

Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton

Vorgespannte dünnwandige Bauteile aus Beton, Falwerke oder Schalenelemente, waren früher als Fertigteil wegen ihrer Leichtigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ästhetik weit verbreitet. Heute sind solche Tragwerke im Bauwesen quasi von der Bildfläche verschwunden. Ein Grund dafür waren Schadensfälle, die oft auf Bewehrungskorrosion durch zu geringe Betondeckung zurückzuführen sind. Für eine Renaissance dieser eleganten Bauteile sind korrosionsbeständige Bewehrungen erforderlich, beispielsweise aus Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK oder kurz Carbon). Carbonbewehrungen eignen sich wegen ihrer hohen Zugfestigkeit besonders als Vorspannelemente. Wird Carbonbewehrung in Form von Gelegen ausgeführt, erlauben die geringen Faserstrangdurchmesser minimale Betondeckungen für den erforderlichen Verbund und eine gleichmäßige Krafteinleitung in den Beton. Dadurch können mit Carbon und Beton (Carbonbeton) werkstoffgerechte Bauteile entstehen, die leicht, dauerhaft und wegen geringen Materialverbrauchs nachhaltig sind. In diesem Artikel werden vorgespannte dünnwandige Bauteile aus Carbonbeton sowie ein Vorschlag für die Sicherstellung einer ausreichenden Versagensankündigung behandelt. Fertigteile mit verschiedenen Bauteilgeometrien, von einfachen Plattenstreifen bis hin zu doppelt gekrümmten Schalenelementen, die theoretisch und experimentell untersucht wurden, werden vorgestellt.

Stichworte Beton; Carbon; Carbonbeton; dünnwandiges Fertigteil; Vorspannung

1 Allgemeines

Bauen ohne Beton ist praktisch nicht möglich, aber ein sparsamer und ressourcenschonender Umgang mit diesem Werkstoff ist dringend nötig. Die Zuschlagstoffe Kies und Sand drohen nämlich zu erschöpfen, und die Zementherstellung ist für rund 8% der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich [1]. Der hier vorgeschlagene Lösungsansatz ist die Verwendung von vorgespanntem Carbonbeton für leichte dünnwandige Bauteile im Hochbau, insbesondere für Decken- und Dachelemente. Dafür wird eine Idee für einen Bemessungsansatz vorgestellt, der durch eine ausreichende Verformungsankündigung das spröde Materialversagen von Carbon berücksichtigt.

Carbonbeton ist eine Weiterentwicklung des Stahlbetons, bei der der korrosionsanfällige Bewehrungs- und Spannstahl durch den zugfesteren und nicht korrodierenden Werkstoff Carbon in Form von Gelegen, geraden Stäben, gekrümmten Bügeln und Litzen oder Lamellen (Bändern)

Thin-Walled Precast Elements Prestressed with CFRP

Prestressed thin walled concrete structures, folded slabs or shell elements, used to be widely used as precast elements because of their lightness, economy and aesthetics. Today, such structures have virtually disappeared from the construction industry. One reason for this was damage, often due to reinforcement corrosion caused by insufficient concrete cover. For a renaissance of these elegant components, corrosion-resistant reinforcements are required, for example made of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP, or carbon for short). CFRP reinforcement is particularly suitable for prestressing owing to its high tensile strength. If CFRP reinforcement is designed in the form of textiles, the low thickness of the fibre strands allows for reduced concrete cover for the required bond and an uniform force distribution into the concrete. As a result, CFRP and concrete (CFRP reinforced concrete) can be used to create structural elements that are material efficient and are lightweight, durable and sustainable due to low material consumption. This article deals with thin-walled precast elements prestressed with CFRP as well as a proposal for ensuring sufficient failure warning. Precast elements with different geometries, from simple slabs to double-curved shell elements, which have been investigated theoretically and experimentally, are presented.

Keywords concrete; CFRP; carbon reinforced concrete; thin-walled precast element; prestressing

ersetzt wird. Da die Betondeckung somit nur für den Verbund und nicht als Korrosionsschutz benötigt wird, können Bauteilquerschnitte schlanker und folglich ressourcenschonender ausgeführt werden. Mit korrosionsresistenter Bewehrung und geringer Betondeckung werden leichte dünnwandige Bauteile aus Beton, Falwerke und Schalen wieder möglich [2, 3]. Durch konsequentes Befolgen der Prinzipien des Leichtbaus [4] lassen sich so Decken und Dächer mit radikal reduziertem Betongewicht bauen. Im Vergleich zu einer massiven Flachdecke lassen sich mit einem Querschnitt wie später im Bild 14 gezeigt bis zu 80% Beton sparen.

Tragwerke aus Carbonbeton sind besonders dann wirtschaftlich, wenn die Carbonbewehrung zum Vorspannen des Betons genutzt werden kann. Die Vorspannung reduziert die Verformung der schlanken, carbonbewehrten Betonelemente und führt somit auch zu reduzierten Rissbreiten. Bei vorgespannten Bauteilen können Risse sogar vollständig vermieden werden. Besonders im Fassaden-



Bild 1 Montage einer Trapezplatte aus vorgespanntem Carbonbeton für eine Garage in Berlin, 2019
Assembly of a folded slab made of prestressed carbon concrete of a garage in Berlin, 2019

bau wird beispielsweise eine Rissfreiheit gewünscht. Die Kombination von Carbon, Vorspannung und Beton führt zu hocheffizienten Verbundtragwerken.

Nach einigen Jahren Carbonforschung an der TU Berlin, zuerst mit einer Spannbandbrücke 2005 [5], durften sich die Verfasser im Rahmen des Verbundvorhabens “Carbon Concrete Composite (C³) – Bauen neu denken”, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), mit carbonvorgespanntem Beton beschäftigen. Im Rahmen des Vorhabens C³-V4.2 wurden zum einen vorgespannte Brückensysteme aus Carbonbeton für den Straßenverkehr untersucht (Teil A) [6], zum anderen wurde die Untersuchung von dünnwandigen Bauteilen mit vorgespannten Carbongeleugen (Teil B) durchgeführt [3, 7] und auch schon in der Praxis umgesetzt, wie das Bild 1 einer Trapezplatte zeigt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse des Teilprojekts zu vorgespannten dünnwandigen Bauteilen aus Carbonbeton vorgestellt, die in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern Ginkgo Projektentwicklung GmbH und solidian GmbH von 2016 bis 2019 erzielt wurden.

2 Stand der Technik

2.1 Vorgespannte dünnwandige Bauteile aus Stahlbeton

Seit den 1930er Jahren wurden zahlreiche vorgespannte dünnwandige Bauteile weltweit errichtet. In der Literatur werden einige Beispiele von mit und ohne Verbund vorgespannten dünnwandigen Bauteilen aus Stahlbeton, von einfachen Plattenstreifen bis zu komplexen doppelt gekrümmte Schalen, dargestellt [8, 9]. Besonders Interessant sind die hyperbolischen Betonfertigteilshalen (HP-Schalen), die durch ihre Effizienz und Ästhetik überzeugen. Sie wurden vorrangig während der 1960–70er Jahre von Müller und Silberkuhl entwickelt [10].

