

Innovatives Bewehrungskonzept für leichte Stützen aus ultra-hochfestem Beton

Jan Markowski¹, Ludger Lohaus¹

¹*Institut für Baustoffe / Leibniz Universität Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

In diesem Artikel wird eine neuartige Bauweise für Stützen aus ultra-hochfestem Beton (UHFB) vorgestellt. Im Vordergrund steht dabei ein Bewehrungskonzept, welches anstelle einer Bewehrung aus Stabstahl aus einer Kombination aus Stahlblech und Carbongelege besteht. Die resultierende Konstruktion ist im Vergleich zu konventionellen Betonbauweisen extrem leicht und hinsichtlich des Verhältnisses Tragfähigkeit zu Gewicht sogar günstiger als Stahlprofile. Somit ist durch die materialgerechte Konstruktion mit Hilfe von UHFB eine ressourcenschonender Betonbauweise möglich.

In diesem Artikel werden das Bewehrungskonzept sowie die konstruktiven Grundsätze für derartige UHFB-Stützen beschrieben. Sie werden aus experimentellen und numerischen Untersuchungen abgeleitet. Die in diesem Artikel beschriebenen Bauteile können in vielfältigen aufgelösten Tragwerken eingesetzt werden. Einige Beispiele sind Offshore-Gründungen, Brücken oder große, freitragende Hallen.

Keywords: ultra-hochfester Beton, Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, Wickelverstärkung, Stützen, Bauweise

ABSTRACT:

This article presents a novel construction method for columns made of ultra-high performance concrete (UHPC). It focuses on a reinforcement concept, which consists of a combination of steel sheets and carbon fabrics instead of a steel bar reinforcement. In comparison to conventional construction methods, the resulting construction shows a great potential to save own weight. UHPC is used in a way that is appropriate to the material and allows a sustainable concrete construction method.

This article describes the reinforcement concept and design principles of the UHFB props. They are derived from experimental and numerical investigations described in this article. The components described in this article can be used in a wide variety of structures. Some examples are offshore foundations, bridges or large self-supporting halls.

Keywords: ultra-high performance concrete, carbon fibre reinforced polymer, winding reinforcement, columns, construction method

1 EINLEITUNG

Ultra-hochfeste Betone können hohe Druckfestigkeiten von über 150 N/mm² sicher erreichen und verfügen gleichzeitig über hervorragende Dauerhaftigkeitseigenschaften. Trotzdem spielt UHFB in der baupraktischen Anwendung bislang kaum eine Rolle in Deutschland. Gleichwohl hat er aufgrund seiner günstigen Eigenschaften das Potential, maßgeblich zu einem ressourcenschonenderen und nachhaltigeren Betonbau beizutragen.

2 MOTIVATION – RESSOURCENSCHONENDER LEICHTBAU MIT UHFB

Mit dem Ziel, eine materialgerechte, ressourcenschonende und leichte Bauweise für Stützen aus UHFB zu entwickeln, wurden am Institut für Baustoffe unterschiedliche Konstruktionen und Bewehrungskonzepte erforscht. Der Einsatz von UHFB erlaubt aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit filigranere Bauteile als aus normalfestem Beton. Setzt man die aufnehmbaren (Druck-) Spannungen des UHFBs ins Verhältnis zu seinem Eigengewicht, ergibt sich ein überaus günstiger Quotient, welcher deutlich leichtere Tragwerke ermöglichen kann, als es beispielsweise mit Baustahl möglich ist. Eine wesentliche Herausforderung beim Bauen mit UHFB ist jedoch sein sprödes, explosionsartiges Versagensverhalten (fib 2008, fib 2010, Schmidt 2018). Aus diesem Grund werden für konstruktive Anwendungen meist hohe Gehalte an feinen, hochfesten Drahtfasern erforderlich, was die erreichbare sehr günstige Umweltbilanz dramatisch verschlechtert. Hinzu kommt, dass der Korrosionsschutz herkömmlicher Bewehrung aus Stabstahl im konventionellen Massivbau durch verhältnismäßig dicke Betondeckungen gewährleistet wird. Diese Herangehensweise steht im Widerspruch zu dem Anspruch, möglichst ressourcenschonend zu bauen. Dicke Schichten Betondeckung verhindern filigrane Konstruktionen, die durch den Einsatz von UHFB ermöglicht werden.

Mit einem innovativen Bewehrungskonzept aus Stahlblechen und kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff kann den beschriebenen Problemen beim Bauen mit UHFB begegnet werden. Das Resultat sind besonders leichte Stützen. Denkbare Anwendungsgebiete sind neben klassischen Stützen auch Drucktragglieder in aufgelösten Tragstrukturen wie z. B. von Fachwerkskonstruktionen von Brücken oder leichter Deckenkonstruktion großer Hallen.

3 UHFB-HOHLZYLINDER MIT STAHLBLECH- UND KOHLENSTOFFFASERBEWEHRUNG – FORM FOLLOWS FUNCTION

Die Formgebung der Bauteile verfolgt das Ziel, bei einer großen Knickstabilität möglichst hohe Lasten bei geringem Eigengewicht und Materialeinsatz aufnehmen zu können. Gleichzeitig sollen die Bauteile ein duktileres Tragverhalten zeigen, sodass ein schlagartiges Versagen ohne Vorankündigung (z. B. im Fall einer Überbeanspruchung) verhindert wird. Nach Überschreitung des Grenzzustands der Tragfähigkeit soll eine residuale Kraft aufgenommen werden können, welche die Resilienz der Tragstruktur aufrechterhält – auch wenn ein einzelnes Element versagt.

