auch Edelstahlfasern (ESF) verwendet. Abb. 1 zeigt die Oberflächen der beiden Fasertypen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (ESEM), wobei ein Quanta FEG 250 von FEI (Hillsboro, USA) verwendet wurde. Die Bilder wurden im Sekundärelektronenmodus (SE) aufgenommen (Nieder- und Hochvakuum, Spannung 5-15 kV, Arbeitsabstand 10 mm).

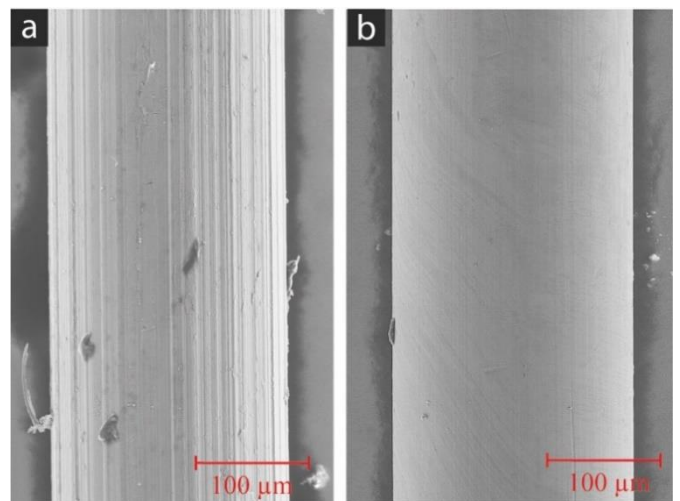


Abbildung 1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (Sekundärelektronenmodus) von a) Edelstahlfasern (ESF) und b) Stahlfasern (messingbeschichtet)

Bei den ESF (Abb. 1a) handelt es sich um austenitische Chrom-Nickel-Stahlfasern mit hoher Korrosionsbeständigkeit. In Zugversuchen wurde eine durchschnittliche Zugfestigkeit von ca. 2070 MPa ermittelt. Die SF (Abb. 1b)

bestehen aus hochfestem Stahl und haben eine Zugfestigkeit von ca. 2000 MPa. Sie weisen produktionsbedingt kleine Risse auf und es sind leichte Rillen in Längsrichtung zu erkennen, die bei den ESF jedoch stärker ausgeprägt sind.

2.3 Faserauszugsversuche

Um die Haftfestigkeit zwischen den Fasern und der Bindemittel-Matrix zu quantifizieren, wurden Faserauszugsversuche durchgeführt. Es wurden Proben mit den Abmessungen $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ verwendet, in die fünf Fasern ($l = 17\text{ mm}$) über eine Länge von $5 \pm 0,5\text{ mm}$ eingebettet wurden. Die Faserauszugsversuche wurden in einem wegkontrollierten Aufbau mit einer konstanten Geschwindigkeit von $0,01\text{ mm/s}$ unter Verwendung einer 150 kN Zwick/Roell-Testing-Vorrichtung durchgeführt. Die eingebettete Faserlänge und die Auszugsgeschwindigkeit wurden auf der Grundlage der Ergebnisse von [6] und [11] bestimmt. Für die Versuche wurden fünf Fasern in einen Stahlhalter eingespannt (Abb. 2). Die Probe wurde in die Aussparung des Stahlhalters eingesetzt und mit einer Gewindestange an die Lastleitung der Prüfmaschine angeschlossen. Die Vorrichtung besteht aus zwei Probenhaltern. Der untere Probenhalter ist fest mit dem Tragrahmen verbunden, während der obere Teil über eine Gleitführung beweglich ist und zum Auszug der Faser führt. Die Auszugskraft wurde mit einer 250-N -Kraftmessdose gemessen, und die Querverschiebung wurde mit einem Messwertnehmer aufgezeichnet.

