

Wickelverstärkte Hybridrohre | Wrapping-reinforced hybrid tubes

- ▶ Ludger Lohaus, Jan Markowski
- ▶ Institut für Baustoffe (IfB), Leibniz Universität Hannover

1 Motivation und Zielsetzung

Dieses Projekt widmete sich einer neuen Bauweise für stabförmige Drucktragglieder aus ultrahochfestem Beton (UHFB), die – als UHFB-Rohre mit Stahlrohren ummantelt – hier als Hybridrohre bezeichnet werden. Durch eine äußere Wickelverstärkung aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) werden die beiden, für sich alleine betrachtet ausgeprägt spröden Hochleistungsmaterialien UHFB und CFK so kombiniert, dass sie zu besonders leichten Bauteilen hoher Tragfähigkeit mit ausgeprägt duktilem Versagensverhalten zusammengefügt werden.

UHFB eignet sich besonders gut für leichte Tragwerke. Aufgrund seines günstigen Verhältnisses von hoher Druckfestigkeit (es können Druckfestigkeiten erreicht werden, die im Bereich der Fließgrenze von konventionellem Baustahl liegen) zu geringem Eigengewicht (UHFB-Rohrdichte beträgt lediglich ca. 30 % der Dichte von Stahl) können stabförmige Drucktragglieder konstruiert werden, welche bei vergleichbarer Tragfähigkeit ein wesentlich geringeres Gewicht aufweisen als Profile aus konventionellem Baustahl. Zudem ist der Einsatz von Beton gegenüber Stahl hinsichtlich der Verfügbarkeit der Ressourcen, der für die Herstellung des Baustoffs notwendigen Energie und der damit verbundenen CO₂-Emissionen sowie seines Preises vorteilhaft. Obwohl UHFB schon seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung ist, spielen Bauteile aus UHFB für tragende Elemente in Deutschland noch immer nur eine untergeordnete Rolle. Sein ökologisches, wirtschaftliches und auch architektonisches Potential, das bislang weitgehend ungenutzt bleibt, soll durch die neue

1 Motivation and objective

This project was dedicated to a new construction method for rod-shaped support elements made of ultra-high performance concrete (UHPC), which – as UHPC tubes coated with steel sheets – are called hybrid tubes in this report. Through an exterior wrapping-reinforcement made of carbon fibre reinforced plastic (CFRP), the two high-performance materials UHPC and CFRP, which are distinctly brittle when viewed on their own, are combined in such a way that they form particularly light components of high load-bearing capacity with profound ductile failure behaviour.

UHPC is particularly suitable for lightweight structures. Due to its favourable ratio of high compressive strength (compressive strengths in the range of the yield point of conventional structural steel can be achieved) to low dead weight (UHPC's raw density is only approx. 30% of the density of steel), rod-shaped pressure support elements can be constructed which have a significantly lower weight than profiles made of conventional structural steel with a comparable load capacity. In addition, the usage of concrete has advantages over steel in terms of the availability of resources, the energy required for the production of the material and the associated CO₂ emissions as well as its price. Although UHPC has been a subject of research for many years, to this day components made of UHPC only play a minor role for load-bearing elements in Germany. Its ecological, economic and also architectural potential, which has remained largely unused to date, is to be utilised far better than before by means of this new con-

Bauweise weit besser als bisher genutzt werden. Ein wesentliches Hemmnis, das einem vermehrten Einsatz von UHFB entgegensteht, stellt dabei sein sprödes Versagensverhalten dar: Durch die extrem hohen aufnehmbaren Druckspannungen wird beim Überschreiten der Druckfestigkeit schlagartig sehr viel Energie freigesetzt, was sich durch ein explosionsartiges Versagensverhalten äußert. Hierin liegt eine große Herausforderung für das Konstruieren duktiler und resilienter Tragwerke aus UHFB.

In der UHFB-Richtlinie [1] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) werden Regeln für die Bemessung und Ausführung von Bauteilen aus UHFB erarbeitet. Die Richtlinie orientiert sich an der Struktur der DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [2] und kann aufgrund dessen nur wenig Anreize für grundlegend neue, UHFB-gerechte Konstruktionen liefern.

Projektziel war es, das Trag- und Versagensverhalten solcher wickelverstärkten Hybridrohre unter zentrischer und exzentrischer axialer Druckbeanspruchung zu erfassen, zu beschreiben und zu prognostizieren.

2 Wickelverstärkte Hybridrohre – Beschreibung der Konstruktion

2.1 Vorarbeiten: UHFB-Hybridrohr

Das Konzept der wickelverstärkten Hybridrohre basiert auf der Weiterentwicklung von UHFB-Hybridrohren, zu denen bereits umfangreiche Vorarbeiten [3]–[5] am Institut für Baustoffe (IfB) der LU Hannover bestehen. Beim UHFB-Hybridrohr wird ein hohler UHFB-Betonkern durch zwei konzentrisch angeordnete Stahlbleche ummantelt. In Abgrenzung zum konventionellen Verbundbau sollen Normalkräfte nahezu ausschließlich durch den Betonkern aufgenommen werden, wobei die Stahlrohre als Umschnürungs- und Stützbewehrung dienen. Wird die Druckfestigkeit des UHFB überschritten, kann der gebrochene Betonkern seitlich durch die beiden Stahlrohre gestützt werden und auf diese Weise weiterhin Normalkräfte übertragen. So kann ein

struction method.

A major obstacle hindering the increased use of UHPC is its brittle failure behaviour: Due to the extremely high compressive stresses that can be absorbed, a great amount of energy is suddenly released when the compressive strength is exceeded, which is expressed by explosive failure behaviour.

Herein lies a major challenge for the design of ductile and resilient UHPC structures. The UHPC guideline [1] issued by the German Committee for Reinforced Concrete (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb) contains rules for the design and execution of structural components made of UHPC. The guideline is based on the structure of DIN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) [2] and can therefore only provide little incentive for fundamentally new designs that are compatible with UHPC.

The project's aim was to record, describe and predict the load bearing and failure behaviour of such wrapping-reinforced hybrid tubes under centric and eccentric axial compressive stress.

2 Wrapping-reinforced hybrid tubes – description of the construction

2.1 Preparatory work: UHPC hybrid tubes

The concept of wrapping-reinforced hybrid tubes is based on the further development of UHPC hybrid tubes, for which a wide range of preliminary work [3]–[5] has already been done at the Institute of Building Materials Science (IfB) of LU Hanover. In the UHPC hybrid tube, two concentrically arranged steel sheets coat a hollow UHPC concrete core. In contrast to conventional composite construction, normal forces are to be absorbed almost exclusively by the concrete core, with the steel tubes serving as a strapping and supporting reinforcement. If the compressive strength of the UHPC is exceeded, the broken concrete core is supported laterally by the two steel sheets and can thus continue to transmit normal forces. In this manner, a "good-natured", ductile component behaviour can be

„gutmütiges“, duktiles Bauteilverhalten sogar völlig ohne Stahlfasern erreicht werden. Eine alleinige Verstärkung mit Stahlfasern wäre dazu nicht in der Lage [5]. Erst mit Sicherstellung eines gutmütigen Versagens kann die außerordentlich hohe Druckfestigkeit von UHFB praktisch nutzbar gemacht und der Gewichtsvorteil gegenüber Konstruktionen aus konventionellem Baustahl realisiert werden [4]. Darüber hinaus erleichtert der Verzicht auf Stahlfasern die Verarbeitung des UHFB und die Herstellung dünnwandiger UHFB-Hohlprofile in entscheidender Weise.

