

Sandwichbauteile mit gefalteten und gekrümmten Betondeckschichten | Sandwich panels with folded plate and curved concrete facings

- ▶ Alexander Stark, Josef Hegger
- ▶ Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

1 Einleitung

In der aktuellen Baupraxis werden mit Standard-Tragelementen meist rechteckige Grundrisse erzeugt. Ausgenommen sind weitspannende Konstruktionen, wie Kuppeln von Domen oder Kühltürme von Kraftwerken. Im Gegensatz dazu waren Schalen aus Stahlbeton im Hochbau im vergangenen Jahrhundert weit verbreitet. Dazu wurden in der Regel große Strukturen in situ betoniert. Zusätzlich wurden weit spannende Fertigteile mit relativ geringer Breite hergestellt. Diese Falwerke oder doppelt gekrümmten Elemente wurden zum Teil mit einer Dicke von weniger als 10 cm realisiert und häufig im sofortigen Verbund vorgespannt. Bedenken hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit können ein Grund dafür gewesen sein, dass solche Konstruktionen heute üblicherweise nicht mehr gebaut werden.

Projektziel war die Entwicklung von Sandwichelementen mit dünnen, gefalteten oder gekrümmten Betondeckschichten, die die Vorteile beider Konstruktionsprinzipien vereinen. Mit diesem Verfahren können leichte Elemente mit hoher Tragfähigkeit hergestellt werden, die effektive Fertigteillösungen für weit spannende Dachkonstruktionen bieten. Darüber hinaus können ausreichende bauphysikalische Eigenschaften wie Wärme- oder Schalldämmung erfüllt werden.

Die Entwicklung von Hochleistungswerkstoffen wie hochfestem Beton (engl. kurz HSC) und ul-

1 Introduction

In current building practice, standard load-bearing elements are mostly of rectangular shape. Exceptions are large shell structures, such as cupolas of domes or cooling towers of power plants. In contrast, shells made of reinforced concrete (RC) were widely applied for building construction in the last century. For this purpose, large structures were usually cast in situ. Additionally, long-span precast elements with limited width were produced. These folded plate or doubly curved elements were realised with a thickness of less than 10 cm and usually prestressed with steel tendons. Concerns regarding the corrosion resistance might have been a reason that such constructions are not build regularly today.

The motivation of this project is the development of sandwich panels with thin, spatially shaped cross-sections, which unify advantages of both construction principles. With this method, light elements with high load-bearing capacities can be established which provide effective precast solutions for long-span roof constructions. Furthermore, sufficient physical properties, such as heat or sound insulation can be fulfilled.

The development of high performance materials, such as high strength concrete (HSC) and ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPC) as well as reinforcement made of fibre reinforced polymer (FRP) are major in-

trahochfestem Faserbeton (engl. kurz UHPFRC) sowie Bewehrungen aus faserverstärktem Kunststoff (FVK) sind wesentliche Innovationen im Bauwesen der vergangenen Jahrzehnte. Die Korrosionsbeständigkeit und hohe Zugfestigkeit von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) ermöglicht langlebige und dünne Betonelemente, da nicht der Korrosionsschutz, sondern v. a. der Verbund zwischen Beton und Bewehrung maßgebend werden.

Um einen Rahmen für Herstellmethoden und Berechnungsverfahren zu schaffen, muss die Interaktion der innovativen Materialien und Bauweisen Schritt für Schritt untersucht werden. Bislang wurden Sandwichelemente mit gefalteten oder gekrümmten UHPFRC- oder Textilbetondeckschichten noch nicht untersucht. Die erhöhte Steifigkeit der Deckschichten muss bei der Berechnung berücksichtigt werden. Für das Kernmaterial ist ein Herstellungsverfahren anzuwenden, das eine hohe Verbundfestigkeit bietet und für nicht-ebene Deckschichten geeignet ist.

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, die Basis für die Entwicklung von weitgespannten Sandwichelementen für Dachkonstruktionen zu schaffen (Bild 1). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden experimentelle, numerische und theoretische Untersuchungen durchgeführt, um gefaltete und doppelt gekrümmte Sandwichelemente mit vorgespannten Deckschichten aus Hochleistungsbeton und CFK-Bewehrung zu realisieren. Insbesondere wurden während der Entwicklung die folgenden Schritte durchgeführt:

- Auswahl geeigneter Materialien,
- Entwicklung geeigneter Fertigungstechniken für das Vorspannen von CFK, das Betonieren

novations of construction materials of the last decades. The corrosion resistance and high tensile strength of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) makes thin and durable concrete elements possible, since only bond requirements of the reinforcement need to be fulfilled.

To establish a framework for production processes and analysis procedures, the interaction of innovative materials and construction methods has to be investigated step by step. So far, sandwich panels with folded plate or curved UHPFRC or TRC facings have not been investigated, yet. The additional stiffness of these facings needs to be considered in the analysis. For the core material, a production method has to be applied which provides high and reliable bond strength and is suitable for non-flat-sections.

This research project aims at providing the background for the development of long-span sandwich panels for roof structures (Fig. 1). In order to achieve this aim, experimental, numerical and theoretical investigations were conducted to provide folded plate and doubly curved sandwich panels with prestressed facings made of high performance concrete and CFRP reinforcement. In particular, the following steps were applied during the development:

- Selection of adequate materials,
- Development of suitable production techniques for prestressing of CFRP, casting of non-planar concrete sections and for non-flat sandwich panels,
- Experimental, numerical and analytical investigations on

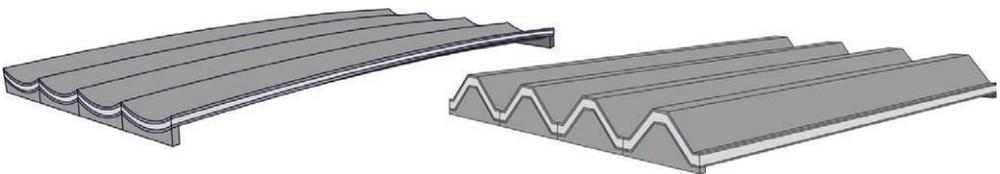


Bild 1: Doppelt gekrümmte und gefaltete Sandwichplatten für Dachkonstruktionen | **Fig. 1:** Doubly curved and folded plate sandwich panels for roof constructions

von nicht ebenen Betonteilen und das Herstellen von nicht ebenen Sandwichelementen,

- Experimentelle, numerische und analytische Untersuchungen zu den Themen
 - Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern,
 - Zug- und Schubbelastung von kleinformatischen Sandwichquerschnitten,
 - Identifizierung von mehraxialen Lastübertragungsmechanismen für Sandwichelemente,
 - Ebene, gefaltete und doppelt gekrümmte Sandwichbalken.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen vorgestellt. Der Bericht basiert auf [1], wo ausführliche weiterführende Informationen zu finden sind.

2 Experimentelle Untersuchungen

2.1 Allgemeines

Experimentelle Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Basis für die Entwicklung von räumlichen Sandwichelementen zu schaffen. Ein zentraler Bestandteil war die Entwicklung von Herstellmethoden. Nach der Bestimmung der Materialeigenschaften von Beton, CFK und Kernschaum wurden das Verbundverhalten der CFK-Spannbewehrung untersucht und Mindestabmessungen von dünnen Betondeckschichten abgeleitet (81 Auszugsversuche, 25 Tests der Übertragungslänge). Anschließend wurden gefaltete und doppelt gekrümmte (hyperbolisches Paraboloid, HP) Betonelemente mit CFK-Vorspannung entwickelt. Großformatige Tests wurden an 8 gefalteten und 7 HP-Elementen durchgeführt.

Die Qualität der Verbundfuge zwischen Kernschaum und Betondeckschichten wurde in Zug- und Schubversuchen an kleinformatischen Querschnitten in 25 Zug- und 63 Schubversuchen bewertet. Mit den Ergebnissen der vorgenannten Untersuchungen wurden flache, gefaltete Platten und doppelt gekrümmte Sandwichelemente hergestellt und als großformatige Versuchskörper (9 ebene, 7 gefaltete und 8 HP) ge-

- Bond behaviour of CFRP prestressing tendons,
- Tensile and shear loading of small-scale sandwich sections,
- Identification of biaxial load transfer mechanisms for sandwich panels,
- Flat, folded plate and doubly curved sandwich panels.

In the following sections, the major outcome of these investigations is presented which is based on work conducted in [1].

2 Experimental testing

2.1 Preface

Experimental testing was conducted to provide the background for the development of spatially shaped sandwich panels. One key factor of the investigations was the development of production methods. After determination of the material properties of concrete, CFRP and core foam, the bond behaviour of CFRP reinforcement was investigated and minimum dimensions of thin concrete facings were derived (81 pull-out tests, 25 tests on the transfer length). Afterwards, folded plate and doubly curved (hyperbolic paraboloid, HP) concrete elements with CFRP prestressing tendons were developed. Tests were carried out on 8 folded plate and 7 HP elements.

The quality of the bond zone between core foam and concrete facings was analysed in tensile and shear tests on small-scale test specimens in 25 tensile and 63 shear tests. With the information of the aforementioned tests, flat, folded plate and doubly curved sandwich panels were produced and tested as large-scale specimens (9 flat, 7 folded plates and 8 HP). Additionally, the biaxial load transfer was investigated with 9 plates and 6 sandwich plates (e.g. [2]).

2.2 Applied materials

In the conducted investigations, two different concrete mixtures were applied:

testet. Zusätzlich wurde der biaxiale Lastabtrag mit 9 Einzelplatten und 6 Sandwichplatten (z. B. [2]) untersucht.

2.2 Verwendete Materialien

Es wurden zwei verschiedene Betonmischungen eingesetzt:

- HSC: Größtkorndurchmesser $d_g = 0,6$ mm;
- UHPFRC: $d_g = 0,5$ mm; mit Stahlfasern: Zugabemenge 0,9 Vol.-%, Faserlänge $l_f = 9$ mm, Faserdurchmesser $\varnothing = 0,15-0,17$ mm, Faser-Zugfestigkeit $f_y > 2.200$ MPa.

Die detaillierten Betonrezepturen sind in [1], [3] und [4] dargelegt. Die Materialkennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Um das Ziel dünner Betondeckschichten für Sandwichelemente zu realisieren, wurde in den Untersuchungen der Einsatz von Stahlbewehrung ausgeschlossen. Aufgrund seiner hohen Zugfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit wurde carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) für:

- Bewehrungsstäbe ($\varnothing 5,0$ mm, Tokyo Rope Ltd.),
- Spannbewehrung ($\varnothing 7,5$ mm siebendrähtige Litze, Tokyo Rope Ltd.),
- Textilgelege (Q95, solidian) und
- Schubgitter (C-Grid®)

- HSC: maximum aggregate diameter $d_g = 0.6$ mm;
- UHPFRC: $d_g = 0.5$ mm; with steel fibres: 0.9 Vol. %, fibre length $l_f = 9$ mm, fibre diameter $\varnothing = 0.15-0.17$ mm, fibre tensile strength $f_y > 2,200$ MPa.

The detailed mixture compositions can be found in [1], [3], [4]. The material properties are shown in Table 1.

The aim to provide thin concrete facings for sandwich panels excluded the usage of steel reinforcement at this point of the investigations. Due to the high tensile strength and corrosion resistance, Carbon Fibre Reinforced Polymer (CFRP) was used for :

- rebars ($\varnothing 5.0$ mm, Tokyo Rope Ltd.),
- prestressing tendons bar ($\varnothing 7.5$ mm seven-wire strand, Tokyo Rope Ltd.),
- mesh-like fabrics (Q95, solidian), and
- shear connectors (C-Grid®)

between the concrete facings. Additionally GFRP pin-connectors (Thermomass®) were tested in small-scale specimens. The material properties are shown in Table 2.

The PU core used in the experimental studies is a mixture of two components, which exhibits a density of about 90 kg/m³. The material properties are shown in Table 3.

Material Material	Zylinderdruckfestigkeit Cylinder compressive strength $f_{c_{m,cyl, 28d}}$ (1d) [MPa]	E-Modul Young's modulus $E_{cm,cyl, 28d}$ (1d) [GPa]	Biegezugfestigkeit Flexural strength $f_{ct,flex, 28d}$ (1d) [MPa]
UHPFRC	150 (65)	45 (32)	20 (7)
HSC	75 (35)	28,5 (23,0)	9,0 (5,0)

Tabelle 1: Materialparameter Festbetone | **Table 1:** Material properties of concrete mixtures

Material Material	E-Modul Young's modulus $E_{t,m}$ [GPa]	Zugfestigkeit Tensile strength $f_{t,m}$ [MPa]
Stab Bar $\varnothing 5$ mm	165	3.200
Litze Strand $\varnothing 7,5$ mm	150	2.650
solidian Q95	240	3.100-3.300
C-Grid®	200	2.300-2.600

Tabelle 2: Materialeigenschaften der Carbonbewehrung | **Table 2:** Material properties of CFRP tendons and meshes

Druck Compression		Zug Tension		Schub Shear	
Festigkeit Strength f_{comp} [MPa]	E-Modul Young's modulus E_{comp} [MPa]	Festigkeit Strength f_{tens} [MPa]	E-Modul Young's modulus E_{tens} [MPa]	Scherfestigkeit Shear strength τ [MPa]	Schubmodul Shear modulus G_c [MPa]
0,95	32	0,58	42	0,57	11,5

Tabelle 3: Materialeigenschaften PU | **Table 3:** Material properties of PU

zwischen den Deckschichten eingesetzt. Zusätzlich wurden punktförmige GFK-Verbindungsmitel (Thermomass®) testweise eingesetzt. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2 dargestellt.

Der in den experimentellen Untersuchungen verwendete Polyurethankern (PU) ist eine Mischung aus zwei Komponenten, die eine Dichte von ca. 90 kg/m³ aufweist. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die Materialien wurden nach [5]–[12] geprüft. Detaillierte Informationen sind in [1] dargestellt.

2.3 Herstellmethoden

2.3.1 Vorspannen und Betonieren der dünnen UHPFRC-Deckschichten

Für einen wirtschaftlichen und sicheren Vorspannprozess wurde eine wiederverwendbare Keilverankerung mit drei Aluminiumkeilen erarbeitet [1], [13] und [14]. Da ein Stab und eine siebendrähtige Litze eingesetzt wurden, wurde eine Lösung entwickelt, die die Anforderungen beider Formen berücksichtigt. Um die Reibung zwischen den CFK-Stäben und den Aluminiumkeilen zu erhöhen und einen kreisförmigen und glatten Querschnitt, insbesondere für die siebendrähtige Litze, zu generieren, wurde ein Klebstoff auf die CFK-Bewehrung aufgebracht. Der aus zwei Komponenten bestehende Klebstoff – als Polymerisationskatalysator Methylmethacrylat und als Monomer-Methylacrylester – war vor dem Einsetzen der Keile ausgehärtet.

Mit den entwickelten Verankerungen sind Spannungen von 3.200 MPa (CFK-Stab) bzw. 2.650 MPa (CFK-Litze) im Zugversuch realisierbar. Gemäß [15] sollten die Vorspannungen unter 65 % der Bruchfestigkeit der CFK-Spannglieder gehalten

The materials were tested according to [5]–[12], for detailed information see [1].

2.3 Production methods

2.3.1 Prestressing and casting of thin UHPFRC members

For an economic and safe prestressing process, a reusable wedge anchor with three aluminium wedges was developed [1], [13], [14]. Since a bar and a seven-wire strand were applied, a solution was preferable which fulfilled the demands of both shapes. To increase friction between the CFRP tendons and the aluminium wedges and to provide a circular and smooth cross-section, especially for the seven-wire strand, a resin was applied on the CFRP reinforcement. The resin consisting of two components – as polymerisation catalyst methyl methacrylate and as monomer methyl acrylic ester – was cured, i.e. hardened, before placing the wedges.