Um das Verbundverhalten genauer zu bestimmen, wurden senkrecht (0°) in die Betonmatrix eingebettete Fasern mit unterschiedlichen Auszugswinkeln (15° und 45°) verglichen. Die Neigung der Fasern wurde durch eine Fixierung der Fasern bei der Probenherstellung sichergestellt, so dass die freie Faserlänge ebenfalls geneigt und beim Faserauszug durch die Klemmvorrichtung vertikal fixiert wurde (Abb. 2). Durch die vollständige Fixierung der freien Faserlänge und einer geradlinigen vertikale Bewegung der Lasteinleitung wurde ein schräger Auszug erreicht. Fasern sind innerhalb von Betonprüfkörpern wie den verwendeten Biegezugprismen nicht alle parallel zur Belastungsrichtung orientiert. Daher stellen senkrecht eingebettete Fasern nur einen Teil der Belastung im Biegezugversuch dar. In einem realen Versagensfall sollten die Fasern eine zufällige Orientierung über den Riss aufweisen und werden daher nicht gerade aus der Betonmatrix herausgezogen. Der Auszug bei verschiedenen Einbettungswinkeln stellt daher ein genaueres Bild über die reelle Belastung nach Rissöffnung dar. Genauere Beschreibungen zum Versuchsaufbau können Schleiting et al. entnommen werden [11].

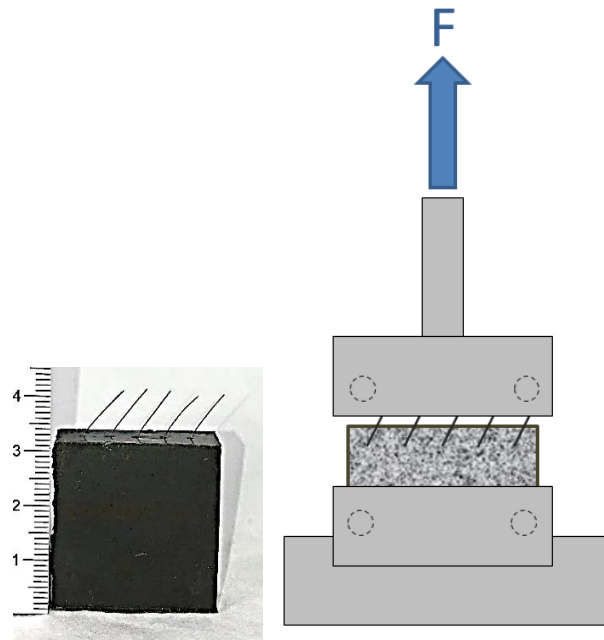


Abbildung 2 Fünffachfaserauszug bei einer Einbettung von 30° Neigung der Fasern.

2.4 Faserauszugsversuche in μ -CT

Mithilfe eines Deben Microtest Lastrahmens wurden weggesteuerte Einzelfaserauszugsversuche durchgeführt (Abb. 3). Der in situ Faserauszug wurde an bestimmten Stufen unterbrochen, damit μ -CT-Scans durchgeführt werden konnten. Hierbei zeigen sich in den entsprechenden Stellen im Kraft-Weg-Diagramm senkrechte Einschnitte. Während des Scans wurde der Lastrahmen auf der entsprechenden Belastungsstufe gehalten und nicht bewegt. Anschließend wurde der Auszug mit einer Geschwindigkeit von $0,1\text{ mm/m}$ bis zur nächsten Stufe fortgesetzt. Die aus dem Einzelfaserauszug entstehenden Kraft-Weg-Diagramme sind großen Schwankungen unterworfen. Faktoren wie die tatsächliche Verbundlänge der Faser, eine eventuell beschädigte oder ungleichmäßige Beschichtung sowie Beschädigungen der Betonmatrix oder eine unregelmäßige Probekörpergeometrie fallen stärker ins Gewicht als bei den Mehrfachfaserauszugsversuchen, die zum einen mit fünf statt einer Faser durchgeführt werden und zum anderen eine größere Anzahl an Probekörpern enthalten und somit eine größere Stichprobenmenge abbilden.

Bei den Einzelscans wurden die Stufen 0 mm (kein Faserauszug), $0,5\text{ mm}$, 1 mm und 3 mm abgebildet. Bei ausgewählten Proben wurden zusätzlich Bilder des leeren Faserkanals aufgenommen. Die μ -CT-Messungen wurden mit einer Spannung von 140 kV , einer Leistung von 10 W und einer Belichtungszeit von 7 s durchgeführt. Da sich der Lastrahmen in einem Glas-Zylinder befindet, muss insgesamt mehr Materie durchstrahlt werden und höhere Belichtungszeiten kommen zustande. Aufgrund der beschriebenen Artefakte konnten die mechanischen Werte der Versuche nicht direkt mit Mehrfachfaserauszug korreliert werden. Die mikrostrukturellen Aspekte des Auszugs bei entsprechenden Auszugsstufen weisen dennoch wichtige Informationen zum Faserauszug auf.