UHFB-Hybridrohre zeigen ein charakteristisches Tragverhalten, bei dem nach Überschreiten der primären Maximallast, welche als Punkt vor dem ersten Abfall der Kraft im Kraft-Verformungs-Diagramm definiert ist, weiterhin Normalkräfte übertragen werden können. Diese *primäre Maximallast* wird im Folgenden im Sinne einer besseren Lesbarkeit als *Maximallast* bezeichnet. Die *Resttraglast* oder *residuale Tragfähigkeit* ist hingegen diejenige Normalkraft, die vom Bauteil nach Überschreiten der primären Maximallast noch übertragen werden kann. Sie wird beim UHFB-Hybridrohr hauptsächlich vom Stahlanteil der Konstruktion beeinflusst [5]. Dies hat zur Folge, dass große Stahlteile benötigt werden, um ein ausreichend hohes Resttragniveau sicherzustellen. Hohe Stahlanteile stehen jedoch den erzielbaren Gewichts- und Kostenersparnissen entgegen. Ferner ergibt sich ein weiteres, aus dem Verbundbau bekanntes Problem: Das äußere Stahlblech neigt aufgrund seines gegenüber UHFB deutlich höheren Elastizitätsmoduls zu lokalem Beulen (sogenanntes „Elefantenfußbeulen“). Im Bereich dieser Beulen steht das äußere Stahlblech dann nicht mehr als dringend benötigte Umschnürungsbewehrung zur Verfügung, und zwar deutlich bevor die maximale Tragfähigkeit des UHFB erreicht ist.

2.2 Wickelverstärktes UHFB-Hybridrohr

Mit dem Ziel, den Leichtbau mit Beton weiter voranzutreiben, stellen wickelverstärkte Hybridrohre (Aufbau s. Bild 1) eine Weiterentwicklung der UHFB-Hybridrohre dar. Ihr Aufbau gleicht dem eines UHFB-Hybridrohrs mit dem

erreicht vollständig auch ohne Stahlfasern. Nur wenn gutmütige, duktile Versagensversicherungen garantiert werden können, kann die außerordentlich hohe Druckfestigkeit von UHPC in der Praxis genutzt werden und der Gewichts- und Kostenvorteil gegenüber Strukturen aus herkömmlichem Stahl erreicht werden [4]. In addition, the absence of steel fibres simplifies the processing of UHPC and the production of thin-walled UHPC hollow sections significantly.

UHPC hybrid tubes show a characteristic load-bearing behaviour in which normal forces can still be transmitted after exceeding the primary maximum load, which is defined as the point before the first drop of the force in the force-deformation diagram. In the following, this *primary maximum load* will be referred to as *maximum load* for better readability. The *residual load capacity*, is the normal force that can still be transmitted by the component after the primary maximum load has been exceeded. In the case of UHPC hybrid tubes, it is mainly influenced by the steel content of the construction [5]. This means that a high content of steel is needed to ensure a sufficient residual load capacity. However, high steel contents are counterproductive to the weight and cost savings that could be achieved. There is also another problem known from composite construction: the outer steel sheet has a tendency to local buckling (also known as "elephant's foot buckling") due to its significantly higher modulus of elasticity compared to UHPC. In the area of these dents, the outer steel sheet is then no longer available as needed strapping reinforcement, well before the maximum load-bearing capacity of the UHPC is reached.

2.2 Wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes

With the aim of advancing lightweight construction with concrete, wrapping-reinforced hybrid tubes (structure see Fig. 1) represent a further development of UHPC hybrid tubes. Their structure is similar to that of a UHPC hybrid tube, with the difference being that the outer steel tube is almost completely replaced by a layer of fibre-reinforced plastic (carbon fibre reinforced plastic, CFRP). That way, the weight of the con-

Unterschied, dass die äußere Stahlblechummantelung weitgehend durch eine Schicht aus faserverstärktem Kunststoff (Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff, CFK) ersetzt wird. So kann das Gewicht der Konstruktion bei gleichbleibender Traglast weiter reduziert und ein vorzeitiges Beulen des äußeren Stahlblechs verhindert werden. In [6], [7] sind die Überlegungen zum Aufbau wickelverstärkter Hybridrohre und des zugrundeliegenden Bewehrungskonzepts detailliert dargestellt.

Wickelverstärkte Hybridrohre bestehen aus vier wesentlichen Komponenten, die ein rundes Hohlprofil bilden. Hohlprofile haben gegenüber Vollquerschnitten den Vorteil, bei gleicher Querschnittsfläche größere Flächenmomente 2. Grades zu erreichen. So können bei gleichem Gewicht größere Widerstände gegen das für Stützen oft relevante Biegeknicken realisiert werden. Ferner kann der Hohlraum im Inneren ggf. auch für Installationsleitungen oder für eine Vorspannung genutzt werden, die den Momentenwiderstand erhöht.

Der UHFB-Kern dient der Aufnahme axialer Druckkräfte. Er liegt zwischen zwei Stahlrohren eingebettet. Das innere Stützrohr fungiert als Aussteifung in radialer Richtung. Kommt es durch Überschreitung der Druckfestigkeit zum Bruch im UHFB, benötigt er eine seitliche Stützung, damit der teilweise zerstörte Betonkern weiterhin Längskräfte übertragen kann. Auf der Innenseite des Betonkerns werden die Betonscherben durch das innere Stahlrohr gehalten. Auf der äußeren Seite des Betonkerns wird die Stützung durch die CFK-Bewehrung übernommen. Die Kohlenstofffasern sind nahezu unidirektional in Umfangsrichtung angeordnet. So können sie ihre große Zugfestigkeit und Steifigkeit zur seitlichen Stützung des Betonkerns einbringen, ohne dass sie sich am axialen Lastabtrag maßgeblich beteiligen und ohne dass lokales Beulen der außenliegenden Bewehrung vor dem Bruch des Betons auftreten kann. Mit der Auswahl eines geeigneten Matrixmaterials kann die CFK-Schicht gleichzeitig als wirksamer Korrosionsschutz ausgebildet werden. Das äußere Stahlblech dient als integrierte Schalung: Neben der formgebenden

struction can be further reduced while maintaining the same load-bearing capacity and premature buckling of the outer steel tube can be prevented. In [6] and [7], the considerations regarding the design of wrapping-reinforced hybrid tubes and the reinforcement concept are presented in detail.

Wrapping-reinforced hybrid tubes consist of four essential components that form a round hollow profile. Compared to full cross-sections, hollow profiles have the advantage of achieving greater 2nd degree surface moments with the same cross-sectional area. This enables greater resistance to flexural buckling, which is often relevant for pillars, to be achieved at the same weight. Furthermore, the hollow inside can also be used for installation lines or for pre-stressing, which increases the moment of resistance.

