

Wiley Industry Days

WIN DAYS**7.-9. Juni** 2021www.WileyIndustryDays.com

Bauen 2021 - Werden Sie mit uns Teil der WINDays

Virtuelle Show mit Konferenz, Ausstellung und Networking für Architektur und Bauingenieurwesen, Automatisierung, Machine Vision, Photonics, Healthcare und Sicherheit.

- **Virtuelle Ernst & Sohn Ausstellungshalle** mit Auditorium für Architektur und Bauingenieurwesen
- **Fokus auf Ihr Networking** - Ihre Kommunikation - Ihren Vertrieb
- **3 Leistungspakete bieten Ihnen optimale Repräsentationsmöglichkeiten**, inkl. direkter Kommunikation mit den Messteilnehmern per Video- und Textchat u. v. m.



STANDBUCHUNGEN

Wenden Sie sich jetzt an unsere Experten!

Fred Doischer - Fred.Doischer@Wiley.com
Tel. +49 (0)172-3999-853

Sigrid Elgner - Sigrid.Elgner@Wiley.com
Tel. +49 (0)30-47031-254



**JETZT KOSTENFREI ALS
BESUCHER REGISTRIEREN!**
WWW.WILEYINDUSTRYDAYS.COM

Von der Bauteilfügung zu leichten Tragwerken: Trocken gefügte Flächenelemente aus UHPFRC

Mit der Entwicklung von neuartig gefügten, dünnwandigen und damit leichten Bauteilen soll der ressourceneffiziente Einsatz von ultrahochfestem faserverstärkten Feinkornbeton in Tragwerken ermöglicht werden. Die Herstellung von modularen, leistungsfähigen UHPFRC-Bauteilen wird durch den „Digital Workflow“ aus digitaler Planung, Berechnung und CNC-gesteuerter Fertigungstechnik ermöglicht. Durch die Verbindung von leichten Betonelementen mittels neuer hochpräziser Non-Standard-Fügeprinzipien können diese material- und kraftflussgerecht miteinander verbunden werden. Die Ergebnisse trocken gefügter Plattenbalken zeigen die Herstellbarkeit und das Potenzial der Trockenstoßverbindungen im realen Maßstab. Beim Nachweis der Tragfähigkeit von dünnwandigen Bauelementen zeigt sich, dass der Einfluss der Faserbewehrung zusätzlich beachtet werden muss.

Light-Weight Structures made of thin walled, dry jointed surface elements made of UHPFRC

With the development of novel jointed, thin walled and thus light components the resource-efficient use of ultra-high performance fiber-reinforced fine grained concrete in structures can be realized. The manufacturing of modular and efficient UHPFRC components is achieved by the digital workflow as a result of digital design, calculation and CNC-controlled manufacturing technology. By linking lightweight concrete components with new, high-precision non standardized joints, such components can be connected material and force flow compatible with each other. The results with dry jointed T-beams show the manufacturability and the potential of the dry jointing system on a large scale. When checking the load capacity of thin-walled construction elements, the influence of fiber reinforcement must be especially considered.

1 Einleitung

Die Entwicklung besonders leistungsfähiger Betone und die Fortschritte bei der digitalen Planung und Fertigung ermöglichen im Betonbau neuartige leichte Bauweisen. So kann man ultrahochfesten faserverstärkten Feinkornbeton (UHPFRC) mechanisch hoch auslasten, geringe Bauteilabmessungen realisieren und Bauteile herstellen, die dem Kraftfluss folgend geometrisch günstig geformt sind. Stab- und Flächentragwerke aus Beton mit einem hohen, bisher unerreichten Verhältnis der Nutzlast zum Eigengewicht können damit realisiert werden.

Solche Tragwerke müssen wegen der aufwendigen und präzisen Herstellung aus Fertigteilen errichtet werden, was hohe Anforderungen an die Bauteilverbindungen stellt. Die Bauteilverbindung kann unterschiedlich ausgeführt werden. Zum einen kann dies über Verklebung mittels einer zusätzlichen Zwischenschicht geschehen, sog. Match-Cast-Verfahren [1], außerdem durch den nachträglichen Einbau von Koppelstellen [2] oder mittels sogenannter „Non-Standard-Fügungen“ [3], in welchen die Kräfte über Trockenstöße mit hoher Ebenheit der Kontaktflächen übertragen werden. Diese Non-Standard-Fügungen können entweder durch hochpräzise Schalungen oder durch Nachbearbeitung der Kontaktflächen hergestellt werden. Der Vorteil solcher, auf mechanischen Prinzipien beruhenden, verzahnten Fügungen liegt in der guten Herstellbarkeit und Reproduzierbarkeit, dem sehr

schnellen und kostengünstigen Aufbau der Bauteile sowie in der Möglichkeit des Rückbaus.

In einem abgeschlossenen Forschungsprojekt [4] wurde zuerst die trockene Fügung dünner stabförmiger Bauteile untersucht, vgl. [3, 5, 6, 7]. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den ersten Ergebnissen des laufenden Forschungsprojekts [8] innerhalb des DFG-Schwerpunktprogramms 1542 zur Entwicklung von trocken gefügten Flächen- und Schalentragwerken aus vorgefertigten dünnen Bauteilen. Diese Bauteile sind überwiegend nur 15 mm dick und werden aus UHPFRC ohne reguläre Bewehrung, aber mit Vorspannung ohne Verbund hergestellt. Bei flächigen Konstruktionen dieser Art liegt eine besondere Herausforderung auf den linienförmigen Verbindungen. Die Verbindungen müssen eine präzise trockene Bauteilfügung auch auf gekrümmten Verbindungslinien ermöglichen und mechanisch sehr effizient sein, also Druck-, Zug- und Querkräfte übertragen können.

In diesem Beitrag werden zuerst die entwickelten Trockenstoßverbindungen in Form von Zahnleisten für ebene Flächentragwerke vorgestellt. Anschließend werden die Herstellung sowie experimentelle und rechnerische Ergebnisse der Untersuchungen an einem idealisierten vorgespannten Plattenbalkenelement gezeigt. Dieses besteht aus modular gefügten Balkensegmenten und mittels Verzahnung angefügten Plattenelementen und stellt einen Ausschnitt aus einem einachsigen gespannten Tragsystem dar, vgl. Bild 1.

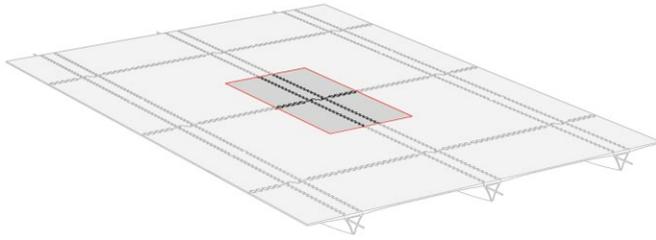


Bild 1 Prinzipskizze eines trocken gefügten, einachsigen vorgespannten Plattenbalkentragwerks (Grafik: LUKAS LEDDEROSE)
Schematic diagram of dry-fit, uniaxial prestressed T-beam structure (graphic: LUKAS LEDDEROSE)

2 Zahnleisten als Trockenstoßverbindungen für Flächenbauteile

Die Standards von Fügeprinzipien müssen immer im Kontext der jeweiligen technologischen, aber auch gesellschaftlichen Entwicklungen betrachtet werden. So waren die Fügeverfahren zur Nutzung der Prinzipien mechanischer Kraftübertragung in der Vergangenheit bereits sehr weit ausgefeilt [9]. In unserem heutigen Baualltag sind uns derartige Fügeprinzipien jedoch weitestgehend unbekannt. Grund hierfür ist die Umkehrung der wirtschaftlichen Grundsätze als Folge der Industrialisierung: Nicht mehr das eingesetzte Material definiert heute die Wirtschaftlichkeit eines Bauwerks, sondern die Lohnkosten für die Arbeit. Dementsprechend sind die heutigen Tragwerke und Fügeprinzipien auch ein Abbild dieser Entwicklung: Geometrisch einfache und masseintensive Bauteile werden entsprechend simpel zusammengefügt.