Abbildung 3 Setup für Einzelfaserauszug im Lastrahmen für Untersuchungen mittels μ -CT

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Faserbewehrter AAM-UHPC

Die Druckfestigkeiten von AAM-UHPC sind mit zement-basierten UHPC (OPC-UHPC) vergleichbar und überschreiten diese sogar (Tabelle 2). Nicht zu vernachlässigen ist allerdings der frühere Erstarrungszeitpunkt und das deutlich ausgeprägtere Schwindverhalten. Zwar kann das Schwinden durch den Einsatz von Stahlfasern reduziert werden, jedoch bewirken 1 Vol.% Stahlfasern nur eine schwache Verringerung der im Vergleich zu OPC-UHPC sehr hohen Schwindwerte.

Diese hohen Schwindwerte sind zu einem großen Teil auf Trocknungsschwinden zurückzuführen wie vergleichende Versuche mit Wellrohren und Schwindprismen aufzeigen. Aufgrund der unzureichenden Reduktion des Schwindmaßes wird auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse hier verzichtet.

Tabelle 2 Mechanische Eigenschaften von AAM-UHPC und OPC-UHPC ohne und mit Stahlfasern.

		AAM-UHPC	UHPCref (OPC)
Druckfestigkeit (7d)	[MPa]	162,9	138,2
Druckfestigkeit (28d)	[MPa]	194,2	176,7
Erstarrungszeitpunkt	[min]	116	560
Ausbreitmaß	[mm]	340	280
Biegezugfestigkeit			
+1 Vol% Edelstahlfasern (7 d)	[MPa]	18,1	16,6
+1 Vol% Stahlfasern (7 d)	[MPa]	17,6	14,0
+1 Vol% Edelstahlfasern (28 d)	[MPa]	18,9	
+1 Vol% Stahlfasern (28 d)	[MPa]	24,7	

Die Ergebnisse der Biegezugfestigkeit des AAM-UHPC nach 28 Tagen zeigen einen Unterschied zwischen den beiden

Fasertypen. Im Vergleich zu den Edelstahlfasern (ESF) weisen die Probekörper mit den Stahlfasern (SF) eine maximale Biegefestigkeit auf, die um etwa 23 % höher ist. Im Allgemeinen wird bei AAM-UHPC mit SF nach 28 Tagen eine deutlich höhere Biegefestigkeit erzielt im Vergleich zu AAM-UHPC mit ESF.

3.2 Mehrfach-Faserauszugsversuche

Betrachtet man beim Mehrfachfaserauszug den geraden Auszug so zeigen sich hier vergleichbare Werte für beide Fasertypen (Abb. 4). Eine leicht höhere Verbundspannung lässt sich hier für die Stahlfasern im Vergleich zu den Edelstahlfasern feststellen. Dies ist gegenläufig zu den Biegezugfestigkeiten nach 7 Tagen, wo die Proben mit Edelstahlfasern höhere Festigkeiten aufweisen (Tabelle 2). Betrachtet man jedoch die Faserauszugsversuche bei den Winkeln 15° und 45°, so wird der Widerspruch aufgelöst. Die Maximalkraft ist bei den Edelstahlfasern höher, zudem weist der danach folgende Verlauf des Schlupfs einen flacheren Verlauf auf, was auf einen höheren Reibungsverband schließt.

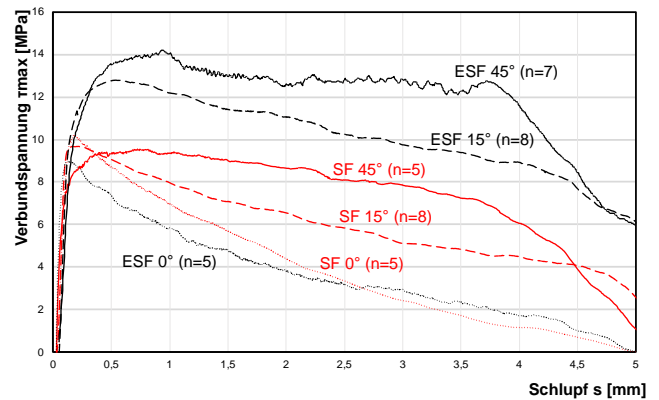


Abbildung 4 Mehrfachfaserauszug unter verschiedenen Winkeln. „n“ gibt die Anzahl der Versuche wieder über die gemittelt wurde.