Um die beiden zum Teil gegensätzlichen Anforderungen zu vereinen, wird der Grundsatz „form follows function“ verfolgt, um ein formoptimiertes Bauteil zu entwickeln, welches die Vorteile moderner Hochleistungsmaterialien wie UHFB und kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff kombiniert.

3.1 Aufbau

Als Grundform der Stützelemente dient ein Hohlzylinder. Durch den kreisrunden Hohlquerschnitt wird ein im Verhältnis zur Querschnittsfläche ein hohes Flächenträgheitsmoment erreicht, was zu einer hohen Knickstabilität führt (Schmidt et al. 2016). Der rohrförmige Querschnitt aus Beton wird von verschiedenen Bewehrungslagen flankiert (siehe Abbildung 1).

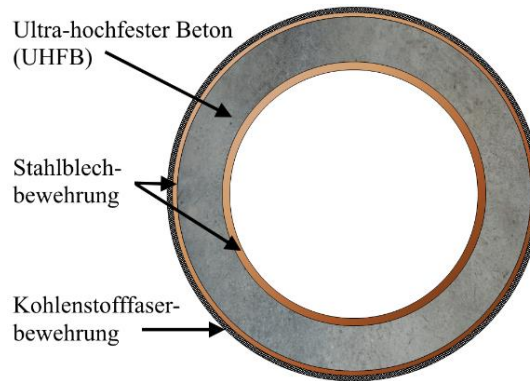


Bild 1: Schematischer Aufbau eines UHFB-Hohlzylinders im Querschnitt

Im Folgenden wird die Konzeption des Bauteils anhand der Funktionen der einzelnen Komponenten erläutert.

3.1.1 Kern aus ultra-hochfestem Beton

Der Einsatz von UHFB als Kernmaterial bedingt den Entwurf des gesamten Bauteils. Normalfester und hochfester Beton in Form kreisrunder Hohlprofile mit konventioneller Stabstahlbewehrung ist bereits von der Bauweise mit Schleuderbetonstützen bekannt. Das spröde Bruchverhalten des ultra-hochfesten Betons macht eine neue Bauweise mit innovativem Bewehrungskonzept notwendig.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein feinkörniger selbstverdichtender UHFB mit einer mittleren Druckfestigkeit von ca. 200 N/mm² und einem Größtkorn von 0,5 mm verwendet. Der Beton wurde über 48 Stunden bei 90 °C wärmebehandelt. Um Luft einschließen zu vermeiden, wurde der Beton mit einer Förderpumpe eingefüllt. Auf eine bei UHFB sonst erforderliche Zugabe von Stahlfasern kann hierbei verzichtet werden.

Die Aufgabe des UHFB-Kerns ist die Aufnahme axialer Lasten. UHFB kann bei gleichem Eigengewicht ein Vielfaches der Druckspannungen von konventionellem Baustahl aufnehmen (vgl. Tab. 1).

Tabelle 1: Das Verhältnis aus aufnehmbarer Druckspannung zu der Dichte illustriert, wie UHFB bei gleichem Gewicht nahezu die dreifache Druckspannung von konventionellem Baustahl S235 aufnehmen kann

Material	Dichte ρ [kg/m ³]	Druckfestigkeit σ_c [N/mm ²]	σ_c / ρ [(N/mm ²) / (kg/m ³)] * 10 ²
Stahl S235	7.850	235	3,0 (\cong 100 %)
Stahl S420	7.850	420	5,4 (\cong 179 %)
UHFB $f_c = 200 \text{ N/mm}^2$	2.350	200	8,5 (\cong 284 %)

3.1.2 *Innere und äußere Stahlblechbewehrung*

Es sind zwei Schichten aus Stahlblech der Güteklasse S235 innen- und außenseitig auf dem Betonkern angeordnet. Das innere Stahlblech wirkt als Schalung für den Hohlquerschnitt und als Bewehrung für den Beton. Durch die laterale Stützwirkung kann der Betonkern auch im gerissenen bzw. gebrochenen Zustand Längsspannungen aufnehmen. Wird die maximal aufnehmbare Druckspannung des Stützelements überschritten, zeigt zunächst der Betonkern das für UHFB typisch spröde Versagensverhalten. Untersuchungen am Institut für Baustoffe haben gezeigt, dass ein Hohlzylinder aus UHFB ohne Bewehrung auch bei Anwendung hoher Stahlfasergehalte nach Überschreiten der maximalen Last ohne Vorankündigung versagen würde. Das Versagen erfolgt explosionsartig, da danach überhaupt keine Normalkräfte mehr übertragen werden können. Auch stahlfaserbewehrte UHFB-Hohlzylinder ohne Stahlblechbewehrung versagen schlagartig. Nach Eintreten des Bruchzustandes können keine nennenswerten residualen Lasten mehr aufgenommen werden. Eine reine Stahlfaserbewehrung reicht alleine nicht aus, um sicher mit UHFB-Hohlzylindern bauen zu können. Eine stabförmige Bewehrung kommt aufgrund der Filigranität der Konstruktion nicht infrage, da die Dicke des Betonkerns nur wenige Zentimeter beträgt.