The concrete core consists of UHPC and is used to absorb axial compressive forces. It is embedded between two steel tubes. The inner support tube acts as a stiffener in radial direction. If the UHPC breaks due to exceeding the compressive strength, it requires lateral support so that the partially destroyed concrete core can continue to transmit longitudinal forces. On the inside of the concrete core, the concrete fragments are held in place by the inner steel tube. On the outer side of the concrete core, the CFRP layer provides the support. The carbon fibres are arranged almost unidirectionally in the circumferential direction. This allows them to provide their high tensile strength and stiffness for lateral support of the concrete core without making a significant contribution to axial load transfer and without local buckling of the external reinforcement before the concrete breaks. With the selection of a suitable matrix material, the CFRP layer can simultaneously provide an effective protection against corrosion. The outer steel tube serves as an integrated formwork: In addition to its shaping function, it also assumes a load-distributing function once the concrete core is broken (or: if the concrete core breaks). Without the outer steel tube, concrete fragments could locally damage the transverse pressure-sensitive wrapping reinforcement

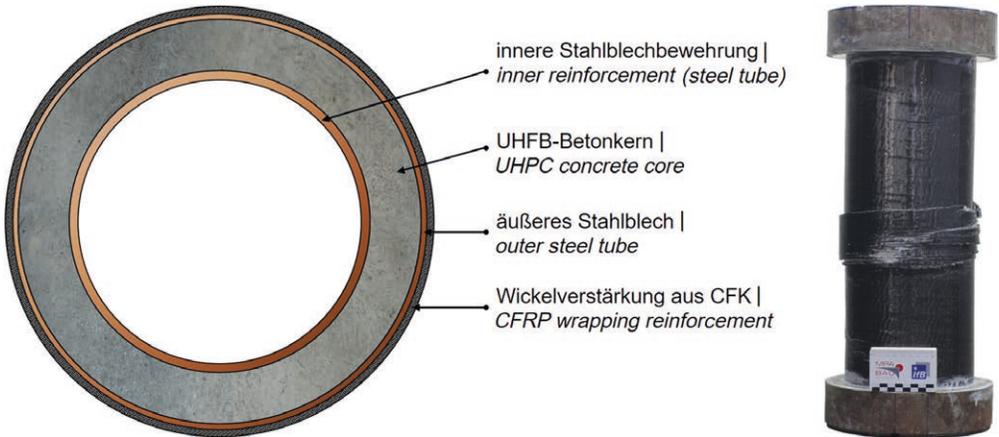


Bild 1: Wickelverstärktes Hybridrohr; links: schematische Darstellung im Querschnitt, rechts: Rohr mit Lasteinleitungsplatten nach der Prüfung | **Fig. 1:** Wrapping-reinforced hybrid tube; left: schematic representation of a cross-section, right: tube with load introduction plates after testing

Funktion übernimmt es eine lastverteilende Aufgabe, wenn der Betonkern gebrochen ist. Ohne das äußere Stahlblech würden Betonscherben die querdruckempfindliche Wickelverstärkung lokal beschädigen und zu einem Sprödbruch führen können. Probekörper ohne äußeres Stahlblech zeigten aufgrund dieses Effektes teilweise ein abruptes, explosionsartiges Versagensverhalten, ohne dass die angestrebte Resttragfähigkeit erreicht wurde (siehe Abschnitt 3.2.3).

3 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden

Es wurden experimentelle Untersuchungen auf Baustoff- und auf Bauteilebene sowie begleitende numerische Analysen durchgeführt, um die Auswirkungen der einzelnen Komponenten der wickelverstärkten Hybridrohre und ihre Interaktionen auf die maximale und auf die residuale Traglast zu untersuchen (s. Bild 2).

3.1 Untersuchungen zur radialen Steifigkeit der Wickelverstärkung

Mit dem Ziel der Auswahl eines geeigneten Faser-Kunststoff-Verbundsystems (FKV-System) und der Ermittlung charakteristischer mechanischer Kennwerte wurden in einem ersten Schritt Versuche zur Ermittlung einer realitätsnahen,

and lead to brittle fracture. Due to this, test specimens without the outer steel tube sometimes showed abrupt, explosive failure behaviour without achieving the desired residual load-bearing capacity (see section 3.2.3).

3 Work programme and investigation methods

Experimental investigations on building material and component level as well as accompanying numerical analyses have been carried out to investigate the effects of the individual components of the wrapping-reinforced hybrid tubes and their interactions on the maximum and residual load (see Fig. 2).

3.1 Investigations on the radial stiffness of the wrapping-reinforcement

With the aim of selecting a suitable fibre reinforced plastic composite (FRP) system and determining characteristic mechanical properties, tests to determine a realistic radial stiffness of the FRP have been carried out as a first step. The radial stiffness is the central property of the FRP regarding the assurance of the residual load-bearing capacity of the components. Glass and carbon fibres were investigated. In the following, only the wrapping reinforcements made

radialen Steifigkeit des FKV durchgeführt. Die radiale Steifigkeit ist die zentrale Eigenschaft des FKV hinsichtlich der Sicherstellung der Resttragfähigkeit der Bauteile. Es wurden Fasern aus Glas und Kohlenstoff untersucht. Im Folgenden werden nur die Wickelverstärkungen aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) betrachtet. In [8] ist der dafür verwendete Versuchsstand beschrieben: Es handelt sich um einen mechanischen Aufweitmechanismus, der in eine Universalprüfmaschine eingebaut werden kann. Durch die von der Maschine vorgegebene Verformung werden zylindrische FKV-Proben aufgeweitet. Von der gemessenen Maschinenkraft lässt sich ein Innendruck auf die Proben berechnen und mithilfe der gemessenen Dehnung eine Umfangsspannung ableiten.

In Tabelle 1 sind auszugsweise Ergebnisse zur radialen Steifigkeit zusammengefasst. Es wurden insgesamt sechs unterschiedliche FKV untersucht, wobei sowohl das Fasermaterial als auch die Faserorientierung variiert wurden. In Bezug auf die Auswahl eines geeigneten FKV für die Bauteilversuche wurden dabei die folgenden Erkenntnisse gewonnen:

- Handlamierte FKV-Schichten erzielen bereits gut reproduzierbare hohe radiale Steifigkeiten.
- Besonders geringe Streuungen traten bei den Proben mit einer horizontalen Umwicklung auf.
- Bereits geringe Abweichungen von der horizontalen Wickelrichtung verringern die radiale Steifigkeit maßgeblich.

Basierend auf den Ergebnissen wurde für alle weiteren Untersuchungen auf Bauteilebene ein unidirektional angebrachtes FKV aus Kohlenstofffasern ausgewählt, was einen guten Kompromiss aus reproduzierbaren Eigenschaften bei gleichzeitig hoher radialer Steifigkeit und vernachlässigbar geringer Steifigkeit in Längsrichtung verspricht. Da die Faserorientierung nachträglich optisch leicht überprüft werden kann, ist die starke Abhängigkeit der Steifigkeit vom Winkel ein gut beherrschbarer Einfluss auf die Tragfähigkeit.

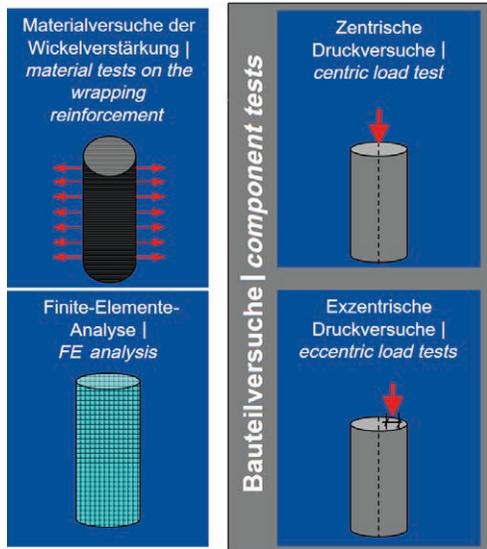


Bild 2: Untersuchungsprogramm | Fig. 2: Research programme

of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) are considered. The test setup used for this purpose is described in [8]. It is a mechanical enlarging mechanism that can be installed in a universal testing machine. Cylindrical FRP specimens are expanded by the predefined deformation of the machine. From the measured machine force, an internal pressure on the specimen can be calculated, as well as a circumferential stress using the measured expansion.

Table 1 summarizes excerpts from the results on radial stiffness. Six different FRP with varying fibre material and fibre orientation were investigated. With regard to the selection of a suitable FRP for the component tests, the following conclusions were made:

- Hand laminated FRP coatings already achieve well reproducible high radial stiffness.
- Especially low scattering occurred in the samples with a horizontal wrapping.
- Even small deviations from the horizontal wrapping direction significantly reduce the radial stiffness.

