

ANSCHLUSSPROJEKTE

Weitspannende Sandwichelemente mit vorge- spannten Deckschichten aus Carbonbeton | Wide-span sandwich elements with prestressed facings made of carbon reinforced concrete

► Ann-Christine von der Heid, Norbert Will, Josef Hegger

► Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen University

Sandwichelemente mit Betondeckschichten besitzen gute bauphysikalische Eigenschaften, einen hohen Vorfertigungsgrad, geringe Montagezeiten und eine gute architektonische Gestaltbarkeit. Werden die Deckschichten mit einer Betonstahlbewehrung ausgeführt, ergibt sich ihre Dicke aufgrund der in EC 2 [1] geforderten Mindestbetondeckung zum Korrosionsschutz der Bewehrung zu etwa 80 mm [2]. Weiterhin wird bei der Bemessung von Stahlbetonsandwichelementen die Verbundtragwirkungen zwischen den einzelnen Schichten nicht angesetzt, sodass das volle Potenzial der Sandwichbauweise bei Stahlbetonsandwichelementen nicht ausgeschöpft wird. Das Forschungsvorhaben beschäftigte sich daher, aufbauend auf den Ergebnissen aus den Projekten HE 2637/16-1 und HE 2637/16-2 [3], s. S.356 ff., mit der praxisnahen Umsetzung von weitspannenden Sandwichelementen mit dünnen Deckschichten unter Ausnutzung der Sandwichtragwirkung. Ein analytisches Berechnungsmodell, das im Zuge des Vorhabens entwickelt wurde, berücksichtigt die Verbundtragwirkung zwischen den einzelnen Schichten und kann das Trag- und Verformungsverhalten zutreffend abbilden.

Das ursprüngliche Projektziel waren Entwicklung und Herstellung von weitspannenden Dachelementen mit doppelt gekrümmter oder gefalteter Geometrie. Nach Rücksprache mit verschiedenen Fertigteilwerken wurde jedoch ein deutlich größeres Interesse an ebenen Strukturen bekundet, um die Elemente flexibel als Dach- oder auch als Fassadenelemente einzusetzen. Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde daher im Projektverlauf mit der Herstel-

Sandwich elements with concrete facings have excellent physical properties, a high level of prefabrication, short assembly times and various architectural design options. The facings are usually produced with steel reinforcement, which leads to a thickness of about 80 mm due to the minimum concrete cover required in EC 2 [1] for corrosion protection of the reinforcement [2]. Furthermore, the bond between the single layers are not taken into account in the design of sandwich elements, so that the full potential of sandwich constructions with reinforced concrete facings is not completely exhausted. Based on the projects HE 2637/16-1 and HE 2637/16-2 [3], see page 356 et seq., the focus of the transfer project was set on wide-span sandwich elements with thin facings made of carbon reinforced concrete and their practical production. An analytical model, which was developed during the project term, takes into account the bond between the single layers and can accurately represent the load-bearing and deformation behaviour of the novel sandwich elements.

The first project aim was the development and production of wide-span roof elements with double-curved or folded geometry. However, after consulting various precast factories, a much greater interest was expressed in flat structures in order to use the elements flexibly as roof or façade elements. Hence, the aim of the research project was adjusted during the project term and the focus was set on the production of elements with plane geometry.

For the production of the thin concrete facings, a non-metallic reinforcement made of carbon fi-

lung von Elementen mit ebener Geometrie angepasst.

Zur Herstellung der dünnen Deckschichten wird anstelle einer konventionellen Betonstahlbewehrung eine nichtmetallische Bewehrung aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) verwendet (Bild 1). Während ebene maschenartige Bewehrungsgitter aus CFK ein fein verteiltes Rissbild im Zustand II sicherstellen, vergrößert die Vorspannung der Deckschichten mit Litzen aus CFK die Biegeschlankheit der Elemente und verringert das Risiko einer Rissbildung im Gebrauchszustand. Die beiden Deckschichten aus hochfestem Beton werden durch einen Kern aus Zwei-Komponenten-Polyurethan (PUR) verbunden, der einen gleichmäßig guten Verbund zwischen den einzelnen Schichten sicherstellt. Zusätzlich wurden auch linienförmige Verbindungsmittel aus alkaliresistentem Glas (Bild 2) verwendet, um deren Auswirkung auf die Sandwichtragwirkung zu untersuchen.