Das äußere Stahlblech übernimmt vorwiegend konstruktive Aufgaben und soll sich im Gegensatz zum inneren Stahlblech nicht am Lastabtrag beteiligen. Es erfüllt somit keine Aufgaben einer Bewehrung sondern dient vielmehr als verlorene Schalung und als Splitter-Schutzschicht zwischen Betonkern und der Kohlenstofffaserbewehrung. Untersuchungen zeigten, dass bei Probekörpern, die ohne ein äußeres Stahlblech hergestellt worden waren (der weitere Aufbau der Probekörper blieb unverändert) im axialen Druckversuch teilweise ein Versagen ohne Vorankündigung auftrat. Daraus wird abgeleitet, dass das äußere Stahlblech als Schutzschicht für die darauf applizierte Bewehrungsschicht aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff dient. Wird die maximale Tragfähigkeit des Betonkerns erreicht, bricht der Betonkern. Scharfkantige Bruchstücke beschädigen die querdruckempfindlichen Kohlenstofffasern, welche dann lokal nicht mehr als Bewehrung zur Verfügung stehen.

3.1.3 *Kohlenstofffaserbewehrung*

Die äußere Bewehrungslage besteht aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Sie dient, analog zum inneren Stahlblech, als laterale Stützung im Versagensfall des Betonkerns. Im Zusammenspiel mit der inneren Stahlblechbewehrung stützt sie nach Erreichen der maximalen Last den gebrochenen Betonkern. Der Betonkern wird so zweiseitig von innen und außen gehalten und kann auch nach dem Bruch weiterhin Normalkräfte – jedoch in reduziertem Maße – übertragen.

Die Kohlenstofffaserbewehrung kann als „Wickerverstärkung“ verstanden werden. Sie wird in Umfangsrichtung des Querschnitts um die äußerste Schicht gewickelt (siehe Bild 3, links). Die Kohlenstofffaserbewehrung besteht aus einem unidirektionalem Band aus Kohlenstofffasern, das in Epoxidharz eingebettet auf das äußere Stahlblech aufgetragen wird. Bei größeren Stückzahlen sind automatisierte Verfahren denkbar. Bild 2 zeigt das Kohlenstofffaserband, die Eigenschaften können Tab. 2 entnommen werden.



Faser	
Breite:	25,0 mm
Dicke:	0,3 mm
Gewicht:	350 g/m ²
Feinheit:	400 tex
Matrix	
Hexion Epicote und Epikure	
Temperung: 12 h bei 70 °C	

Bild 2: Die Kohlenstofffaserbewehrung in Form eines endlosen, unidirektionalen Bandes.

Tabelle 2: Spezifikation der Kohlenstofffaserbewehrung aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff

Die Schichtdicke der Kohlenstofffaserbewehrung ergibt sich aus der Dicke des Kohlenstofffaserbands und der Anzahl der Lagen. Durch die gleichmäßige Orientierung der Fasern, zeigt die Kohlenstofffaserbewehrung ein anisotropes Tragverhalten (siehe Bild 3, rechts).

Als weitere Funktion dient die in Epoxidharz eingebettete Kohlenstofffaserbewehrung als Korrosionsschutz.

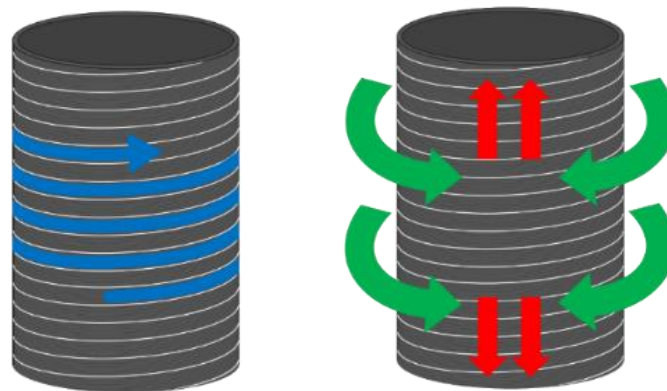


Bild 3: links: die Kohlenstofffaserbewehrung wird in Umfangsrichtung um den Probekörper gewickelt; rechts: schematische Darstellung der Steifigkeit der Bewehrungsschicht aus Kohlenstofffasern: Die Bewehrung hat aufgrund der Faserorientierung eine hohe Steifigkeit in Umfangsrichtung (grün) und eine vernachlässigbar geringe Steifigkeit in Längsrichtung (rot).

3.2 Herstellung der Stützen



Bild 4: oben links: Einfüllen des Betons mithilfe einer Betonierlanze in den Zwischenraum zwischen den beiden Stahlblechen (Quelle: Scholle et al. 2016a); oben rechts: Probekörper auf Wickeldorn zum Auftragen der Kohlenstofffaserbewehrung; unten links: Probekörper beim Auftragen der Kohlenstofffaserbewehrung; unten rechts: fertiggestellter Probekörper

Zunächst werden mithilfe von Abstandhaltern an den Stirnflächen die beiden Stahlrohre konzentrisch ausgerichtet. Der entstehende Spalt zwischen den beiden Rohren wird mit UHFB im Kontraktorverfahren mithilfe einer Betonierlanze ausgefüllt. Nach erfolgter Wärmebehandlung wird die Kohlenstofffaserbewehrung auf die aufgeraute Oberfläche des äußeren Stahlrohrs aufgetragen (siehe Bild 4). Die Oberfläche des Stahlrohrs wird durch Glasperlenstrahlen vorbereitet, damit das Epoxidharz des kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes gut darauf haftet.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die experimentellen Untersuchungen zu den so hergestellten leichten Stützen aus UHFB mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung gegeben. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Drucktragverhalten der Stützen. Neben zentrischem Druck ist bei der Anwendung der Stützelemente in einem Bauwerk auch mit einer Überlagerung aus Biegemomenten und Normalkraft zu rechnen. Um die Normalkraft-Momenten-Interaktion zu untersuchen, wurde ein Versuchstand zur exzentrischen Lasteinleitung verwendet.