2.1 Entwicklung und Herstellung von hochpräzisen Trockenstoßverbindungen

Ziel bei der Entwicklung von Fügeprinzipien für schlanke, flächige Bauteile ist es, die Voraussetzungen zum Bau von Platten oder Schalen aus segmentierten, trocken gefügten Fertigteilen zu schaffen und die einzelnen Elemente zu dünnwandigen UHPFRC-Bauteilen effizient und kostensparend zu verbinden. Für die folgenden Untersuchungen wurde der UHPFRC aus dem ersten Forschungsprojekt verwendet [3]. Aus numerischen Voranalysen und bereits gewonnenen Erkenntnissen zur Lastübertragung bei trocken gestoßenen stabförmigen Bauteilen [3] konnten wichtige Kriterien zur Form der Flächenfugungen abgeleitet werden:

- Zur Übertragung von **Druckkräften** ist eine möglichst große Fläche orthogonal zur Druckbeanspruchung notwendig.
- Die Verwendung von Hinterschnitten mit Anschlusswinkeln zwischen 10° und 20° ermöglicht die beste Übertragung von **Zugkräften**.
- Für die Übertragung der **Querkraft** sollten die Querschnitte möglichst gleichmäßig und mit geringen Abständen durch Schubzähne miteinander verbunden werden.

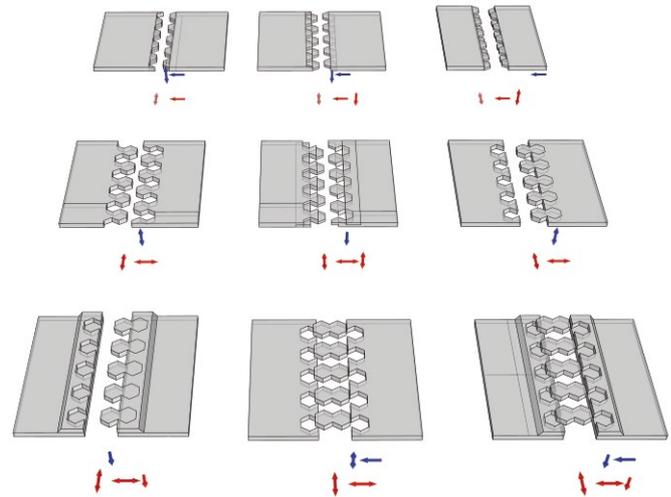


Bild 2 Herleitung der geometrischen Fügemöglichkeiten; blaue Pfeile zeigen Fügerichtungen und rote Pfeile die übertragbaren Kraftrichtungen an (Grafik: LUKAS LEDDEROSE)
Designing process of different jointing types; blue arrows show jointing direction and red arrows the direction of force transfer (graphic: LUKAS LEDDEROSE)

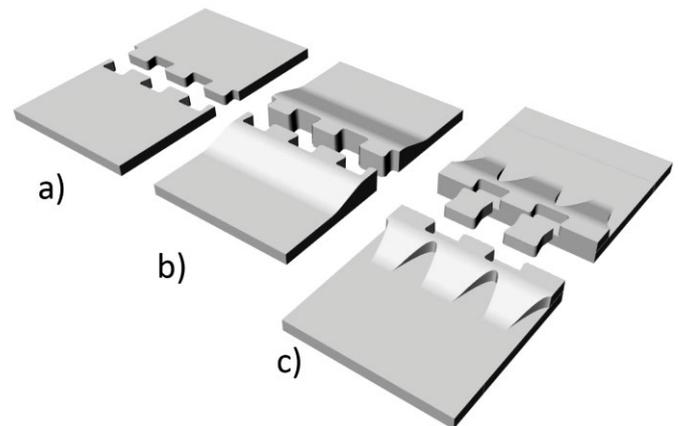


Bild 3 Plattenverbindungen a) als flacher Fügestoß, b) als aufgeweitete Verbindung mit Zug- und Druckzone (Stoßtyp B2.2) und c) als fugeoptimierte Verbindung mit zusätzlichen UHPFRC-Passstücken (Stoßtyp B2.4) (Grafik: LUKAS LEDDEROSE)
Slab joints as a) thin slab joint, b) added joint in tension and compression zone (type B2.2) and c) optimized jointing concept with UHPFRC inlays (type B2.4) (graphic: LUKAS LEDDEROSE)

Im ersten Schritt wurden Fügeprinzipien in Form von Zahnleisten entwickelt, welche sich durch den jeweiligen Form- und Kraftschluss unterscheiden. Wie in Bild 2 dargestellt, kann durch das Zusammenführen von vertikalen und horizontalen Schnittführungen im Stoßbereich eine Vielzahl an dreidimensionalen Fügegeometrien hergeleitet werden. Im folgenden Schritt wurden die Verbindungstypen auf ihre Fügetauglichkeit in unterschiedlichen Fügeorientierungen (blaue Pfeile) und die grundsätzliche Fähigkeit zur Kraftübertragung für Normalkraft sowie Biegung und Querkraft (rote Pfeile) beurteilt.

Unterstützend wurden die Fügetypen als reale Modelle mittels 3-D-Printer hergestellt und auf ihre Funktionalität hin überprüft. Eine Auswahl der entwickelten Zahnleistenverbindungen zeigt Bild 3. Solche quer zur Schalen-

ebene fügbaren Verbindungen erlauben die Übertragung von Druck- sowie Zugkräften durch eine Verzahnung der Elemente. Bild 3b) verdeutlicht, wie mit einer Aufdickung der Hebelarm für die Übertragung von Momenten im Stoßbereich vergrößert werden kann. Im Bild 3c) wird gezeigt, wie die Fügbarkeit auf der Baustelle durch separate UHPFRC-Passstücke erleichtert werden kann.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war die Herstellung einer sehr maßhaltigen Schalung. Es wurden diverse Varianten der drei Schalungsgrundwerkstoffe Polyurethan-Schaum, XPS-Hartschaumplatten und Wachs im Hinblick auf ihre Zerspanbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Abformqualität untersucht, wobei insbesondere die hohe Oberflächenqualität der in einigen Wachschalungen abgeformten Bauteile [10, 11, 12] sowie der geringe Verschleiß der meisten Schalungen aus PU-Platten beeindruckte. Im Laufe des Forschungsprojekts wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Herstellung der Platten untersucht. Zum einen wurden Schalungen verwendet, die mit einer 3-Achs-CNC-Maschine gefräst wurden [7], zum anderen wurden mit Übermaß hergestellte Platten mit einer 5-Achs-Wasserstrahlanlage geschnitten.

Im Gegensatz zum CNC-Fräsen mit seiner einfachen Umsetzung des digitalen Modells in die realen Geometrien gestaltete sich die Methode des Wasserstrahlschneidens durch die notwendige Annäherung an die optimalen Schneidparameter komplexer, da die konische und sich je nach Plattenmaterial und Schneidtiefe ändernde Form des Schneidstrahls berücksichtigt werden musste. So stehen bei dieser Methode, nach Ermittlung des nötigen Korrekturfaktors bei der Geometrieerzeugung, die rationale Herstellung der Rohlinge und die Möglichkeit der scharfkantigen Innenkonturen der Realisierbarkeit von Absätzen und Taschen bei der Methode des CNC-FräSENS gegenüber.