Based on the results, a unidirectionally positioned FRP made of carbon fibres was selected

Bezeichnung Designation	Eigenschaften der Kohlenstoffasergelege und Orientierung Properties of carbon fibre fabrics and orientation	Sekantenmodul (radiale Steifigkeit) Secant modulus (radial stiffness) [N/mm ²]	Standardabweichung Standard deviation [N/mm ²]
CFK-90 UD	200 g/m ² , 90° horizontale Wicklung horizontal winding	60.000	3.800
CFK-80 AWW	80 g/m ² , ausgleichender Winkelverbund* compensating angular composite*	70.000	5.800
CFK-80 UD	200 g/m ² , 80° unidirektional unidirectional	29.000	5.200

* Mehrlagiges Gelege, bei dem die Fasern in einer symmetrischen Anordnung zueinander stehen | Multilayer fabric in which the fibres are in a symmetrical arrangement to each other

Tabelle 1: Sekantenmodul der radialen Steifigkeit unterschiedlicher Faser-Kunststoff-Verbunde (bezogen auf den Durchschnitt aus jeweils drei Proben, Auszug) | **Table 1:** Secant modulus describing the radial stiffness of different fibre-plastic composites (based on the average of three samples, extract)

3.2 Experimentelle Untersuchungen auf Bauteilebene

3.2.1 Probekörperherstellung

Nachfolgend sind die Herstellungsschritte der Bauteilprobekörper dargelegt:

1. Konzentrisches Ausrichten des inneren und des äußeren Stahlblechs,
2. Einfüllen des ultra-hochfesten Betons in den Zwischenraum mithilfe einer Mörtelpumpe,
3. Ausschalen nach 48 h, Wärmebehandlung bei 90 °C über 48 h,
4. Auftragen des FKV,
5. Tempern des FKV bei ca. 60 °C über min. 48 h.

Folgende Baustoffe wurden verwendet:

Ultra-hochfester Beton. Es wurde ein feinkörniger, fließfähiger ultra-hochfester Mörtel mit selbstverdichtenden Eigenschaften verwendet, der auf der Zusammensetzung M3Q (entwickelt im SPP 1182 „Nachhaltig Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton“ [9]) basiert. Nach einer Wärmebehandlung wurde eine charakteristische Würfeldruckfestigkeit (100 mm) von ca. 220 N/mm² erreicht.

Stahlrohre. Die verwendeten Stahlrohre bestehen aus robotergeschweißtem Stahlblech der Güteklasse DC01 nach [10] mit einer Fließgrenze von ca. 235 N/mm².

for all further investigations at the component level. This promises a good compromise between reproducible properties with high radial stiffness and negligible stiffness in the longitudinal direction. Since the fibre orientation can easily be checked optically afterwards, the strong dependence of stiffness on angle is a well controllable influence on the load-bearing capacity.

3.2 Experimental investigations on component level

3.2.1 Specimen production

In the following, the manufacturing steps of the specimens are described:

1. concentric alignment of the inner and outer steel sheet,
2. filling the ultra-high strength concrete into the interstitial space using a mortar pump,
3. stripping after 48 h, heat treatment at 90 °C for 48 h,
4. application of the FRP,
5. tempering of the FRP at approx. 60 °C for at least 48 h.

The following building materials were used:

Ultra-high performance concrete. A fine-grained, flowable ultra-high performance mortar with self-compacting properties was used, based on the composition M3Q (developed

Faser-Kunststoff-Verbundsystem. Für das FKV wurde ein zweikomponentiges Epoxidharz verwendet. Damit wurde ein 25 mm breites, unidirektionales Kohlenstofffaserband (*high tension*, Flächengewicht 350 g/m², Feinheit 400 tex, Dicke 0,3 mm) im Bandwickelverfahren von Hand auf die Probekörper laminiert.

3.2.2 Untersuchungen von wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren unter zentrischer Druckbeanspruchung

Im ersten Schritt der Untersuchungen auf Bauteilebene wurde der Einfluss der Wickelverstärkung auf das axiale Tragverhalten (maximal aufnehmbare Normalkraft N_{max} und residuale Normalkraft N_{res}) untersucht.

Bei einigen Probekörpern kommt es dazu, dass nach dem Erreichen der Kraft N_{max}, die definitionsgemäß den ersten Abfall im Kraft-Dehnungs-Diagramm markiert, im weiteren Verlauf der Belastung des Probekörpers aufgrund von Umschnürungseffekten noch größere Kräfte als N_{max} aufgenommen werden können (N_{max,global}). Um trotzdem eine einheitliche Resttraglast benennen zu können, wird ein flächenbasiertes Verfahren herangezogen, das auf dem Duktilitätsindex I₅ nach Attard/Foster [11] basiert.

$$I_5 = \frac{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1 + C \cdot (3 \cdot \epsilon_1 - \epsilon_1)}{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1}$$

In Bild 3 ist die Berechnung des Duktilitätsindex I₅ exemplarisch für einen fiktiven Probekörper gezeigt, dessen Residuallast aus Gründen der Anschaulichkeit bei konstant 50 % der Maximallast liegt. Dieses flächenbasierte Verfahren lässt sich auch anwenden, wenn der Verlauf der Residuallast nicht linear verläuft, sondern weiter steigt oder fällt. Indem das Integral über den Verlauf des Nachbruchbereichs gebildet wird, kann ein mittlerer Wert für N_{res} angegeben werden, wenn zuvor der Duktilitätsindex I₅ berechnet worden ist.

$$N_{res} = (I_5 - 1) \cdot \frac{N_{max}}{4}$$

in SPP 1182 "*Building Sustainable with Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)*" [9]). After heat treatment, a characteristic cube (100 mm) compressive strength of approx. 220 N/mm² was achieved.

Steel tubes. The steel tubes used were made of robot-welded steel sheets of grade DC01 according to [10] with a yield point of approx. 235 N/mm².

Fibre-plastic composite system. A two-component epoxy resin was used for the FRP. A 25 mm wide, unidirectional (UD) carbon fibre tape (*high tension*, weight per unit area 350 g/m², fineness 400 tex, thickness 0.3 mm) was laminated to the test specimens by hand lay-up.

3.2.2 Investigations of wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes under centric compressive load

In the first step of the investigations on component level, the influence of the wrapping reinforcement on the axial load-bearing behaviour (maximum absorbable normal force N_{max} and residual normal force N_{res}) were investigated.

Some specimens, after reaching the force N_{max}, which by definition marks the first drop in the force-strain diagram, could absorb even higher forces than N_{max} in the further process of loading the specimen due to strapping effects (N_{max,global}). In order to be able to designate a uniform residual load nevertheless, an area-based method is used, which is adapted from the ductility index I₅ according to Attard/Foster [11].

$$I_5 = \frac{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1 + C \cdot (3 \cdot \epsilon_1 - \epsilon_1)}{0,5 \cdot A \cdot \epsilon_1}$$

Figure 3 shows an example of the calculation of the ductility index I₅ of a fictitious specimen with a residual load of constant 50% of the maximum load for demonstrative clarity. This area-based method can also be used if the course of the residual load is not linear but continues to rise or fall. By forming the integral over the course of the post-fracture area, a mean value

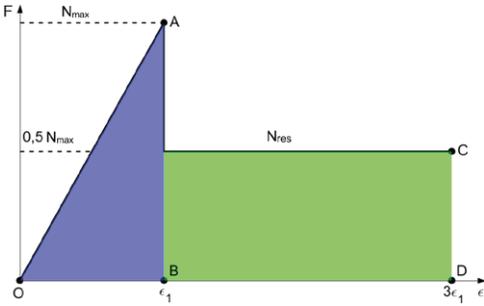


Bild 3: Idealisierter Last-Stauchungs-Verlauf zur Bestimmung der Residuallast nach Attard/Foster | **Fig. 3:** Idealised load-deformation curve to determine the residual load according to Attard/Foster

In Bild 4 ist exemplarisch der Kraft-Längsdehnungs-Verlauf von Probekörper CFK15-PK-2 dargestellt. Dabei sind die zur Berechnung der Residuallast verwendeten Flächenanteile wie in Bild 3 markiert.