Neben den Versuchen auf Bauteilebene wurden auch Baustoffversuche an der Kohlenstofffaser durchgeführt, um die mechanischen Eigenschaften, die für das Tragverhalten auf Bauteilebene entscheidend sind, zu erfassen.

4.1 Kohlenstofffaserbewehrung – Bestimmung der radiale Steifigkeit

Für das Tragverhalten der Stützen hat die Kohlenstofffaserbewehrung eine zentrale Bedeutung. Die maßgebende Eigenschaft der Bewehrungsschicht ist die Steifigkeit in Umfangsrichtung. Die laterale Stützwirkung der Kohlenstofffaserbewehrung auf den Betonkern wird durch die radiale Steifigkeit der Bewehrung bedingt. Diese leitet sich von der umfänglichen Steifigkeit ab. Um die Kohlenstofffaserbewehrung bemessen und charakterisieren zu können, wird ein Versuchsaufbau verwendet, welcher die radiale Steifigkeit der Bewehrungsschicht quantifizieren kann. Die Steifigkeit geht als Materialparameter direkt in die Bemessung der Bewehrung ein.

Es wurden unterschiedliche Faserorientierungen auf ihre Eignung als Faserbewehrung geprüft. Neben der radialen Steifigkeit ist auch die Reproduzierbarkeit der erreichten Steifigkeit ein wichtiger Faktor. Handwerklich geprägte Prozesse wie das Laminieren eines Faserkunststoffverbundsystems können zu Schwankungen der mechanischen Eigenschaften führen. Durch Wiederholversuche kann die Streuung der Versuchsergebnisse ausgewertet werden und Faserkunststoffverbundsysteme, welche auffällig große herstellungsbedingte Schwankungen der mechanischen Eigenschaften zeigen, für weitere Betrachtungen ausgeschlossen werden.

Der Versuchsaufbau (vgl. Bild 5) besteht aus einem Aufspreizmechanismus, welcher in eine Universalprüfmaschine eingebaut werden kann. In dem Aufspreizmechanismus wird eine Probe des Faserkunststoffverbundsystems platziert. Es wird ein weggeregelter Druckversuch gestartet, bei dem ein Aufspreizmechanismus betätigt wird, welcher die Probe radial aufweitet. Durch die in der Maschine gemessene Druckkraft und die erreichte Verschiebung (bzw. von der Maschine gefahrenen Weg) kann über geometrische Beziehungen bestimmt werden, wie groß die radiale Steifigkeit der Probe ist.

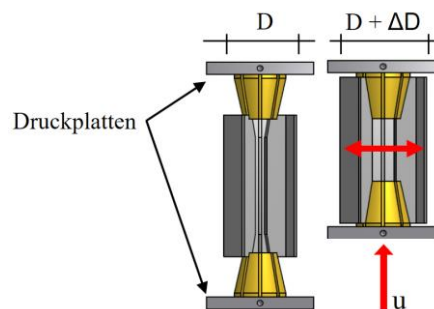


Bild 5: Aufspreizmechanismus zur Bestimmung der radialen Steifigkeit eines Faserkunststoffverbundzylinders

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein unidirektional, zu 100 % in Umfangsrichtung gewickeltes Kohlenstofffaserverbundsystem am geeignetsten hinsichtlich radialer Steifigkeit und Reproduzierbarkeit ist. Es wurde eine durchschnittliche radiale Steifigkeit von 60.000 N/mm^2 gemessen, welche ca. 20 % oberhalb des E-Moduls des UHFBs liegt. Die Standartabweichung bei drei Probekörpern lag bei lediglich 3.800 N/mm^2

4.2 Zentrische Längstragfähigkeit

Basierend auf den experimentellen Ergebnissen zur Kohlenstofffaserbewehrung wurden die Probekörper für die Untersuchung der axialen Tragfähigkeit dimensioniert. Ziel der Untersuchung ist

es, die maximale und die residuale Tragfähigkeit für Stützelemente zu ermitteln, welche zentrisch axial mit Druck beansprucht werden und keine Überlagerung mit Biegemomenten erfahren. Es wurden kleinmaßstäbliche und großmaßstäbliche Versuche zur zentrischen Drucktragfähigkeit durchgeführt.

4.2.1 Kleinmaßstäbliche Versuche zum Einfluss der Kohlenstofffaserbewehrung

Im Fokus der kleinmaßstäblichen Versuche (Probendurchmesser 170 mm, Probenlänge 500 mm) stand der Einfluss der Kohlenstofffaserbewehrung auf das Tragverhalten. Dazu wurden die Dicke der Wickelverstärkung und die Dicke des inneren Stahlblechs variiert. In einem weggeregelten Druckversuch wurden die Probekörper auf ihre zentrische Drucktragfähigkeit und ihre residuale Tragfähigkeit untersucht (siehe Bild 6, links), indem sie bis zu ihrer maximalen Tragfähigkeit und darüber hinaus belastet wurden.