Zur experimentellen Überprüfung der Tragfähigkeit trockener Verzahnungen von Schalensegmenten wurden verschiedene Versuchskörper hergestellt, wobei das Verhältnis von Zahnbreite zu Zahnhöhe sowie der Winkel der Zähne quer zur Plattenrichtung variiert wurden (Bild 4). Die hergestellten UHPFRC-Versuchskörper wurden mit einer Toleranz von $\pm 0,05$ mm und einem Winkel von 2° senkrecht zur Fügerrichtung gefertigt, sodass die konischen Verzahnungen nahezu gleitend ineinanderpassen.

2.2 Mechanische Leistungsfähigkeit von UHPFRC-Platten mit Zahnleistenverbindungen

Die Untersuchung von Platten mit unterschiedlichen Zahnleistenverbindungen wurde anhand einer Versuchsmatrix (Bild 4) mit unterschiedlichen Verhältnissen der Breite zur Höhe (Varianten A bis D) und Winkeln der Zahnleistenverbindung (Varianten 1 bis 3) vorgenommen. Die 400 mm langen Platten haben eine Breite von 200 mm in Richtung der Fügung bei einer Dicke von

	A 20 / 10	B 40 / 20	C 40 / 40	D 60 / 40
3 20°				
2 10°				
1 5°				

Bild 4 Versuchsmatrix zum Test der entwickelten Zahnleistenverbindungen (horizontal: b/h Verhältnis in [mm], vertikal: Zahnwinkel)
Matrix of developed tooth jointing system (horizontal: w/h ratio in [mm], vertical: tooth angle)

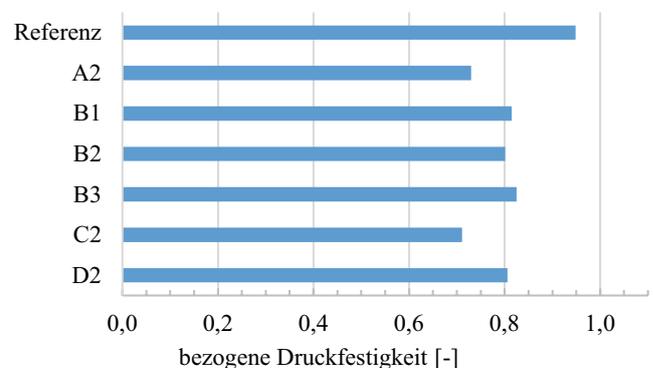


Bild 5 Ergebnisse der Druckversuche an Zahnleistenverbindungen bezogen auf die mittlere Zylinderdruckfestigkeit ($d/h = 80/160$ mm)
Results of compression test on tooth jointing system, normalized to cylinder strength ($d/h = 80/160$ mm)

15 mm. Es zeigte sich beim Fügen der Verbindungen, dass die benötigten Kräfte zum Zusammendrücken mit zunehmendem Fügewinkel und geringerem Breite-zu-Höhe-Verhältnis der Zähne größer wurden. Als optimal wird eine Fügung angesehen, die sich noch händisch, z. B. mit einem Kunststoffhammer, zusammenbringen lässt. Der Stoßtyp A erfordert aufgrund seiner engen Verzahnung bereits eine so hohe Fügekraft, dass ein Fügen nur noch mittels hydraulischer Pressen möglich ist.

Die Probekörper wurden weggeregelt in unterschiedlichen Beanspruchungsrichtungen geprüft. Für den **Druckversuch** quer zur Fügung wurden die Platten an den Enden plangefräst und in Stahlhalterungen eingespannt [7]. Ein Versagen der Platten konnte damit auf die freie Prüflänge von 140 mm beschränkt werden. Als Referenz wurde eine durchgehende Platte ohne Fügestelle geprüft. In Bild 5 sind die Versuchsergebnisse in einer auf die Zylinderdruckfestigkeit bezogenen Darstellung für die Zahnleistenverbindungen aufgetragen, um den Einfluss einer Fügung dünner Platten auf die erzielbare Festigkeit zu beschreiben. Die Zylinderdruckfestigkeit

wurde, aufgrund der hohen aufnehmbaren Druckkräfte des UHPFRC, an fünf Proben mit einem reduzierten Durchmesser $d = 80$ mm und einer Höhe $h = 160$ mm nach [13] bestimmt.

Die zwei geprüften Referenzplatten, hier als Referenz bezeichnet, versagen mit einem Betondruckbruch in Plattenmitte. Die Platten mit Verbindungselementen zeigen ein ähnliches Bruchverhalten, erreichen aber insgesamt aufgrund der Lastkonzentration an den Zahnwurzeln maximal 82% der Zylinderdruckfestigkeit (Stoßtyp B3 nach Bild 5). Die geringen Abweichungen untereinander und zur ungestoßenen Referenzplatte zeigen jedoch, wie klein der Einfluss der Fügegeometrie auf die Druckübertragung über die Fuge ist.

Im Gegensatz zum Druckversuch zeigte sich im 4-Punkt-Biegezugversuch, dass die Festigkeit sehr stark von dem Fügewinkel und der Zahnlänge abhängt (Bild 6). Die Biegezugfestigkeit wird hier auf die Prismenbiegezugfestigkeit bezogen dargestellt, da diese die Vergleichsgröße zur späteren Dimensionierung der Bauteile darstellt. Die nicht gefügte Platte als Referenz zeigt bereits, dass mit den 15 mm dicken Platten insgesamt nur Kräfte in Höhe von ca. 60% der Materialfestigkeit aufgenommen werden können. Diese typische Abminderung entsteht durch die ungünstigere Faserausrichtung bei den stehend betonierten Probekörpern [14] im Vergleich zum liegend betonierten Standardprisma. Dies kann durch später liegend betonierte Versuchskörper vermieden werden. Aufgrund der ansteigenden Zahnlänge kommt es von Stoßtyp A zu Stoßtyp D zu einem zunehmend duktileren Verformungsverhalten.

Grundsätzlich ist bei allen Stoßtypen eine starke Verringerung der Biegetragfähigkeit gegenüber der Referenzplatte festzustellen, da Kräfte größtenteils nur noch durch Reibung an den Zahnflanken übertragen werden können. Durch eine Aufdickung im Stoßbereich kann der Reibanteil zwischen den Zähnen erhöht werden und zusätzlich der Effekt der geometrischen Verzahnung durch Vergrö-

ßerung der unter Druck stehenden und somit zusammengepressten Kontaktflächen verstärkt werden. Die aus diesen Erkenntnissen heraus entwickelten Fügebauteile B2.2 (Bild 3 b), B2.3 und B2.4 (Bild 3 c) leiten sich aus dem Stoßtyp B2 ab, der aufgrund seiner guten Tragfähigkeit sowie Fügeigenschaften für die anschließenden Untersuchungen weiterverwendet wird. Die Fügung B2.3 ist eine Kombination aus der Fügung B2.2 mit dem UHPFRC-Passstück. Mittels der Fügeprinzipien B2.2 bis B2.4 ist es schlussendlich möglich, die Tragfähigkeit einer nicht gestoßenen Platte zu erreichen. Aufgrund des Versuchsaufbaus, bei dem die größte Momentenbeanspruchung im Bereich der Aufdoppelung liegt [7], konnte mit den Stoßtypen B2.2 und B2.3 sogar die Biegezugfestigkeit der Referenzplatte übertroffen werden (Bild 6).