With the developed anchors, stresses of 3,200 MPa and 2,650 MPa were applicable in tensile tests on CFRP bars and seven-wire strands, respectively. According to [15], the jacking stresses should be kept below 65% of ultimate strength of the CFRP tendons to avoid creep rupture. The maximum tested prestressing was 1,750 MPa.

For all members with CFRP reinforcement orientated parallel to the longitudinal axis of the members, i.e. tests on the transfer length and flat as well as folded plate facings, the standard configuration of prestressing bed in the laboratory was used in combination with developed anchorages and adjustment screws. For the doubly curved section, i.e. hyperbolic paraboloids, straight but skew lines can be found. Hence, for investigated doubly curved



Bild 2: Entwickelter Vorspannrahmen für doppelt gekrümmte Bauteile; von links nach rechts: Rahmen mit Spanngliedern, Detail der schiefwinkligen gerade Bewehrung, Neigung der Hohlkolbenzylinder | **Fig. 2:** Developed prestressing frame for doubly curved elements; from left to right: frame with prestressing tendons; details of skew, but straight tendons; inclination of hollow piston cylinders

werden, um ein vorzeitiges Versagen zu vermeiden. Die maximal getestete und eingeleitete Vorspannung betrug 1.750 MPa.

Für alle Bauteile mit parallel zur Stablängsachse ausgerichteter CFK-Bewehrung, d. h. Versuche zur Übertragungslänge und ebene sowie gefaltete Betondeckschichten, wurde die Standardkonfiguration des Spannbetts der Versuchshalle in Kombination mit den entwickelten Verankerungen und Stellschrauben verwendet. Doppelt gekrümmte Elemente, d. h. hyperbolische Paraboloiden, sind zwar durch Geraden erzeugbar, konnte aber nicht im Standardvorspannbett hergestellt werden. Stattdessen wurde ein Spannrahmen entwickelt, der eine schiefe, aber geradlinige Konfiguration der Bewehrung ermöglicht (Bild 2). An jeder CFK-Litze wurden Hohlkolbenzylinder zum Vorspannen eingesetzt. Zusätzlich wurden Stellschrauben verwendet, um die korrekte Position der Litzen zu gewährleisten.

Für alle Elemente mit flächigen geradlinigen Kanten wurde Schalung standardmäßig einge-

elements the standard prestressing bed could not be used. Instead, a stiff frame was set up to allow for skew, but linear configuration of reinforcement (Fig. 2). Hollow piston cylinders were applied for jacking at each CFRP tendon. Additionally, adjusting screws were used to ensure correct positions of tendons.

For all elements with area by area straight edges, the formwork was placed in a standard way. Folded plate elements were cast from top flange in a closed formwork. For doubly curved elements, a closed formwork was set up using the principle of straight but skew lines. A thin medium density fibreboard (MDF) was placed in strips of 50 mm width on wooden frames (Fig. 3). These frames were shaped like the corresponding top or bottom surface at the particular position. Afterwards, a filler was applied on top of the MDF to provide a smooth surface (Fig. 3) which is impermeable to water. The elements were cast upside down to avoid discontinuities from casting at element's midspan (highest position). Therefore, at both ends openings were provided to cast the concrete mixture.

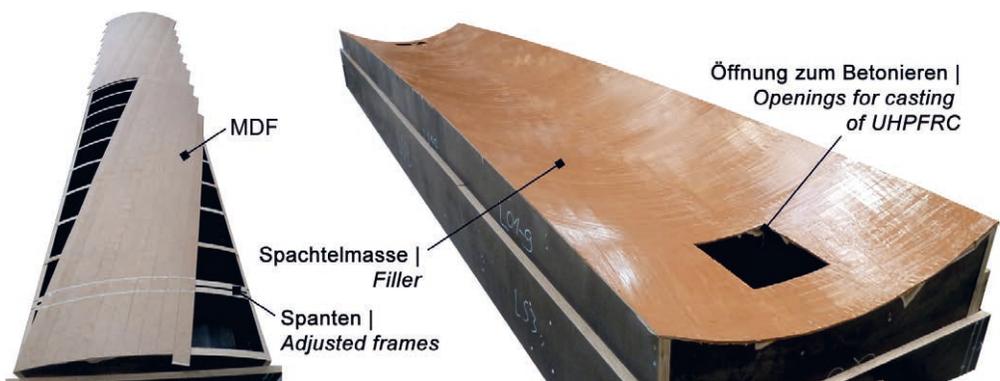


Bild 3: Schalung für doppelt gekrümmte Bauteile während der Montage (links, Unterseite) und fertiggestellte Schalung (rechts, Oberseite) | **Fig. 3:** Formwork for doubly curved elements during construction (left, bottom side) and finished formwork (right, top side)

setzt. Gefaltete Elemente wurden vom Obergurt in einer geschlossenen Schalung betoniert. Für doppelt gekrümmte Elemente wurde eine geschlossene Schalung nach dem Prinzip der geraden, aber windschiefen Geraden hergestellt. Eine dünne, mitteldichte Faserplatte (MDF) wurde in 50 mm breiten Streifen auf Holzspannten aufgebracht (Bild 3, links). Diese Spannten waren an der jeweiligen Stelle wie die entsprechende Ober- oder Unterseite geformt. Anschließend wurde Spachtelmasse auf die MDF-Platten aufgebracht, um eine glatte, wasserundurchlässige Oberfläche zu generieren (Bild 3, rechts). Die Deckschichten wurden um 180° um die Längsachse gedreht betoniert, um Fehlstellen in Feldmitte (höchste Position) zu vermeiden. Daher wurden an beiden Enden Betonieröffnungen vorgesehen. So wurden die daraus resultierenden Fehlstellen nahe der Auflager angeordnet, sodass die Trag- und Verformungsfähigkeit nicht negativ beeinflusst wurden. Es wurde nur von einer Seite betoniert. Dadurch war die Belüftung gewährleistet und es konnten glatte Oberflächen mit nur geringen Luft einschläüssen erzeugt werden.

Nach einem Aushärten und dem Entfernen der Oberseite der Schalung wurden die Vorspannkraft aufgebracht. Anschließend wurden die Elemente in die Endposition gedreht.

2.3.2 Ausschäumen der Sandwichbauteile

Auf Standardproduktionsmethoden für ebene Betonfertigteilsandwichplatten wurde verzichtet, um unterschiedliche Querschnittsformen zu ermöglichen und eine zuverlässig hohe

Thus, the resulting discontinuities were placed close to the supports, which did not negatively affect structural performance. The concrete mixture was cast from only one side until the formwork was filled up. Hence, ventilation was guaranteed and smooth surfaces with only small air inclusions were producible.

After one day of concrete hardening and stripping of the top side of the formwork, the prestressing forces were released. Afterwards, the elements were turned into final position.

2.3.2 Foaming of sandwich panels

Standard production methods for precast concrete sandwich panels were omitted to make various cross-sectional shapes possible and provide a reliable high bond strength between core foam and concrete facings.

A new production method based on investigations conducted in [3] was applied for all test specimens. Adapted from steel sandwich sections, a polyurethane (PU) mixture was foamed in pack between two hardened concrete layers. With this method, various shapes of cross-sections can be generated and a repeatable high bond quality was aimed.

In contrast to investigations conducted in [3], [4], [16], the mixture was poured in for large-scale elements. In Fig. 4, the production procedure for doubly curved sandwich panels is exemplarily shown. After weighing the two components for the reaction mixture of PU and preparing of formwork with hardened concrete facings, the PU mixture was poured in. The braced wooden



Bild 4: Herstellprozess für großformatige Sandwichelemente | Fig. 4: Production procedure for large-scale sandwich elements

Verbundfestigkeit zwischen Kernschaum und Betondeckschichten zu gewährleisten. Für alle Versuchskörper wurde ein neues Produktionsverfahren auf der Grundlage der in [3] durchgeführten Untersuchungen angewendet. Ausgehend von den Methoden für Stahl-Sandwichelemente wurde eine Mischung aus Polyurethan (PU) zwischen zwei ausgehärteten Betonschichten geschäumt. So können verschiedene Querschnittsformen und mit wiederholbar hoher Verbundqualität erzeugt werden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [3], [4] und [16] wurde das Zweikomponentengemisch nun auch für großformatige Elemente eingesetzt. In Bild 4 ist das Herstellungsverfahren für doppelt gekrümmte Sandwichelemente exemplarisch dargestellt. Nach dem Wiegen der beiden Komponenten für das PU-Reaktionsgemisch und der Vorbereitung der Schalung mit ausgehärteten Betondeckschichten wurde das Gemisch eingefüllt. Die ausgesteifte Holzschalung wurde geschlossen und ein Kontergewicht aufgebracht, um den Schaumdruck der PU-Mischung aufzunehmen. Nach dem Aufschäumen wurde die Schalung entfernt. Bei der Herstellung der Elemente wurde keine spezielle Behandlung der Betonoberflächen vorgenommen.

formwork was closed and a counterweight was applied to withstand the pressure from expansion of the PU mixture. Afterwards, the formwork was removed.

For the production of the elements, no special treatment of the surfaces was applied.

2.4 Bond behaviour of CFRP reinforcement in concrete

Investigations on pre-tensioned CFRP tendons in different types of concrete were conducted to analyse the bond behaviour. On the one hand, in pull-out tests local bond strengths were determined, and on the other hand, in tests on the transfer length minimum concrete covers and transfer lengths were investigated. Major results of experimental testing in this chapter are based on published work, e.g. [1], [17], [18].

All in all, 81 pull-out tests on 150 mm cubes in dependence on [19] with different prestressing states and 25 tests on the transfer lengths were conducted. In UHPFRC, the CFRP bar and seven-wire strand showed a maximum bond strength of about 25 MPa for a prestressing of 1,350 MPa independently of tested concrete covers. Even for concrete cover to tendon diameter ratios c/d_p of 2.5 no splitting cracks

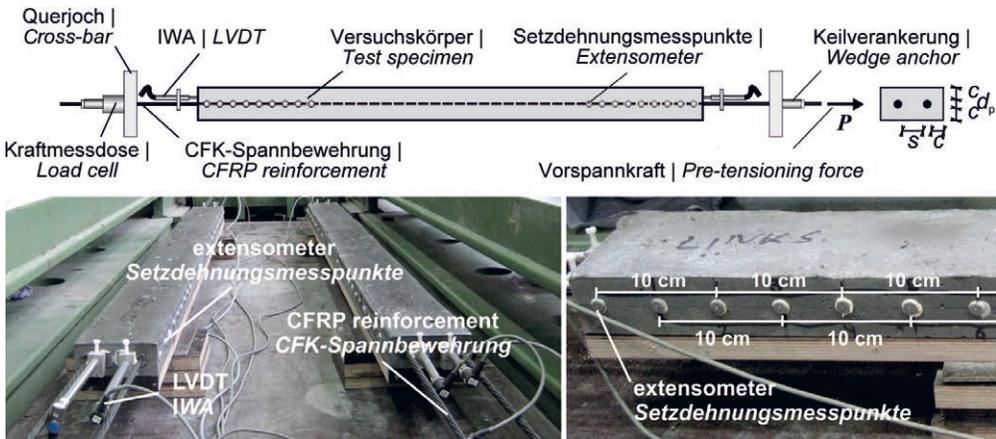


Bild 5: Versuchsaufbau der Spannkrafteinleitungsversuche | Fig. 5: Test setup of tests on the transfer length

2.4 Verbundverhalten der CFK-Bewehrung in Beton

Zur Untersuchung des Verbundverhaltens wurden Versuche an vorgespannten CFK-Spanngliedern in verschiedenen Betonen durchgeführt. Zum einen wurden in Pull-out-Tests lokale Verbundfestigkeiten ermittelt, zum anderen wurden die Übertragungslänge und Mindestbetondeckungen untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen Prüfungen in diesem Abschnitt basieren auf bereits veröffentlichten Arbeiten, z. B. [1], [17] und [18].

Insgesamt wurden 81 Pull-out-Versuche an 150-mm-Würfeln in Anlehnung an [19] mit unterschiedlichen Vorspannzuständen und 25 Versuche zur Übertragungslänge durchgeführt. In UHPFRC zeigten der CFK-Stab und die sieben-drähtige Litze eine maximale Verbundfestigkeit von ca. 25 MPa bei einer Vorspannung von 1.350 MPa unabhängig von den geprüften Betondeckungen. Auch bei einem Verhältnis von Betondeckung zu Spannglieddurchmesser c/d_p von 2,5 traten keine Spaltrisse auf und die Versuchskörper versagten durch Herausziehen der Spannglieder. Im Vergleich zu Stahlritzen wurden um etwa 40 % höhere maximale Verbundfestigkeiten ermittelt. In HSC betrug die Haftfestigkeit etwa 15 MPa für mit 1.350 MPa vorgespannte CFK-Stäbe und -Litzen.

In Tests an zentrisch vorgespannten Balken (Bild 5) wurden die Mindestbetondeckung und der Abstand zwischen Stäben und Litzen für eine rissefreie Spannkrafteinleitung sowie die Übertragungslängen selbst ermittelt. Da die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Mindestabmessungen von dünnen Betondeckschichten verwendet werden sollten, wurden jeweils nur zwei Stäbe oder Litzen angeordnet. Ähnlich wie bei den Pull-out-Versuchen wurde die Bewehrung in einem steifen Rahmen vorgespannt. Die Vorspannkraft von 1.350 MPa wurde nach einem Tag Betonhärtung in 20%-Schritten aufgebracht. Bei jeder Ablassstufe wurden die Betonstauchungen mit den Setzdehnungsmessungen in halber Höhe bestimmt. Der Endschlupf der Spannglieder wurde kontinuierlich

erfolgt und die specimens failed by pull-out of the tendon. In comparison to steel strands, about 40% higher maximum bond strengths were determined. In HSC, the bond strength was about 15 MPa for CFRP bars and seven-wire strands prestressed to 1,350 MPa.

Tests on the transfer length (Fig. 5) were carried out to determine minimum concrete cover and spacing between bars and strands for a crack-free transmission zone as well as the transfer lengths. The test setup comprises small beams with two centrally placed CFRP prestressing tendons. Since the test results were used to determine minimum dimensions of thin concrete elements, only two bars or strands were applied. Similar to pull-out testing, the reinforcement was pre-tensioned in a stiff rig. The prestressing force was released after one day of concrete hardening in steps of 20%. At each step, the concrete compression strains were determined from extensometer measurement at mid height. The end slip of prestressing tendons was continuously identified by displacement transducers. Additionally, the pre-tensioning force was measured with load cells.

In this section, only key results are discussed. Further results can be found in [1], [17], [18]. During the tests, it was focused on crack-free minimum dimensions to provide preferably thin UHPFRC elements. Fig. 6 exemplarily shows end slip and compression strains for beams prestressed with CFRP strands in UHPFRC ($\sigma_p = 1,350$ MPa).