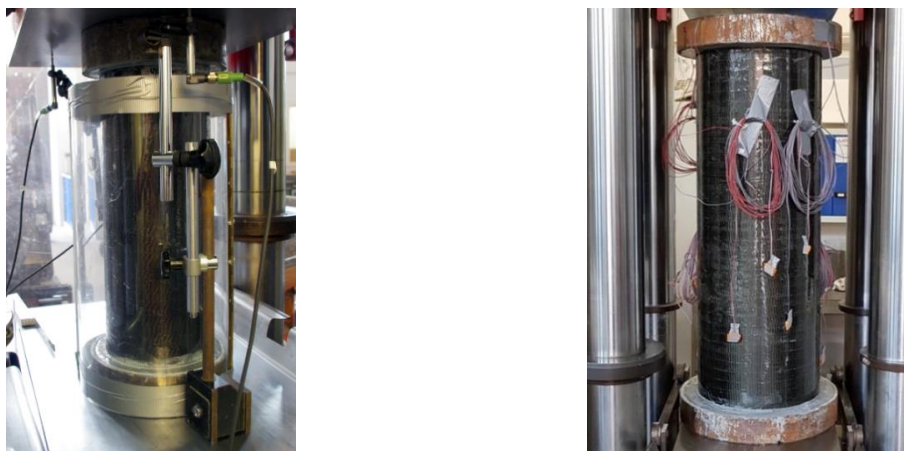


Bild 6: links: kleinmaßstäblicher Probekörper (Länge 500 mm) mit induktiven Wegaufnehmern und Schutzvorrichtung; rechts: großformatiger Probekörper (Länge 1000 mm) mit Dehnungsmesstreifen

4.2.2 Großmaßstäbliche Versuche zur Skalierbarkeit

Zum Nachweis der Skalierbarkeit der Versuchsergebnisse der kleinformigen Versuchsserien wurden großformatige (siehe Bild 6, rechts) Druckversuche an UHFB-Hohlzylindern mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung ebenfalls auf ihre zentrische Drucktragfähigkeit geprüft. Ziel dieser Untersuchungen ist der Nachweis der Übertragbarkeit der Annahmen zum Tragverhalten größerer Strukturen. Die Skalierung erfolgte für die Länge sowie für den Durchmesser der Proben um den Faktor zwei.

4.3 Längstragfähigkeit mit Biegebeanspruchung – Exzentrische Druckbeanspruchung

Zusätzlich zur Normalkraftbeanspruchung kann bei vielen stützenförmigen Bauteilen eine Biegebeanspruchung nicht ausgeschlossen werden. In weiteren experimentellen Untersuchungen zur Längstragfähigkeit der UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung wurde das Tragverhalten auch unter einer zusätzlichen Biegebeanspruchung untersucht. Ziel der Versuchsreihe war es, den Einfluss der Kohlenstofffaserverstärkung bei unterschiedlich großen Biegemomenten zu ermitteln. Dabei stand die Fragestellung im Vordergrund, ob die Kohlenstofffaserbewehrung auch bei auftretenden Biegemomenten eine hohe residuale Last gewährleisten kann. Von einer gleichbleibenden Grundgeometrie ausgehend, wurden die Dicke der Kohlenstofffaserverstärkung sowie das Verhältnis von Moment zu Normalkraft in jeweils zwei Stufen

(siehe Bild 7, rechts) variiert. Dazu wurde ein speziell entwickelter Prüfstand verwendet, welcher eine störungsfreie exzentrische Lasteinleitung erlaubt (siehe Bild 7, links).

Bei der Anwendung der Stützen im Bauwerk oder als Drucktragglied in einem aufgelösten Fachwerk ist es möglich, durch den Hohlraum im Inneren des Querschnitts Spannglieder zum Aufbringen einer Vorspannkraft zu leiten. Auf diese Weise kann zu jeder Zeit ein „überdrückter“ Querschnitt gewährleistet werden.

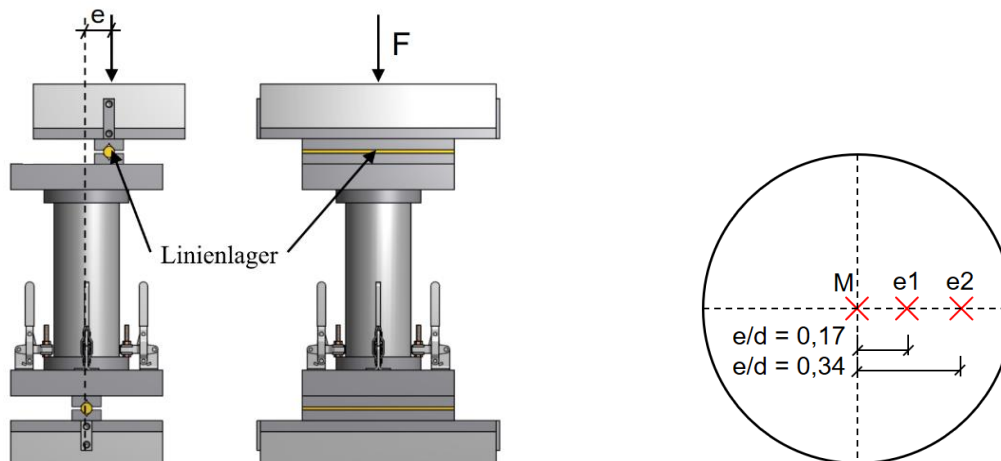


Bild 7: links: Vorrichtung zur einachsigen exzentrischen Lasteinleitung in unterschiedlichen Exzentrizitätsstufen, rechts: Darstellung der untersuchten Exzentrizitätsstufen (e: Exzentrizität, d: Probendurchmesser)

5 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein numerisches Modell zum Tragverhalten der UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung erstellt. Ziel des numerischen Modells ist die Verifizierung von Modellannahmen zum Tragverhalten der Stützelemente. So können durch eine numerische Simulation versagensinduzierende Mechanismen besser identifiziert werden als im Experiment, wo Spannungszustände im Betonkern nicht sicher festgestellt werden können.