Die in Bild 1 dargestellte Dicke der Deckschicht von 6 cm ergibt sich aus der erforderlichen Mindestbetondeckung der Bewehrungselemente, die zum einen für eine rissfreie Spannkrafteinleitung der CFK-Litzen und zum anderen für die Kraftübertragung in den Übergreifungsstößen der Bewehrungsgitter notwendig ist. Dafür wurden Spannkrafteinleitungsversuche und Dehnkörperversuche durchgeführt. Das Verbundverhalten der CFK-Litzen für die Anwendung der Vorspannung mit sofortigem Verbund wurde

bre reinforced plastic (CFRP) was used instead of conventional steel reinforcement (Fig. 1). While plane mesh-shaped reinforcement grids made of CFRP ensure a finely distributed crack pattern, the prestressing of the facings with strands made of CFRP increases the span of the elements and reduces their deformation. The two facings made of high-strength concrete are connected by a core of two-component polyurethane (PU), which ensures a uniformly good bond between the single layers. In addition, linear connecting devices made of alkali-resistant glass (Fig. 2) were also used to investigate their impact on the sandwich effect.

The thickness of the facings of 6 cm shown in Fig. 1 results from the required minimum concrete cover of the reinforcement elements. On the one hand, the concrete cover is necessary for a crack-free transmission zone of the CFRP strands and on the other hand for force transmission in the lap joints of the reinforcement grids. For this purpose, tests on the transfer length and uniaxial tensile tests were conducted. The bond behaviour of the pretensioned CFRP strands was investigated in pull-out tests with different degrees of prestressing in order to

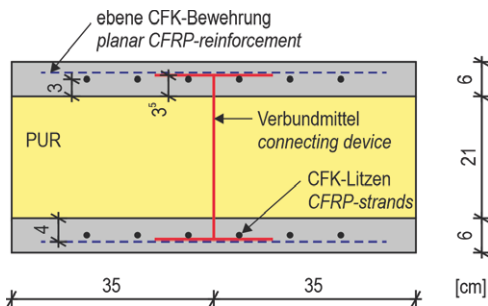


Bild 1: Untersuchte Sandwichelemente – exemplarischer Querschnitt eines großformatigen Versuchskörpers | **Fig. 1:** Sandwich panels investigated – exemplary cross section of a large-sized specimen | © IMB der RWTH Aachen

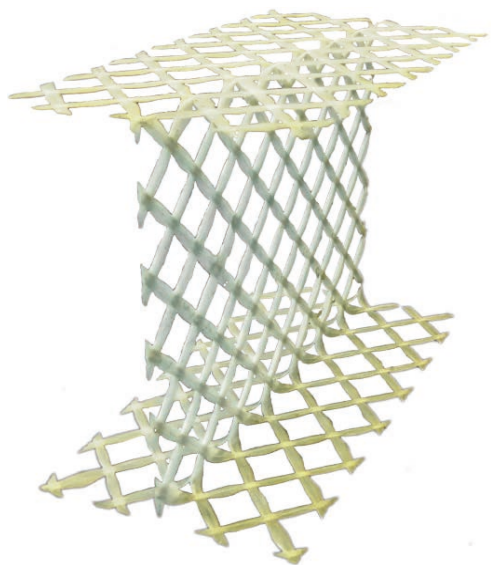


Bild 2: Verwendetes Verbundmittel | **Fig. 2:** Connection device used | © IMB der RWTH Aachen, s. a. [3], [5]

in Pull-out-Versuchen mit unterschiedlichen Vorspanngraden untersucht, um den günstigen Einfluss des Hoyer-Effekts zu bestimmen. Experimentelle Untersuchungen an kleinformatigen Sandwichelementen gaben Aufschluss über das Zug- und Schubverhalten des Polyurethans und der Verbundmittel. Die Ergebnisse der kleinformatigen Versuche [4] dienten im weiteren Projektverlauf der Vorbemessung von großformatigen Elementen unter Biegebeanspruchungen sowie als Eingangsparameter für die numerischen und analytischen Modelle.