For intact cross-sections, the end slip increases almost proportionate to the induced prestressing force. The prestressing force was released in five steps and at each step, a small increase in end slip was observed. This may have been caused by bond creep. When concrete cover was not sufficient to remain un-cracked, a disproportional increase in end slip was observed at a particular release step. Beams prestressed with CFRP bars showed a similar behaviour, even though the small increases in end slip at release step were not observed. The concrete

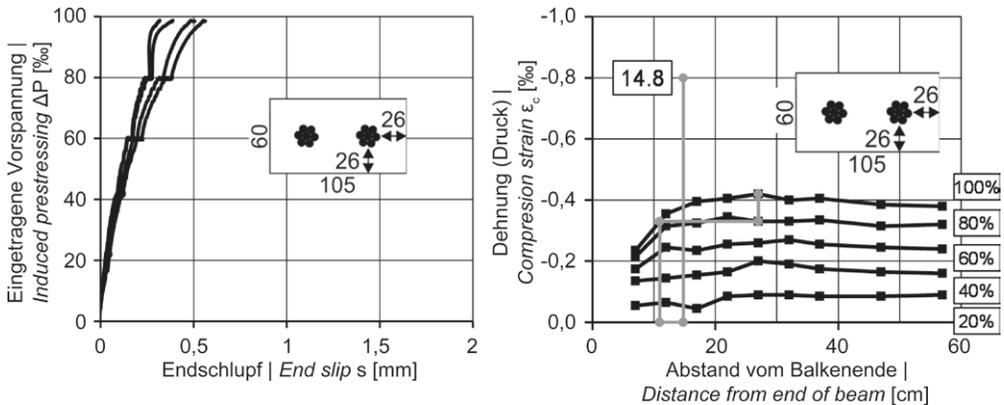


Bild 6: Endschlupf s von intakten Spannkrafteinleitungsbereichen (links) und Betondruckspannungen ϵ_c sowie Übertragungslängen für vorgespannte CFK-Litzen (rechts), schrittweise Steigerung der eingeleiteten Spannkraft P bis max. 1.350 MPa | **Fig. 6:** End slip s of intact transmission zones (left) and concrete compression strains ϵ_c and transfer lengths for pre-tensioned CFRP strands (right); step-wise induced prestressing P up to 1,350 MPa

mit induktiven Wegaufnehmern (IWA) ermittelt. Zusätzlich wurde die Vorspannkraft mit Kraftmessdosen aufgezeichnet.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse erläutert. Weitere Resultate finden sich [1], [17] und [18]. Bei den Versuchen wurden vor allem die Mindestabmessungen ermittelt, um möglichst dünne, rissfreie UHPFRC-Deckschichten herzustellen. Bild 6 zeigt exemplarisch den Endschlupf und die Stauchungen von mit CFK-Litzen vorgespannten Balken aus UHPFRC (unterschiedliche Vorspanngrade).

Bei intakten Verankerungsbereichen nimmt der Endschlupf nahezu proportional zur aufgebrauchten Vorspannkraft zu. Bei jedem der fünf Vorspannschritte wurde ein kleiner Anstieg des Endschlupfes beobachtet. Dies kann durch Verbundkriechen verursacht worden sein. Bei gerissenen Versuchskörpern – bei denen also die Betondeckung nicht ausgereicht hatte – wurde beim Reißen ein überproportionaler Anstieg des Endschlupfes beobachtet. Mit CFK-Stäben vorgespannte Balken zeigten ein ähnliches Verhalten, obwohl die geringen Anstiege des Endschlupfes bei jedem Messvorgang nicht beobachtet wurden.

Die Übertragungslängen wurden nach [21] abgeleitet. Ungerissene Versuchskörper wiesen

compression strains were derived from extensometer measurements and transfer lengths derived according to [21].

Tests with intact transmission zone showed a transfer length of less than 150 mm for CFRP bars and strands in UHPFRC and about 240 mm in HSC (prestressing $\sigma_{mp0} = 1,350$ MPa). Reducing the prestressing force by 50%, the transfer lengths decreased about 10–15% [1]. In tests on steel strands in UHPFRC conducted by Bertram [20], a transfer length of 200 mm was measured for a prestressing of 1,350 MPa, even though the uniaxial compression strength was about 120 MPa (three days of concrete curing before release). For HSC, the transfer lengths were about 15% higher. Variation of spacing s/d_p (compare Fig. 5) had no important influence on the transfer length. For UHPFRC, minimum concrete cover ratios of $c/d_p = 3.0$ for strands and $c/d_p = 4.0$ for bars were necessary ($\sigma_{mp0} = 1,350$ MPa) for a crack-free transfer length. For HSC, $c/d_p = 4.0$ for strands were sufficient.

2.5 Sandwich sections under tensile and shear loading

The load-bearing capacity of sandwich panels is strongly controlled by the interface zone between core material and outer layers. To inves-

eine Übertragungslänge von weniger als 150 mm für CFK-Stäbe und -Litzen in UHPFRC und etwa 240 mm in HSC (Vorspannung $\sigma_{mp0} = 1.350 \text{ MPa}$) auf. Durch die Reduzierung der Vorspannkraft um 50 % verringerten sich die Übertragungslängen um ca. 10–15 % [1]. In den von Bertram [20] durchgeführten Versuchen an Stahlilitzen in UHPFRC wurde bei einer Vorspannung von 1.350 MPa eine Übertragungslänge von 200 mm gemessen, obwohl die einachsige Druckfestigkeit etwa 120 MPa betrug (drei Tage Betonhärtung vor dem Ablassen). Bei HSC waren die Übertragungslängen etwa 15 % größer. Die Variation des Abstands zwischen den Spanngliedern s/d_p (s. Bild 5) hatte keinen wesentlichen Einfluss auf die Übertragungslänge. Für UHPFRC waren Mindestbetondeckungsverhältnisse von $c/d_p = 3,0$ für Litzen und $c/d_p = 4,0$ für Stäbe ($\sigma_{mp0} = 1.350 \text{ MPa}$) für einerisselfreie Übertragungslänge erforderlich. Für HSC und Litzen waren $c/d_p = 4,0$ ausreichend.

2.5 Sandwichquerschnitte unter Zug- und Schubbelastung

Die Tragfähigkeit von Sandwichelementen wird durch die Verbundfuge zwischen Kernmaterial und Betondeckschichten maßgeblich beeinflusst. Um die Qualität der Herstellmethode durch Ausschäumen zu untersuchen, wurden Zug- und Schubversuche durchgeführt. Die Ergebnisse zur Zug- und Schubfestigkeit sowie der Steifigkeit dienten als Grundlage für numerische Modelle und theoretische Ansätze. Die wichtigsten hier vorgestellten experimentellen Ergebnisse wurden auch in [3], [4] zusammen mit Untersuchungen von Shams und in [1] veröffentlicht.

Die Versuche an kleinformatigen Probekörpern unter Zug- und Schubbelastung wurden mit in [16] und [22] angewendeten Versuchsaufbauten durchgeführt (Bild 7). Versuche ohne Verbindungselemente zwischen den Deckschichten dienten zum Nachweis der Haftfestigkeit im Vergleich zur einaxialen Zugfestigkeit des Kernmaterials. Die Anwendung eines CFK-Schubgitters und von punktförmigen GFK-Verbundmitteln wurde exemplarisch untersucht. Die

tigate the quality of the production method of foaming in pack of polyurethane, tensile and shear tests were conducted. The test results of tensile and shear strengths as well as stiffness served as basis for numerical models and theoretical approaches. Major experimental results presented here have also been published in [3], [4] together with investigations by Shams and in [1].

Testing was carried out on small-scale specimens under tensile and shear loads using test setups also applied by [16] and [22] (see Fig. 7). Tests without connector elements between the outer layers served for the verification of bond strength compared to the tensile strength of the core material only. The applications of a CFRP shear grid and CFRP pin connectors were exemplarily investigated. The load was induced displacement controlled with 1.0 mm/min. Besides the load, LVDTs (linear variable differential transformer) were used to measure the relative displacement Δv in tensile tests as well Δv and Δu for shear tests.

For tensile testing, the load was induced by cast-in channels since high bond strength was expected. Hence, the thickness of UHPFRC layers was chosen to 80 mm in order to anchor the cast-in channels. The bond zone was $350 \times 350 \text{ mm}^2$ for all specimens. Without shear connectors, for UHPFRC facings, maximum bond strength was about 0.22 MPa, whereas for HSC facings 0.13 MPa was observed. For an applied CFRP shear grid a pronounced residual strength was measured for UHPFRC facings, but no increase in maximum load, since the bond strength of PU was already in the range of the maximum load of the shear grid. An embedment length of 30 mm was sufficient to prevent the shear grid from pulling out for UHPFRC and HSC. Smaller embedment lengths were not investigated, since thicknesses of concrete facings of beam elements were determined to 60 mm.

Under shear loading, a test set-up according to Shams [16] was utilised for flat specimens (Fig. 7,

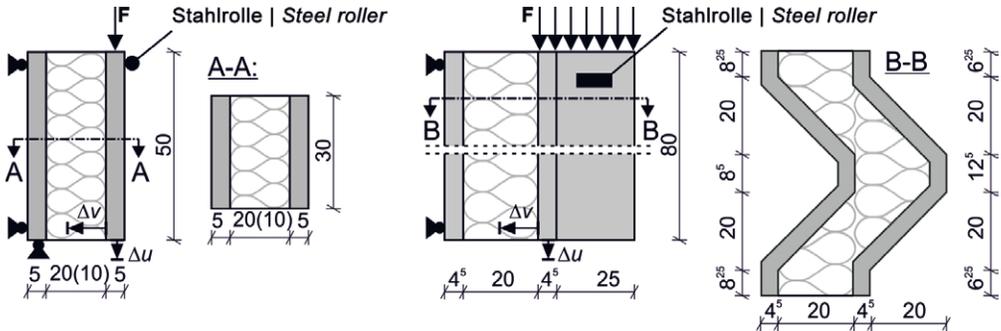


Bild 7: Versuchsaufbauten für Schubversuche an ebenen (links) und gefalteten Elementen (rechts) | Fig. 7: Experimental set-ups of shear tests for flat (left) and folded plate (right) elements

Belastung wurde mit 1,0 mm/min aufgebracht. Neben der Prüfkraft wurden IWA verwendet, um die relative Verschiebung v im Zugversuch sowie v und u im Schubversuch zu messen.

Für die Zugversuche wurde die Last durch in den Deckschichten eingelassene Ankerschienen aufgebracht, da eine hohe Haftfestigkeit erwartet wurde. Daher wurde die Dicke der UHPFRC-Schichten zu 80 mm gewählt. Die Verbundfläche betrug jeweils $350 \times 350 \text{ mm}^2$. Ohne Verbindungsmittel betrug die maximale Haftzugfestigkeit bei UHPFRC-Deckschichten etwa 0,22 MPa und bei HSC 0,13 MPa. Bei Verwendung von CFK-Schubgittern wurde ein ausgeprägtes Nachbruchverhalten bei UHPFRC-Deckschichten beobachtet, jedoch keine Erhöhung der maximal ertragbaren Belastung, da die Verbundfestigkeit von PU bereits im Bereich der maximalen Belastung des Schubgitters lag. Eine Verankerungslänge von 30 mm reichte dabei aus, um ein Herausziehen des Schubgitters bei UHPFRC und HSC zu verhindern. Kleinere Verankerungslängen wurden nicht untersucht, da die Dicke der Deckschichten der Sandwichbalken und -schalen auf 60 mm festgelegt worden war.

Unter Schubbelastung wurde ein Versuchsaufbau nach Shams [16] für ebene Versuchskörper verwendet (Bild 7, links). In ähnlicher Weise wurde ein Aufbau für Falwerke entwickelt (Bild 7, rechts).

Der Einsatz eines CFK-Schubgitters führte im Allgemeinen zu einem steiferen Verhalten und einem ausgeprägten Nachbruchverhalten (Bild 8).

left). In a similar manner, a set up for folded plate elements was developed (Fig. 7, right).

The application of a CFRP shear grid generally resulted in a stiffer behaviour and a pronounced post-failure state (Fig. 8). For the applied CFRP shear grid a sufficient amount of remaining load-bearing capacity of $\approx 80\%$ of maximum test load was observed, leading to an increase of over 100% in relative displacement Δu . This behaviour was observed for 100 mm and 200 mm core heights as well as for one or two applied shear grids. CFRP shear grids with embedment length of 30 mm in the UHPFRC facings failed within the free length between the facings. Hence, the short embedment length was sufficient. GFRP pin connectors with embedment length of 30 mm failed at maximum load and did not lead to remaining load-bearing capacity. For core heights of 100 mm and 200 mm, the maximum shear stresses were derived to 0.38 MPa and 0.27 MPa, respectively. The load-displacement behaviour until maximum load showed no significant difference compared to tests on specimens without connectors. The elements failed due to diagonal cracks in the core material or by debonding. As mentioned before, the induced bending moment resulted in tensile forces at top and compression forces at bottom of the specimens. For HSC facings, a similar load-displacement response was observed with maximum loads of about 35 kN. Applying shear connectors lead to a similar behaviour as for UHPFRC facings.

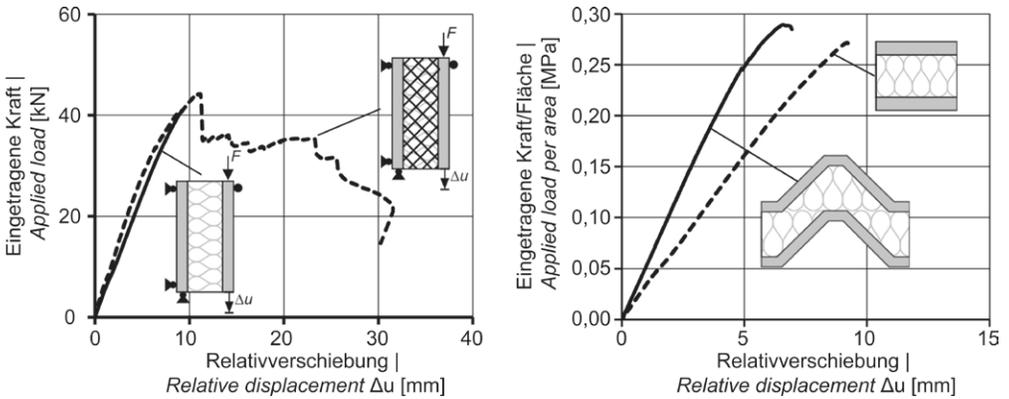


Bild 8: Repräsentative Versuchsergebnisse von Schubversuchen; links: Last-Verformungs-Diagramm, rechts: Schubspannung und zugehörige Relativverschiebung Δu | **Fig. 8:** Representative test results of shear tests on sandwich sections; left: load-deformation diagram, right: shear stress in bond zone with corresponding relative displacement Δu

Für das eingesetzte CFK-Schubgitter wurde eine ausreichende Resttragfähigkeit von ca. 80 % der maximalen Prüfkraft beobachtet, was zu einem Anstieg der Relativverschiebung Δu um über 100 % führte. Dieses Verhalten wurde sowohl bei Versuchskörpern mit 100 mm und 200 mm Kernhöhe sowie bei einem und zwei eingesetzten Schubgittern beobachtet. CFK-Schubgitter waren mit 30 mm in den UHPFRC-Deckschichten verankert und versagten innerhalb der freien Länge zwischen den Deckschichten. Somit war die kurze Verankerungslänge ausreichend. Punktförmige GFK-Verbundmittel (Verankerungslänge ebenfalls 30 mm) versagten bei maximaler Belastung und führten somit nicht zu einer erhöhten Resttragfähigkeit. Für Kernhöhen von 100 und 200 mm wurden die maximalen Schubspannungen mit 0,38 MPa bzw. 0,27 MPa bestimmt. Das Kraft-Verformungs-Verhalten von Versuchskörpern ohne Verbundmittel wies bis zur Maximallast keinen signifikanten Unterschied zu Versuchskörpern mit Verbundmitteln auf. Die Querschnitte versagten durch Diagonalarisse im Kernmaterial oder durch Delamination. Das entstehende Biegemoment in dem Versuchsaufbau führte zu Zug- und Druckkräften in den Versuchskörpern. Für HSC-Deckschichten wurde ein ähnliches Kraft-Verformungs-Verhalten bei maximalen Belastungen von ca. 35 kN beobachtet, auch der Einsatz von Verbundmitteln wirkte sich ähnlich aus wie bei UHPFRC.

The investigated folded plate cross-section with a core height of 200 mm showed an about 50% higher stiffness compared to flat sections with the same core height (Fig. 8). For this comparison, the applied load was normalised by the bond area. Again, slight tilting of the specimen could not be avoided. The elements failed due to shear cracks in the core material and partially from debonding at the top part of the specimens.

2.6 Sandwich panels under flexural loading

The results of investigations on small-scale specimens were used to set up sandwich panels with spatially shaped facings. In total, three different cross-sections were investigated. For the validation of the production method on large-scale specimens, elements with flat facings were produced. For elements with non-flat facings, a folded plate cross-section and doubly curved configuration were analysed.