Bei den Versuchen wurde eine Ausgangsgeometrie gewählt, von der aus die Dicke der Wickelverstärkung (Nennstärke Kohlenstofffasern t_f) variiert wurde (Serien CFK06 bis CFK24). In einer Referenzserie (CFK00) wurde auf eine Wickelverstärkung komplett verzichtet. Die Serie mit dem Präfix Si40 hat eine Aussteifung des inneren Kerns (Dicke des inneren Stützrohrs $T_{s,inner}$, um Einflüsse aus der Interaktion zwischen innerem Stahlrohr und Wickelverstärkung zu untersuchen. Serie G01 sind großformatigere Proben zur Untersuchung möglicher Skalierungseffekte. In Tabelle 2 sind die Probekörpergeometrien zusammengestellt.

Es wurden weggeregelte Druckversuche in einer Universalprüfmaschine durchgeführt, s. Tabelle 3 und Bild 5. Übereinstimmend mit dem Ingenieurmodell nach Lindschulte/Lohaus für nichtwickelverstärkte Hybridrohre kann der Betonquerschnitt ca. 80 % der querschnittsbezogenen, rechnerisch möglichen Kraft aufnehmen [3]. Diese Abminderung kann als Bauteilfaktor für dünnwandige Hohlprofile verstanden werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits dünne Schichten einer Wickelverstärkung die residuale Traglast gegenüber Probekörpern ohne Wickelverstärkung (Serie CFK00) zuverlässig steigern.

for N_{res} can be given if the ductility index I_s has been calculated beforehand.

$$N_{res} = (I_s - 1) \cdot \frac{N_{max}}{4}$$

Figure 4 shows an example of the force-strain curve, in this case of the CFK15-PK-2 specimen. The areas used for the calculation of the residual load are marked as shown in figure 3.

For the tests, an initial geometry was selected from which the thickness of the wrapping-reinforcement (nominal thickness carbon fibres t_f) was varied (series CFK06 to CFK24). In one reference series (CFK00), no wrapping-reinforcement was used at all. The series with the prefix Si40 has a stiffening of the inner core (thickness of the inner support tube $T_{s,inner}$ to investigate influences from the interaction between inner steel tube and wrapping reinforcement. Series G01 are larger sized samples to investigate possible scaling effects. The specimen geometries are listed in Table 2.

Path-regulated compression tests were performed in a universal testing machine, see Table 3 and Figure 5. In accordance with the engineering model according to Lindschulte/Lohaus for non-wrapping-reinforced hybrid tubes, the concrete cross-section can absorb approx. 80% of the cross-section-related, mathematically possible force [3]. This reduction can be understood as a component factor for thin-walled hollow sections.

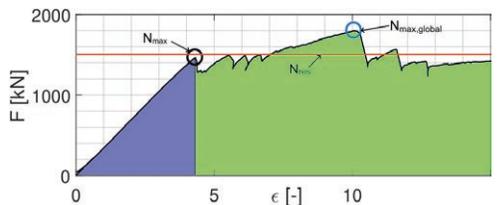


Bild 4: Kraft-Dehnungs-Verlauf von Probekörper CFK15-PK-2: da die Maximallast N_{max} als Maximum vor dem ersten Abfall der Kraft-Dehnungs-Kurve definiert ist, liegt die Residuallast N_{res} in diesem Fall höher als N_{max} ; die global größte Kraft $N_{max,global}$ bleibt ohne besondere Berücksichtigung. | **Fig. 4:** Force-strain curve of test specimen CFK24-PK-1: since the maximum load N_{max} is defined as the maximum before the first drop of the force-strain curve, the residual load N_{res} is higher than N_{max} in this case; the globally largest force $N_{max,global}$ is not taken into account.

Geometriegröße Geometry	Probekörper Specimen	
	Kleinformatig Small scale CFK00–24, Si40	Großformatig Large scale G01
Länge Length	500 mm	1.000 mm
Außendurchmesser Stahlrohr innen Inner steel tube's outside diameter $\varnothing S_{\text{innen}}$	133,0 mm	304,8 mm
Außendurchmesser Stahlrohr außen Outer steel tube's outside diameter $\varnothing S_{\text{außen}}$	169,0 mm	339,6 mm
Dicke Stahlrohr außen Outer steel tube's thickness $t_{s,\text{außen}}$	1,0 mm	0,8 mm

Tabelle 2: Probekörpergeometrien | Table 2: Specimen's geometries

Probekörper Specimen	t_f [mm]	$T_{s,\text{innen}}$ [mm]	N_{max} [kN]	N_{res} [kN]
CFK00-PK-1	0,0	2,9	1.419	658
CFK00-PK-2	0,0	2,9	1.399	705
CFK00-PK-3	0,0	2,9	1.261	735
CFK06-PK-1	0,6	2,9	1.425	1.085
CFK06-PK-2	0,6	2,9	1.235	1.221
CFK15-PK-1	1,5	2,9	1.969	1.554
CFK15-PK-2	1,5	2,9	1.464	1.505
CFK24-PK-1	2,4	2,9	1.803	1.838
CFK24-PK-2	2,4	2,9	2.011	1.815
Si40-CFK-06	0,6	4,0	1.428	1.482
Si40-CFK-15	1,5	4,0	1.801	1.675
Si40-CFK-24	2,4	4,0	1.670	1.874
G01-PK1	1,5	2,0	2.279	1.111
G01-PK2	1,5	2,0	2.115	1.418

Tabelle 3: Versuchsprogramm der zentrisch beanspruchten Probekörper | Table 3: Test program for centrally loaded specimens

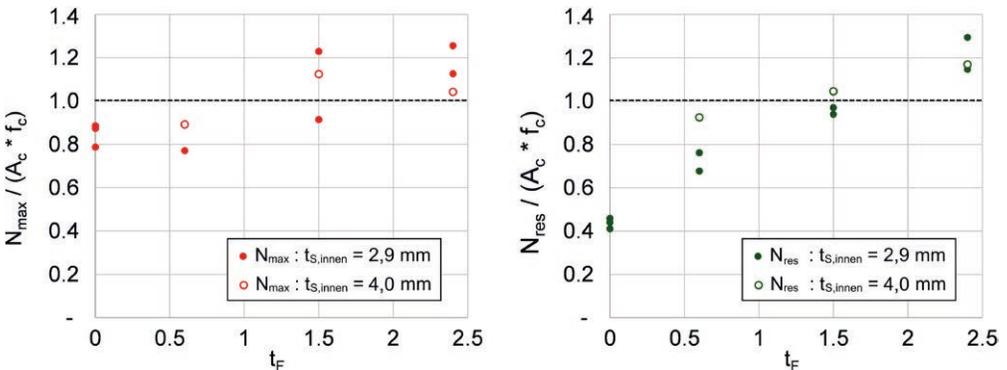


Bild 5: Darstellung der über die Betondruckfestigkeit f_c normierten Traglast N_{max} (links) und Resttraglast N_{res} (rechts) in Abhängigkeit der Dicke t_f der Wickelverstärkung der zentrisch beanspruchten, kleinformatigen Probekörper | Fig. 5: Diagram of the load-bearing capacity (left) and the residual load bearing capacity (right) of the centrally loaded, small-format specimens in dependency of the winding reinforcement's thickness t_f , normalized by the concrete compressive strength f_c