Bild 2a) zeigt die Herstellung einer vorgespannten HP-Schale [11]. Die Geometrie stellt einen Streifen eines einschali-

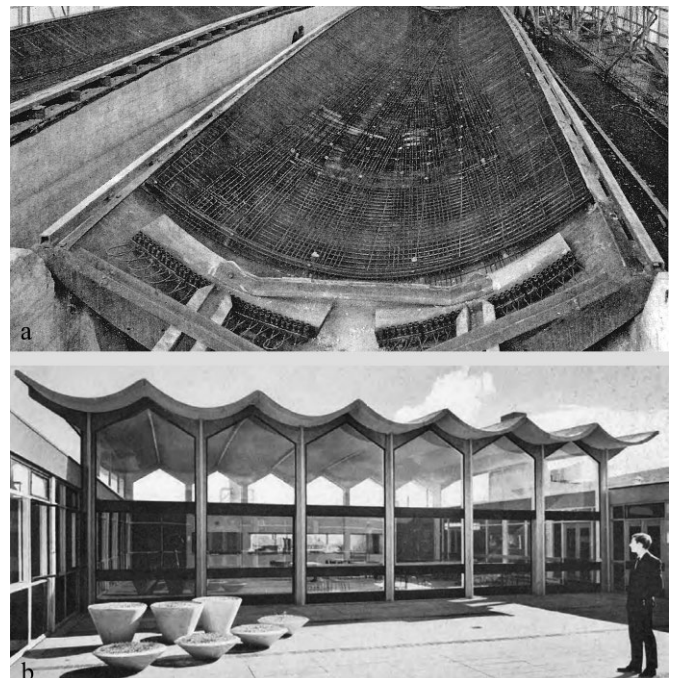


Bild 2 a) Herstellung einer HP-Schale [11], b) Anwendung von HP-Schalen für ein Gebäude in Birmingham [10]
a) Production of a HP shell [11], b) Application of HP shells for a building in Birmingham [10]

gen Hyperboloids dar, der aus geraden Erzeugenden besteht und daher als vorgespanntes Fertigteil in einem Spannbett hergestellt werden kann. Vorgespannte HP-Schalen wurden als Fertigteile für die Überdachung verschiedener Gebäude weltweit verwendet. Das Tragverhalten dieses Systems wurde unter anderen von Ruppert et al. [12] mittels FE-Analyse untersucht. Bild 2b) zeigt die Verwendung von HP-Schalen für ein Gebäude in Birmingham [10].

2.2 Vorgespannte dünnwandige Bauteile aus Carbonbeton

Während die Vorspannung von Stahlspanngliedern in der Bauindustrie heute dem Stand der Technik ent-



Bild 3 Betonmast mit Carbondrähten vorgespannt [13]
CFRP prestressed concrete pylon [13]

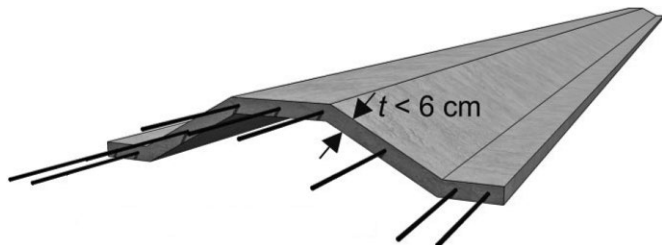


Bild 4 CFK-bewehrtes Falzwerk [2]
CFRP reinforced folded slab [2]

spricht, gibt es hinsichtlich der Vorspannung von Carbonspanngliedern oder -textilien und insbesondere bei dünnwandigen Bauteilen noch viel Forschungsbedarf. In diesem Abschnitt werden einige aktuelle Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet zusammengefasst.

2011 untersuchte schon Terrasi [13] die Kombination von vorgespannten Carbondrähten sowie Hochleistungsbeton und setzte sie für die Entwicklung von dünnwandigen Betonfertigteilen ein. Ein Beispiel ist ein 27 m hoher Mast. Der konische Mast (Bild 3) hatte einen Außendurchmesser von 850 mm am Fußpunkt und 530 mm oben bei einer durchschnittlichen Dicke von 48 mm. Der Mast wog 6000 kg bei einer Gewichtsreduktion um 40% im Vergleich zur herkömmlichen Bauweise aus Stahlbeton.

Stark und Hegger [2] führten Experimente zum Verbundverhalten (erforderliche Mindestdicke für Schalenelemente) von vorgespannten Carbonstäben und -litzen durch. Für Falzwerke oder Schalen mit einer einzigen Vorspannlage ergaben sich Stärken von weniger als 60 mm (Bild 4) und unter 45 mm für für Carbonlitzen und -stäbe bei Durchmessern von 7,5 und 5 mm.

In [14] wurden von Forstlechner et al. Untersuchungen über die Eignung besandeter Carbonlamellen als Spannglieder für dünne Carbonbeton-Platten beschrieben. Auszieh- und Spannkrafteinleitungsversuche wurden zur Untersuchung des Verbunds zwischen Carbon-Lamellen und Beton durchgeführt. Außerdem wurde das Biegetragverhalten vorgespannter Carbonbeton-Plattenstreifen mit einer Dicke von 50 mm anhand von Vier-Punkt-Biegeversuchen untersucht.

Sydow, Kuraht et al. [15] haben dünne, mit Carbonlitzen vorgespannte Betonplatten entwickelt, die standardisiert in Stärken von 24, 40 und 60 mm produziert werden.

Diese werden industriell und großformatig als Halbzeug gefertigt, um in einem späteren Schritt projektspezifisch zugeschnitten, bearbeitet und gefügt zu werden.

Eine andere Möglichkeit, dünnwandige Betonbauteile vorzuspannen, ist die Verwendung von Carbongelegen (auch Carbontextilien genannt), deren kleine, flache Querschnitte (beispielsweise $1,77 \text{ mm}^2$ bei den Carbongelegen SITGrid 040, vgl. Abschn. 5.3) von Vorteil sind und die zudem in mehreren Lagen gleichzeitig vorgespannt werden können. Aufbauend auf der Korrosionsresistenz von Carbongelegen erlauben die geringen Faserstrangflächen minimale Betondeckungen für den erforderlichen Verbund und eine gleichmäßige Kräfteinleitung in den Betonquerschnitt. Dadurch können sehr dünnwandige und dadurch sehr leichte Textilbetonbauteile entworfen werden, die sich besonders als Fertigteile eignen. Deshalb konzentrierte sich die Forschung im Vorhaben C³-V4.2-Teil B auf das Vorspannen von Carbongelegen.

Aus diesen Beiträgen erkennt man ein hohes Potenzial bei dünnwandigen Bauteilen aus vorgespanntem Carbonbeton, die das Bauen mit Beton deutlich effizienter und dadurch umweltfreundlicher machen können. Es besteht allerdings noch viel Forschungsbedarf bei der Untersuchung von Trag-, Verformungs- und Dauerstandverhalten sowie bei der Entwicklung von neuen Bauteilen, die das Potenzial von vorgespanntem Carbonbeton ausschöpfen. In den nächsten Kapiteln werden die an der TU Berlin durchgeführten Untersuchungen und Anwendungen von Bauteilen aus vorgespanntem Textilbeton zusammengefasst.