The flexural behaviour of prestressed sandwich panels was investigated on simply supported beam elements. Flat and folded plate elements were tested with 2.4 m span under three-point loading. The span was increased to 4.0 m and four-point loading for doubly curved elements. All test specimens were loaded displacement controlled with 1.0 mm/min. Besides the test load, deflections and deformations were meas-

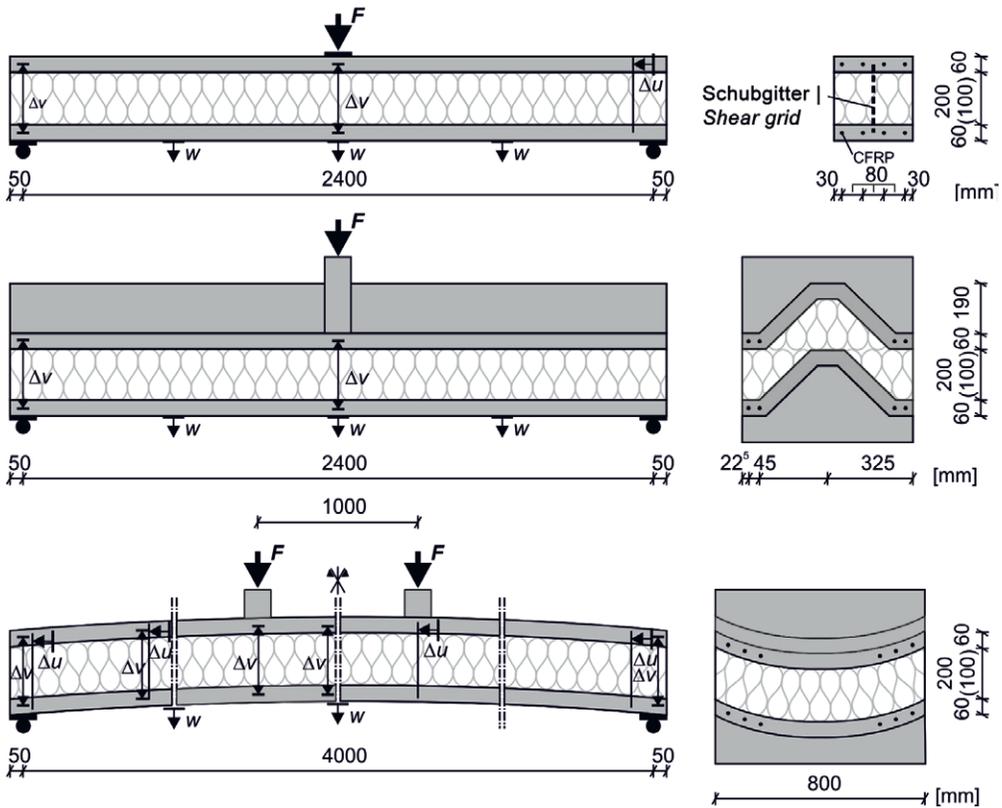


Bild 9: Versuchsaufbauten der Biegeversuche an Sandwichelementen | Fig. 9: Test setups of bending tests on sandwich panels

Der untersuchte Faltenwerkquerschnitt mit einer Kernhöhe von 200 mm zeigte eine um ca. 50 % höhere Steifigkeit im Vergleich zu ebenen Querschnitten mit gleicher Kernhöhe (Bild 8, rechts). Für diesen Vergleich wurde die aufgebrachte Last auf die Verbundfläche normiert. Auch hier konnte eine leichte Verkippung des Versuchskörpers nicht vermieden werden. Die Elemente versagten aufgrund von Schubrisen im Kernmaterial und teilweise durch Delamination im oberen Teil der Versuchskörper.

2.6 Sandwichbauteile unter Biegebeanspruchung

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen an kleinformatigen Probekörpern wurden Sandwichelemente mit räumlich geformten Deckschichten erarbeitet. Insgesamt wurden drei

unterschiedliche Querschnitte kontinuierlich mit LVDTs. Die Testaufbauten von Sandwichbalken sind in Fig. 9 dargestellt. Für die Bewertung des Sandwicheffekts wurden ein gefaltetes Platten- und ein doppelt gebogenes Element untersucht. Gefaltete Platten- und doppelt gebogene Elemente wurden kontinuierlich über ihre Breite abgestützt und belastet, um praktische Randbedingungen zu gewährleisten. Aufgrund der Komplexität in der Produktion wurden an diesem Stadium Scherverbinder nur für die ebenen Elemente montiert. Aufgrund der hervorragenden Festigkeit und Duktilität von UHPFRC wurden nur zwei ebene Sandwichbalken mit HSC-Fassungen exemplarisch getestet.

Neben der Querschnittsform wurde der Einfluss von Vorspannung untersucht. Vier Stäbe oder vier siebenadriges Stränge wurden als vorgespannte CFRP-Bewehrung verwendet:

verschiedene Querschnitte untersucht. Für die Validierung des Herstellungsverfahrens an großformatigen Versuchskörpern wurden Elemente mit ebenen Deckschichten hergestellt. Für Elemente mit nicht ebenen Deckschichten wurden ein Falterwerkquerschnitt und eine doppelt gekrümmte Konfiguration analysiert.

Das Biegetragverhalten von vorgespannten Sandwechenelementen wurde an Einfeldträgern untersucht (Bild 9). Ebene und Falterwerkelemente wurden mit 2,4 m Spannweite unter 3-Punkt-Belastung getestet. Die Spannweite wurde für doppelt gekrümmte Elemente auf 4,0 m mit 4-Punkt-Belastung erhöht. Die Tests wurden weggesteuert mit 1,0 mm/min durchgeführt. Neben der Prüfkraft wurden mit IWA kontinuierlich Durchbiegungen und Verformungen gemessen. Zur Beurteilung des Sandwecheffekts wurden gefaltete Einzeldeckschichten und doppelt gekrümmte Elemente untersucht. Gefaltete und doppelt gekrümmte Elemente wurden über die Breite kontinuierlich gelagert und belastet, um praxisrelevante Lagerungsbedingungen zu schaffen. Aufgrund der Komplexität in der Produktion wurden Verbundmittel nur bei den ebenen Elementen angeordnet. Aufgrund der deutlich höheren Festigkeit und Duktilität von UHPFRC wurden nur zwei ebene Sandwichträger mit HSC-Deckschichten exemplarisch getestet.

Neben der Querschnittsform wurde auch der Einfluss einer Vorspannung mit CFK-Bewehrung (vier Stäbe oder vier siebendrähtige Litzen) untersucht. Die Vorspannelemente waren wie folgt angeordnet:

- Ebene Elemente: in mittlerer Deckschichthöhe,
- Falterwerkelemente: in den unteren Flanschen der Deckschichten,
- Doppelt gekrümmte Elemente: diagonal (gerade, aber windschief).

Eine detaillierte Übersicht über alle Versuchsparameter und -ergebnisse ist in [1] zu finden.

Die Biegeversuche an ebenen Sandwechenelementen zeigten eine zufriedenstellende Reprö-

- Flat elements: reinforcement in mid-height;
- Folded plate elements: reinforcement in the bottom flanges of the facings;
- Doubly curved elements: reinforcement diagonal as straight, but skew lines.

A detailed overview of all test parameters and results is given in [1].

Flexural tests on flat sandwich sections showed a satisfying reproducibility of the bond zone quality for specimens applying the formwork side of the facings in the bond zone. Additionally, the material properties of the PU core were reproducible independently from the size and shape of the specimens. In Fig. 10, the load-deflection response of tests with UHPFRC facings (CFRP shear grid, bars without pre-tensioning and strands with pre-tensioning) and textile reinforced concrete (TRC) facings are depicted. Both tests with UHPFRC facings showed roughly the same maximum load, but about 25% less deflection for the prestressed member. It can be clearly seen that the sandwich panel with TRC facing showed considerably less stiffness, early cracking and roughly half of the maximum load compared to the elements with UHPFRC facings. As expected from bond tests as well as tests on small sandwich sections, elements with UHPFRC facings showed a superior structural performance. Additionally, these specimens

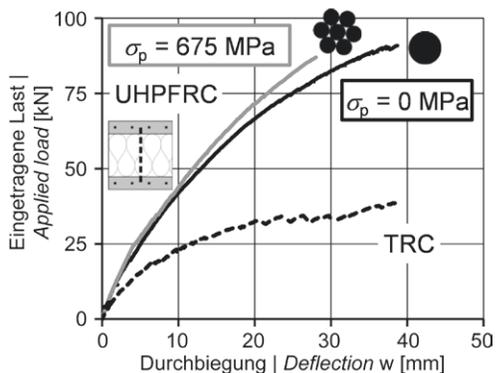


Bild 10: Last-Mittendurchbiegungs-Beziehung von ebenen Sandwechenelementen mit UHPFRC- bzw. TRC-Deckschichten mit Schubgittern | Fig. 10: Load- midspan deflection relation of planar sandwich beams with UHPFRC and TRC facings, resp., with shear grids

duzierbarkeit der Qualität der Verbundfuge für Versuchskörper, bei denen die glatte Schalungsseite der Deckschichten in der Verbundfuge angeordnet war. Darüber hinaus waren die Materialeigenschaften des PU-Kerns unabhängig von der Größe und Form der Versuchskörper reproduzierbar. In Bild 10 ist beispielhaft das Last-Durchbiegungs-Verhalten von Versuchskörpern mit UHPFRC-Deckschichten (CFK-Schubgitter, Stäbe ohne Vorspannung und Litzen mit Vorspannung) und Textilbeton (TRC) dargestellt. Beide Versuche mit UHPFRC-Deckschichten zeigten etwa die gleiche maximale Belastung, aber etwa 25 % weniger Durchbiegung für das vorgespannte Element. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Sandwichbalken mit TRC-Deckschichten im Vergleich zu den Elementen mit UHPFRC-Deckschichten deutlich weniger Steifigkeit aufweist, eine frühzeitige Rissbildung erfährt und eine deutliche geringere Bruchlast erreicht. Wie anhand der vorangegangenen kleinteiligen Versuche erwartet, zeigten Elemente mit UHPFRC-Deckschichten ein deutlich günstigeres Verhalten. Darüber hinaus können diese Versuchskörper relativ leicht vorgespannt werden und der Herstellungsprozess von Faltenwerken und doppelt gekrümmten Deckschichten aus TRC ist im Vergleich zum Gießen von UHPFRC relativ aufwendig.

Das Versagen von Versuchskörpern mit UHPFRC-Deckschichten ohne Vorspannung wurde durch Mehrfachrisse mit kleinen Rissbreiten und Abständen angekündigt. Bei maximaler Belastung zeigten Probekörper mit Vorspannung deutlich weniger Risse. Beide Elemente versagten aufgrund von Schubrisen im PU-Kern in Kombination mit Rissen in den Deckschichten. Im Gegensatz dazu versagten Elemente mit TRC durch übermäßige Rissbildung der Deckschichten und einen Biegeriss des Kernmaterials jeweils in Feldmitte.

Zur Erforschung des Trag- und Verformungsverhaltens von **Faltwerkquerschnitten** wurden zunächst einzelne Faltenwerkelemente getestet, um den Einfluss unterschiedlicher Vorspannkraft und Bewehrungsanordnungen zu untersuchen. Anschließend wurden verschiedene Anordnungen

can be prestressed relatively easily and the production process of folded plate and doubly curved facings made of TRC is rather complex compared to casting of UHPFRC.

Failure of tests with UHPFRC facings without prestressing was indicated by multiple cracking with small crack widths and spacings. At maximum load, tests with prestressing showed considerably less cracks. Both tests failed due to shear cracking of the PU core in combination with cracking of the UHPFRC facings. In contrast, slabs with TRC facing failed due to excessive cracking of the bottom facing and a flexural crack of the core material, both at midspan.

In the following section, the structural performance of **folded plate cross-sections** is shortly discussed. At first, single folded plate elements were tested to investigate the influence of different prestressing forces and reinforcement arrangements. Afterwards, different arrangements of reinforcement and prestressing forces were applied to folded plate sandwich beams. The test results of single folded plate elements were additionally used as reference to evaluate the sandwich action. Top in Fig. 11, the load-deflection responses of prestressed and non-prestressed single folded plate elements and folded plate sandwich elements are exemplarily compared. For sandwich elements with equal prestressing and arrangement of reinforcement, the maximum load was 2.5 to 3 times higher compared to single folded plate elements. The corresponding maximum deflection of sandwich elements was about the same as for single folded plate elements.

Crack widths remained less than 2.5 mm until 80% of maximum load for single folded plate beams and sandwich elements. In Fig. 11 (bottom), the crack patterns of prestressed elements – bottom views – are shown. For single elements and sandwich panels, flexural cracks first developed at mid span in the bottom flanges at roughly 30–40% of the maximum load. Increasing test loads resulted in further cracks in the bottom flanges. After the bottom flanges were cracked at several positions, the flexural

gen von Bewehrungs- und Vorspannkräften für die Anwendung in Sandwichträgern getestet. Die Ergebnisse der Einzelschalenelemente wurden zusätzlich als Referenz zur Beurteilung der Sandwichwirkung herangezogen. In Bild 11, oben, sind die Last-Durchbiegungs-Beziehungen von vorgespannten und nicht vorgespannten Einzel-Faltwerkelementen und Sandwichelementen exemplarisch dargestellt. Bei Sandwichelementen mit gleicher Vorspannung und Bewehrungsanordnung war die maximale Belastung im Vergleich zu Einzelschalen 2,5- bis 3-mal höher. Die maximale Durchbiegung der Sandwichelemente war etwa gleich hoch wie bei den einzelnen Elementen, aber bei einem deutlich höheren Lastniveau.

In Bild 11 (unten) sind die Rissbilder (Untersichten) von vorgespannten Elementen dargestellt. Die Rissbreiten blieben unter 2,5 mm bis 80 % der maximalen Belastung bei Einzelschalen und Sandwichelementen. Bei beiden Elementtypen entwickelten sich zunächst mittig in den unteren Flanschen Biegerisse bei etwa 30–40 % der maximalen Belastung. Steigende Belastungen führten zu weiteren Rissen in den unteren Flanschen. Nachdem die unteren Flansche an mehreren Stellen gerissen waren, verliefen die Biegerisse in einem Winkel von bis zu 45° in die Stege.

In Bild 12 ist das Last-Durchbiegungsverhalten von **doppelt gekrümmten Elementen** – sowohl Einzelelemente, d. h. nur eine UHPFRC-Schicht, als auch Sandwichelemente – mit unterschiedlichen Vorspannkräften (sechs Stäbe oder Litzen) unter 4-Punkt-Biegebelastung dargestellt. Wie bei den Faltwerkelementen festgestellt wurde, blieben die Rissbreiten bei Einzel- und Sandwichelementen kleiner als 2,5 mm. Bei einzelnen doppelt gekrümmten UHPFRC-Schalen wurde jedoch ein Druckversagen beobachtet (Bild 12, rechts). Das Versagen wurde in der Nähe der Lastaufbringung bei Durchbiegungsverhältnissen von L/60 bis L/40 (abhängig vom Vorspanngrad) verursacht. Die Ergebnisse der Biegeversuche an Sandwichelementen zeigten keine Erhöhung der Prüfkraft durch Vorspannung, aber eine geringere Durchbiegung. Im Gegen-

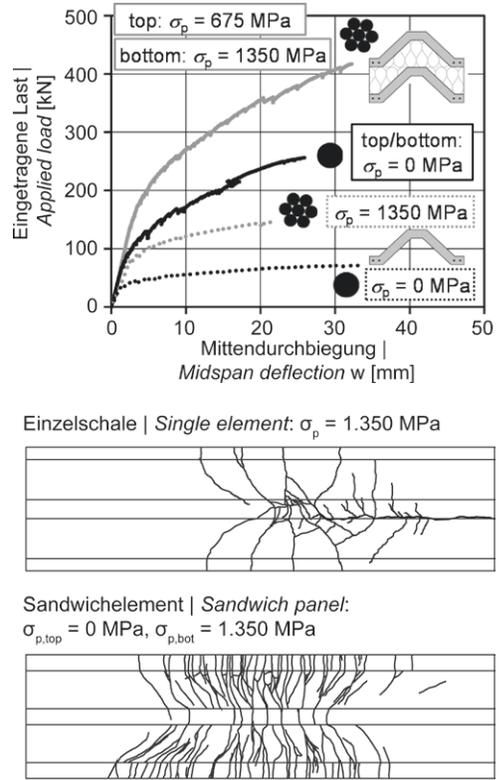


Bild 11: Gefaltete Einzel- und Sandwichschalen mit unterschiedlicher Vorspannung; Mittendurchbiegung in Abh. der Lasthöhe und Rissbilder (Untersicht) nach Versuchsende | **Fig. 11:** Folded single resp. sandwich elements with different prestressing; midspan deflections depending on the load height and crack patterns (bottom view) after testing

cracks proceeded into the webs at an angle up to 45°.