In Plattendruckversuchen mit geeigneten Fügeflächen wurde die Tragfähigkeit für **querkraftbelastete Bauteile** bestimmt. Die Platten mit lediglich zwei Zähnen stellen dabei einen Ausschnitt aus einem kontinuierlichen Fügebauteil dar. Durch die fehlende seitliche Querdehnungsbegrenzung kommt es jedoch versuchsbedingt zu einem frühzeitigen Versagen bei Beanspruchungswinkeln zwischen 15° und 45° . Ausgelöst wird dies durch einen Riss, der jeweils an den Zahnwurzeln entsteht und durch die Platte fortschreitet (Bild 7 links). Bei einer Neigung der Fügefläche von 60° kommt es zu einem reinen Scherverversagen im Zahn (Bild 7 Mitte). Mit Scherversuchen unter einem Belastungswinkel von 90° konnte gezeigt werden, dass die Passstücke aus UHPFRC die Querkrafttragfähigkeit von monolithischen Zahnverbindungen ebenfalls erreichen (Bild 7 rechts).

Abschließend kann festgestellt werden, dass im reinen Druckversuch mit allen Zahnleistenverbindungen gute Tragfähigkeiten erreicht werden können. Bei den Biegezugversuchen zeigte sich jedoch, dass ein Neigungswinkel der Zähne quer zur Platte zwischen 10° und 20° für die Übertragung der Zugkräfte am besten geeignet ist. Durch die zusätzliche Aufdoppelung des Querschnitts ist es sogar möglich, die Tragfähigkeit einer nicht gestoße-

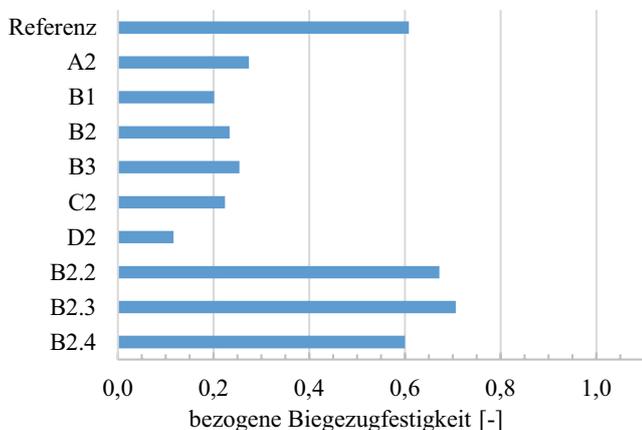


Bild 6 Biegezugfestigkeit bezogen auf die mittlere Prismenbiegezugfestigkeit (40/40/160 mm)
Flexural strength normalized to the flexural strength of prisms (40/40/160 mm)

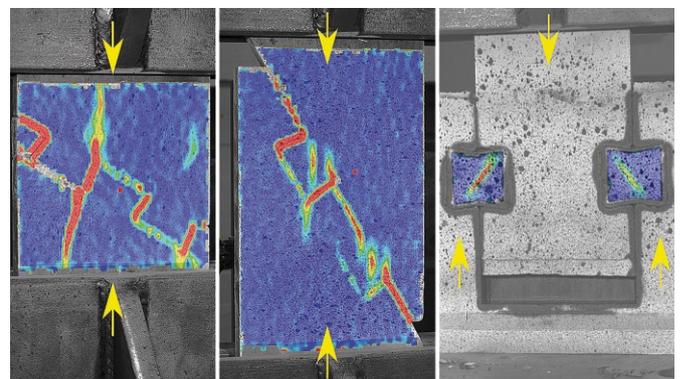


Bild 7 Rissbildung nach Erreichen der Traglast bei Scherversuchen mit Zahnleistenverbindungen unter 30° (links), 60° (Mitte) und mit UHPFRC-Passstücken unter 90° (rechts); gelbe Pfeile zeigen die Belastungsrichtung
Cracking after reaching the ultimate load in shear tests on tooth joints under 30° (left), 60° (middle) and with UHPFRC inlays under 90° (right); yellow arrows show loading direction

nen Platte zu erreichen. Dabei können neben monolithischen Zähnen auch Passstücke aus UHPFRC verwendet werden. Die Querkrafttragfähigkeit der Passstücke erreicht dabei ebenfalls die der monolithischen Zahnleistenverbindung. Daher eignen sich die Passstücke besonders gut für geometrisch komplexe Fügebauteile.

3 Trocken gefügte Plattenbalken aus UHPFRC

3.1 Material und Fügeprinzipien

Für die Herstellung von modularen, dünnwandigen gefügten Bauteilen aus UHPFRC aus Balken- und Plattenelementen wurde aufgrund der benötigten Betonmengen auf ein kommerzielles Produkt als Fertigmischung zurückgegriffen, welches selbstnivellierende Eigenschaften besitzt und sich einfach verarbeiten lässt (Tab. 1). Die mittleren Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5 sind in Tab. 2 dargestellt. Für die Dimensionierung und Bemessung der einzelnen Bauteile wurden die Mittelwerte aus den Standardversuchen verwendet.

Durch Zusammenführung von ebenen Flächen- und linienförmigen Balkenelementen entsteht ein zusammenwirkendes Bauteil in Form eines einachsig gespannten Plattenbalkens (Bild 8). Der Plattenbalken stellt einen Ausschnitt aus einem einachsig spannenden Tragsystem dar (Bild 1). Die Plattenelemente werden mittels Zahnleistenverbindungen mit dem Balken zusammengefügt. Untereinander werden Balken und Platten mit UHPFRC-Passstücken verbunden.

3.2 Herstellung modularer Plattenbalken

Da die modulare Bauweise des trocken gefügten Plattenbalkens (PB) exakte Elementabmessungen erfordert, wo-

Tab. 1 Ausgangsstoffe für den Beton UHPFRC ND-2,5 für Bauteilversuche
Mix design for concrete UHPFRC ND-2,5 for component tests

Ausgangsstoff	Masse [kg/m ³]
NANODUR [®] Compound 5941 Grau	1100
Halterner Quarzsand H33	1012
STRATEC Weidacon Mikro-Stahldrahtfasern (2,5 Vol.-%; d/l = 0,18/11 mm)	192
Fließmittel (GRACE ADVA [®] Flow 375)	21
Schwindreduzierer (GRACE Eclipse [®] Floor)	7
Wasser	159

Tab. 2 Materialkennwerte des UHPFRC ND-2,5
Material properties of UHPFRC ND-2,5

Kennwert	Mittelwert
Zylinderdruckfestigkeit (d/h = 80/160 mm)	138 MPa
Einachsige Zugfestigkeit (d/h = 80/160 mm)	9 MPa
Prismenbiegezugfestigkeit (b/h/l = 40/40/160 mm)	17 MPa
Elastizitätsmodul	49,2 GPa