3 Tragverhalten von Textilbetonbauteilen

3.1 Schlaff bewehrter Textilbeton

Die Grundlagen zum schlaff bewehrten Textilbeton wurden hauptsächlich in den Sonderforschungsbereichen SFB 532 [16] an der RWTH Aachen und SFB 528 [17] an der TU Dresden gebildet. Im Rahmen des SFB 528 untersuchte Jesse [18, 19] das Spannungs-Dehnungsverhalten von textilbewehrten Betonproben. Die Untersuchungen zeigten im Versuch geringere Steifigkeiten und Traglasten als theoretisch angenommen. Dies war auf ein vorzeitiges Reißen der Außenfilamente der Faserstränge zurückzuführen. Die verwendeten Textilien bestanden aus unge tränkten Glasfasern, was zu einem schwachen inneren Verbund zwischen Filamenten und Matrix führte. Erste Ergebnisse zu getränkten Textilien für eine Verbesserung des inneren Verbunds wurden dargestellt und lagen als Basis für weitere Untersuchungen vor.

Kulas [20] untersuchte später an der RWTH Aachen mit Epoxidharz getränkte Glas- und Carbontextilien und deren Verbund zum Beton. Es zeigte sich, dass die Bruchfestigkeit der getränkten Faserstränge zwei- bis dreimal so hoch ist wie die von ungetränkten. Der durch die Trän-



Bild 5 Prototyp einer Schalenbrücke aus Textilbeton
Prototype of a textile reinforced concrete shell bridge

kung verbesserte innere Verbund führt zu einem ähnlichen Verhalten wie bei einem stabstahlbewehrten Beton. Folglich kann die Biegefestigkeit textilbewehrter Betonbauteile (im Gegensatz zu den nicht getränkten Textilien) ähnlich wie beim stahlbewehrten Beton bestimmt werden (vgl. auch [21]). Es ist allerdings darauf zu achten, dass bei textilbewehrten Betonbauteilen eine ausgeprägte Spaltbildung aufgrund der hohen Zugfestigkeit und Verbundspannungen der getränkten Faserstränge entstehen kann (aktuelle Untersuchungen dazu findet man bei [22, 23]).

Das Potenzial von schlaff bewehrtem Textilbeton hat sich bereits bei vielen gebauten Konstruktionen gezeigt. Sehr filigrane und dadurch sehr leichte Betontragwerke wurden ermöglicht [24–26]. An der TU Berlin wurde beispielsweise ein Schalenbrückenprototyp mit Regelflächengeometrie und einer Wandstärke von ca. 5 mm hergestellt (Bild 5).

Schlanke, biegebeanspruchte Carbonbetonbauteile, die schlaff bewehrt sind, können jedoch die hohe Zugfestigkeit des Carbons oft nicht ausnutzen, ohne große Krümmungen zu induzieren [27]. Zudem weisen in der Regel Textilbetonbauteile im Vergleich zu konventionellen Betonelementen aufgrund von schlankeren Querschnitten eine geringere Biegesteifigkeit auf, was zu noch größeren Krümmungen und damit größeren Durchbiegungen führen kann [3]. Eine elegante Lösung, um dem entgegen zu wirken, ist die Aufbringung einer Vorspannung.

3.2 Vorgespannter Textilbeton

Vorgespannte Carbonbelege sind nur von wenigen Wissenschaftlern untersucht worden. Krüger [28] untersuchte in seiner Dissertation vorgespannte Textilbetonplatten mit Bewehrung aus alkalibeständigem (AR-Glas), Aramid und Carbon. Die Versuche zeigten u.a., dass ein ausreichender innerer Verbund für die Ausnutzung der Faserstrangzugfestigkeit sowie die Erzeugung einer rauen Oberfläche der Faserstränge für die Vorpannkraftüber-

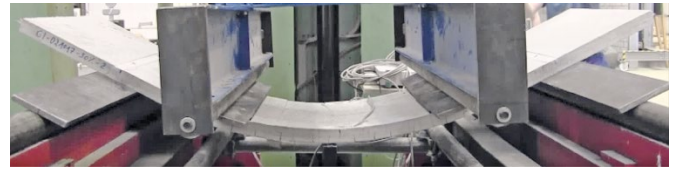


Bild 6 Vier-Punkt-Biegeversuche an zentrisch vorgespannten textilbewehrten Plattenstreifen [7]
Four-point bending tests on centrally pre-stressed textile-reinforced plate strips [7]

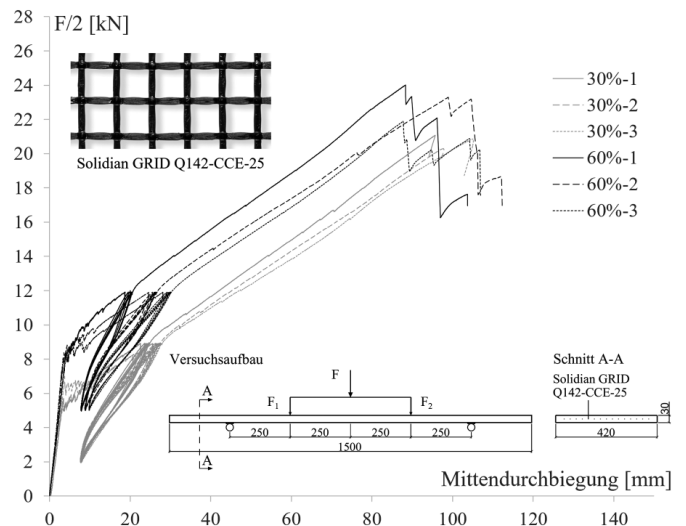


Bild 7 Kraft-Mittendurchbiegung von vorgespannten Platten und Versuchsaufbau (Abmessungen in mm) [7]
Force-deflection of prestressed slabs and experimental setup (Dimensions in mm) [7]

tragung von großer Bedeutung sind. Vollständige Harz-impregnierungen haben für die Erfüllung dieser beiden Kriterien ihre Eignung bewiesen.

An der TU Berlin wurden Vier-Punkt-Biegeversuche an zentrisch vorgespannten textilbewehrten Plattenstreifen durchgeführt (Bild 6) [7]. Alle Probekörper wurden in Längsrichtung mit 15 Fasersträngen aus Carbongelegen solidian GRID Q142-CCE-25 der Firma solidian vorgespannt (vgl. Bild 7) und einheitlich mit der Feinbetonmischung C3-B2-HF-2-190-2 aus dem Basisvorhaben B2 [29] mit der Verwendung des Bindemittels Deuna BMK-D5-1 der Firma Dyckerhoff GmbH [30] (mittlere Druckfestigkeit $f_{cm} = 121,1$ MPa aus Würfelversuchen nach DIN EN 12390-3) hergestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen mit zunehmendem Vordehngrad, 30 und 60% der charakteristischen Faserstrangzugfestigkeit ($f_{tex,k} = 2200$ MPa nach Herstellerangabe [31]) beim Anspannen, ein höheres Rissmoment und damit geringere Verformungen im gerissenen Zustand. Eine exzentrische Vorspannung würde den Effekt noch weiter verstärken [3]. Durch Vorspannung können Carbongelege unter Bemessungslasten voll ausgelastet werden, was eine wirtschaftlichere Bemessung ermöglicht.