In Fig. 12 (left) the load-deflection behaviour of **doubly curved elements** – single elements (that means: one UHPFRC layer) as well as sandwich elements – with different prestressing forces (six bars or strands) under four-point flexural loading is depicted. As observed for folded plate elements, the crack widths for single and sandwich elements remained less than 2.5 mm. However, for single doubly curved UHPFRC elements a compression failure was observed (Fig. 12, right). The failure was induced in the vicinity of the load application at deflection ratios of L/60 to L/40, depending on the prestress-

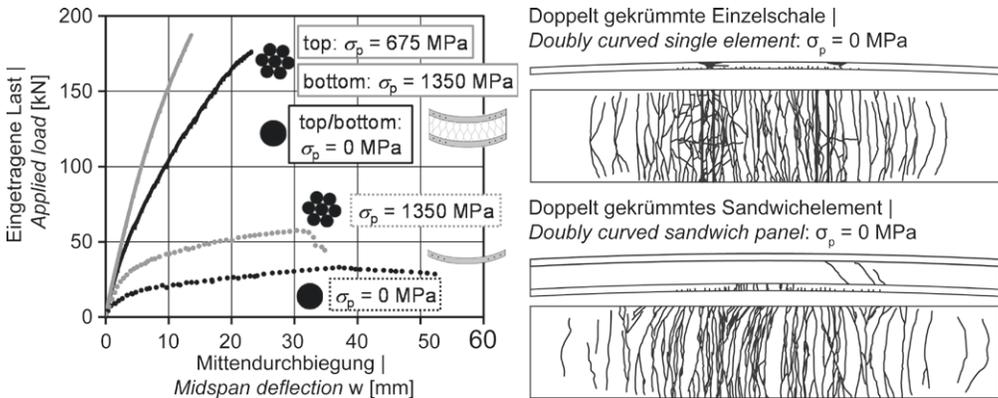


Bild 12: Doppelt gekrümmte Elemente – Einzel- und Sandwichschalen – mit verschiedenen Vorspannungen; Mittendurchbiegung in Abh. der Lasthöhe (links) und Rissbilder für Elemente ohne Vorspannung der Deckschichten nach Versuchsende (rechts, Ansichten von der Seite und von unten) | **Fig. 12:** Doubly curved elements – single and sandwich – with different prestressing forces; midspan deflections depending on the load height (left) and crack patterns after testing of elements without prestressing (right: side and bottom views)

satz zu Falterwerkelementen versagten doppelt gekrümmte Sandwichprofile bei deutlich geringerer Durchbiegung, aber bei der vier- bis fünffachen maximalen Belastung im Vergleich zu einzelnen doppelt gekrümmten Elementen. Das Versagen von Sandwichelementen wurde durch Schubrisse im Kernmaterial aufgrund der großen Relativverschiebungen der äußeren UHPFRC-Schichten verursacht. Druckversagen, wie es bei einzelnen doppelt gekrümmten Elementen beobachtet wurde, trat bei Versuchen an Sandwichelementen nicht auf. Verformungen in Querrichtung der Elemente wurden nicht beobachtet.

Ein Tastversuch unter Langzeitbelastung wurde an einem doppelt gekrümmten Sandwichträger ohne Vorspannung der Deckschichten durchgeführt. Eine Belastung von 22 kN entsprach 50 % der Risslast eines solchen Prüfkörpers. Nach 1.000 h war kein deutlicher Anstieg der Durchbiegungen und Verformungen sichtbar.

ing. The results of flexural tests on sandwich sections showed no increase in test load due to prestressing, but less deflection. In contrast to folded plate elements, doubly curved sandwich sections failed at considerably less deflection, but at four to five times the maximum load compared to single doubly curved elements. The failure of sandwich elements was induced by shear cracks in the core material due to relative slip of the outer UHPFRC layers. Compression failure, as observed for single doubly curved elements, did not occur in tests on sandwich elements. Deformations in transverse direction of the elements due to loading were not observed.

A tentative test under long-term loading was conducted on a doubly curved sandwich beam without prestressing of the facings. The dead load of 22 kN, represents 50% of the cracking load of this test specimen. After 1,000 h there was no considerable increase in deflections and deformations visible.

3 Finite-Elemente-Modellierung

3 Finite element modelling

3.1 Allgemeines

3.1 Preface

Bei der Entwicklung der Sandwichelemente wurden numerische, nichtlineare Finite-Elemente-Untersuchungen (FE-Untersuchungen) mit

Non-linear numerical investigations were conducted during the development of sandwich panels. The numerical investigations have been

ABAQUS [23] unter Verwendung nichtlinearer Materialmodelle durchgeführt. Für jeden Untersuchungsschritt wurden die Versuchskörper modelliert und die Resultate der Berechnungen mit den experimentellen Ergebnissen validiert, um die Anwendbarkeit der Materialgesetze zu bewerten. Die numerischen Untersuchungen wurden mit Hilfe von 3D-Modellen durchgeführt. In allen Fällen wurden 8-Knoten-Volumenelemente mit reduzierter Integration für Beton, Lastplatten und PU-Schaum eingesetzt. Die Bewehrung wurde als Fachwerkstäbe mit starrem Verbund zum umgebenden Beton abgebildet. Bei den Verbunduntersuchungen wurde die Bewehrung mit Volumenelementen diskret modelliert. Alle Modelle wurden mit dem impliziten Newton-Raphson-Lösungsverfahren simuliert. Die Größe der Elemente wurde in Abhängigkeit der Größe der untersuchten Elemente angepasst. Detaillierte Informationen zu den Simulationsverfahren sind in [1] zu finden.

3.2 Materialmodelle

Für Beton wurde das nichtlineare Verhalten unter Zug- und Druckbeanspruchung mit einem plastischen Schädigungsmodell [23]–[25] modelliert. Innerhalb des Modells wird ein verschmierter Rissbildungsansatz in Kombination mit skalaren Schädigungen verwendet. Dieses Modell ist in der nichtlinearen FE-Software ABAQUS [23] integriert. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Parametern sind in [1] enthalten. Die theoretischen Ansätze und Eingangswerte für das einaxiale Zug- und Druckverhalten wurden unter Berücksichtigung von [26]–[28] ermittelt. Die Querdehnzahl wurde konstant mit 0,2 gewählt. Versuche an UHPFRC-Würfeln unter mehraxialer Druck- und Zugbelastung wurden von Speck [29] durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass das durchschnittliche Verhältnis von zwei-axialer zu einaxialer Druckfestigkeit σ_{b0}/σ_{c0} etwa 1,0 (grobkörnig) bis 1,08 (feinkörnig) beträgt. Im Gegensatz dazu wird für NSC in der Regel 1,16 berücksichtigt. In [30] wurde die Anwendbarkeit eines Plastizitätsmodells für UHPFRC- und NSC-Materialproben für verschiedene Spannungszustände, d. h. Zug-, zwei-axiale Druck- und Biegebeanspruchung, untersucht.

performed with the finite element environment ABAQUS [23] using non-linear models for materials. For each investigation step, the test specimens have been modelled and the results of the calculations were validated with experimental data to evaluate the applicability of the provided material laws for the materials. The numerical investigations were performed using 3D models. In all cases, 8-node volume elements with reduced integration were applied for concrete, loading plates and PU foam. The reinforcement was idealised as truss members with rigid bond to the surrounding concrete. Only in case of bond investigations, the reinforcement was modelled discretely using volume elements. All models were simulated using the implicit solution technique of Newton-Raphson procedure. The element's sizes were adapted in dependence on the size of investigated members. Detailed information on the simulation procedures can be found in [1].

3.2 Material models

For concrete the non-linear behaviour under tensile and compressive loading conditions was modelled using the damage plasticity model [23]–[25]. Within the model, a smeared cracking approach in combination with scalar damage is used. This model is incorporated in the non-linear finite element software ABAQUS [23]. Detailed information on the applied parameters are given in [1]. The input values for uniaxial tensile and compressive behaviour were determined by theoretical approaches considering the material properties [26]–[28]. Poisson's ratio was constantly chosen to 0.2. Tests on UHPFRC cubes under multiaxial compression and tension have been conducted by Speck [29]. It was shown that the average ratios of biaxial to uniaxial compressive strength σ_{b0}/σ_{c0} are about 1.0 (coarse-grained HSC) to 1.08 (fine-grained). In contrast, for NSC usually 1.16 is taken into account. In [30] the applicability of a damage plasticity model for UHPFRC and NSC material samples was shown for different stress states, i.e. tensile, biaxial compressive, and flexural loading.

Um die Komplexität numerischer Modelle zu minimieren, wurde das anisotrope Materialverhalten aller CFK-Komponenten vernachlässigt. Gemäß Horstmann [31] wurde ein isotropes linear-elastisches Materialverhalten bis zum Bruch bei maximaler Zugfestigkeit angenommen. Für CFK-Stäbe, -Litzen und das Schubgitter wurden die maximale Festigkeit und die Elastizitätsmoduln gemäß den Angaben in Abschnitt 2 implementiert. Die Querdehnzahl wurde konstant auf 0,2 [15], [31] gewählt.

Innerhalb von ABAQUS kann das anisotrope Materialverhalten von ausgehärteten Schäumen durch das Materialgesetz „*crushable foam*“ in Kombination mit einem isotropen, elastischen Materialverhalten vereinfacht werden. Die Querdehnzahl wurde auf 0,41 eingestellt, um das Verhältnis von E-Modul und Schubmodul zu berücksichtigen. Für den plastischen Zustand wurde das *Crushable-Foam*-Modell angewendet. Das plastische Verhalten wird durch einen von Mises-Kreis und eine Ellipse in Meridianrichtung dargestellt. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Fließspannung unter Druck wurde aus eigenen Materialtests abgeleitet.

Das Tragverhalten von Sandwichprofilen wird maßgeblich durch die Qualität der Verbundfuge zwischen Beton und Kernmaterial gesteuert, insbesondere wenn keine Verbundmittel eingesetzt werden. Kohäsionselemente wurden verwendet, um einen möglichen Ausfall der Verbundfuge durch Delamination zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurde eine Spannungs-Öffnungs-Beziehung verwendet [1].

3.3 Validierung der verwendeten Modelle

In [1] wurde die Anwendbarkeit der Materialmodelle für Kernschaum und Verbundfuge für Zug-, Schub- und Druckbelastung an kleinskaligen Prüfkörpern nachgewiesen. Zusätzlich wurde das Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern im Beton durch numerische Modelle tiefergehend untersucht. In diesem Abschnitt werden nur die Ergebnisse zur Modellierung von Betonschalen- und Sandwichbalken exemplarisch dargestellt. Die numerischen Modelle wurden

To minimise the complexity of numerical models, the anisotropic material behaviour of all CFRP components was neglected. In accordance with Horstmann [31], an isotropic linear-elastic material behaviour with failure at maximum tensile strength was assumed. For the bar, strand and shear grid, the maximum strength and Young's moduli were applied in accordance with information given in section 2. Poisson's ratio was set constantly to 0.2 [15], [31].

Within ABAQUS, the anisotropic material behaviour of foam can be simplified by the material law crushable foam in combination with an isotropic and elastic material behaviour. Poisson's ratio was set to 0.41 to account for the relationship of Young's modulus and shear modulus. For the plastic state, the crushable foam material law was applied. The volumetric hardening approach presumes that the yield stress is mainly dependent on compressive stresses. The plastic behaviour is represented by a von Mises circle and an ellipse in meridian direction. The stress-strain relationship of yield stress under compression was derived from own material testing.

The quality of the interface between facing and core material mainly controls the bearing behaviour of sandwich sections, especially for cases without any additional shear connectors. A cohesive interface was applied to account for possible failure of the bond zone. For this purpose a traction-separation relationship was used [1].

3.3 Validation of applied models

In [1] the applicability of the material models for core foam and bond zone was shown for tensile shear and compressive loading on small-scale test specimens. Additionally, the bond behaviour of CFRP tendons in concrete was further investigated by numerical models. In this section, only the results for modelling of concrete shell beams and sandwich beams are exemplarily shown. The numerical models were assembled, loaded and supported in the same way as the experimental investigations.

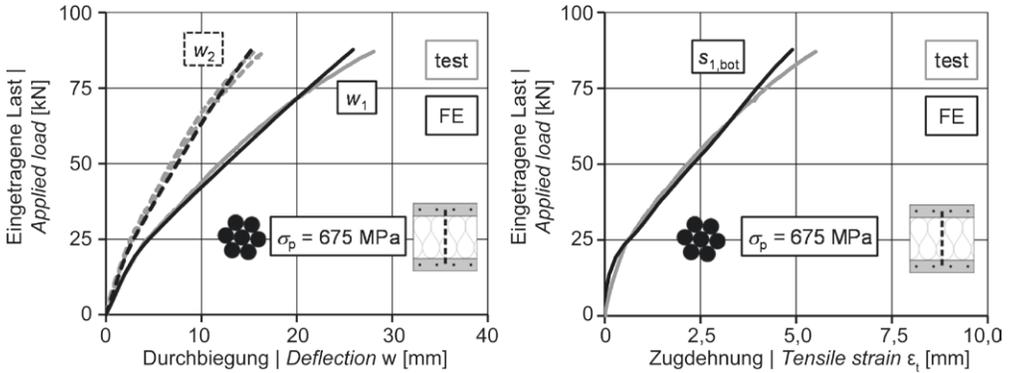


Bild 13: Numerische und experimentelle Ergebnisse von ebenen Sandwichquerschnitten mit vorgespannter CFK-Bewehrung und CFK-Schubgittern unter Biegebeanspruchung; links: Durchbiegung am Viertelspann (w_2) und in Balkenmitte w_1 , rechts: Zugdehnung ϵ_t | **Fig. 13:** Numerical and experimental results of planar sandwich beams with pre-tensioned strands and CFRP shear grid under bending; left: deflection at quarter point (w_2) and midspan (w_1), right: bottom strain ϵ_t

in gleicher Weise wie die experimentell getesteten Probekörper abgebildet, aufgelagert und belastet.

Zunächst wurden Sandwichbalken mit ebenen Deckschichten analysiert, um die abgeleiteten Materialparameter zu validieren. In Bild 13 sind die numerisch bestimmten Last-Verformungs-Beziehungen für einen vorgespannten Sandwichbalken mit UHPFRC-Deckschichten und CFK-Schubgittern exemplarisch dargestellt (w_2 : Durchbiegung im Viertelspann, w_1 : Balkenmitte). Die gute Übereinstimmung des Trag- und Verformungsverhaltens und der Lastabtragmechanismen wird durch die Vorhersage der Risslasten bestätigt. Wie in den Versuchen haben die CFK-Spannglieder in der Simulation nicht versagt, sondern wurden je nach Spannbettvorspannung bis maximal 2.500 MPa belastet. Abhängig von der Herstellungsqualität (vgl. [1]) wurden für

First of all, sandwich beams with flat facings were analysed to validate the derived material parameters. In Fig. 13 the numerically determined load-deflection responses at midspan w_1 and quarter points w_2 for a prestressed sandwich beam with UHPFRC facings and CFRP shear grid are exemplarily shown. The good agreement of the overall responses and load carrying mechanisms is confirmed by the prediction of the bottom strain. As in the tests, the CFRP tendons did not fail in the simulation, but were stressed up to 2,500 MPa at maximum, depending on the initial prestressing. Depending on the production quality (cp. [1]), for flat specimens, a very good prediction of results was achieved with consistently derived input parameters.