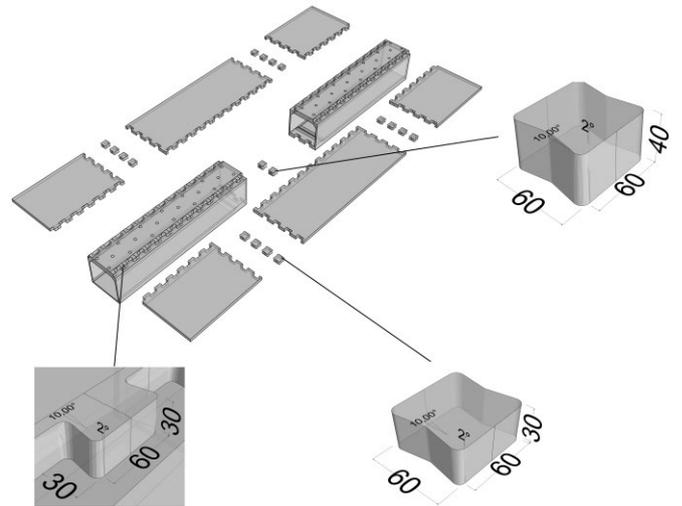


Bild 8 Fügeprinzipien für den UHPFRC-Plattenbalken (PB) mit UHPFRC-Passstücken und Zahnleistenverbindungen (Grafik: Lukas Ledderose) [15]
Joining system for UHPFRC T-beam (PB) with UHPFRC inlays and tooth joints (graphic: Lukas Ledderose) [15]

bei schon geringe Abweichungen der einzelnen Bauteile das Fügen zu einer Gesamtstruktur unmöglich machen, muss bei dem Konzept der Schalung und deren Herstellung großer Wert auf die Maßgenauigkeit gelegt werden. Um dem gerecht zu werden, wurden einige Vortests mit CNC-gefrästen Polyurethan-Platten aus obomodulan[®] verschiedener Dichten durchgeführt und ausgewertet.

Die unterschiedlichen Schalungen sowie die Geometrien der Betonbauteile wurden mit optischer Messtechnik erfasst und mit den digitalen Modellen verglichen. Die Auswertung dieser Vortests hat ergeben, dass sich obomodulan[®] mit einer Dichte von 700 kg/m³ hervorragend für die Erstellung der Schalung für die einzelnen Plattenbalkenkomponenten eignet. Weitere Gründe hierfür sind die mechanischen Eigenschaften des obomodulan[®], welche es ermöglichen, Verbindungstechniken für die einzelnen Schalungsteile wie Gewindemuffen, Innengewinde und Passnuten vorzusehen. Zusätzlich besitzt das Material eine feine, geschlossenporige Struktur, es kann mehrmals verwendet werden und ist gut fräsbearbeitbar. Daher wurde die gesamte Schalung des Plattenbalkens aus obomodulan[®]-Platten mithilfe einer 3-Achs-CNC-Fräsmaschine hergestellt.

Da der herzustellende Plattenbalken modular aufgebaut ist, wurde lediglich die Hälfte der Schalung spiegelsymmetrisch hergestellt. Es waren somit zwei Betonagen notwendig, um einen kompletten Plattenbalken herzustellen. Nach Herstellung der einzelnen Schalungsteile und deren Fügung zu einer Balkenschalung wurden der Balken sowie drei Platten in einer zweihäufigen Schalung betoniert. Das Betonagekonzept der Platten sah vor, dass diese stehend betoniert werden sollten, da alle Zahnleisten Schalseiten sein mussten und die Dicke der Platte ebenfalls die zulässige Toleranz einhalten sollte.

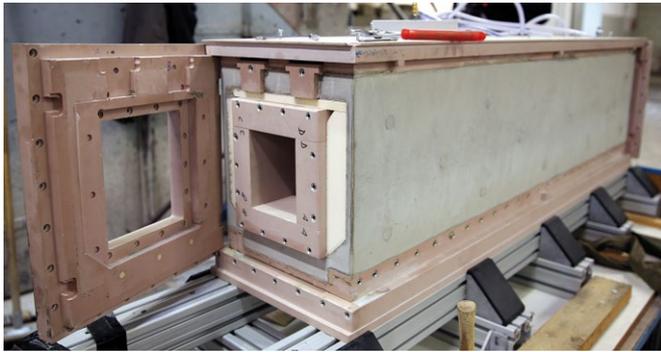


Bild 9 Gegossener Balken in der Schalung
Beam in formwork



Bild 10 Fügung mit UHPFRC-Passstücken auf der Unterseite des Plattenbalkens in der Zugzone
Joining with UHPFRC inlays under the T-beam in the tension zone

Beim Balken sollten möglichst alle Seiten Schalseiten sein, um den hohen Genauigkeitsansprüchen gerecht zu werden, was die Betonage jedoch erheblich erschwerte. Bis auf eine kleine Einfüllöffnung am späteren Auflager des Plattenbalkens waren alle innen- und außen liegenden Betonseiten Schalseiten. Auf Bild 9 ist die fertige und zum Teil bereits ausgeschaltete Hälfte des Balkens dargestellt. Trotz des Versuchs der Entlüftung über ein Schrägstellen der Schalung hat die aufsteigende Luft in den oberen ca. 5 mm des Querschnitts zu deutlichen Verdichtungsstellen geführt (Bild 10). Die Betonieroberseite bildet später die Balkenunterseite. Während des Zusammenfügens des Plattenbalkenquerschnitts konnten die Einzelteile per Hand bewegt, zusammengesteckt und gefügt werden. Die Passstücke wurden auf der Unterseite des Plattenbalkens mit einem Kunststoffhammer ohne Schädigung der Struktur eingeschlagen (Bild 10).

3.3 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten an trocken gestoßenen Plattenbalken

Insgesamt wurden drei Versuche an trocken gestoßenen Plattenbalken (PB) mit einer Gesamtlänge von 3,0 m und einer Breite von 1,3 m durchgeführt. Jedes Balkenelement hatte eine Höhe von 35 cm und eine Breite von 33 cm. Die Wandstärke bei PB1 und PB2 beträgt 1,5 cm und wurde bei PB3 auf 2,5 cm erhöht. Die aufgesetzten Plat-



Bild 11 Versuchsaufbau; dargestellt ist der mit CF-Gelege verstärkte Plattenbalken PB2
Test setup of T-beam strengthened with CF-sheets PB2

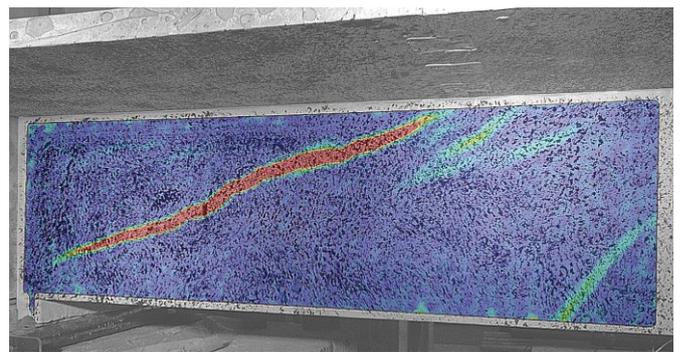


Bild 12 Mittels Fotogrammetrie sichtbar gemachte Verformungen des Steges von PB1, blau: Bereich ohne Zugverformung, rot: Zugdehnungen
Photogrammetric measured deformations on web of PB1, blue: area without tensile deformations, red: tensile strains

ten haben eine Dicke von 3,0 cm und eine Breite von 53,5 cm bei einer Länge von 144 bzw. 78 cm (Bild 8). Die horizontale Vorspannung im Balken wurde mit einem Carbonstab mit einer Zugfestigkeit von 1,8 MN realisiert, der am Spannanker (Bild 11 rechts) mit 24 M16-Schrauben per Drehmomentschlüssel definiert vorgespannt wurde. Die Vorspannung verläuft in der halben Höhe des Balkenelements und folglich außerhalb der Schwerachse des kompletten Plattenbalkens, wodurch ein der äußeren Belastung und dem Eigengewicht entgegenwirkendes Moment entsteht. Die vertikale Lasteinleitung erfolgte im 4-Punkt-Biegeversuch in den Drittelpunkten über Lasttraversen gleichzeitig auf Balken- und Plattenelemente (Bild 11). Die Probekörper wurden gelenkig gelagert und mit 27 % bzw. bei PB3 mit 22 % der Zylinderdruckfestigkeit bezogen auf die Balkenquerschnittsfläche vorgespannt, um eine hohe Biegetragfähigkeit zu erreichen.