Bei Vordehngraden von ca. 30 und 60% der charakteristischen Faserstrangzugfestigkeit und einer Betondeckung

von ca. 12 mm waren keine Spaltrisse in den untersuchten Platten zu erkennen. Ein Vordehngrad von ca. 90% führte jedoch zu einem Spaltriss in Höhe der Bewehrungslage an der Bauteilseite. Krafteinleitungsversuche dazu, wie bei [2] zur Ermittlung von minimalen Betondeckungen und Kraftübertragungslängen beispielsweise für verschiedene Faserstrangsformen, -flächen und Tränkungen sowie die Untersuchung der Einflussparameter auf die Spaltrissbildung (vgl. [22, 23]) bei vorgespannten Textilbetonbauteilen, sind noch erforderlich.

4 Konzept für eine Bemessung

4.1 Allgemeines und Stand der Normung

Die grundsätzliche Funktionsweise von Tragwerken bzw. dünnwandigen Bauteilen aus vorgespanntem Carbonbeton ist mit herkömmlichen Spannbetontragwerken vergleichbar. Der Beton nimmt die Druckkräfte auf, während die Zugkräfte über die Bewehrung und Spannglieder abgetragen werden. Die Bewehrung geht einen Verbund mit dem Beton ein, während Spannglieder ihren Beitrag zum Trag- und Verformungsverhalten mit und ohne Verbund leisten können. Folglich können die grundsätzlichen Berechnungsmethoden aus dem Stahl- und Spannbetonbau angewandt werden. Durch den Wechsel des Bewehrungsmaterials und das linearelastische Verhalten des Carbons sind allerdings dort, wo die unterschiedlichen Eigenschaften des neuen Bewehrungs- und Spanngliedmaterials einen Einfluss haben, Anpassungen in der Bemessung vonnöten (vgl. [32]).

Es gibt bereits weltweit einige Regelwerke, die neben schlaff bewehrtem Carbonbeton auch vorgespannte Bauteile zum Inhalt haben [3]. Die erste Richtlinie erschien 1997 in Japan (JSCE Concrete Engineering Series 23) [34], danach erschienen eine kanadische (ISIS Canada Research Network, Design Manual Nr. 5) [35] und eine US-amerikanische Richtlinie (ACI 440.4R-04) [36]. Das aktuellste Regelwerk ist die 2012 erschienene kanadische Norm CSA standard S806-12 [37]. In Europa gibt es einige Sachstandberichte zu nicht vorgespannten Konstruktionen, zu denen das 2007 erschienene fib bulletin 40 [38] und das DAfStb Heft 582 [39] gehören.

Im Folgenden werden u.a. die Ausführungen und Vorschläge von Schlaich et al. [33] und Aplitz [40] kurz zusammengefasst, die im Rahmen des C³-Vorhabens V4.2 erarbeitet wurden.

4.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Die Teilsicherheitsbeiwerte für Carbongelege sind im Vergleich zu Stahlbewehrung in der Regel höher. Zur Biegebemessung für die Textilbewehrung eines schlaff bewehrten Betonbauteils ermittelte Rempel [41] als Teilsicherheitsfaktor einen Wert von 1,3. Der Wert hängt von der Qualität des verwendeten Produktes für die Be-

wehrung ab (Rempel verwendete Gelege von solidian). Hier wurden allerdings noch keine Langzeiteffekte berücksichtigt. Zurzeit werden im Rahmen vom C³-Vorhaben L9 verschiedene Werte für den Teilsicherheitsbeiwert γ_{nm} aus der vorhandenen Literatur zusammengefasst, die je nach Bewehrungs- und Belastungsart zwischen 1,1 und 1,5 variieren [32]. Für schlaife Gelege wird im Arbeitspapier ein Wert von 1,3 definiert. Dazu müssen noch Langzeitauswirkungen durch den Beiwert α_{nm} berücksichtigt werden. Die Ermittlung von Werten für α_{nm} ist jedoch noch in Bearbeitung. Im Rahmen dieser Arbeit wird $\alpha_{nm} = 1,0$ eingesetzt, obwohl bei vorgespannter Bewehrung, wegen der Streckung der Faser in der Matrix, sogar Werte $\alpha_{nm} \geq 1,0$ möglich sein könnten [42].

Gemäß kanadischer Norm [37] soll ein schlagartiges Zugversagen vermieden werden. Ist dies nicht möglich, muss das einwirkende Moment um einen Faktor von 1,6 erhöht werden. Dadurch wird eine wirtschaftliche Bemessung mit Carbon erschwert. Weitere Untersuchungen zum Druck- und Zugversagen von Carbonbetonbauteilen sind noch erforderlich, um dieses Kriterium ausschließen zu können.

Außerdem und im Gegenteil zu konventionellem Stahlbeton kann bei einem Zugversagen mehrlagig bewehrter Carbonbetonbauteile das spröde und nicht plastische Bewehrungsversagen zu einem „reißverschlussartigen“ Aufreißen durch alle Lagen führen. Im Gegensatz zu Stahl findet deshalb keine Lastumlagerung nach Erreichen der Fließgrenze statt. Abhilfe kann eine gestaffelte Vorspannung schaffen (Randlage mit geringerer Vorspannung), damit alle Lagen im belasteten Zustand gleichermaßen gedehnt werden.

Zur Verhinderung eines schlagartigen Bauteilkollapses empfehlen die Autoren genauso wie Aplitz [40], unabhängig von der Versagensart eine ausreichende Versagensankündigung durch Verformbarkeit zu garantieren. Ein Weg, um dies zu ermöglichen, ist die Sicherstellung von großen und vor allem erkennbaren Verformungen (bzw. Durchhang) vor dem Bauteilversagen (ohne Berücksichtigung von Langzeiteffekten). Schlanke Querschnitte werden solche Kriterien leichter erfüllen als Querschnitte mit großem Hebelarm und kleinen Rissen. Für die hier betrachteten Einfeldträger wird eine Verformungsgrenze des Durchhangs in Feldmitte von $L/100$ beim Erreichen des maximalen Werts des Bemessungsmoments im GZT, entweder aus der Grundkombination (M_{Ed}) oder ggf. aus der außergewöhnlichen Situation (M_{EdA}), vorgeschlagen. Um dieses Kriterium zu erfüllen, stehen dem Planer nicht nur die Bauteilgeometrie und die Materialeigenschaften, sondern auch die Höhe der Vorspannung, mit der man einen direkten Einfluss auf die Biegesteifigkeit des Bauteils hat, als Parameter zur Verfügung.