In Fig. 14, the numerical models of folded plate and doubly curved sandwich elements are shown. A mesh size of 25 mm in longitudinal

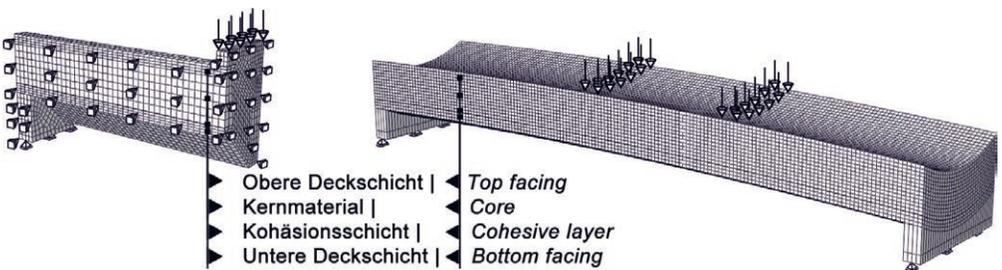


Bild 14: Numerische Modelle von gefalteten (links) und doppelt gekrümmten (rechts) Sandwichbauteilen (nicht maßstäblich) | **Fig. 14:** Numerical models of folded plate (left) and doubly curved (right) sandwich elements (not to scale)

ebene Elemente sehr gute Übereinstimmungen mit den Simulationen bei Verwendung von konsistenten Eingangsparametern erzielt.

In Bild 14 sind die numerischen Modelle von faltwerk- und doppelt gekrümmten Sandwich-elementen dargestellt. Es wurde eine Netzgröße von 25 mm in Längsrichtung verwendet. Das FE-Netz der faltwerkelemente wurde im Rahmen des FE-Programms erzeugt, während die Elemente der doppelt gekrümmten Elemente mit Hilfe einer programmierten Subroutine [1] erzeugt wurden, da sowohl Extrusions- als auch Revolutionsverfahren für die doppelt gekrümmte Form nicht angewendet werden können. Innerhalb dieses entwickelten Programm-codes wurden die Anzahl der Elemente und die Bewehrungsrichtung auf Basis von Länge, Breite, Höhe und Dicke des doppelt gekrümmten Elements ermittelt. Das ermittelte FE-Netz wurde in die FE-Software importiert.

In [1] wurde die Anwendbarkeit des plastischen Schädigungsmodells für die Bestimmung von Last-Durchbiegungs-Beziehungen sowie Dehnungen in faltwerken und doppelt gekrümmten Einzelschalen dargestellt. Zusätzlich wurden die Bereiche plastischer Dehnungen in guter Übereinstimmung mit den Rissbereichen der Versuchskörper festgestellt.

Im Gegensatz zu ebenen Sandwichbalken zeigten die experimentellen Untersuchungen an gefalteten Sandwichelementen einen signifikanten Einfluss der Vorspannung der Deckschichten auch bei einer relativ kurzen Spannweite von 2,4 m. Die numerisch ermittelten Last-Verformungs-Beziehungen stimmten gut mit den Versuchsergebnissen überein. Der Versagensmodus der Sandwichelemente war immer eine Kombination aus starker Rissbildung der Deckschichten und plastischer Verformung des Kernmaterials. Die Spannglieder wurden bis zu 2.600 MPa bei Vorspannungen von 1.350 MPa beansprucht, was beinahe der maximalen Zugfestigkeit von 2.650 MPa entspricht. Eine Vorspannung von 675 MPa führte zu Höchstspannungen von etwa 2.000 MPa beim Versagen der Elemente. Wie bei den realen Tests versagte die Verbundfuge zwischen Kern-

direction was applied for folded plate sections and for doubly curved sections. The mesh of folded plate elements was generated within the finite elements programme, whereas that of doubly curved elements were created with aid of a source code [1], since extrusion or revolution techniques could not be applied for the doubly curved shape. Within this developed programme code, the number of elements and direction of reinforcement were determined on the basis of length, width, height and thickness of the doubly curved cross-section. The determined mesh of each part was imported into the finite element software.

In [1] the applicability of the damage plasticity model for the determination of load-deflection responses as well as strains in folded plate and doubly curved single sections was shown. Additionally, the plastic strains were found in good agreement with the crack patterns.

In contrast to flat sandwich beams, the experimental investigations on folded plate sandwich elements showed a significant influence of prestressing of UHPFRC layers, even for the relatively short span of 2.4 m. The numerically determined load-deflection responses were found in good agreement with the test results. For the sandwich panels, always a mixed failure mode from excessive cracking of the facings and plastic deformation of the core material was observed. In the model, the prestressing tendons were stressed up to 2,600 MPa for prestressing of 1,350 MPa, which is close the maximum tensile strength of 2,650 MPa. Prestressing of 675 MPa resulted in maximum stresses of about 2,000 MPa at failure of the elements. As in the tests, the interface between core and facings did not fail. For all combinations of reinforcement and prestressing forces, the load-deflection response was almost congruent. Hence, validated material laws for PU and interface from small-scale testing led to an appropriate prediction of the load bearing behaviour of sandwich panels under flexural loading. As shown in Fig. 15, the load-deflection response of doubly curved sandwich panels was predictable in good agreement. Therefore, an artificially increased shear

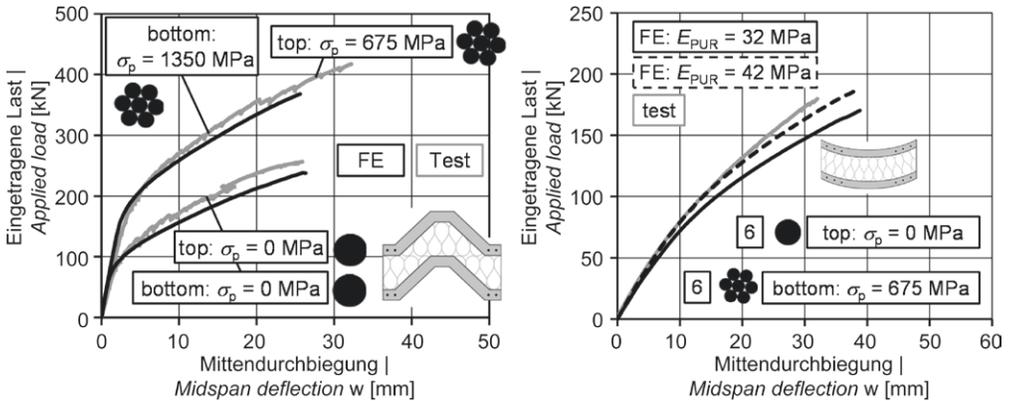


Bild 15: Numerische und experimentelle Ergebnisse von gefalteten (links) und doppelt gekrümmten Sandwichbauteilen (rechts) unter Biegebeanspruchung | **Fig. 15:** Numerical and experimental results of flexural tests on folded plate sandwich beams (left) and doubly curved sandwich beams (right)

material und Deckschichten in der Simulation nicht. Für alle Kombinationen von Bewehrung und Vorspannkraften war das Last-Verformungs-Verhalten nahezu deckungsgleich. Die anhand der kleinformigen Versuchskörper validierten Materialgesetze für PU-Schaum und Verbundfuge führten also zu einer adäquaten Vorhersage des Trag- und Verformungsverhaltens von Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung. Wie in Bild 15 dargestellt, konnte das Last-Verformungs-Verhalten von doppelt gekrümmten Sandwichelementen ebenfalls in relativ guter Übereinstimmung prognostiziert werden. Allerdings führte die Verwendung eines modifizierten Schubmoduls durch Ansatz eines erhöhten E-Moduls zu einem verbesserten Last-Verformungs-Verhalten bei vorgespannten Elementen. Für weitere Erläuterungen und Untersuchungen wird auf [1] verwiesen.

Anschließend wurden weitere Vergleiche zwischen Numerik und Versuch vorgenommen. Die Gegenüberstellung von Rissmustern und Verteilungen der plastischen Dehnungen in den UHPFRC-Deckschichten zeigten gute Übereinstimmungen, auch wenn sich keine geeigneten plastischen Bereiche entwickelten (Bild 16). Dies war bereits bei den UHPFRC-Einzelschalen der Fall.

Obwohl Schubrisse durch das numerische Modell nicht über die ganze Höhe des Kernmate-

rials verwendet wurde, wurde durch die Anwendung eines erhöhten Young's Moduls [1]. Dies resultierte in einem global verbesserten Last-Verformungs-Verhalten für vorgespannte Elemente. Um die konsistenten Materialmodelle anzuwenden, wurden die etablierten Young's Modulus und Schubmodulus von 32 MPa und 11.5 MPa, beziehungsweise, für weitere Untersuchungen, die vollständig in [1] dargestellt sind.

Subsequently, further results were compared to test results. The comparison of crack pat-

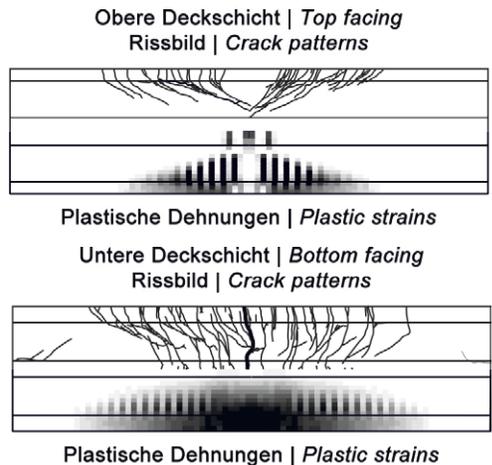


Bild 16: Vergleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse von gefalteten Sandwichbauteilen unter Biegebeanspruchung (4 Litzen, $\sigma_p = 675$ MPa) | **Fig. 16:** Comparison of numerical and experimental results of flexural tests on folded plate sandwich panel (4 strands, $\sigma_p = 675$ MPa)

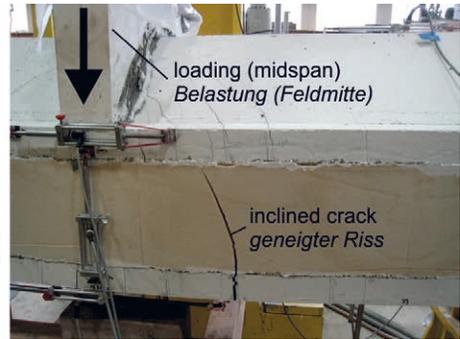
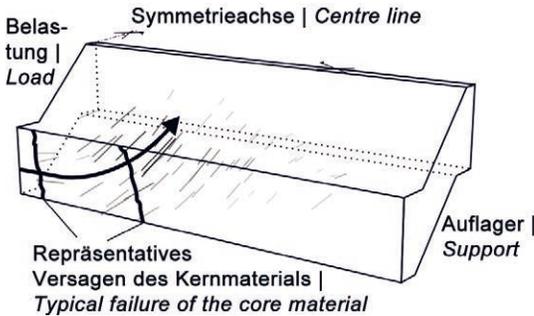


Bild 17: Numerisch ermittelte Hauptzugspannungsrichtungen im Kernmaterial von vorgespannten gefalteten Sandwichelementen (je Deckschicht 4 Litzen, $\sigma_p = 675$ MPa) bei Maximallast (links) und geneigter Riss im Kernmaterial bei Versagen im Versuch | **Fig. 17:** Numerically determined direction of maximum principal tensile stresses in core material of prestressed folded plate sandwich element (4 strands, $\sigma_p = 675$ MPa in top and bottom facing) at maximum load (left) and inclined crack in core material at failure in the test (right)

rials vorhergesagt wurden, entwickelten sich oben und unten in der Kernschicht Bereiche mit plastischen Dehnungen. Die Maximalwerte der Zugspannungen wurden in der Mitte zwischen Auflager und Lasteinleitung ermittelt. Die Richtungen der maximalen Hauptspannungen in der Kernschicht ergaben überwiegend einaxiale Zugspannungen in Feldmitte (Bild 17, links). Aufgrund der Form der Faltwerke waren die Spannungsrichtungen in der Mitte zwischen Lagerung und Lasteinleitung geneigt. Die experimentellen Untersuchungen zeigten ein Versagen im Kernmaterial entweder in Feldmitte oder mittig zwischen Auflager und Lasteinleitung, das hauptsächlich durch Rissbildung der UHPFRC-Deckschichten verursacht wurde (Bild 17, rechts). Die Richtung der maximalen Zugspannungen entsprach den beiden typischen Rissrichtungen.

Der Vergleich von Rissbildern und plastischen Dehnungen für doppelt gekrümmte Sandwichelemente zeigte eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Versuchen (vgl. exemplarisch Bild18).

terns and distributions of plastic strains in the UHPFRC facings shows a good agreement, even though inclined plastic regions were not developed (Fig. 16). This was already the case for UHPFRC single layers.

Even though shear cracks over the height of the core material were not predicted by the numerical model, regions of plastic strains developed at the top and bottom of the core layer. Maximum values of tensile stresses were obtained in the middle between support and loading.

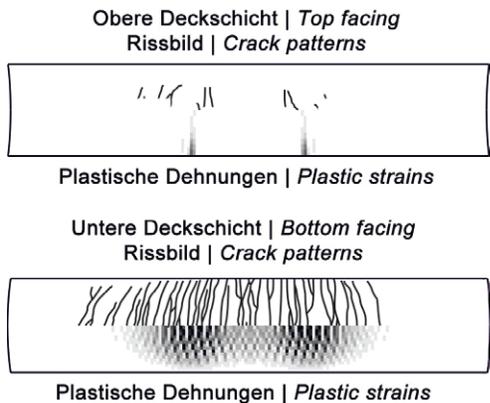


Bild 18: Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen von doppelt gekrümmten Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung (untere Deckschicht: 6 Litzen mit $\sigma_p = 675$ MPa, oben: keine Vorspannung) | **Fig. 18:** Comparison of numerical and experimental results of doubly curved sandwich panel under bending (bottom facing: 6 strands with $\sigma_p = 675$ MPa; no prestressing of top layer)

4 Analytische Modelle

4.1 Allgemeines

Für das Verbundverhalten von CFK-Spanngliedern, das Zug- und Schubtragverhalten von

Sandwichquerschnitten und das Biegetragverhalten von vorgespannten Sandwichelementen mit Betondeckschichten im Zustand II wurden verschiedene analytische Modelle abgeleitet. Für die Herleitung und die vollständigen Modelle wird auf [1] verwiesen. Im Folgenden werden nur das Modell und die wichtigsten Ergebnisse für vorgespannte Sandwichelemente unter Biegebeanspruchung vorgestellt.

Bei Berechnungen von Sandwichelementen mit Stahlbetondeckschichten wird in der Regel der Verbund zwischen Deckschichten und Kernmaterial vernachlässigt und nur die aus Verbindungsmitteln resultierende Sandwichtragwirkung berücksichtigt. Da dieses Verfahren insbesondere bei hoher Verbundfestigkeit (vgl. Abschnitt 2) sehr konservativ und für die genaue Vorhersage von Rissbildung und maximalen Belastungen nicht ausreichend ist, wurde in [1] ein analytischer Ansatz abgeleitet. Das entwickelte Modell basiert auf der Sandwichtheorie von Stamm und Witte [32]. Dieser Ansatz geht von einem linearen Materialverhalten aus. Um die Rissbildung der Spannbetondeckschichten und die rissüberbrückende Wirkung von Fasern in UHPFRC zu berücksichtigen, wurde in [1] ein Modell zur Berechnung theoretischer Momenten-Krümmungs-Beziehungen dieser Werkstoffkombination entwickelt. Mit Hilfe dieser Beziehungen werden Resttragfähigkeit und -steifigkeit pro Belastungsschritt berechnet. Verbindungsmittel wurden durch lineare Federn idealisiert [1]. Die erhöhte Schubsteifigkeit des Kernmaterials von nicht ebenen Profilen wurde aus dem Schubfluss dieser Querschnitte abgeleitet [1], [32].