Die Dimensionierung der Bauteile erfolgte mit dem Ziel, das Versagen außerhalb der Fügstellen zu erzeugen. PB1 zeigte ein Querkraftversagen (Bild 12) im Steg. Aufgrund einer nicht optimalen Faserverteilung bildete sich dabei nur ein einzelner großer Schubriss unter ca. 23° aus. Im Bild ist ebenfalls ein sich öffnender Biegeriss rechts unten zu erkennen, der ein baldiges Versagen der Zugzone andeutet. Um aufgrund der dünnen Wandstärke ein erneutes Querkraftversagen zu vermeiden, wurde PB2 mit einem Kohlefasergelege im Querkraftbereich verstärkt

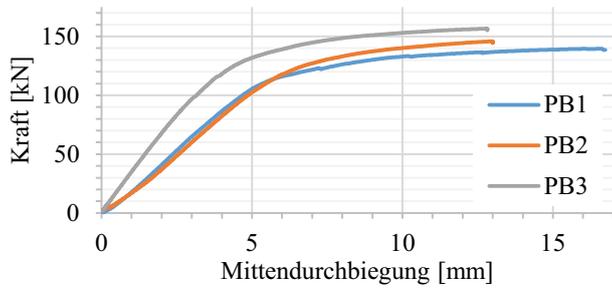


Bild 13 Kraft-Durchbiegungsdiagramm für 4-Punkt-Biegeversuche an UHPFRC-Plattenbalken
Force deflection curve for 4-point bending tests on UHPFRC T-beams

(Bild 11) und bei PB3 die Dicke der Wandung in den Stegen und in der Zugzone erhöht. Dies führte dazu, dass bei PB2 und PB3 die Last um 9% gesteigert werden konnte und ein Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone erzeugt wurde. Zusätzlich kam es bei PB3 zu einem Druckversagen des Stegs und aufgrund des größeren Querschnitts zu einem deutlich steiferen Gesamttragverhalten (Bild 13).

Bei der Planung der Versuche wurden die Nachweise für Normalkraft, Biegung und Querkraft aller Querschnittsteilbereiche mit derselben äußeren Belastung durchgeführt. Es konnte daher nach dem Ausschließen des Querkraftversagens im Steg (Bild 12) die Traglast bei PB2 und 3 nur noch geringfügig gesteigert werden. Bei PB2 und 3 kam es zu einem Versagen der UHPFRC-Passstücke in der Zugzone und der Öffnung der Stoßfuge in Balkenmitte. Der Beginn des Öffnens der Stoßfuge sowie das Aufgehen des Querkrafttrisses bei PB1 sind durch eine starke Zunahme der Durchbiegung gekennzeichnet (Bild 13). Da bei PB3 das Passstück von PB2 übernommen worden ist, konnte die maximale Zugkraft in der nun vergrößerten Zugzone nicht vollständig über die Fügung übertragen werden und PB3 versagte ohne einen Biegeriss im Balken. Es wäre somit möglich gewesen, durch eine nochmalige Aufdickung des Stoßbereichs die Traglast weiter zu steigern.

Die Ergebnisse der Plattenbalkenversuche haben gezeigt, dass die Herstellung von leistungsfähigen Bauteilen aus modularen Bauelementen mit einer geringen Wanddicke von 15 mm möglich ist. Der Faserverteilung kommt dabei eine große Bedeutung zu. Der Anschluss der Platten an den Balken durch neuartige Zahnleistenverbindungen hat sich als eine sehr effektive Bauweise erwiesen. Die UHPFRC-Passstücke und Zahnleistenverbindungen werden durch den Fügeprozess nur sehr gering beansprucht und konnten nach dem Versuch wieder problemlos demontiert werden. Für die Prüfung von PB2 wurden beispielsweise die Plattenelemente von PB1 wiederverwendet. Mit UHPFRC-Passstücken und einer lokalen Aufdickung ist es möglich, die gesamte Kraft des ungestörten Querschnitts zu übertragen. Daher empfiehlt sich eine solche Aufdickung besonders an hoch querkraft- und biegebelasteten sowie geometrisch komplexen Fugestellen.

3.4 Überlegungen zum rechnerischen Nachweis dünnwandiger Bauteile aus UHPFRC

Für die Nachweise von dünnwandigen Bauteilen müssen Maßstabeffekte hinsichtlich der an Standardprüfkörpern gewonnenen Festigkeitswerte berücksichtigt werden. Zur Ableitung von Materialparametern, um Traglasten analytisch oder numerisch zu bestimmen, hat sich der Ansatz des Versagenskriteriums nach MOHR/COULOMB [1] als zielführend herausgestellt. Durch das Modell kann bestimmt werden, ob sich ein Versagen durch Scherbruch oder ein Überschreiten der Druckfestigkeit einstellt. Die Berechnung der Scherspannung τ_u der Bruchehüllenden erfolgt mit Gl. (1). Darin gibt μ den Reibbeiwert, σ_n die Normalspannung senkrecht zur Fugestelle und c die innere Reibung des Materials an.

$$\tau_u = \mu \cdot \sigma_n + c \quad (1)$$

In Scherversuchen an Prismen (4/4/16 cm) und Balken (15/15/50 cm) nach BAŽANT/PFEIFFER [16] und in Plattendruckversuchen mit Fugewinkeln von 90° (Bild 7 rechts) kann die reine Scherfestigkeit bestimmt werden, vgl. Bild 14. Wie im Bild 7 bereits gezeigt wurde, kann die sich einstellende Festigkeit für Neigungswinkel der Fügefläche zwischen 15° und 45° höher erwartet werden, da im realen Bauteil durch die seitliche Querdehnungsbehinderung ein Aufspalten des Querschnitts verhindert wird. Um dies zu berücksichtigen, werden die auf dem MOHR'schen Spannungskreis aufgetragenen gemessenen Scherfestigkeiten nachträglich in Richtung der Bruchgeraden korrigiert (vgl. Pfeile in Bild 14). Die Platten mit einem Fugewinkel von 60° zeigen einen reinen Scherbruch in der Fugestelle (Bild 7 Mitte), somit kann hier die maximale Scherfestigkeit der Plattenfugung erreicht werden.