3.3 Faserauszugsversuche in μ -CT

Für den Vergleich der in situ Faserauszugsversuche wurden aus den 3D-Daten zweidimensionale Schnittbilder generiert. Eine 3D-Rekonstruktion eines Datensatzes ist exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt. Die hier schräg eingebettete Stahlfasern weist eine leichte Verkropfung am Ende auf, was auf das manuelle Zurechtschneiden der Fasern auf entsprechende Länge zurückzuführen ist. Die erstellten Vergleichsaufnahmen beim in situ Faserauszug stellen nicht exakt denselben Bildbereich dar, obwohl die Probe sich über den gesamten Faserauszug im Gehäuse der CT befindet. Die aus den Messparametern resultierende Auflösung von 4,31 μ m begrenzt auch die Dicke der Schichten, aus denen die Schnittbilder bestehen. Wenn die Probe durch das Ziehen an der Faser oder die Bewegung des Lastrahmens um wenige μ m verrutscht oder auch wenn die 0°-Projektion durch das Adjustieren des Aufnahme-feldes in einem anderen Winkel oder an einer anderen Stelle beginnt, verschiebt sich die exakte Position des Schnittbildes.

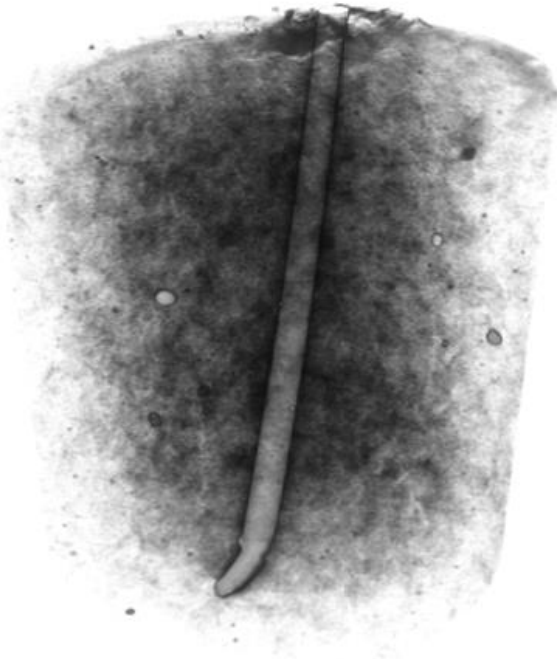


Abbildung 5 3-D-Rekonstruktion von schräg eingebetteter Stahlfaser in AAM-UHPC.

Abb. 6 zeigt den Faserauszug von einer Edelstahlfasern (ESF) in einem Neigungswinkel von 15° aus AAM. Bereits vor dem Beginn des Faserauszugs ist in Bild a) ein deutlich ausgeprägter Ausbruchkrater an der Oberfläche der Betonmatrix zu erkennen, was auf eine eventuelle Beschädigung beim Einspannen der Faser in den Lastrahmen zurückzuführen ist. Im weiteren Verlauf des Auszugs wird der bereits abgelöste Teil des AAM von der Faser in Auszugsrichtung weggerissen. Während des Auszugs bricht außerdem eine Porenwand in der Nähe des Faserkanals (Abb. 6d; unten rechts).