Eine andere Variante wäre die Festlegung einer Verformungsgrenze des Durchhangs bei einem Anteil des Moments aus dem Bemessungswert des Tragwiderstands

(M_{Rd}). Hierfür kann ein Abminderungsfaktor definiert werden, sodass große Verformungen vor der maximalen Auslastung erkennbar sind. Für die Ermittlung genauer Werte für die Verformungsuntergrenze des Durchhangs für verschiedene Tragwerke und Bemessungssituationen sollen noch zukünftig analytisch und experimentell weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Bei statisch unbestimmten oder gekrümmten Bauteilen sollen andere Verformbarkeitskriterien wie Rissbreiten definiert werden. Der Fokus dieses Artikels liegt allerdings lediglich auf ebenen Einfeldträgern.

Weitere Nachweise bez. Querkraft, Durchstanzen, Ermüdung, Verankerung der Längsbewehrung und Stöße sind noch weiter zu untersuchen. Zuletzt ist die Anwendbarkeit von Stabwerkmodellen in den D-Bereichen noch ein Bereich mit viel Forschungsbedarf.

4.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

Für Stahlspannglieder sowohl im Verbund als auch ohne Verbund fordert der Eurocode 2 (EC2) [43] einen überdrückten Querschnitt (Dekompressionsnachweis) in der quasiständigen Einwirkungskombination. An dem Rand, der dem Spannglied am nächsten liegt, dürfen keine Zugspannungen auftreten. Die Ursache ist die Korrosionsempfindlichkeit der Spannglieder, weswegen Risse am Bauteil vermieden werden sollen. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit von Carbonspanngliedern kann laut Schlaich und Aplitz auf den Dekompressionsnachweis verzichtet werden [33, 40].

Ebenso können die Rissbreitenbeschränkungen gelockert werden. Maßgebend sind lediglich die Dauerhaftigkeit des Betons sowie Anforderungen an die Ästhetik. Im EC2 wird für alle Spann- oder Stahlbetonbauteile allgemein eine Rissbreite von 0,4 mm für ein „akzeptables Erscheinungsbild“ gefordert. Dies gilt sowohl für die Begrenzung des Einzelrisses (infolge Zwang) als auch für das abgeschlossene Rissbild (infolge Last) unter der quasiständigen Einwirkungskombination.

Zur Begrenzung der Verformungen gelten wie bei Stahlbetonbauteilen bestimmte Grenzen wie beispielsweise unter quasiständiger Einwirkungskombination ($E_{d,perm}$) $L/250$ für den Durchhang zum Erhalten eines ansprechendes Erscheinungsbilds und $L/500$ für die Durchbiegung zur Vermeidung von Schäden in angrenzenden Bauteilen.

4.4 Besonderheiten und sonstige Nachweise

Bei vorgespannten Textilbetonbauteilen ist eine nachträgliche Vorspannung (mit oder ohne Verbund) aufgrund der Textilstruktur nicht möglich. Wegen der biaxialen Verteilung der Faserstränge ist das Einbringen der Gelege in Hüllrohren nicht möglich. Aus diesem Grund ist nur eine Vorspannung mit sofortigem Verbund (oder mit externer Vorspannung) möglich [3].

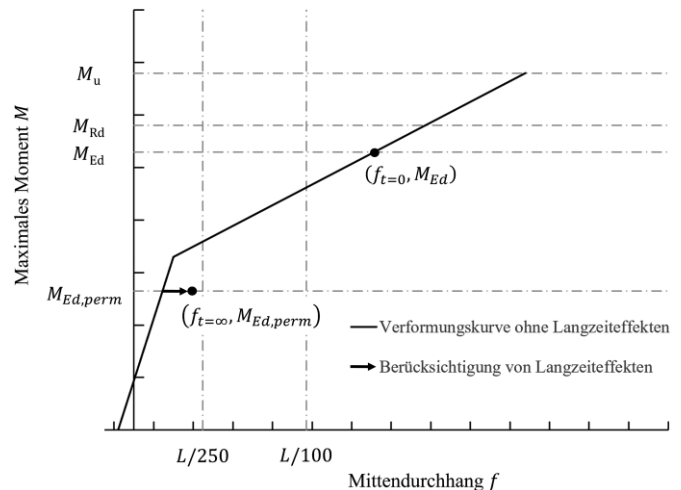


Bild 8 Verformungsbegrenzung und Vorschlag für Versagensankündigung
Deformation limitation and proposed approach for failure warning

Bei der Bemessung sollte neben den Geometrie- und Materialeigenschaften des Bauteils der Vordehngrad so hoch festgelegt werden, dass die Verformungskriterien des GZG (mit Berücksichtigung von Langzeiteffekten) eingehalten werden und gerade so niedrig, dass die vorgeschlagene Versagensankündigung auf Verformbarkeit im GZT (ohne Berücksichtigung von Langzeiteffekten) gegeben ist. Bild 8 zeigt dies schematisch anhand der Momenten-Verformungsbeziehung eines Einfeldträgers. Im GZG dient der Verformungsnachweis für den Durchhang in Feldmitte ($f_{t=∞}$) z. B. bei $L/250$, in der Regel unter dem Bemessungsmoment aus der quasiständigen Lastkombination ($M_{Ed,perm}$). Eine Versagensankündigung kann, wie im Abschn. 4.2 erwähnt, durch Verformbarkeit definiert werden. Am Beispiel eines Einfeldträgers soll dieser beim Erreichen des maximalen Werts des Bemessungsmoments im GZT, entweder M_{Ed} oder ggf. M_{EdA} , bereits genügend Durchhang (z. B. $f_{t=0} > L/100$) vorweisen.

5 Bauteiluntersuchungen

5.1 Entwickelte Vorspannvorrichtungen

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Ginkgo und solidian wurden mehrere dünnwandige Bauteile aus vorgespanntem Carbonbeton mit unterschiedlichen Geometrien hergestellt und an der TU Berlin experimentell untersucht.

Konventionelle Vorspannvorrichtungen, bei denen jedes einzelne Spannglied vorgespannt wird, können nicht direkt auf Carbondtextilien angewendet werden, da das Einspannen der Textilien aufgrund der großen Anzahl an Fasersträngen technisch schwierig und vergleichsweise unwirtschaftlich ist. Deshalb müssen Methoden gefunden werden, mit denen alle Faserstränge gleichmäßig vorgespannt werden können. Die Anforderung an die Vorspannvorrichtung ist, dass die einzelnen Faserstränge jeweils die gleiche Vordehnung und damit die gleiche Vor-