4.2 Validierung der abgeleiteten Ansätze

In Bild 19 werden die berechneten Last-Verformungs-Beziehungen an den Mittelpunkten (w_m) und den Viertelpunkten ($w_{1/4}$) von ebenen Sandwichbalken (mit CFK-Schubgitter) mit und ohne Vorspannung der CFK-Bewehrung mit den Versuchsergebnissen verglichen. Die prognostizierten Last-Durchbiegungs-Beziehungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen sowohl für vor-

The directions of maximum principal stresses in the core layer show predominant axial tensile stresses at midspan (Fig. 17, left). Due to the shape of folded plates, the stresses were found inclined in the middle between loading and support. The experimental results showed a failure in the core material either close to midspan or in between midspan and support for a core thickness of 200 mm, which was mainly induced due to cracking of the UHPFRC layers (Fig. 17, right). The direction of maximum tensile stresses were in agreement with both typical crack directions (Fig. 17).

The comparison of crack patterns and plastic strains for doubly curved sandwich panels shows a good prediction of cracked regions. In Fig. 18, the comparison is exemplarily shown for a specimen with prestressed bottom facing and reinforced top facing.

4 Analytical models

4.1 Preface

Analytical and engineering models for bond of CFRP prestressing tendons, tensile and shear behaviour of sandwich sections and the flexural behaviour of prestressed sandwich panels with cracked concrete facings were derived. For the derivation and full results of these models, it is referred to [1]. Subsequently, only the procedure and key results for prestressed sandwich panels under flexural loading are shortly presented.

For the design of sandwich panels with RC facings, usually the sandwich action induced by the core material is neglected and only the shear connectors are taken into account. Since this procedure is very conservative, especially for high strength of the bond zone (cp. section 2), and not adequate for the exact prediction of cracking and maximum loads, a calculative approach was derived in [1]. The developed model is based on the sandwich theory by Stamm and Witte [32]. This approach assumes a linear material behaviour. To account for crack-

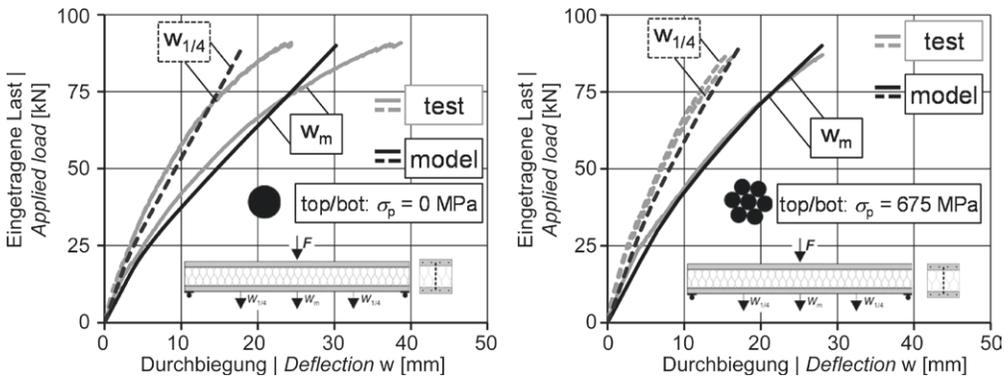


Bild 19: Durchbiegungen w bei ebenen Sandwichquerschnitten ohne (links) und mit (rechts) Vorspannung | Fig. 19: Deflection w of flat sandwich panels with CFRP shear grids without (left) and with (right) prestressed facings

gespannte als auch für nicht vorgespannte Deckschichten.

Die prognostizierten Versagensarten waren ein kombiniertes Versagen der Deckschichten und der Verbundfuge. Durch die hohe Verbundfestigkeit der Verbundfuge versagten die Probekörper bei Verwendung von Schubgittern durch Schubrissbildung des Kernmaterials, die durch die große Relativverschiebung der Deckschichten hervorgerufen wurde. Das Rechenmodell prognostizierte etwa die gleiche Relativverschiebung wie in den Versuchen bei Eintritt des Versagens und bei Erstrissbildung der Deckschichten. Im Bereich der Auflager wurde im Modell Delamination über eine Länge von ca. 250 mm bei maximaler Belastung bestimmt. Weitere Messstellen wurden in [1] validiert.

Zusätzlich wurde das abgeleitete Modell zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von gefalteten Sandwichelementen unter Biegebeanspruchung angewendet. Zur Bestimmung der theoretischen Momenten-Krümmungs-Beziehungen (vgl. [1]) wurde der Faltwerkquerschnitt in einen Querschnitt mit abschnittsweise konstanter Breite, wie beispielsweise einen umgekehrten T-Träger, umgewandelt. In [1] wurde die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Modells gezeigt. Für verschiedene Vorspannkkräfte wurden die Last-Verformungs-Beziehungen in sehr guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen berechnet.

ing of prestressed concrete facings and the crack-bridging effect of fibres in UHPFRC, in [1], a model was developed to calculate theoretical moment-curvature relationships. With aid of this relationships, residual stiffness and rigidity are calculated. For connecting devices it was accounted by linear spring stiffness, which were derived in [1]. The increased shear stiffness of the core material of non-flat sections was derived from the shear flow distribution in the cross-sections [1], [32].

4.2 Validation of derived approaches

In Fig. 19, the calculated load-deflection responses at midspan (w_m) and at quarter points ($w_{1/4}$) of flat sandwich panels with and without pre-tensioning of the CFRP reinforcement are compared to the test results. For these elements, one CFRP shear grid was applied. The predicted load deflection responses are in good agreement with test results for prestressed and non-prestressed facings.

The predicted failure modes were a combined failure of the facings and the bond zone. In case of applied shear grids, test specimens failed due to shear cracks in the core material, which was induced by high relative displacement of the facings, but relatively good bond conditions. The model predicted about the same relative displacement at failure and cracking of the facings. In the vicinity of the supports, debonding

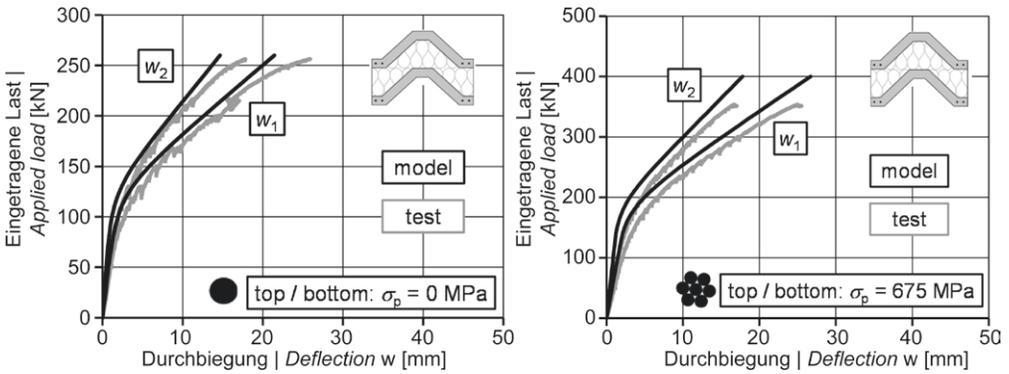


Bild 20: Last-Durchbiegungs-Beziehungen in Feldmitte (w_1) und in den Viertelpunkten (w_2) aus hergeleitetem Modell und Versuchen an gefalteten Sandwichbauteilen mit CFK-Stäben (links) und CFK-Litzen (rechts) | **Fig. 20:** Comparison of the load-deflection response at midspan (w_1) and at quarter points (w_2) of derived model and test data for folded plate sandwich panels with CFRP bars (left) and with CFRP strands (right)

Die Schersteifigkeit A des Kernmaterials wurde basierend auf [1] und [32] berechnet. In Bild 20 ist das ermittelte Last-Durchbiegungs-Verhalten für gefaltete Sandwichelemente ohne Vorspannung und mit Vorspannung der Deckschichten dargestellt. Die Risslasten sowie die Maximallasten wurden in guter Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen in Feldmitte (w_1) und in den Viertelpunkten (w_2) für die Elemente ohne Vorspannung ermittelt. Für das vorgespannte Sandwichelement wurde die Rissbelastung leicht überschätzt. Das Versagen der Elemente wurde durch Risse in den Deckschichten und kleinen Delaminationsbereichen an den Auflagern vorhergesagt. Die Spannungen in der CFK-Bewehrung wurden bis zu 2.600 MPa bestimmt, was in etwa der Bruchfestigkeit der CFK-Litzen entspricht. Für die untersuchten Spannweiten zeigte der Ansatz der Transformation des Faltwerkquerschnitts in einen umgekehrten T-Querschnitt zufriedenstellende Ergebnisse.

Der abgeleitete Berechnungsansatz zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens wurde auch für doppelt gekrümmte Sandwichelemente unter Biegebeanspruchung überprüft. Die Überhöhung in Längsrichtung des doppelt gekrümmten Elements führt zu mathematischen Gleichungen, die in geschlossener Form nicht direkt gelöst werden können. Zusätzlich führt die unterschiedliche Lage der Bewehrung über die Längsrichtung zu unter-

was determined over a length of about 250 mm at maximum load by the model. Further gauges were validated in [1].

Additionally, the proposed model was applied to determine the load bearing behaviour of folded plate sandwich panels under flexural loading. For the determination of theoretical moment-curvature relationships (cp. [1]), the folded plate cross-section was converted in a cross-section with area by area constant width, such as an inverted T-beam. In [1] the applicability of the proposed model was shown. For different pre-tensioning stresses, the load-deflection responses were found in very good agreement. The shear stiffness A of the core material was calculated based on [1] and [32]. In Fig. 20, the determined load-deflection response is shown for folded plate sandwich panels without prestressing and with prestressing of the facings. The cracking loads as well as maximum loads were determined in good agreement with the test results at midspan w_1 and at quarter points w_2 for the panel without prestressing. For the prestressed sandwich panel, the cracking load was slightly overestimated. The failure of the panels was predicted by cracking of the facings and small parts of debonding at the supports. The stresses in CFRP reinforcement were determined up to 2,600 MPa, which is close to the maximum capacity of CFRP strands. For short spans, the approach of transforming the folded plate

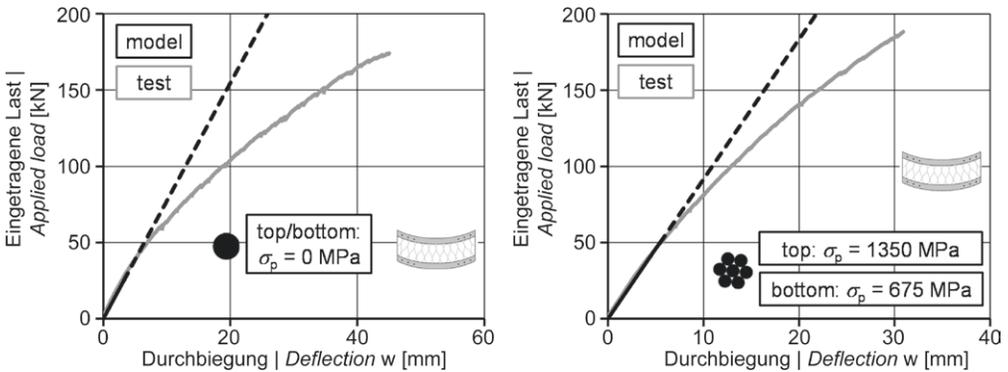


Bild 21: Abgeleitete linear-elastische Last-Durchbiegungs-Beziehungen gekrümmter Sandwichschalen und Versuchsergebnisse von doppelt gekrümmten Sandwichschalen ohne (links) und mit (rechts) Vorspannung | **Fig. 21:** Determined linear-elastic load-deflection response of curved sandwich panels and test results of doubly-curved sandwich panels without (left) and with (right) prestressing

schiedlichen Berechnungsquerschnitten mit z. B. unterschiedlichen Hebelarmen der inneren Kräfte. Da der Hebelarm über die gesamte Länge des Elements variiert, kann kein adäquater Ersatzquerschnitt für einen gemittelten Hebelarm ohne Überhöhung gefunden werden. Für die folgenden Anwendungen des analytischen Modelles wurde die Überhöhung deshalb vereinfachend vernachlässigt.

Wenn man die Sandwichtheorie anwendet, erhält man das linear-elastische Verhalten des Verbundquerschnitts. In Bild 21 ist der Vergleich der Versuchsergebnisse und des berechneten linear-elastischen Verhaltens für Sandwichträger ohne und mit Vorspannung der UHPFRC-Deckschichten dargestellt. Die Vorspannkraft wurde im Schwerpunkt der Deckschichten aufgebracht, was in etwa der resultierenden Position über die Gesamtlänge entspricht.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Berechnungsansatz eine gute Übereinstimmung für den linearen elastischen Bereich erzielt. Risse an den Deckschichten führen nach Erreichen der Zugfestigkeit zu einem nichtlinearen Verhalten. Ansätze zur Berücksichtigung der Rissbildung der UHPFRC-Deckschichten wurden nicht weiter berücksichtigt, da die Vernachlässigung der Überhöhung und die Idealisierung der gekrümmten Form auf einen Querschnitt mit flächenkonstanter Breite zu großen Abweichungen und Fehlern führen würde. Der Berechnungsaufwand

cross-section into an inversed T-beam showed satisfying results.

The proposed approaches to determine the load bearing behaviour of curved sandwich panels under flexural loading were verified. The camber in longitudinal direction of the doubly curved element leads to equations, which cannot be directly solved in closed form. Additionally, the varying position of reinforcement results in different cross-sections over the length, i.e. varying lever arm of inner forces, in case that the concrete tensile strength is taken into account. Since the lever arm varies over the full length of the element, no adequate approach of a mean lever arm for an element without camber can be found. For the following applications of analytical models, the camber in longitudinal direction was neglected.

Applying sandwich theory only, yields the linear elastic behaviour of the section. In Fig. 21, the comparison of test results and calculated linear elastic behaviour is shown for sandwich beams without and with prestressing of the UHPFRC facings. The prestressing force was applied at centroid of the facings, which is roughly the resultant position over the full length.

The results demonstrate, that the approach shows a good agreement for the linear elastic part. Cracking of the facings leads to a non-linear behaviour after reaching the maximum

für die Kombination der Sandwichtheorie mit Rissbildung von gekrümmten Deckschichten ist höher als bei der nichtlinearen Finite-Elemente-Modellierung. Daher wird vorgeschlagen, die abgeleiteten FE-Lösungen zu verwenden, um das Trag- und Verformungsverhalten von doppelt gekrümmten Sandwichelementen zu berechnen.

5 Zusammenfassung

In den beiden dreijährigen Forschungsprojekten HE 2637/16-1 und HE 2637/16-2 wurden vorgespannte Sandwichelemente mit gefalteter und doppelt gekrümmter Geometrie aus Hochleistungsmaterialien untersucht. Schritt für Schritt wurden verschiedene Materialien und die Kombination der Materialien und Komponenten analysiert. Zunächst wurden verschiedene Herstellmethoden erarbeitet. Insbesondere zu nennen sind das Vorspannen von CFK-Bewehrung, das Betonieren von räumlichen Querschnitten und das Fügen der ausgehärteten Deckschichten durch Aufschäumen mit Polyurethan. Verbundversuche an CFK-Bewehrung in HSC und UHPFRC sowie Kleinkörperversuche von Sandwichquerschnitten unter Zug- und Schubbelastung dienten als Grundlage für Untersuchungen an großformatigen Versuchskörpern mit ebenen, gefalteten und doppelt gekrümmten Querschnitten. Für jeden der Untersuchungsschritte wurden numerische und analytische Modelle abgeleitet, um die Lastübertragungsmechanismen weiter zu analysieren sowie Widerstände und zugehörige Verformungen der Sandwichelemente prognostizierbar zu machen.