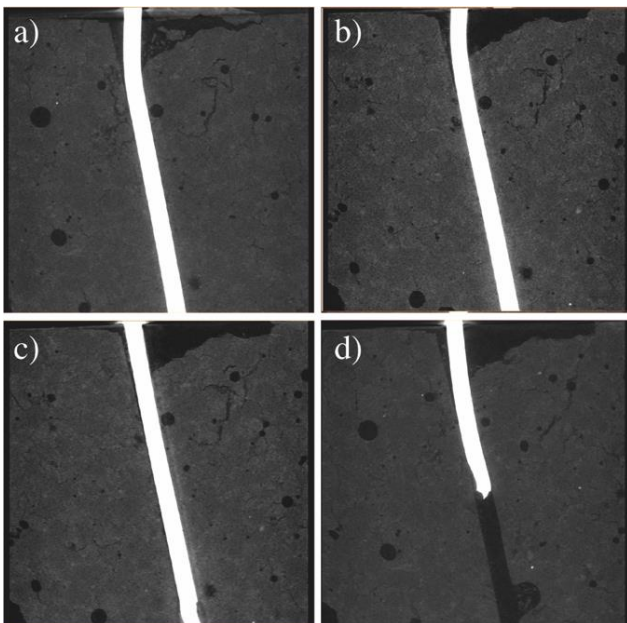


Abbildung 6 μ -CT Schnitt während Faserauszug von Edelstahlfasern (ESF) aus AAM-UHPC bei einem Einbettungswinkel von 15° bei unterschiedlichen Auszugslängen (a – 0 mm, b – 0,5 mm, c – 1mm, d – 3 mm).

Der Auszug der SF bei einem Einbettungswinkel von 15° lässt einen vergleichsweise kleinen Ausbruchkegel zurück (Abb. 7). Auch die Poren in der Nähe des Faserkanals bleiben unbeschädigt.

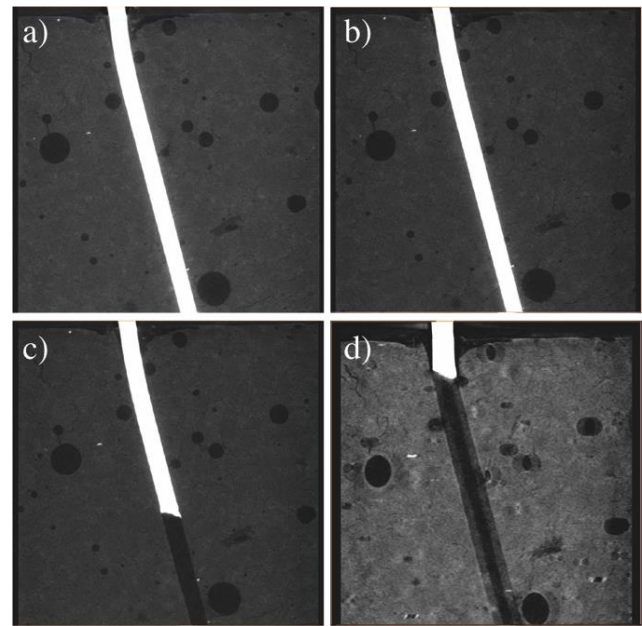


Abbildung 7 μ -CT Schnitt während Faserauszug von Stahlfasern (SF) aus AAM-UHPC bei einem Einbettungswinkel von 15° bei unterschiedlichen Auszugslängen (a – 0 mm, b – 0,5 mm, c – 1mm, d – 3 mm).

Der Faserauszug einer ESF bei einem Neigungswinkel von 45° ist in Abbildung 8 dargestellt. Auch hier ist vor dem Faserauszug bereits ein Ausbruchkrater in der Betonmatrix zu erkennen (Abb. 8a). Im weiteren Verlauf des Auszugs bilden sich Risse quer zur Faserlage, die den Krater vergrößern. In der letzten vermessenen Auszugsstufe kommt es zu einem Riss der Faser. Bei den Mehrfachfaserauszug zeigte sich eine erhöhte Verbundspannung bei diesem höheren Einbettungswinkel, jedoch ist hier nicht auszuschließen, dass die Form am Faserende (siehe auch Abb. 5) zu einer Verankerung in der Betonmatrix geführt hat und somit die Zugfestigkeit der Faser überschritten wurde.

Der Auszug der SF in einem Winkel von 45° (Abb. 9) ist begleitet von einem großen Ausbruchkrater. Auch das Umknicken der Faser beim Auszug ist in b) an der Oberkante der AAM-Matrix deutlich zu erkennen. Die zuvor bereits sichtbaren Risse, welche vermutlich auf das Schwinden zurückzuführen sind, weiten sich auf (Abb. 9c) und verursachen Schäden an der AAM-Matrix. Der Ausbruchkrater wird während des Auszugs weiter vergrößert. Die auftretenden Schäden sind auf das Auftreten von Umlenkkraften zurückzuführen, die beim schrägen Faserauszug im Vergleich zum geraden Faserauszug auftreten [12].