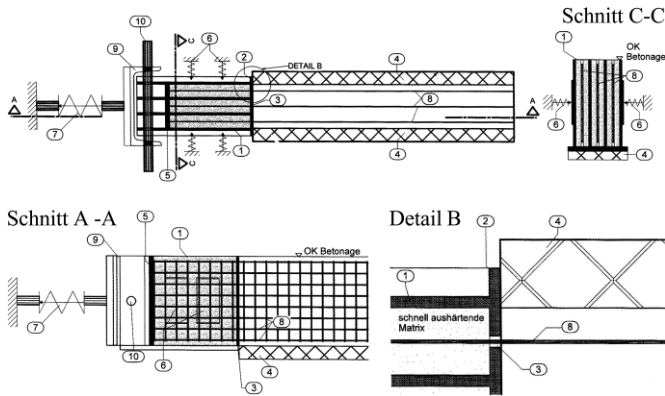


Bild 9 Vorspannvorrichtung für Gelege von Ginkgo [44]
 (1) Aufnahmeelement, (2) Stirnseite, (3) Durchbrechung, (4) Formwerkzeug (Schalung), (5) Abstandhalter, (6) Querklemmelemente, (7) Druckzylinder, (8) Faserstränge, (9) Jochförmiges Element, (10) Bolzen
 Prestressing device for CFRP-textiles developed by Ginkgo
 (1) Pickup element, (2) Front side, (3) Breakthroughs, (4) Formwork, (5) Spacers, (6) Cross clamping elements, (7) Pressure cylinder, (8) Fibre strands, (9) Yoke-shaped element and (10) Bolt

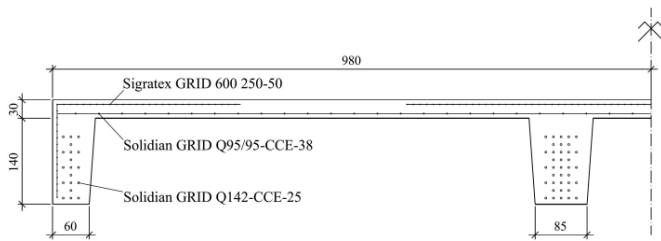


Bild 10 Querschnitt der untersuchten TT-Platte (Abmessungen in mm)
 Cross section of the TT-slab (dimensions in mm)

spannkraft erhalten. Für die Vorspannung von Carbongelegen wurden von den Firmen Ginkgo und solidian getrennt zwei Vorspannvorrichtungen mit unterschiedlichen Ansätzen entwickelt. Die Vorspannvorrichtung von Ginkgo basiert auf dem Ansatz der Verklebung der Textilien mit einer schnell aushärtenden Matrix und dem anschließenden Klemmen der vergossenen Faserstränge. Auf diese Weise können mehrere Lagen gleichzeitig vorgespannt werden. Allerdings ist hier der Arbeitsaufwand größer als bei dem System von solidian, bei dem durch einfaches Klemmen durch Verschrauben eine einzelne Lage auf eine effiziente Weise vorgespannt werden kann. Bild 9 zeigt das Prinzip des Vergussystems von Ginkgo.

5.2 TT-Platte

Eine mit Carbongelegen vorgespannte TT-Platte mit einer Gesamtlänge von 4,65 m wurde entworfen, bemessen und experimentell getestet. Der Querschnitt der TT-Platten ist bis zur Spiegelachse in Bild 10 dargestellt. Für die Bemessung wurden ein Eigengewicht von 2,47 kN/m in Längsrichtung und Ausbaulasten von 3,0 kN/m² sowie Nutzlasten von 2,0 kN/m² und 1,0 kN (Wohn- und Aufenthaltsräume – Kategorie A3 nach DIN EN 1991-1-1) für die Anwendung im Hochbau angenommen. Daraus



Bild 11 a. Vier-Punkt-Biegeversuch, b. Biegeversagen
 a. Four-point-bending test, b. Bending failure

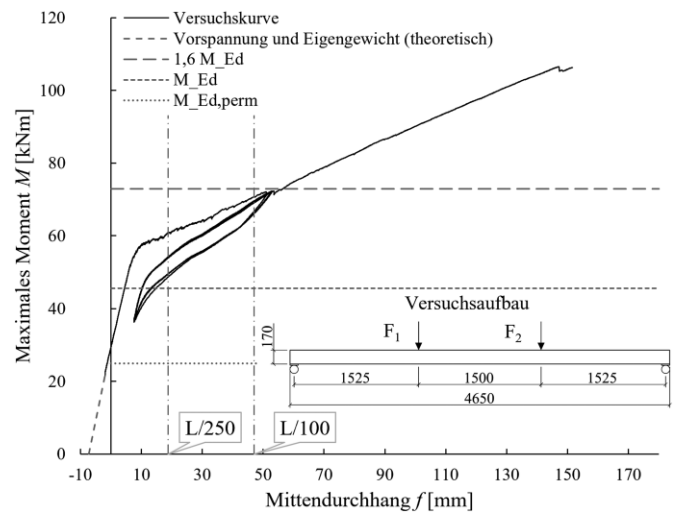


Bild 12 Moment-Mittendurchhang einer TT-Platte und Versuchsaufbau
 (Abmessungen in mm)
 Moment-deflection diagram for a TT-slab and experimental setup
 (dimensions in mm)

ergeben sich für das maximale Feldmoment ein Bemessungswert im GZT aus der Grundkombination $M_{Ed} = 44,38$ kNm sowie ein Bemessungswert im GZG aus der quasiständigen Kombination $M_{Ed,perm} = 24,65$ kNm (Kombinationsbeiwert $\psi_2 = 0,3$ nach DIN EN 1990/NA). Im Rahmen der Versuche (Bild 11) wurden neben der Bestimmung des Bruchmoments auch die Rissentwicklung und das Tragverhalten bei großen Verformungen beobachtet.

Vier vorgespannte TT-Platten aus Carbonbeton wurden von Ginkgo hergestellt und an der TU Berlin getestet. Drei davon in einem Vier-Punkt-Biegeversuch und eine im Langzeitversuch zur Untersuchung der zeitlichen Veränderung des Trag- und Verformungsverhaltens unter Dauerlast. Aufbauend auf den Vier-Punkt-Biegeversuchen war es möglich, das Trag- und Verformungsverhalten nach dem im vorigen Kapitel vorgeschlagenen Bemessungskonzept zu analysieren.

Mit insgesamt zwei mal vier Greifern an den äußeren und inneren Stegen wurden die 112 Faserstränge aus Carbon-

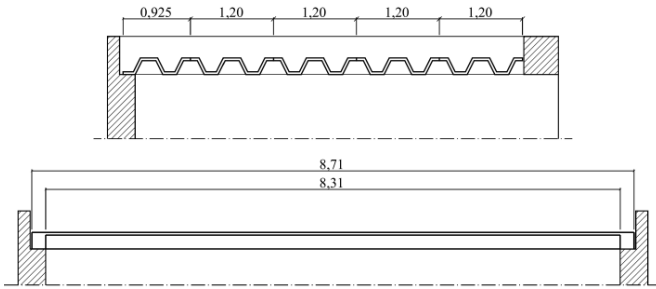


Bild 13 a. Querschnitt der Garage (Abmessungen in m), b. Längsschnitt des Garagendachs (Abmessungen in m)
a. Front view of the garage (Dimensions are in meters), b. Side view of the garage roof (Dimensions are in meters)

gelegen solidian GRID Q142-CCE-25 bei jeder Platte vorgespannt. Die äußeren Stege wurden mit je 19 Fasersträngen und die inneren mit je 37 Fasersträngen versehen. Ein Vordehngrad beim Anspannen von ca. 65% der charakteristischen Faserstrangzugfestigkeit ($f_{\text{tex,k}} = 2200 \text{ MPa}$ nach Herstellerangabe [31]) wurde gemäß kanadischer Norm [37] gewählt. Die im Bild 12 dargestellte Fertigteileplatte wurde mit der Feinbetonmischung C3-TB-A-3.2 aus der Firma BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH [45] ($f_{\text{cm}} = 56,4 \text{ MPa}$ aus Würfelversuchen nach DIN EN 12390-3) hergestellt.