Dazu wurde ein parametrisiertes (Material- und Geometrieparameter) Volumenmodell erstellt, welches eine automatisierte Rechnungen ermöglicht. So sind automatisierte Verfahren zur Sensitivitätsanalyse, Kalibrierung und Optimierung möglich.

6 ERGEBNISSE

6.1 Zentrische Drucktragfähigkeit

In Bild 8 sind die Ergebnisse für die maximale und die residuale Tragfähigkeit dargestellt. Dabei wird die gemessene Normalkraft (N) auf die rechnerische Tragfähigkeit des Betonkerns ($A_c \cdot f_c$) bezogen. Auf der Längsachse sind die unterschiedlichen Schichtdicken (t_{CFRP}) der Kohlenstofffaserbewehrung aufgetragen. Zusätzlich zur Dicke der Kohlenstofffaserbewehrung wurde auch die Dicke der inneren Stahlblechbewehrung (t_{Si} , runde Markierungen für $t_{Si} = 4,0$ mm und rautenförmige Markierungen für $t_{Si} = 2,9$ mm) in zwei Stufen variiert. Die grünen Markierungen repräsentieren die maximale Traglast (N_{Max}), die roten die residuale Last (N_{res}).

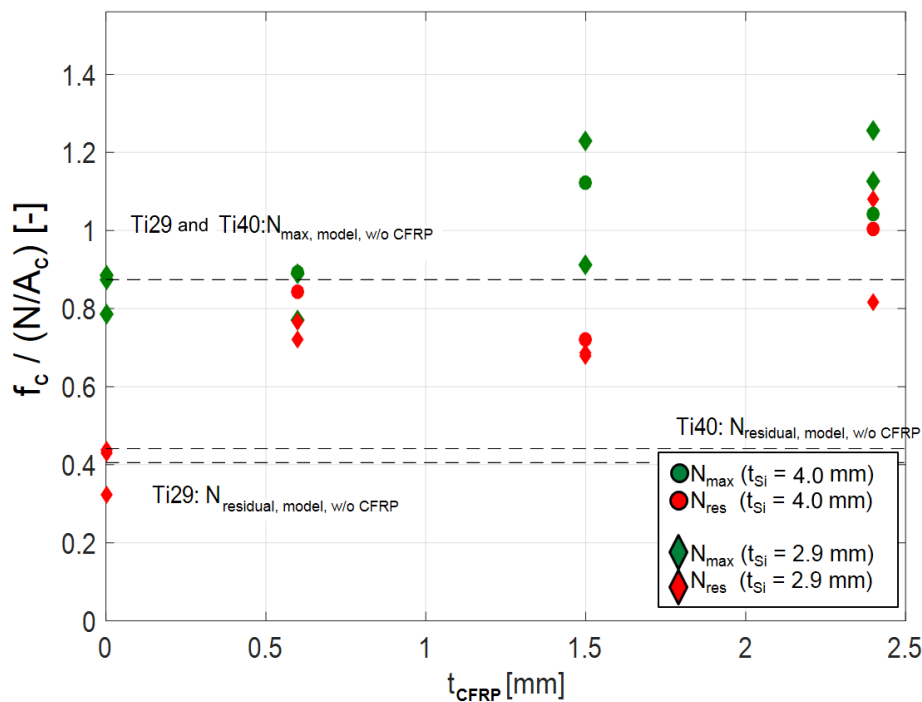


Bild 8: Experimentelle Ergebnisse der zentrischen Drucktragfähigkeit sind über die vom Betonkern aufnehmbare Spannung normiert und in Abhängigkeit der Dicke der Kohlenstofffaserbewehrung dargestellt.

Die gestrichelten Horizontallinien repräsentieren die nach einem Ansatz von Lindschulte errechneten Traglasten (Lindschulte 2013, Lindschulte et al. 2015). Dieses Rechenmodell gilt für hybride Stahl-UHFB-Stützen und berücksichtigt keine Kohlenstofffaserbewehrung. Die Hybriden UHFB-Stahl-Stützen hatten den gleichen grundlegenden Aufbau wie die hier verwendeten Proben, wurden jedoch ohne Carbonbewehrung, dafür mit dickerer äußerer Stahlblechbewehrung hergestellt. Der Verzicht auf die Carbonbewehrung hat wegen des dickeren äußeren Blechs eine erhöhtes Eigengewicht zur Folge. Außerdem kann bei hohen Beanspruchungen ein lokales Beulen des äußeren Stahlblechs auftreten. Aus diesem Grund wurde die Konstruktion zu UHFB-Hohlzylindern mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung weiterentwickelt.

Von den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Kohlenstofffaserbewehrung bereits bei einer Schichtdicke von 0,6 mm (entspricht zwei Lagen des Kohlenstofffaserbands) die residuale Traglast um ca. 80 % gegenüber den Proben ohne Kohlenstofffaserbewehrung steigert. Eine signifikante Steigerung der maximalen Traglast lässt sich jedoch nicht sicher erreichen (Lohaus 2018, Markowski et al. 2016).