Als Ergebnis wurde eine effiziente Methode zur Herstellung und Analyse von räumlichen Sandwichelementen vorgeschlagen. Die durch den Herstellprozess erzielte hohe Verbundqualität in Kombination mit erhöhten Tragfähigkeiten von räumlich geformten und vorgespannten Deckschichten ermöglicht weit spannende Dachkonstruktionen mit multifunktionalen Eigenschaften.

tensile strength. Approaches to account for cracking of UHPFRC facings during the analysis were not further considered, since neglecting of camber and idealisation of curved shape to a cross-section with area by area constant width would result in high error. The effort to combine sandwich theory with cracking of curved cross-sections is higher than using non-linear finite element modelling. Hence, it is proposed to use the derived finite element solutions to predict the overall structural performance of doubly curved sandwich panels.

5 Summary and conclusions

In the two three-year projects (HE 2637/16-1, HE 2637/16-2), prestressed sandwich panels with folded plate and doubly curved geometry made of high performance materials were investigated. Step-by-step, different materials and the interaction of materials and components were analysed. First of all, different production methods had to be developed. In particular, prestressing of CFRP, casting of spatially shaped cross-sections and joining the hardened facings to sandwich panels by foaming in pack with polyurethane. Bond tests of CFRP in HSC and UHPFRC as well as small-scale tests of sandwich sections under tensile and shear loading served as basis for investigations on large-scale specimens with flat, folded and doubly curved cross-sections. For each of the investigations steps, numerical and analytical models were developed to further analyse load transfer mechanisms and make loads and deformations of the sandwich panels predictable.

It can be concluded that an efficient method to establish and analyse load-bearing sandwich panels was proposed. The high bond quality achieved by the production process in combination with increased load capacities of spatially shaped and prestressed facings can lead to long-span roof structures that feature multifunctional properties.

In dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft für zwei Jahre geförderten Transferprojekt HE 2637/29-1 werden die Produktionsmethoden und verschiedenen konzeptionellen Ansätze in Zusammenarbeit mit Industriepartnern weiter untersucht, s. S. 714 ff. Es wird erwartet, dass mit diesem Projekt ein bau-praktischer Hintergrund für multifunktionale Sandwichelemente geschaffen wird.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198063016 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2017
- [2] Stark, A.; Kueres, D.; Hegger, J.: Sandwichelemente mit UHPC-Deckschichten und geschäumten PUR-Kernschichten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), S. 816–827
- [3] Shams, A.; Stark, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichelementen mit Betondeckschichten und geschäumten Polyurethan-Kernschichten. Bauingenieur (2013) 10, S. 412–419
- [4] Shams, A.; Stark, A.; Hoogen, F.; Hegger, J.; Schneider, H.: Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. Composite Structures 121 (2015), S. 271–279
- [5] DIN EN 206-1:2001-07: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000.
- [6] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005.
- [7] DIN EN 12350-2:2009-08: Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß; Deutsche Fassung EN 12350-2:2009.
- [8] DIN EN 12350-8:2010-12: Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch; Deutsche Fassung EN 12350-8:2010.
- [9] DIN EN 826:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 826:2013.

The production methods and different conceptual designs are further investigated in collaboration with industrial partners (precast plant, chemical company and CFRP producer) in the transfer project HE 2637/29-1 funded by the German Research Foundation for a duration of two years (compare p. 714 in this book). It is expected to provide a practical background for the multifunctional elements with this project.

Acknowledgement

The authors thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (no. 198063016) within the Priority Programme SPP 1542.

- [10] DIN EN 14509:2013-12: Selbsttragende Sandwich-Elemente mit beidseitigen Metalldeckschichten – Werkmäßig hergestellte Produkte – Spezifikationen; Deutsche Fassung EN 14509:2013.
- [11] DIN EN 12090:2013-06: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung des Verhaltens bei Scherbeanspruchung; Deutsche Fassung EN 12090:2013.
- [12] DIN EN 1607:2013-05: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen – Bestimmung der Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene; Deutsche Fassung EN 1607:2013.
- [13] Stark, A.; Hegger, J.: Sandwichkonstruktionen mit dünnen Betondeckschichten. 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. 83–93
- [14] Stark, A.; Classen, M.; Knorrek, C.; Camps, B.; Hegger, J.: Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. Structural Concrete 19 (2018) 6, S. 1851–1961 – DOI: 10.1002/suco.201700288
- [15] American Concrete Institute (ACI, Hrsg.): ACI 440.4R-04: Prestressing concrete Structures with FRP Tendons. 2004 (2011)
- [16] Shams, A.: A Novel Approach for the Production and Design of Load-carrying Sandwich Panels with Reinforced Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2015
- [17] Stark, A.; Hegger, J.: Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 10, S. 701–710

- [18] Stark, A.; Perse, S.; Hegger, J.: Test on the Transfer Length of CFRP Tendons in UHPC. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – Proc. of HiPerMat 2016, 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, 2016, Book of Abstracts: S. 129–130, Langfassung auf CD-ROM
- [19] Int. Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM, Hrsg.): RC 6 TC9-RC: Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test. 1973, 2. Aufl. 1983
- [20] Bertram, G.: Zum Verbund- und Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern aus ultra-hochfestem Beton. Diss., RWTH Aachen University, 2012
- [21] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt, Hrsg.): Richtlinie für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund. 1980
- [22] Shams, A.; Horstmann, M.; Hegger, J.: Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections. *Composite Structures* 118 (2014), S. 643–653
- [23] Abaqus 6.14: Documentation. Dassault Systemes Simulia Corporation, 2014
- [24] Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Onate, E.: A plastic-damage model for concrete. *Int. Journal of solids and structures* 25 (1989) 3, S. 299–326
- [25] Lee, J.; Fenves, G.: Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of engineering mechanics* 124 (1998) 8, S. 892–900
- [26] Hillerborg, A.; Modéer, M.; Petersson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research* 6 (1976) 6, S. 773–781
- [27] Sargin, M.: Stress-strain relationships for concrete and the analysis of structural concrete sections. Buchreihe Solid Mechanics Division, University of Waterloo (Kanada), 1971
- [28] Fehling, E.; Schmidt, M.; Teichmann, T.; Bunje, K.; Bornemann, R.; Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultra-hochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Universität Kassel, 2005
- [29] Speck, K.: Beton unter mehraxialer Beanspruchung – Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung. Diss., TU Dresden, 2007
- [30] Kueres, D.; Stark, A.; Herbrand, M.; Classen, M.: Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell – Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC. *Bauingenieur* 90 (2015), S. 252–264
- [31] Horstmann, M.: Zum Tragverhalten von Sandwichkonstruktionen aus textildbewehrtem Beton. Diss., RWTH Aachen University, 2010
- [32] CEB-FIP fib Bulletin 40: FRP Reinforcement for RC Structures. Technical Report on the Design and Use of Fibre Reinforced Polymer Reinforcement (FRP) for Reinforced Concrete Structures. 2007
- [33] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen – Berechnung, Fertigung, Ausführung. Wien · New York: Springer, 1974

Bildnachweise | Picture credits

Alle Bilder: Alexander Stark, Bilder 1–4, 6–21: [1], Bild 5: [3]; zumeist gegenüber der Originalquelle modifiziert. | All figures: Alexander Stark, pictures 1–4, 6–21: compare [1], picture 5: [3]; mostly modified compared to the original version.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Sandwichkonstruktionen aus dünnen gefalteten und gekrümmten Betondeckschichten

Sandwich constructions with thin folded and curved concrete layers

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger Professor und Institutsleiter Professor and head of institute
DFG-Geschäftszeichen DFG reference number:	HE 2637/16-1/2 (Projektnummer Project number: 198063016)
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80-25170 jhegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period:	Reporting/funding period: 07/2011–06/2017
Team Team:	Alexander Stark

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Stark, A.; Hegger, J.: Sandwich panels with thin folded and curved concrete layers. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proc. of the 9th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 22.–25.07.2012 am Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe: KIT Scientific Publ., 2012, S. 257–262
- Stark, A.; Hegger, J.: Bond behaviour of pre-tensioned CFRP tendons in UHPFRC. In: Barros J.; Sena-Cruz, J. (Hrsg.): 11th Int. Symp. on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures, 26.–28.06.2013 in Guimarães (Portugal), 2013, S. 125–126 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 8 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: Development of CFRP pre-tensioned folded and curved shells made of UHPFRC. In: Obrebski, J.; Tarczewski, R. (Hrsg.): Beyond the limits of man – Proc. of IASS Symp. 2013, 23.–27.09.2013 in Breslau (Wrocław, Polen), 2013, S. 343 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 6 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: CFRP Tendons in UHPFRC – Bond Behaviour and Application to Folded and Curved Shells. In: Toutlemonde, F.; Resplendino, J. (Hrsg.): Proc. of 2nd Int. Symp. on UHPFRC (UHPFRC'2013), 01.–03.10.2013 in Marseille (Frankreich), 2013, S. 335–342
- Stark, A.; Hegger, J.: Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 10, S. 701–710
- Stark, A.; Shams, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichelementen mit Betondeckschichten und geschäumten Polyurethan-Kernschichten. Bauingenieur 88 (2013) 10, S. 412–419
- Stark, A.; Perse, S.: Innovative Sandwichkonstruktionen mit UHPC-Deckschichten. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DafStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 an der Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 71–76
- Hegger, J.; Chudoba, R.; Stark, A.; van der Woerd, J. D.: Leicht Bauen mit Beton – Origami-basierte Falwerke und vorgespannte Sandwich-Schalenträger | Concrete light – Origami-based folded structures and prestressed sandwich shell beams. BFT international 80 (2014) 2, S. 27–29 – Smart Concretes = Intelligente Betone – Proc. der 58. Ulmer Betontage, 18.–20.02.2014 in Neu-Ulm
- Stark, A.; Hegger, J.: Development of CFRP Pre-tensioned Sandwich Panels with Concrete Facings. In: El-Hacha, R. (Hrsg.): Proc. of CICE 2014 – 7th Int. Conf. on FRP in Civil Engineering, 20.–22.08.2014 in Vancouver (Kanada), 2014, S. 210 (Kurzfassung), Langfassung auf CD-Rom: 6 S.
- Stark, A.; Hegger, J.: Sandwichkonstruktionen mit dünnen Betondeckschichten. 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. 82–93
- Horstmann, M.; Shams, A.; Stark, A.: Sandwichkonstruktionen aus Textilbeton. In: Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen (Hrsg.): Massivbau im Wandel – Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger, 2014, S. 603–614

- Chudoba, R.; Hegger, J.; Scholzen, A.; Sharei, E.; Stark, A.; Will, N.; van der Woerd, J.: Die Leichtigkeit des Betons – Dünnwandige Schalentragwerke aus hochleistungsfähigen zementartigen Verbundwerkstoffen. RWTH Themen – Bauingenieurwesen (2015) 2, S. 42–45
- Shams, A.; Stark, A.; Hoogen, F.; Hegger, J.; Schneider, H.: Innovative sandwich structures made of high performance concrete and foamed polyurethane. Composite Structures 121 (2015) 3, S. 271–279 – DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.11.026
- Kueres, D.; Stark, A.; Herbrand, M.; Classen, M.: Numerische Abbildung von Beton mit einem plastischen Schädigungsmodell – Grundlegende Untersuchungen zu Normalbeton und UHPC. Bauingenieur 90 (2015) 6, S. 252–264
- Hegger, J.; Herbrand, M.; Stark, A.; Classen, M.: Betonbau der Zukunft: leicht, filigran und nachhaltig. Bauingenieur 90 (2015) 7/8, S. 337–344
- Hegger, J.; Chudoba, R.; Will, N.; Classen, C.; Rempel, S.; Stark, A.; van der Woerd, J.: Bauen mit Betonfertigteilen. RWTH Themen – Production Engineering (2016) 1, S. 26–31
- Herbrand, M.; Kueres, D.; Stark, A.; Classen, M.: Numerische Simulation von balken- und plattenförmigen Bauteilen aus Stahlbeton und UHPC mit einem plastischen Schädigungsmodell. Bauingenieur 91 (2016) 2, S. 46–56
- Stark, A.; Classen, M.: Prestressed Sandwich Beams with UHPC Layers. In: Proc. of 1st Int. Interactive Symp. on UHPC, 18.–20.07.2016 in Des Moines (Iowa, USA), 2016, publ. auf USB-Stick: 10 S. – <http://dx.doi.org/10.21838/uhpc.2016.17>
- Stark, A.; Perse, S.; Hegger, J.: Test on the Transfer Length of CFRP Tendons in UHPC. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of HiPerMat 2016, 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, Kassel: kassel university press, 2016, S. 129–130 (Kurzfassung), Langfassung auf USB-Stick: 8 S.
- Stark, A.; Kueres, D.; Hegger, J.: Sandwichelemente mit UHPC-Deckschichten und geschäumten PUR-Kernschichten. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 12, S. 816–827
- Kueres, S.; Stark, A. P.; Will, N.; Hegger, J.: Development of a modular footbridge system with pre-tensioned CFRP reinforcement. In: Sriharan, S.; Graybeal, B.; Wille, K. (Hrsg.): Engineering the Future – Proc. of 39th IABSE Symp., 21.–23.09.2017 in Vancouver (Kanada), 2017
- Hegger, J.; Curbach, M.; Stark, A.; Wilhelm, S.; Farwig, K.: Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures. Structural Concrete 19 (2018), S. 637–646 – DOI: 10.1002/suco.201700157
- Stark, A.; Classen, M.; Knorrek, C.; Camps, B.; Hegger, J.: Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. Structural Concrete 19 (2018) 6, S. 1851–1861 – <https://doi.org/10.1002/suco.201700288>
- Stark, A.; Classen, M.; Hegger, J.: Bond Behaviour of CFRP Tendons in UHPFRC. Engineering Structures 178 (2019) 1, S. 148–161 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.10.002

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

Dissertation | Dissertation

- Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. 2017

Bachelorarbeiten | Bachelor's Theses

- Richter, P.: Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichträgern. 2014
- Berwing, J.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Sandwichkonstruktionen mit Betondeckschichten. 2015
- Jung, V.: Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichschalenträgern. 2017

Matarbeiten | Master's Theses

- Perse, S.: Experimentelle und theoretische Verbunduntersuchungen an Sandwichkonstruktionen aus UHPC und PUR. 2013
- Dawo, P.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von mit CFK vorgespannten Sandwichträgern aus UHPC und PUR. 2015
- Petzold, S.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Bauteilen aus Hochleistungs Beton mit CFK-Bewehrungen. 2015

- Knorrek, C.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Sandwich-Schalenträgern aus UHPC und PUR mit Vorspannung aus CFK. 2016
- Camps, B.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespannten Sandwichträgern mit UHPC-Deckschichten. 2017

Folgeprojekt | Follow-up project

- Gefaltete und gekrümmte Sandwichbauteile aus Hochleistungswerkstoffen für weitgespannte Dachelemente | Folded and curved sandwich panels made of high performance materials for long-span roof construction

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Erkenntnistransfer-Projekt Knowledge Transfer Project
Laufzeit Period:	11/2017–10/2019

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Organisation und Ausrichtung des Treffens der SPP-Arbeitsgruppe „Modellierung“ in Aachen am 22.04.2015 | Organisation of the meeting of the SPP work group “Modelling” in Aachen, 22.04.2015
- Organisation und Ausrichtung des 6. Jahrestreffens des SPP 1542 in Aachen, 04.–06.10.2016 | Organisation of the annual meeting of SPP 1542, 04.–06.10.2016 in Aachen