Mit der so gewonnenen Beschreibung der Materialfestigkeit können die Bauteile dimensioniert werden. Allerdings ist darin noch nicht die effektive Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ enthalten. Eine exakte Beschreibung der Festigkeit muss unter Berücksichtigung der lokalen Faserorientierung, -menge und des Fasergehalts im versagensrelevanten

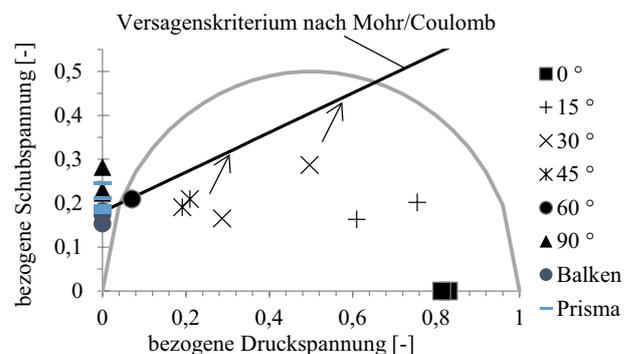


Bild 14 Querkraftversuche dargestellt im MOHR'schen Spannungskreis mit Bruchehüllender (bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit)
Shear tests in MOHR/COULOMB circle with failure envelope (normalized to cylindrical compressive strength)

ten Querschnitt geführt werden, da der Einfluss der Fasern vor allem für dünne Bauteile bei Biegung und Querkraft nicht vernachlässigt werden kann [17]. Zur Bestimmung der Orientierungsfaktoren gibt es bereits fortgeschrittene Berechnungsmethoden, wie z. B. in [18] dargelegt. Der in diesem Projekt mithilfe des Mikro-Computertomografen (Mikro-CT) ausgewertete Faserorientierungsbeiwert η_i (Gl. (2)) einer Einzelfaser wird vereinfacht nach FRETTLÖHR [19] ermittelt und hat sich als ausreichend genau dargestellt. Die Anzahl der Fasern n_f in einem Schnittbild sowie der Faserneigungswinkel φ_i bzw. die Breite der beiden Ellipsenhauptachsen $d_{f,i}$ und $d_{fl,i}$ einer Faser werden dafür ausgewertet (Bild 15) und über den Versagensbereich gemittelt.

$$\eta_i = \frac{1}{n_f} \sum_i \cos \varphi_i = \frac{1}{n_f} \sum_i \frac{d_{f,i}}{d_{fl,i}} \quad (2)$$

Der somit ermittelte Faserorientierungsbeiwert wird verwendet, um die effektive Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ zu beschreiben, welche anschließend im Nachweisformat für Biegung (Gl. (3)) und Querkraft (Gl. (5)) eingesetzt wird. In Bild 15 links ist zu sehen, dass die lokale Faserverteilung und -orientierung sehr stark schwankt, was dazu führt, dass die entstehenden Rissbreiten und die Anzahl der Risse in den durchgeführten Biegezug- und Querkraftversuchen die Tragfähigkeit stark beeinflussen.

Für den Nachweis der **Biegung** in dünnwandigen Bauteilen wird der Biegenachweis von FEHLING et al. [20] mit der Modifikation mit der effektiven Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ vorgeschlagen, vgl. Gl. (3).

$$M_{Eds} = F_{cd} \cdot \left(d - \frac{x}{3} \right) - F_{fd} \cdot (d - 0,45 \cdot x - 0,55 \cdot h) \quad (3)$$

mit:

M_{Eds} auf die Lage der Zugbewehrung bezogenes Moment

F_{cd} Bemessungswert der resultierenden Betondruckkraft

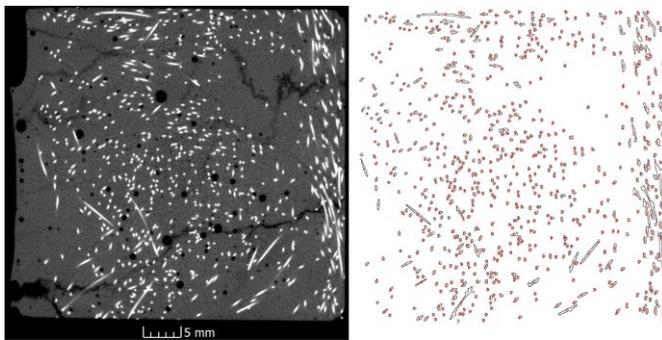


Bild 15 Schnittbild durch ein querkräftegeprüftes UHPFRC-Prisma (4/4/16 cm) am Versagensriss mittels Mikro-CT (links) und Analyse der Faserorientierung im Schnitt (rechts)

Section through shear tested UHPFRC prism (4/4/16 cm) at failure crack with Micro-CT (left) and analysis of fiber orientation in section (right)

F_{fd} Bemessungswert der resultierenden Faserbetonzugkraft
 d statische Nutzhöhe
 x Betondruckzonenhöhe
 h Querschnittshöhe

Mit Gl. (4) wird der Bemessungswert der resultierenden Faserbetonzugkraft für den Biegenachweis berechnet.

$$F_{fd} = 0,81 \cdot b \cdot (h - x) \cdot \left(k_{f,eff} \cdot \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{cf0k}}{\gamma_{cf}} \right) \quad (4)$$

mit:

b Querschnittsbreite

α_{ct} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betonzugfestigkeit

f_{cf0k} charakteristische Faserbetonzugfestigkeit im Riss

γ_{cf} Teilsicherheitsbeiwert für UHPC unter Zugbeanspruchung

Erste vielversprechende Ansätze für den Nachweis der **Querkrafttragfähigkeit** von UHPFRC-Bauteilen ohne diskrete Bewehrung wurden bereits entwickelt, vgl. z. B. [21]. Der zum Nachweis der dünnwandigen Fügebauteile verwendete Ansatz von ROSEBUSCH [22], vgl. Gl. (5), mit der Modifikation um eine effektive Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ zeigte ebenfalls erste gute Ergebnisse. Der Querkraftnachweis nach ROSEBUSCH leitet sich aus der Empfehlung des RILEM TC 162 [23] ab.

$$V_{Rd} = V_{cd} + V_{fd} \quad (5)$$

mit:

V_{cd} Querkraftwiderstand eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung

V_{fd} Querkraftwiderstand der Stahlfaserbewehrung

Die beiden Traganteile des Querkraftwiderstands werden mit den Gln. (6) und (7) berechnet.

$$V_{cd} = \left[0,12 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (6)$$

mit:

k Maßstabsfaktor zur Berücksichtigung der Bauteilhöhe

ρ_l Längsbewehrungsgrad

f_{ck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons

σ_{cp} Spannung aus Normalkraftbeanspruchung

b_w kleinste Querschnittsbreite in der Zugzone

d statische Nutzhöhe

$$V_{fd} = k_{f,eff} \cdot k_f \cdot k \cdot 0,7 \cdot \tau_{fd} \cdot b_w \cdot d \quad (7)$$

mit:

k_f Faktor zur Berücksichtigung des Einflusses der Flansche bei Plattenbalken

τ_{fd} Bemessungswert für die Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit durch Stahlfasern

Zur Anwendung der modifizierten Ansätze muss die lokale Faserorientierung im Querschnitt ermittelt bzw. im Bauteil abgeschätzt werden. Durch das Erreichen einer optimalen Faserwirksamkeit $k_{f,eff}$ können die Festigkeiten und die Duktilität verbessert werden. Für beide Ansätze müssen aber noch weitere Daten gewonnen werden, um die allgemeine Anwendbarkeit nachzuweisen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ [24] wurden in einer Kooperation des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) und des Instituts für Tragwerksentwurf (ITE) an der Technischen Universität Braunschweig neuartige Trockenstoßverbindungen aus UHPFRC entwickelt. Hierfür wurden geometrische Fügeprinzipien von Flächenelementen auf ihre Herstellbarkeit, Fügbarkeit und Leistungsfähigkeit hin untersucht. Basierend auf den entwickelten Fügeprinzipien wurde anschließend ein einachsig gespannter Plattenbalken realisiert und im Großversuch geprüft. Anschließend wurden mögliche Ansätze für einen rechnerischen Nachweis von gefügten, dünnwandigen Bauteilen aus UHPFRC dargelegt.