Im Diagramm (Bild 12) ist die experimentelle Moment-Mittendurchbiegungs-Kurve einer der untersuchten TT-Platte zu sehen, wobei die wichtigsten Werte für die Biegebemessung (M_{Ed} , $M_{\text{Ed,perm}}$) gezeigt werden. Da ursprünglich die untersuchten TT-Platten wegen eines rechnerischen Zugversagens der Gelege für 1,6 M_{Ed} nach [37] bemessen wurden (vgl. Abschn. 4.2), erfüllte das Bauteil alle Bemessungskriterien. Allerdings wurde bei den nächsten Schritten der Forschungsarbeit die Idee vorgeschlagen, die Versagensankündigung durch Verformbarkeit sicherzustellen, wodurch die dargestellte TT-Platte nicht mehr genügend erkennbare Verformung (vgl. Abschn. 4.2) bei M_{Ed} zeigt. Deshalb wurde beim nächsten Beispiel (Trapezplatte) anfänglich ein passender Vordehngrad ausgewählt, sodass dieses Verformungskriterium erfüllt wird.

5.3 Trapezplatte

Eine Trapezplatte wurde entwickelt und als Dachelement für eine Garage mit Infralichtbetonwänden eingesetzt. Das Garagendach setzt sich aus fünf nebeneinanderliegenden Trapezplatten zusammen. Jede Trapezplatte besitzt zwei Sicken bei einer Bauteilbreite von 1,20 m und -höhe von 0,24 m. Die Gesamtlänge beträgt 8,71 m. Die Geometrie des Trapezbalkens an der westlichen Wand weicht insofern von der Grundgeometrie ab, dass diese nur eineinhalb Sicken besitzt (Bild 13a)). Diese Trapezplatte wird auf der Rückwand am unteren Flansch gelagert. Das gesamte Dachsystem entsteht aus Fertigteilen und ist für ein späteres Recycling einfach demontierbar.

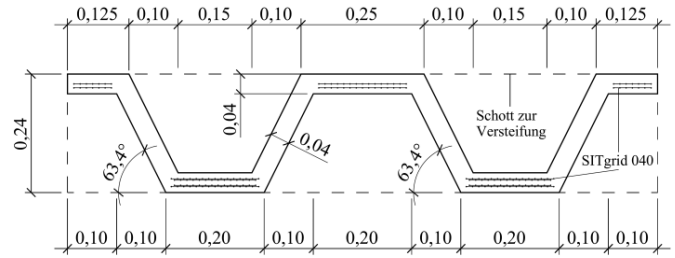


Bild 14 Trapezplattenquerschnitt (Abmessungen in m)
Cross section of the folded slab (dimensions in m)



Bild 15 Vier-Punkt-Biegeversuch der Trapezplatte
Four-bending test of a folded slab

Für die Bemessung der Trapezplatten wurden ein Eigen-gewicht von $1,68 \text{ kN/m}$ in Längsrichtung, Ausbaulasten von $1,03 \text{ kN/m}^2$ und eine Nutzlast von $1,0 \text{ kN}$ (Nutzlasten für Dächer – Kategorie H nach EN 1991-1-1/NA) angenommen. Außerdem wurden Schnee- und Eislasten von $0,68 \text{ kN/m}^2$ für die ständigen und veränderlichen Situationen sowie $1,56 \text{ kN/m}^2$ für die außergewöhnliche Situation (norddeutsche Tiefebene) nach DIN EN 1991-1-3/NA und eine Windlast von $0,13 \text{ kN/m}^2$ nach DIN EN 1991-1-4/NA berücksichtigt. Daraus ergeben sich für das maximale Feldmoment ein Bemessungswert im GZT aus der Grundkombination $M_{\text{Ed}} = 50,97 \text{ kNm}$ (aus der außergewöhnlichen Situation ergibt sich $M_{\text{Ed,A}} = 49,42 \text{ kNm}$) sowie ein Bemessungswert im GZG aus der quasiständigen Kombination $M_{\text{Ed,perm}} = 26,4 \text{ kNm}$ (Kombinationsbeiwert $\psi_2 = 0$ nach DIN EN 1990/NA).

In den drei oberen Flanschen einer Trapezplatte liegen jeweils zwei Lagen der Carbonbewehrung SITgrid 040 der Firma Wilhelm Kneitz GmbH, mit 15 Fasersträngen im mittleren Flansch und je acht Fasersträngen in den äußeren Flanschen. Nur jeweils die obere Lage davon ist vorgespannt. In den zwei unten liegenden Flanschen befinden sich jeweils zwei Doppellagen Carbonbewehrung SITgrid 040 mit jeweils 29 Fasersträngen, die alle vorgespannt sind. Jeder Faserstrang hat eine Fläche von $1,77 \text{ mm}^2$. Der Vordehngrad beim Anspannen aller vorgespannten Faserstränge beträgt nach Bemessung 45% des charakteristischen Werts der Zugfestigkeit ($f_{\text{pk}} = 1700 \text{ MPa}$ nach Herstellerangabe [46]). Die geplante Betonart wurde mit einem Spezialbeton der Firma BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH [45] gewählt. Für die Bemessung wurden eine mittlere Druckfestigkeit $f_{\text{cm}} = 78,2 \text{ MPa}$ ($f_{\text{ck}} = 70 \text{ MPa}$) und Elastizitätsmodul $E_{\text{cm}} = 27 \text{ GPa}$ nach Herstellerangabe angenommen.

Ein Vier-Punkt-Biegeversuch einer Trapezplatte wurde durchgeführt (Bilder 15 und 17), um das Trag- und Ver-

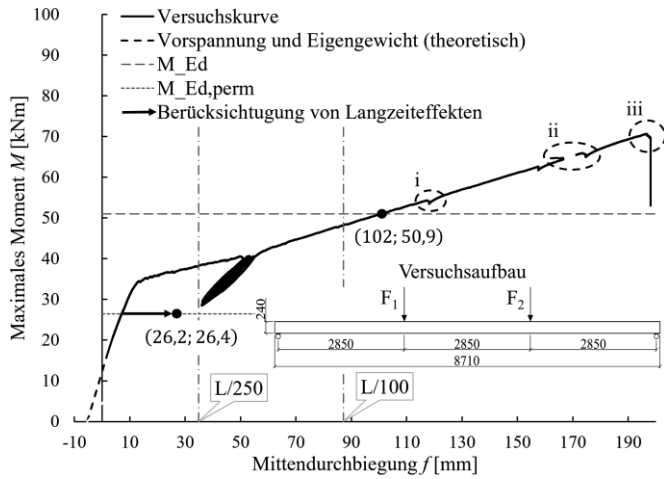


Bild 16 Moment-Mittendurchbiegungsdiagramm einer Trapezplatte und Versuchsaufbau (Abmessungen in mm)
Moment-deflection diagram of a folded slab and experimental setup (dimensions in mm)

formungsverhalten zu untersuchen. Das Ziel hierbei war zu sehen, ob die bemessenen Tragfähigkeits- und Verformungskriterien beim hergestellten Bauteil erfüllt sind. Analog zu den TT-Platten zeigt das Moment-Durchgangs-Diagramm das Tragverhalten mit den entsprechenden Bemessungsgrenzwerten (Bild 16).