6.2 Drucktragfähigkeit bei zusätzlicher Biegemomentbeanspruchung

In Bild 9 sind die experimentellen Ergebnisse der exzentrisch belasteten Proben in Form eines Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm dargestellt. Die rote gestrichelte Linie repräsentiert rechnerische charakteristische Werte, die in Anlehnung an das Rechenverfahren aus Eurocode (2010), Teil 4 – Verbundbau, ermittelt worden sind. Die zur Normalkraft gehörigen Biegemomente errechnen sich aus der Exzentrizität (e) multipliziert mit der gemessenen maximalen Normalkraft (N_{max}). Für die Exzentrizität $e = 0$ sind die maximalen Normalkräfte zentrisch belasteter Probekörper mit gleicher Geometrie angegeben.

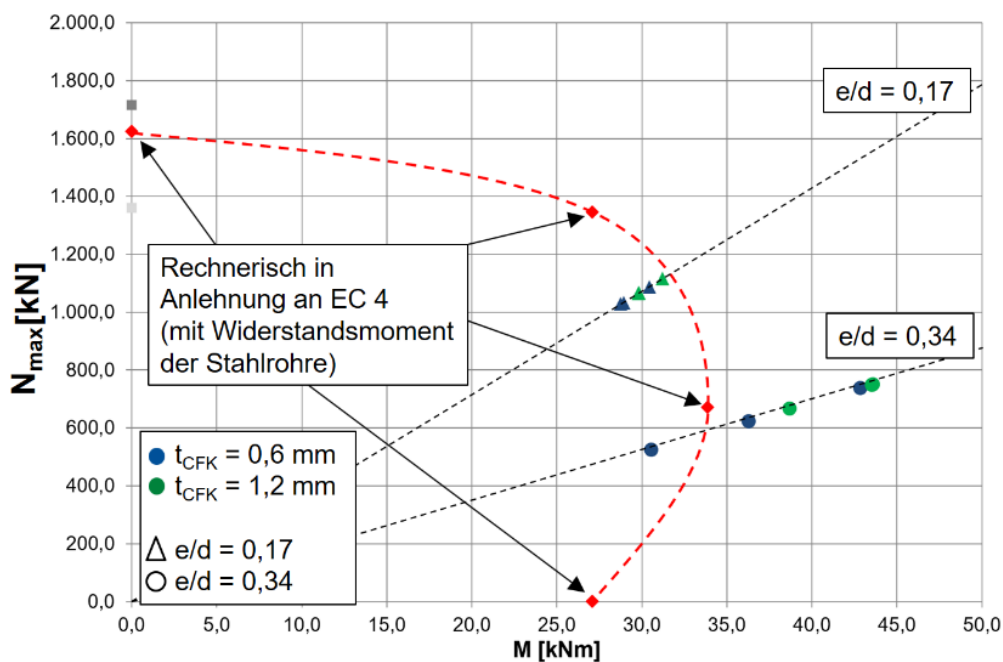


Bild 9: Experimentelle Ergebnisse für die maximale Traglast der exzentrisch belasteten Proben.

Die experimentell ermittelten Werte liegen in der Nähe der errechneten Werte. Für $e/d = 0,17$ liegen jedoch alle Versuchsergebnisse unterhalb der rechnerischen, charakteristischen Erwartungswerte. Es wird angenommen, dass die Rechenverfahren aus dem Euro Code zwar grundsätzlich geeignet sind, die Momenten-Normalkraft-Interaktion nachzuvollziehen. Es wird vorgeschlagen einen zusätzlichen Abminderungsfaktor einzuführen, um die grundsätzliche Charakteristik der Interaktionskurve beizubehalten und gleichzeitig die, durch die Dünnwandigkeit der Profile zu erwartende, Traglastabminderung zu berücksichtigen.

Es ist zu erkennen, dass die Dicke der Kohlenstofffaserbewehrung bei exzentrisch beanspruchten Proben nahezu keinen Einfluss auf die maximale Traglast hat.

Im Vergleich zu den zentrisch belasteten Probekörpern wurde festgestellt, dass die residuale Tragfähigkeit im Vergleich zur maximalen Tragfähigkeit auf einem vergleichsweise höheren Niveau von ca. 80 % der maximalen Tragfähigkeit liegt. Auch die Streuungen der Ergebnisse innerhalb einer Serie fallen geringer aus, als bei den zentrisch belasteten Stützen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Forschung am Institut für Baustoffe zeigt, dass UHFB in Kombination mit einer Bewehrung aus Stahlblech und Kohlenstofffaser ein günstiges System hinsichtlich des Drucktragverhaltens der Bauteile darstellt. Damit ist es möglich, die beiden spröden und wenig duktilen Materialien ultra-hochfester Beton und Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff so zu kombinieren, dass die daraus resultierenden Bauteile auch ohne Stahlfaserzugabe ein ausgeprägt duktiler Tragverhalten zeigen. So kann das Potential UHFB voll ausgeschöpft und sein Problem des spröden Bruchverhaltens überwunden werden. UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech und Kohlenstofffaserbewehrung haben ein sehr geringes Eigengewicht, bei hoher Trag- und Knicklast. In Bild 10 ist das günstige Verhältnis exemplarisch im Vergleich zu anderen Bauarten illustriert. Eine Stütze mit der gleichen charakteristischen Traglast aus konventionellem Baustahl S235 wäre ca. doppelt so schwer wie ein

UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech und Kohlenstofffaserbewehrung. Ein Hohlquerschnitt, der ausschließlich aus UHFB bestünde, wäre am leichtesten. Ein sicheres Bauen ist damit jedoch aufgrund seines mangelhaften Nachbruchverhaltens nicht möglich. Eine Stahlbewehrung (UHFB-Hybridkonstruktion), welche zu einer ca. 50 %-igen residualen Last führt, würde im Gewicht bei ca. 70 % der Referenzkonstruktion (Scholle et al. 2016b), die nur aus Stahl besteht, liegen. Durch die Hinzunahme von Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff kann ein großer Teil des Stahls der Hybridkonstruktion eingespart werden, was letztlich zum günstigsten Verhältnis von sicher aufnehmbarer Traglast zum Eigengewicht führt.