Dieser Effekt lässt sich exemplarisch gut an einem Vergleich der residualen Traglast von der Referenzserie CFK00 und der Serie CFK06 nachvollziehen. Hier wurde die Resttraglast mit einer

The results show that even thin layers of a wrapping-reinforcement reliably increase the residual load compared to test specimens without wrapping reinforcement (CFK00 series). This

Wickelverstärkung von nur 0,6 mm (d. h. zwei Lagen des 0,3 mm dicken Kohlenstofffaser-UD-Bandes) verdoppelt. Bei den Serien mit dickerer Wickelverstärkung ($> 0,6$ mm) können über große Verformungen konstant hohe Lasten aufgenommen werden (vgl. Bild 3). Aus Sicht einer wirtschaftlichen Bemessung ist ein solches Tragverhalten, bei dem die Residuallast nahezu so groß ist wie die Maximallast nicht anzustreben. Jedoch kann auf diese Weise die Fähigkeit der Konstruktion unter Beweis gestellt werden, extrem duktile UHFB-Drucktragglieder auszubilden.

Weiter zeigte sich, dass mit zunehmender Dicke der Wickelverstärkung die maximale Traglast der Probekörper nicht in dem Maße weiter gesteigert werden kann wie die residuale Traglast. Hierauf wird in [12] detaillierter eingegangen.

3.2.3 Wickelverstärkte Hybridrohre ohne äußeres Stahlblech

Zusätzlich wurden zwei Serien mit jeweils drei Probekörpern hergestellt, bei denen auf das äußere Stahlblech verzichtet wurde und das FKV direkt auf den Betonkern appliziert wurde. Als außenseitige Schalung für den Betonkern wurde dazu ein abnehmbares Plexiglasrohr verwendet. Bei diesen Proben kam es im Druckversuch teilweise zu einem schlagartigen Versagen, da die querdrukempfindlichen Fasern durch den Betonkern abrupt zerstört wurden und somit danach nicht mehr als Umschnürungsbe- wehrung wirken konnten [8].

3.2.4 Untersuchungen von wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren unter exzentrischer Druckbeanspruchung (Normalkraft-Momenten-Überlagerung)

Zur Untersuchung der Interaktion zwischen Momenten- und Normalkraftbeanspruchung wurden jeweils zwei Exzentrizitätsniveaus (Exzentrizität e zu Außendurchmesser d) und jeweils zwei unterschiedlich dicke Wickelverstärkungen miteinander kombiniert (s. Tabelle 4 und Bild 6). Jede Serie bestand aus drei Proben. Das 1,0 mm dicke Stahlrohr ($t_{s,außen}$) besaß Durchmesser $\varnothing S_{innen} = 133,0$ mm und $\varnothing S_{außen} = 169,0$ mm. Auf-

effect can be demonstrated by comparing the residual load of the CFK00 reference series and the CFK06 series. Here, the residual load was doubled with a wrapping reinforcement of only 0.6 mm (i.e. two layers of the 0.3 mm thick carbon fibre UD tape). In the series with thicker wrapping-reinforcement (> 0.6 mm), constantly high loads can be absorbed by large deformations (see. Fig. 3). From the point of view of economic dimensioning, such a load-bearing behaviour, in which the residual load is almost as high as the maximum load, is not to be aimed for. However, in this way the ability of the design to form extremely ductile UHPC pressure support elements can be demonstrated.

Furthermore, it was shown that with increasing wrapping-reinforcement's thickness, the maximum ultimate load of the specimens cannot be further increased to the same extent as the residual load. This is discussed in more detail in [12].

3.2.3 Wrapping-reinforced hybrid tubes without an outer steel tube

In addition, two series of three specimens each were produced, in which the outer steel tube was dispensed and the FRP was applied directly to the concrete core. A removable acrylic glass tube was used as an outer formwork for the concrete core. In some cases, these specimens failed abruptly in the compression test because the transverse pressure-sensitive fibres were abruptly destroyed by the concrete core and could therefore no longer act as strapping reinforcement [8].

3.2.4 Investigations of wrapping-reinforced UHPC hybrid tubes under eccentric compressive load (normal force-moment superposition)

To investigate the interaction between moment and normal force loading, two eccentricity levels (eccentricity e to outer diameter d) and two wrapping reinforcements of different thickness were combined (see Table 4 and Fig. 6). Each series consisted of three specimens. The 1.0 mm thick steel tube ($t_{s,outside}$) had diameters

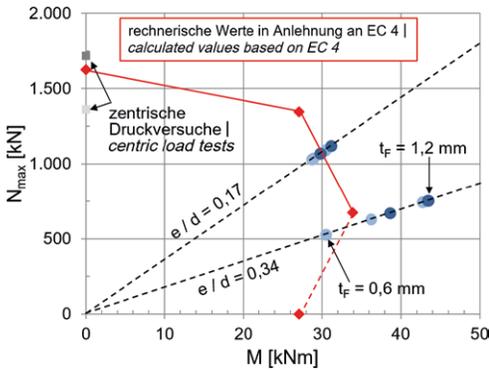


Bild 6: Versuchsergebnisse als Momenten-Normalkraft-Interaktionsdiagramm; die rote Linie repräsentiert charakteristische Widerstandswerte in Anlehnung an das Nachweisverfahren aus dem Eurocode 4 [13] | **Fig. 6:** Representation of the results as a moment normal force interaction diagram; the red line represents characteristic resistance values according to the procedure of the Eurocode 4 [13]

grund der Momentenbeanspruchung durch die exzentrische Lasteinleitung ist der vorgestellte Ansatz zur Berechnung der Resttagfähigkeit N_{res} nicht aussagekräftig. Stattdessen wird die Definition nach Lindschulte/Lohaus verwendet, bei der die Kraft, die unmittelbar nach Überschreiten der maximalen Traglast aufgenommen wird, als Resttraglast N_{res^*} definiert wird.

Es lässt sich ableiten, dass die Traglast wickelverstärkter Hybridrohre trotz des konzeptuellen Unterschieds zum Verbundbau mit bereits bekannten Nachweisverfahren approximiert werden kann. Die Ergebnisse zeigen geringere Streuungen als die Ergebnisse der zentrisch beanspruchten Probekörper und die festgestellten residualen Traglasten liegen vergleichsweise auf einem höheren Niveau. Hinsichtlich der Sicherstellung der angestrebten Bauteilduktilität zeigt sich somit die exzentrische Beanspruchung als weniger kritisch als die rein zentrische Druckbeanspruchung. Die Wickelverstärkung

$\varnothing S_{inside} = 133.0 \text{ mm}$ and $\varnothing S_{outside} = 169.0 \text{ mm}$. Due to the moment loading caused by the eccentric load application, the presented approach for calculating the residual load-bearing capacity N_{res} is not meaningful. Instead, the definition according to Lindschulte/Lohaus is used, in which the force absorbed immediately after exceeding the maximum ultimate load is defined as the residual ultimate load N_{res^*} .

It can be deduced that the ultimate load of wrapping-reinforced hybrid tubes can be approximated with already known verification methods despite the conceptual difference to composite construction. The results show lower scatter than the results of the centrally loaded specimens and the residual ultimate loads determined are comparatively at a higher level. With regard to ensuring the desired component ductility, the eccentric compressive loading appears to be less critical than the purely centric compressive loading. The wrapping reinforcement is therefore a highly effective type of reinforcement even under moment loading.