Konventionelle Herstellungsmethoden, wie das Positiv- oder Negativverfahren, können für Sandwichelemente mit einem geschäumten Kern nicht angewendet werden. Daher wurde ein neuartiges Verfahren entwickelt, bei dem zunächst die Deckschichten auf der langen Seite stehend simultan vorgespannt und betoniert werden. Die stehende Position der Elemente ermöglicht im nächsten Schritt das Eingießen des flüssigen PUR-Dämmstoffs zwischen die bereits erhärteten und vorgespannten Betonschalen. Um den bei der Expansion des PUR entstehenden Druck aufnehmen zu können, werden die Deckschichten mit einer biegesteifen und verformungsarmen Schalung umschlossen. Die neuartige Fertigungsmethode wurde durch die Herstellung von vier großformatigen Elementen mit Abmessungen von $8,2 \times 0,7 \times 0,33$ m validiert. Anschließend wurden in Vier- und Drei-Punkt-Biegeversuchen das Tragverhalten untersucht. Bild 3 zeigt beispielhaft das Querkraftversagen eines Trägers mit einer Verbundmittelreihe. Eine genauere Beschreibung des Herstellungsverfahrens und der Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeversuche finden sich in [5] und [6]. Die im Projekt hergeleiteten analytischen

measure the positive influence of the Hoyer effect. With tests on small-scale sandwich elements the tensile and shear behaviour of the polyurethane and the connecting devices could be determined. The results of small-scale tests [4] were used in the further project term for the preliminary design of large-scale elements under bending loads and as input parameters for the numerical and analytical models.

Conventional manufacturing methods, such as the face-up or face-down method, cannot be used for sandwich elements with a foamed core. Therefore, a novel method was developed where the facings are simultaneously concreted and prestressed standing on the longitudinal side. This position of the elements allows the pouring of the liquid PUR between the already hardened and prestressed concrete facings. To absorb the pressure of the expanding PU, the facings are enclosed with a braced wooden formwork. The novel manufacturing method was validated by producing four large-sized elements with dimensions of $8.2 \times 0.7 \times 0.33$ m³. Subsequently, the load-bearing behaviour was investigated in four- and three-point bending tests. Fig. 3 shows an example of the shear failure of a beam with one connecting device. A more detailed description of the manufacturing process and the results of the four-point bending tests can be found in [5] and [6]. The analytical models derived in the project for the calculation of the load-bearing and deformation behaviour were finally validated using the large-scale tests and FE simulations.

The large-sized sandwich elements with prestressed, filigree concrete facings developed in the transfer project impressively demonstrate the great potential of this construction method,



Bild 3: Versagen eines Versuchskörpers im Vier-Punkt-Biegeversuch | **Fig. 3:** Failure of a test specimen in a four-point bending test | © IMB der RWTH Aachen

Modelle zur Berechnung des Trag- und Verformungsverhaltens wurden abschließend anhand der großformatigen Versuche und FE-Simulationen validiert.

Die im Transferprojekt entwickelten großformatigen Sandwichelemente mit vorgespannten, filigranen Betondeckschichten belegen eindrucksvoll das große Potenzial dieser Bauweise, die gleichermaßen für schlanke Fassaden- und Dachelemente mit großer Tragfähigkeit hervorragend geeignet ist. Bei der Materialauswahl und Herstellung der Elemente stand eine möglichst praxisnahe Herstellung im Vordergrund. Für die Etablierung in der Baupraxis sollte der Fokus auf einer optimierten Fertigung liegen, wie sie beispielsweise durch Wendeanlagen mit Stahlschalungen möglich ist.

which is suitable for slender façade and roof elements with great load-bearing capacity. The materials and the production method were chosen for a practical application. For the establishment in building practice, the focus should be set on an optimised production in further investigations, for example with rotation devices and steel formwork.