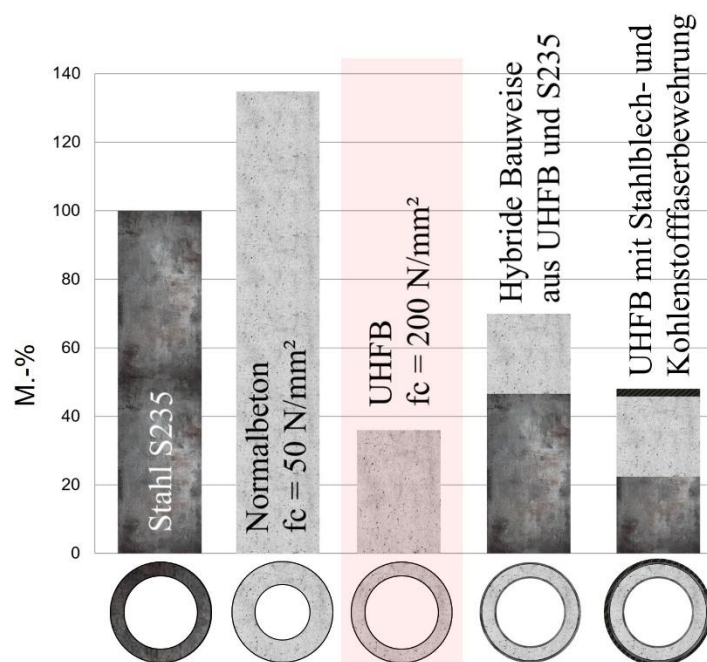


Bild 10: Exemplarische Darstellung der Masse unterschiedlicher Bauweisen für druckbeanspruchte Stützen der gleichen Traglast.

8 AUSBLICK

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass das System UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung eine gut geeignete Bauweise für druckbelastete, stabförmige Bauteile darstellt.

In weiteren Untersuchungen wird auf die Finite-Elemente-Methode zurückgegriffen, um eine Optimierung der Konstruktion durchzuführen. Das Verhältnis aus Tragfähigkeit zu Eigengewicht dient dabei als Zielfunktion für automatisierte Optimierungsprozesse.

Neben der Optimierung des Querschnitts werden innovative Produktionsprozesse im Strangpressverfahren für solche Bauteile erprobt. Die stabförmigen Bauteile eignen sich besonders gut für modularisierte Fachwerke, deren Eigengewicht ein wesentlicher Faktor ist. Damit die Bauteile wirtschaftlich, in konstant hoher Qualität und mit großer Produktionsrate produziert werden können, wird ein neues Herstellungsverfahren für UHFB-Hohlzylinder mit Stahlblech- und Kohlenstofffaserbewehrung entwickelt. Dabei kommt eine automatisierte Qualitätssicherung, basierend auf einem künstlichen neuronalen Netz, zum Einsatz. Das Herstellungsverfahren basiert auf einem kontinuierlichen Fließfertigungsprozess, bei dem der ultra-hochfeste Beton extrudiert wird.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der DFG für die Projektförderung im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“.

LITERATUR

- Eurocode (2010): “Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings”; German version EN 1994-1-1:2004 + AC:2009
- fib (2008): “Constitutive modelling of high strength / high performance concrete” CEB fib bulletin 42, Lausanne, State-of-art report
- fib (2010): “Model Code for Concrete Structures” CEB fib, Lausanne
- Lindschulte, N. (2013): “Drucktragverhalten von Rohren aus ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung”, Berichte aus dem Institut für Baustoff, Dissertation, Hannover
- Lindschulte, N. & Lohaus, L. (2015): “Rohre aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung unter zentrischer Druckbeanspruchung”, Bauingenieur, Band 90
- Lohaus, L. & Markowski J. (2018): “Rohrförmige Drucktragglieder aus Ultrahochfestem Beton - Wirksamkeit von Blechummantelung und Wickelverstärkung auf Duktilität und Resttragfähigkeit”, Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell, 501-515
- Markowski, J. & Lohaus, L. (2016): “UHPC Sandwich Structures with Composite Coating Under Compressive Load” Acta Polytechnica CTU Proceedings, S. 38-42
- Schmidt, A., Curbach, M., Henke M. & Fischer, O. (2013). “Formvariationen von Druckgliedern”, Beton- und Stahlbetonbau Volume 108, Issue 11, S. 792-803
- Schmidt, M., Bunje, K., Droll, K., Fehling, E., Greiner, S., et al. (2008): “Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb, Fachbereich 07 des NA Bau im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.” DAfStB-Heft 561
- Scholle, N. & Lohaus, L. (2016a): “UHPC-Steel Hybrid Tube Components for Application in Offshore Support Structure” Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, S. 154-159
- Scholle, N., Lohaus L & Lindschulte N.: (2016b). “Weight-saving potential of hybrid tube structures”, Proceedings of HiPerMat 2016 – 4th Int. Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Material, S. 237-238