3.3 Numerical investigations

Accompanying the experiments, numerical investigations were carried out to verify the design principles and gain detailed insights into the load-bearing behaviour of the components. For example, stresses and strains in the concrete core can be read off, failure modes (Fig. 7) can be determined and the utilization states of the individual components can be determined for optimized design.

A fully parameterized (material and geometry) Abaqus solid model was used, which allows automated model generation. In a pre-in-

Serie Series	e/d [-]	t _F [mm]	N _{max} [kN]	σ ² N _{max} [kN]	N _{res*} [kN]	σ ² N _{max} [kN]
E28-C06	0,17	0,6	1.049	34	894	15
E28-C12	0,17	1,2	967	88	947	63
E58-C06	0,34	0,6	681	95	522	37
E58-C12	0,34	1,2	723	45	604	62

Tabelle 4: Versuchsergebnisse zur Normalkraft-Momenten-Überlagerung | **Table 4:** Experimental program of tests with normal force-moment superposition including the in-series standard deviations

ist demnach auch bei Momentenbeanspruchung eine hochwirksame Art der Bewehrung.

3.3 Numerische Untersuchungen

Begleitend zu den Experimenten wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um die Konstruktionsprinzipien zu überprüfen und detaillierte Einsichten in das Tragverhalten der Bauteile zu gewinnen. So können beispielsweise Spannungen und Dehnungen im Betonkern abgelesen werden, Versagensmodi (Bild 7) bestimmt und die Ausnutzungszustände der einzelnen Komponenten für eine optimierte Bemessung ermittelt werden.

Verwendet wurde ein vollständig parametrisiertes (Material und Geometrie) Abaqus-Volumenmodell, das eine automatisierte Modellerzeugung erlaubt. In einer Voruntersuchung wurden unter Berücksichtigung der am IfB bestehenden Versuchsergebnisse zum UHFB-Hybridrohr Materialparameter des verwendeten *Concrete-Damage-Plasticity*-Materialmodells kalibriert. Ein detaillierter Einblick in die numerischen Untersuchungen ist in [14] gegeben. Das Modell ist in der Lage, mit einer hohen Übereinstimmung die maximale und residuale Traglast zu prognostizieren.

4 Zusammenfassung

Mit Hilfe der Bauweise *wickelverstärkte Hybridrohre* können extrem leichte Betonbauteile mit hoher Tragfähigkeit konzipiert werden. Während der Betonbau üblicherweise als Massivbau und der Stahlbau eher als Leichtbauweise eingestuft wird, kann der als Benchmark anzusehende Kennwert Tragfähigkeit zu Gewicht mit etwa 15 kN/kg gegenüber einem vergleichbaren Rohr aus Baustahl (S235, 30 kN/kg) etwa um das Doppelte gesteigert [8] werden. Sowohl unter reiner Normalkraftbeanspruchung als auch unter Normalkraft- und Momentenbeanspruchung kann mithilfe der Wickelverstärkung ein duktileres Tragverhalten sichergestellt werden. So kann UHFB beispielsweise in besonders leichten Stützen eingesetzt werden, ohne dass große Stahlteile zur Sicherstel-

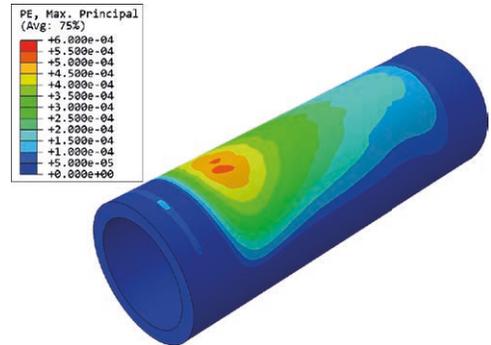


Bild 7: Anhand der Simulation einer exzentrisch beanspruchten Probe kann das Versagen der Betondruckzone durch die Darstellung plastischer Verformungen nachvollzogen werden | **Fig. 7:** By simulating an eccentrically loaded specimen, the failure of the concrete pressure zone can be demonstrated by displaying plastic deformations

vestigation, material parameters of the *concrete-damage-plasticity* material model used were calibrated taking into account the existing test results on the UHPC hybrid tube at the IfB. A detailed insight into the numerical investigations is given in [14]. The model is able to predict the maximum and residual ultimate load with a high accuracy.

4 Summary

With the help of the *wrapping-reinforced* hybrid tube construction method, extremely lightweight concrete components with high load-bearing capacity can be designed. Concrete constructions are usually classified as solid and heavy construction and steel constructions are considered rather as lightweight construction. The characteristic value of load-bearing capacity to dead weight, which is to be regarded as a benchmark, can be increased by about double with about 15 kN/kg compared to a comparable pipe made of structural steel (S235, 30 kN/kg) [8]. Ductile load-bearing behaviour can be ensured both under pure normal force loading and under normal force and moment loading with the aid of the wrapping reinforcement. For example, UHPC can be used in particularly lightweight columns without the need for large amounts of steel to ensure ductility

lung der Duktilität notwendig werden und ohne dass dem UHFB Stahlfasern beigefügt werden müssten, welche die Verarbeitbarkeit und die Formfüllungseigenschaften des UHFBs erfahrungsgemäß deutlich verschlechtern würden. Im Gegensatz zu einer Stahlfaserverstärkung, deren Orientierung kaum zielsicher beeinflusst werden kann, stellt in wickelverstärkten Hybridrohren ein Faser-Kunststoff-Verbundsystem mit einer steuerbaren Faserorientierung sicher, dass die günstigen Materialeigenschaften der Kohlenstofffasern sowie des UHFB zielgerichtet so eingesetzt werden können, dass sie sich funktional gegenseitig ergänzen, um leichte und sichere Drucktragglieder zu erzeugen.

Während Betontragwerke bislang immer deutlich schwerer waren als Stahltragwerke können wickelverstärkte Hybridrohre diesen Nachteil nicht nur ausgleichen, sondern bei gleicher Traglast und gutmütigem Versagensverhalten sogar ca. 50 % des Eigengewichts vergleichbarer Konstruktionen aus konventionellem Baustahl einsparen. Damit bilden sie eine aussichtsreiche Perspektive beim „Leicht Bauen mit Beton“.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257623116 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton (UHFB-Richtlinie). Entwurf 01.07.2019, verwobene Fassung von EC 2-1-1 + NA + UHFB-Regelungen
- [2] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC2010.
- [3] Lindschulte, N.; Lohaus, L.: Rohre aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung unter zentrischer Druckbeanspruchung. Bauingenieur 90 (2015) 2, S. 71–80

and without the need to add steel fibres to the UHPC, which would significantly deteriorate the workability and mold-filling properties of the UHPC according to experience. In contrast to steel fibre reinforcement, which orientation can hardly be influenced in a targeted manner, in wrap-reinforced hybrid tubes a fibre-plastic composite system with a controllable fibre orientation ensures that the favourable material properties of the carbon fibres as well as the UHPC can be used in such a manner, that they complement each other functionally, producing lightweight and safe compression members.

While concrete structures have always been significantly heavier than steel structures so far, wrapping-reinforced hybrid tubes can not only compensate this disadvantage but also even save around 50% of the dead weight of comparable structures made of conventional structural steel with the same ultimate load and good-natured failure behaviour. This makes them a promising option for "Future Concrete Structures Using Bionic, Mathematical and Engineering Formfinding Principles".

Acknowledgement

The authors would like to thank "Deutsche Forschungsgemeinschaft" (DFG) for funding project no. 257623116 within the priority program SPP 1542.