Literatur | References

- [1] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 +AC:2010.
- [2] Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V. (FDB e.V., Hrsg.): Merkblatt Nr. 3 zur Planung vorgefertigter Stahlbetonfassaden (11/2016). Bonn, 2016
- [3] Stark, A.: Analysis of Prestressed Sandwich Panels with Ultra-High Performance Concrete Facings. Diss., RWTH Aachen University, 2017
- [4] von der Heid, A.; Bosbach, S.; Stark, A.; Schulze-Ardey, J. P.; Hegger, J.: Thin Sandwich Elements Prestressed with CFRP Tendons. In: Ilki, A.; Ispir, M.; Inci, P. (Hrsg.): Proc. of 10th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020), 30.06.–02.07.2021 in Istanbul (Türkei), S. 351–362
- [5] von der Heid, A.; Bosbach, S.; Hegger, J.: Production and performance of sandwich elements with textile reinforced facings prestressed with CFRP. In: Zhao, B.; Lu, X. (Hrsg.): Concrete Structures for Resilient Society – Proc. of fib Symp. 2020, 22.–24.09.2020 in Shanghai (China; digitale Veranstaltung), 2020, S. 248–255
- [6] von der Heid, A.; Stark, A.; Will, N.; Hegger, J.: Weit-spannende Sandwichelemente mit vorgespannten Textilbetondeckschichten und geschäumtem PUR-Kern. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 7, S. 498–507 – DOI: 10.1002/best.202100023

Projektdate | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Gefaltete und gekrümte Sandwichbauteile aus Hochleistungswerkstoffen für weitgespannte Dachelemente

Folded-plate and curved sandwich panels made of high performance materials for long-span roof elements

Antragsteller Applicant:	Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Adresse Address:	RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
Kontakt Contact:	+49 241 80 25170 hegger@imb.rwth-aachen.de www.imb.rwth-aachen.de
Förderer Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum Funding period:	01.11.2017–31.10.2019 Kostenneutrale Verlängerung bis Cost-neutral extension up to: 31.10.2020
Team Team:	Ann-Christine von der Heid Norbert Will
Partner Partners:	BASF Construction Chemicals GmbH, Mannheim BASF Polyurethanes GmbH, Boxel (Niederlande) FTA Forschungsgesellschaft für Textiltechnik Albstadt mbH (Groz-Beckert KG), Albstadt

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- von der Heid, A.; Stark, A.; Hegger, J.; Schmidt, M.; Bielak, J.: Production and structural performance of thin doubly curved elements prestressed with CFRP tendons. In: Int. Institute for FRP in Construction (Hrsg.): Proc. of Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures 14 – FRPRCS 14, 04.–07.06.2019 in Belfast (Irland), 2019 (digitaler Tagungsband)
- von der Heid, A.; Stark, A.; Hegger, J.: Doppelt gekrümmte Sandwichelemente mit Deckschichten aus vorgespanntem Carbonbeton. In: C³ – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 11. Carbon- und Textilbetontage 2019, 24./25.09.2019 in Dresden, 2019, S. 74/75
- von der Heid, A.; Bosbach, S.; Hegger, J.: Production and performance of sandwich elements with textile reinforced facings prestressed with CFRP. In: Zhao, B.; Lu, X. (Hrsg.): Concrete Structures for Resilient Society – Proc. of fib Symp. 2020, 22.–24.09.2020 in Shanghai (China; digitale Veranstaltung), 2020, S. 248–255
- von der Heid, A.; Stark, A.; Will, N.; Hegger, J.: Weitspannende Sandwichelemente mit vorgespannten Textilbetondeckschichten und geschäumtem PUR-Kern. Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021) 7, S. 498–507 – DOI: 10.1002/best.202100023
- von der Heid, A.; Bosbach, S.; Stark, A.; Schulze-Ardey, J. P.; Hegger, J.: Thin Sandwich Elements Prestressed with CFRP Tendons. In: Ilki, A.; Ispir, M.; Inci, P. (Hrsg.): Proc. of 10th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2020), 30.06.–02.07.2021 in Istanbul (Türkei), S. 351–362
- von der Heid, A.: Zum Tragverhalten von Sandwichelementen aus Textilbeton mit schlaff bewehrten und vorgespannten Deckschichten. Diss., 2021