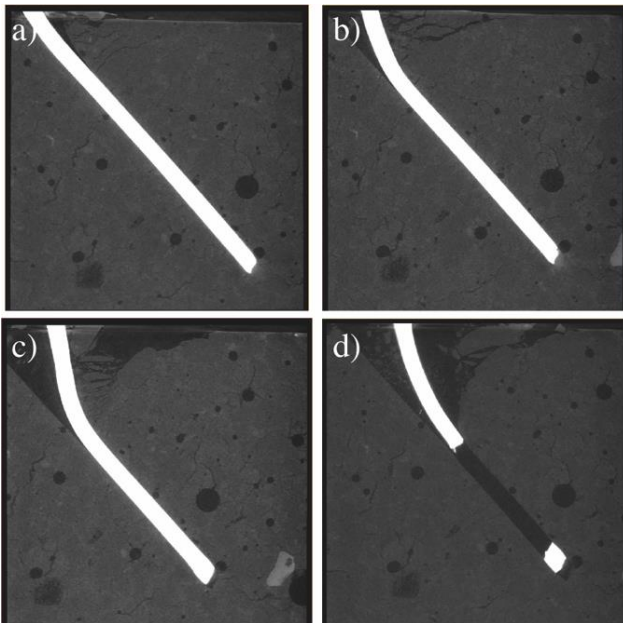


Abbildung 8 μ -CT Schnitt während Faserauszug von Edelstahlfasern (ESF) aus AAM-UHPC bei einem Einbettungswinkel von 45° bei unterschiedlichen Auszugslängen (a – 0 mm, b – 0,5 mm, c – 1 mm, d – 3 mm).

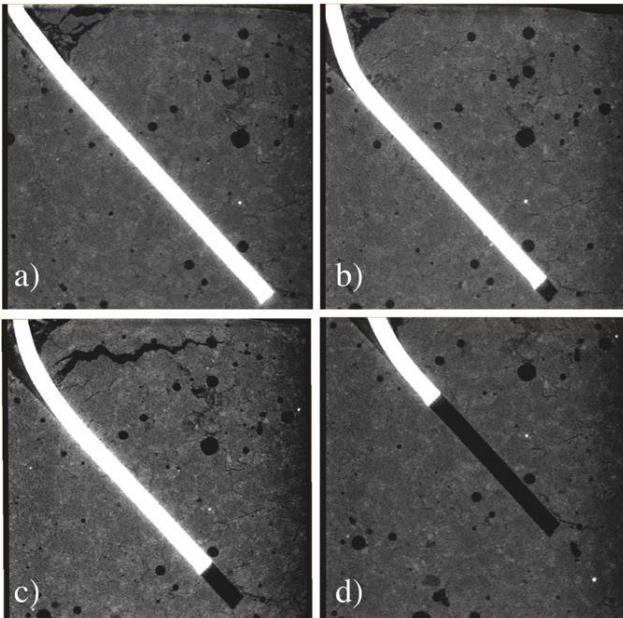


Abbildung 9 μ -CT Schnitt während Faserauszug von Stahlfasern (SF) aus AAM-UHPC bei einem Einbettungswinkel von 45° bei unterschiedlichen Auszugslängen (a – 0 mm, b – 0,5 mm, c – 1 mm, d – 3 mm).

4 Zusammenfassung

Der im Vergleich zu OPC-UHPC leicht verbesserte Verbund, der sich in der Biegezugfestigkeit, aber auch im Faserauszug zeigt (siehe auch [7, 9]) ist auf einen besseren Verbund von Bindemittelmatrix zu Faser zu erklären. Trotz hoher Schwindwerte und auch einhergehender Schwindrisse weist der AAM-UHPC eine hohe Druck- und Biegezugfestigkeit. Aufgrund der produktionsbedingten Riefen weisen die Edelstahlfasern eine veränderte Topographie im Vergleich zu den glatten Stahlfasern auf.

Die höheren Verbundspannungen, die beim Einsatz von Edelstahlfasern erreicht wurden, können auf die verbesserte Anhaftung der Bindemittelmatrix an der Oberfläche der Fasern zurückgeführt werden. Auch die im weiteren

Verlauf des Faserauszugs erhöhte Verbundspannung der Edelstahlfasern weist auf einen verbesserten Reibungsverbund durch Mikroverzahnung mit den Längs-Riefen hin. Beim Erreichen der maximalen Verbundspannung lösen sich die Fasern aus der Matrix. Danach stellt sich der Verbund über Reibung ein. Aufgrund der Neigung werden diese Kräfte vermehrt auf die Matrix übertragen, woraus die höhere Verbundspannung beim weiteren Auszug resultiert. Dies führt zu Schädigungen in der Matrix, wie anhand der μ -CT-Aufnahmen gezeigt werden konnte. Die Defekte zeigen sich durch Ausbildung eines Ausbruchkraters und Aufweitung von bestehenden und Ausbildung von neuen Rissen.