- [4] Scholle, N.; Lohaus, L.; Lindschulte, N.: Weight-saving potential of hybrid tube structures. In: Midendorf, B.; Fehling, E. (Hrsg.): Proc. of HiPerMat 2016 – 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Material, Kassel: kassel university press GmbH, 09.–11.03.2016, 2016, Contribution 193, S. 237–238
- [5] Lindschulte, N.: Drucktragverhalten von Rohren aus Ultrahochfestem Beton mit Stahlblechummantelung. Diss., Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2013
- [6] Markowski, J.; Lohaus, L.: Innovatives Bewehrungskonzept für leichte Stützen aus ultra-hochfestem Beton. In: Lohaus, L.; Haist, M.; Marx, S. (Hrsg.):

Beiträge zur 7. DAFStb-Jahrestagung mit 60. Forschungskolloquium, 28./29.10.2019 in Hannover, Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2019, S. 183–195 – DOI: 10.15488/5538

[7] Markowski, J.; Lohaus, L.: UHPC Sandwich Structures with Composite Coating under Compressive Load. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 7 (2016), S. 38–42 – DOI: 10.14311/APP.2017.7.0038

[8] Markowski, J.; Lohaus, L.: Winding Reinforced UHPC Sandwich Structures for Lightweight Jackets for Offshore Megastructures. *Journal of Physics: Conference Series* 1356 (2019) – Proc. of EERA Deep Wind Conf. 2019, 16.–18.01.2019 in Trondheim (Norwegen), Beitrag Nr. 012027, 9 S. – DOI: 10.1088/1742-6596/1356/1/012027

[9] Fehling, M.; Schmidt, T.; Teichmann, K.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum Projekt DFG FE 497/1-1, erschienen in: Schmidt, M.; Fehling, E. (Hrsg.): *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, Heft 1, Kassel: kassel university press, 2005

[10] DIN EN 10130:2007-02: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10130:2006.

[11] Attard, M. M.; Foster, J. F.: *Ductility on High Strength Concrete Columns*. Uniciv Report 344, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1995

[12] Lohaus, L.; Markowski, J.: Rohrförmige Drucktragglieder aus Ultrahochfestem Beton – Wirkung der Blechummantelung und Wickelverstärkung auf Duktilität und Resttragfähigkeit. In: Pahn, M.; Thiel, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell*, TU Kaiserslautern / Ernst & Sohn, 2018, S. 501–514

[13] DIN EN 1994-1-1:2010-12: Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1994-1-1:2004 + AC:2009.

[14] Markowski, J.; Lohaus, L.: Ultra-high Performance Concrete Sandwich Structures as Basic Element of Offshore Mega Structures – A Finite Element Model. In: *The Int. Society of Ocean and Polar Engineers* (Hrsg.): Proc. of 29th Int. Ocean and Polar Engineering Conf. (ISOPE), 16.–21.06.2019 in Honolulu (Hawaii, USA), 2019, S. 4128–4134

Bildnachweise | Picture credits

Alle Bilder | All pictures: Jan Markowski

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Wickelverstärkte Hybridrohre | Wrapped hybrid tubes

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus Institutsleiter (bis 2020) Head of the institute (until 2020)
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	LO751/16-1 (Projektnummer Project number: 257623116)
Adresse Address:	Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe, Appelstr. 9A, 30167 Hannover
Kontakt Contact:	+49 511 762 3722 institut@baustoff.uni-hannover.de www.baustoff.uni-hannover.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Reporting / funding period: 01.04.2015–31.03.2018 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.05.2018
Team Team:	Niklas Scholle (01.04.2015–30.11.2015) Jan Markowski (01.12.2015–31.05.2018)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Markowski, J.; Lohaus, L.: UHPC Sandwich Structures with Composite Coating under Compressive Load. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 7 (2016), S. 38–42 – DOI: 10.14311/APP.2017.7.0038
- Lohaus, L.; Markowski J.: Rohrförmige Drucktragglieder aus Ultrahochfestem Beton – Wirkung der Blechummantelung und Wickelverstärkung auf Duktilität und Resttragfähigkeit. In: Pahn, M.; Thiel, C.; Glock, C. (Hrsg.): *Vielfalt*

im Massivbau – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell, TU Kaiserslautern / Ernst & Sohn, 2018, S. 501–514

- Markowski, J.; Lohaus, L.: Winding Reinforced UHPC Sandwich Structures for Lightweight Jackets for Offshore Megastructures. In: Journal of Physics: Conference Series 1356 (2019) – Proc. of 16th Deep Sea Offshore Wind R&D conf., 16.–18.01.2019 in Trondheim (Norwegen), 2019, 9 Seiten – DOI: 10.1088/1742-6596/1356/1/012027
- Markowski, J.; Lohaus, L.: Ultra-high Performance Concrete Sandwich Structures as Basic Element of Offshore Mega Structures – A Finite Element Model. In: The International Society of Ocean and Polar Engineers (Hrsg.): Proc. of 29th Int. Ocean and Polar Engineering Conf. (ISOPE), 16.–21.06.2019 Honolulu (Hawaii, USA), 2019, paper ISOPE-I-19-619, S. 4128–4134
- Markowski, J.; Lohaus, L.: Innovatives Bewehrungskonzept für leichte Stützen aus ultra-hochfestem Beton. In: Beiträge zur 7. DAfStb-Jahrestagung mit 60. Forschungskolloquium, 28./29.10.2019 in Hannover, Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, 2019, S. 183–195 – DOI: 10.15488/5538

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertation | Dissertation

- Markowski, J.: Zum Tragverhalten von Hohlzylindern aus Ultra-hochfestem Beton mit Bewehrung aus Stahlblech und Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. (geplante Einreichung | planned submission: 2022)

Studienarbeiten | Student's research projects

- Hunnius, J.: Untersuchungen des Einflusses einer zusätzlichen Faserkunststoff-Wickelverstärkung auf das Tragverhalten von stahlblechummantelten UHFB-Rohrstrukturen. Masterarbeit, 2015
- Abdulkarim, W.: Erstellung eines parametrisierten, numerischen Modells zum tragverhalten Wickelverstärkter Hybridrohre. Bachelorarbeit, 2016
- Müller, M.: Dauerhaftigkeitsbedingungen von Faser-Kunststoff-Verbundsystemen unter Offshore-Bedingungen. Projektarbeit, 2016
- Duhni, A.: Erstellung eines numerischen Modells zum Tragverhalten Wickelverstärkter Hybridrohre. Bachelorarbeit, 2017
- Jakoby, F.: Tragverhalten von exzentrisch belasteten UHFB-Hohlzylindern mit Carbon- und Blechbewehrung. Bachelorarbeit, 2018
- Loose, A. J.: Beschreibung des Tragverhaltens von Wickelverstärkten UHFB-Hybridrohren. Projektarbeit, 2018
- Müller, M.: Wickelverstärkte Rohre aus Ultrahochfestem Beton unter einaxialer Druckbeanspruchung. Bachelorarbeit, 2018
- Bramme, A.: Knoten und Fügstellen von stabförmigen Stahlbeton (Fertig-)Bauteilen. Projektarbeit, 2019
- Horst, L.: Numerische Untersuchung zum versagensinitierenden Mechanismus Wickelverstärkter Hybridrohre. Projektarbeit, 2019
- Richter, D.: Vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Bauweisen schlanker Stützen unter besonderer Berücksichtigung des Eigengewichts. Projektarbeit, 2019

Folgeprojekt | Follow-up project

- Qualitätsgesicherte Fließfertigung leichter UHFB-Stabelemente mittels Künstlicher Neuronaler Netze | Quality-assured flow production of lightweight UHPC rod elements using artificial neural networks

Antragsteller Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus, Prof. Dr.-Ing. Raimund Rolles (Institut für Statik und Dynamik, LUH)
Förderung Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2187
Förderzeitraum Funding period:	01.01.2020–31.12.2022