Die Umsetzung der neuartigen Bauweise, nämlich Betonfertigbauteile aus trocken gefügten Segmenten zusam-

menzusetzen, fordert auf unterschiedlichen Ebenen ein Umdenken in der konventionellen Baupraxis. Die neuen Ansätze betreffen sowohl den digitalen Bereich der Fertigungskette, wie etwa die Parametrisierung der Fügegeometrien, die automatisierte Generierung von Datensätzen für die CNC-Bearbeitung und die Berechnung, als auch die fertigungstechnische Seite. Hier ist insbesondere die Verwendung von technischen Wachsen als Schalungsmaterial zu nennen, z.B. [12] in dieser Ausgabe, oder auch erste vielversprechende Voruntersuchungen zur Leistungssteigerung dünnwandiger UHPFRC-Bauteile durch gezielte Ausrichtung der Mikrostahtdrahtfasern mittels magnetischer Felder während der Betonage, z.B. [25, 26]. Das Forschungsprojekt bietet somit die Möglichkeit, neue Wege zu beschreiten und zukünftige innovative Bauweisen aufzuzeigen.

Dank

Der besondere Dank der Autoren gilt allen im Forschungsteam mitarbeitenden Kolleginnen und Kollegen im Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“.

Literatur

- [1] OETTEL, V.; EMPELMANN, M.: *Feinprofilierte UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile*. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 7, S. 487–495.
- [2] KOBLE, M.: *Ein Implantat zur Einleitung konzentrierter Lasten in Bauteile aus ultra-hochfestem Beton*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2013.
- [3] MAINKA, J.; LEHMBERG, S.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Non-Standard Fügeprinzipien für leichte Bauteile aus UHPFRC*. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 11, S. 763–773.
- [4] BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Entwicklung neuartiger Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen und Stabtragwerke*. DFG-Forschungsantrag, TU Braunschweig, 2011.
- [5] LEHMBERG, S.; BUDELMANN, H.: *Entwicklung von dünnwandigen Stabwerksknoten aus ultrahochfestem faserverstärktem Beton*. In: BREITENBÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium in Bochum, 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 47–52.
- [6] LEHMBERG, S.; LEDDEROSE, L.; MAINKA, J.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Non-Standard Joints for lightweight modular Spatial and Shell Structures made from UHPFRC*. In: Brasil, R. M. L. R. F.; Pauletti, R. M. O. (Eds.): Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium „Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints“, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 9 S. (published on USB stick).
- [7] LEHMBERG, S.; MAINKA, J.; LEDDEROSE, L.; BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC*. In: SCHEERER, S.; CURBACH, M. (Hrsg.): Leicht Bauen mit Beton, Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 122–139 – online unter: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171431>.
- [8] BUDELMANN, H.; KLOFT, H.: *Von der Bauteilfugung zu leichten Tragwerken: Hybride, trocken gefügte Stab-, Flächen- und Raumtragelemente aus UHPFRC*. DFG-Forschungsantrag, TU Braunschweig, 2014.
- [9] SCHINDLER, CH.: *Die Standards des Nonstandard*. In: Fakultät für Architektur der Technischen Universität Graz (Hrsg.): GAM. Architecture Magazine 06, Springer Wien New York, 2009, S. 180–194
- [10] MAINKA, J.; KLOFT, H.; HEINEMANN, T.: *A novel recyclable wax formwork-system for high-precision free-form UHPC members and joints*. In: Brasil, R. M. L. R. F.; Pauletti, R. M. O. (Eds.): Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium „Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints“, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 8 S. (published on USB stick)
- [11] MAINKA, J.; KLOFT, H.; STEIN, E.: *A novel precise formwork-technology based on CNC milled recyclable industrial wax for the casting of geometrically complex concrete elements*. In: KIVI (Hrsg.): Future Visions – Proceedings of the IASS Symposium 2015 & ISOFF Symposium, 17.–20.8. & 16./17.8.2015 in Amsterdam (the Netherlands), paper No. IASS2015-517423, 12 S. (published on USB stick).
- [12] MAINKA, J.; KLOFT, H.; BARON, S.; HOFFMEISTER, H.-W.; DRÖDER, K.: *Non-Waste-Wachsschalungen: Neuartige Präzisionsschalungen aus recycelbaren Industriewachsen*. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 12, S. 784–793.

- [13] DIN EN 12390-3: *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2009.
- [14] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; TEICHMANN, T.; BUNJE, K.; BORNEMANN, R.; MIDDENDORF, B.: *Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)*. Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, 2005.
- [15] BUDELMANN, H.; LEHMBERG, S.: *Von der Küchenarbeitsplatte zum leichten Tragwerk – Was kann ultrahochfester faserverstärkter Feinkornbeton?* In: SCHEERER, S.; VAN STIPRIAAN, U.: Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2016, S. 80–93.
- [16] BAŽANT, Z. P.; PFEIFFER, P. A.: *Shear fracture tests of concrete*. Materials and Structures 19 (1986), S. 111–121.
- [17] BONZEL, J.; SCHMIDT, M.: *Verteilung und Orientierung von Stahlfasern im Beton und ihr Einfluß auf die Eigenschaften von Stahlfaserbeton*. Betontechnische Berichte (1984/85), S. 73–116.
- [18] WILLE, K.; TUE, N. V.; PARRA-MONTESINOS, G. J.: *Fiber distribution and orientation in UHPFRC beams and their effect on backward analysis*. Materials and Structures 47 (2014), S. 1825–1838.
- [19] FRETTLÖHR, B.: *Bemessung von Bauteilen aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton (UHFFB)*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2011.
- [20] FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J. C.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S.: *Ultrahochfester Beton – UHPC*. In: BERGMEISTER, K.; FINGERLOOS, F.; WÖRNER, J.-D. (Hrsg.): *Betonkalender 2013*, Band 2, Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 118–239.
- [21] HEINZLE, G.; FREYTAG, B.; LINDER, J.; SPAROWITZ, L.: *Schubtragfähigkeit dünnwandiger Träger aus stahlfaserbewehrtem UHPC*. Bauingenieur 87 (2012), S. 182–193.
- [22] ROSENBUSCH, J.: *Zur Querkrafttragfähigkeit von Balken aus stahlfaserverstärktem Stahlbeton*. Dissertation, TU Braunschweig, 2003.
- [23] Rilem TC 162-Tdf: *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete*. Materials and Structures 33 (2000), S. 75–81.
- [24] Homepage des SPP 1542: <http://spp1542.tu-dresden.de/> (geprüft am 20.10.2016).
- [25] LEDDEROSE, L.; KLOFT, H.: *Magnetic rearrangement of Steel Fibers in UHPFRC*. In: Brasil, R. M. L. R. F.; Pauletti, R. M. O. (Eds.): *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium “Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints”*, 15.–19.09.2014 in Brasilia (Brasilien), 8 S. (published on USB stick).
- [26] LEDDEROSE, L.; NEUDECKER, S.; KLOFT, H.: *Robot-aided rearrangement of steel fibres in UHPFRC via magnetic forces*. In: KIVI (Hrsg.): *Future Visions – Proceedings of the IASS Symposium 2015 & ISOFF Symposium*, 17.–20.8. & 16./17.8.2015 in Amsterdam (the Netherlands), paper No. IASS2015-417922, 12 S. (published on USB stick).

Autoren



Dipl.-Ing. Sven Lehmborg
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz (iBMB)
Fachgebiet Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
s.lehmborg@ibmb.tu-bs.de



Dipl.-Ing. (M. a. A.) Lukas Ledderose (Arch.)
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf (ITE)
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
l.ledderose@tu-bs.de



M.Eng. Franz Wirth
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf (ITE)
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
f.wirth@tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau
und Brandschutz (iBMB)
Fachgebiet Baustoffe
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
h.budelmann@ibmb.tu-bs.de



Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf (ITE)
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
h.kloft@tu-braunschweig.de