Insgesamt ist die Herstellung von faserbewehrtem AAM-UHPC als lohnenswert zu betrachten, weil zum einen die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen signifikant erhöht wird, zum anderen die materialeigene Problematik der hohen Schwindwerte perspektivisch verbessert werden kann. Die Methodik des in situ Faserauszugs mittel μ -CT zeigt mikrostrukturelle Defekte auf und gewährt Einblicke über Versagensmechanismen während des Faserauszugs. Die verbesserte Haftung des AAM-UHPC an den Fasern sollte in Rheologie- und Kontaktwinkelanalysen untersucht werden.

Referenzen

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, J.; Leutbecher, T.; Fröhlich, S. (2014) *Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples*. Ernst & Sohn: s.l., ISBN 978-3-433-60415-1.
- [2] Sameer, H.; Weber, V.; Mostert, C.; Bringezu, S.; Fehling, E.; Wetzel, A. (2019) *Environmental Assessment of Ultra-High-Performance Concrete Using Carbon, Material, and Water Footprint*. *Materials* (Basel), 12, doi:10.3390/ma12060851.
- [3] Provis, J.L.; Bernal, S.A. (2014) *Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials*. *Annu. Rev. Mater. Res.*, 44, 299–327, doi:10.1146/annurev-matsci-070813-113515.
- [4] Sun, B.; Ye, G., de Schutter, G. (2022) *A review: Reaction mechanism and strength of slag and fly ash-based alkali-activated materials*. *Construction and Building Materials*, Volume 326, 126843.
- [5] Singh, N.B.; Middendorf, B. (2020) *Geopolymers as an alternative to Portland cement: An Overview*. *Construction and Building Materials*, 237 (10), 117455, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117455.
- [6] Wetzel, A.; Middendorf, B. (2019) *Influence of silica fume on properties of fresh and hardened ultra-high performance concrete based on alkali-activated slag*. *Cement and Concrete Composites*, 100, 53–59, doi:10.1016/j.cemconcomp.2019.03.023.
- [7] Wetzel, A.; Göbel, D.; Schleiting, M.; Wiemer, N.; Middendorf, B. (2022) *Bonding Behaviour of Steel Fibres in UHPFRC Based on Alkali-Activated Slag*. *Materials* 15, 1930. doi:10.3390/ma15051930
- [8] Schleiting, M.; Wetzel, A.; Krooß, P.; Thiemicke, J.;

- Niendorf, T.; Middendorf, B.; Fehling, E. (2020) *Functional microfibre reinforced ultra-high performance concrete (FMF-UHPC)*. Cement and Concrete Research 2020, 130, 105993, doi:10.1016/j.cemconres.2020.105993.
- [9] Wiemer, N.; Wetzel, A.; Schleiting, M.; Krooß, P.; Vollmer, M.; Niendorf, T.; Böhm, S.; Middendorf, B. (2020) *Effect of Fibre Material and Fibre Roughness on the Pullout Behaviour of Metallic Micro Fibres Embedded in UHPC*. Materials (Basel), 13, 3128, doi:10.3390/ma13143128.
- [10] Leutbecher, T.; Fehling, E. (2012) *Tensile Behavior of Ultra-High-Performance Concrete Reinforced with Reinforcing Bars and Fibers: Minimizing Fiber Content*. ACI Structural Journal, 109, doi:10.14359/51683636.
- [11] Schleiting, M.; Klier, K.; Wiemer, N.; Wetzel, A.; Zarges, J.-C.; Heim, H.-P.; Middendorf, B. (2023) *Fibre pullout behaviour of fibre-reinforced UHPC with TPE-coated fibres*. Construction and Building Materials 376, 131043.
- [12] Stürwald, S. (2011) *Versuche Zum Biegetragverhalten von UHPC Mit Kombiniertes Bewehrung*. Forschungsbericht Fachgebiet Massivbau, Universität Kassel, Kassel, Germany, pp.16-29.