Bild 16 zeigt, dass das Bauteil der Einwirkung des Grenzzustands der Tragfähigkeit widersteht und beide vorgeschlagenen Verformungskriterien (vgl. Abschn. 4.4) erfüllt sind. An der Stelle i sieht man einen kleinen Sprung der Kurve, da der Versuch angehalten wurde, um den Tragwerkszustand beim leichten Überschreiten von M_{Ed} zu beobachten. Danach (bei ca. $1,19 M_{Ed} \approx 65 \text{ kNm}$) versagte ein Steg auf Querkraft. Ziel war es auch zu zeigen, inwieweit die Querkrafttragfähigkeit ohne jegliche Querkraftbewehrung in den vier Betonstegen mit dem positi-



Bild 19 a. Innenansicht der gebauten Garage, b. Außenansicht der gebauten Garage
a. Inner view of the constructed garage, b. Outside view of the constructed garage

ven Einfluss der Vorspannung gegeben ist. Da das Versagen bei einem inneren Steg erfolgte, der schwer einsehbar war, konnte der genaue Zeitpunkt nicht festgestellt werden. Die Kraft-Verformungskurve lässt darauf schließen, dass dies an der Stelle ii erfolgte, da hier eine starke Kraftumlagerung der Zylinder stattgefunden hat. Nach dem Stegversagen konnte das Bauteil bei gleichbleibender BauteilstEIFigkeit weiter bis zum Erreichen des maximalen Zylinderwegs (20 cm) und damit zum Abbruch des Versuchs belastet werden (Stelle iii).



Bild 17 Vorbereitung des Vier-Punkt-Biegeversuchs der 8,71 m Trapezplatte
Preparation of the four-bending test of a folded slab with a length of 8,71 m

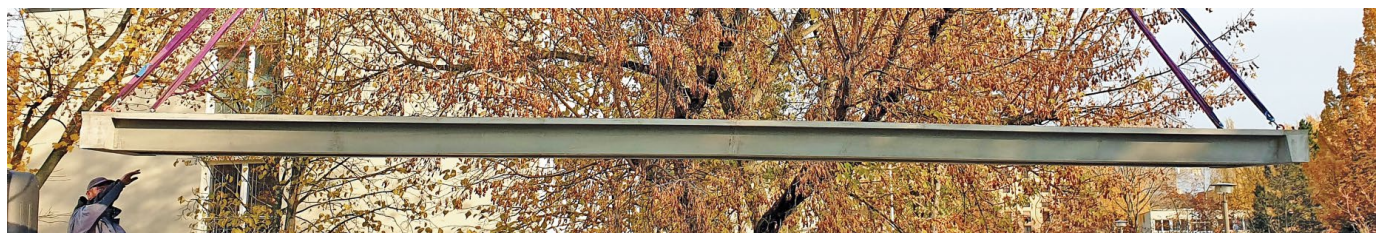


Bild 18 Montage einer Trapezplatte
Assembly of a folded slab

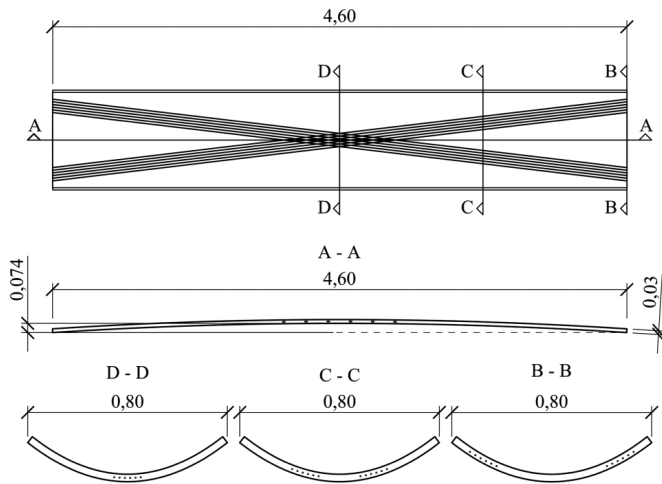


Bild 20 Geometrie der hergestellten HP-Schalen (Abmessungen in m)
Geometry of the constructed HP-shells (dimensions in meters)

Bezüglich des Querkraftversagens eines Steges ist es zu beachten, dass ein Vier-Punkt-Biegeversuch für die hier gezeigte Anwendung nicht realitätsnah ist. Hierbei befinden sich die maximalen Werte für das Moment und die Querkraft an derselben Stelle, und zwar an der Lasteinleitung. Weitere Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit mit dem Ziel, auf Querkraftbewehrung bei sehr schlanken vorgespannten Trägern (beispielsweise wie bei Hohlblechen) verzichten zu können, sollen noch durchgeführt werden. Basierend auf der Bemessung und den experimentellen Untersuchungen wurden die endgültigen Trapezplatten hergestellt und als Dachelemente für die Garage eingesetzt. Bilder 1 und 18 zeigen die Montage der Bauteile. Bild 19 zeigt die fertige Konstruktion. Weitere Messungen werden zurzeit am Bauwerk durchgeführt, um das Tragverhalten unter realitätsnahen Klima- und Lastbedingungen zu analysieren.

6 HP-Schale (Ausblick)

Als letztes Beispiel wird eine doppelt gekrümmte HP-Schale vorgestellt. Zunächst soll die Bauteilgeometrie definiert werden, insbesondere, um die optimale Lage der Spannglieder zu finden. Damit soll sichergestellt werden, dass das Bauteil in Längsrichtung so gekrümmt ist, dass die Spannglieder innerhalb der äußeren Ränder liegen.

Mit der definierten Geometrie (Bild 20) wurden von Ginkgo vier Bauteile (Bild 21) hergestellt, die an der TU Berlin getestet wurden und derzeit ausgewertet werden. Für die Vorspannung der Bauteile wurden Carbonbelegstreifen (GRID Q142/142 CCE 25) mit jeweils zwanzig Fasersträngen der Firma solidian verwendet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Carbonbeton steht der Bauwirtschaft sowohl im Neubau als auch bei Instandsetzungen ein äußerst materialef-



Bild 21 Hergestellte HP-Schale
Constructed HP-shell

fizienter und wirtschaftlicher Baustoff zur Verfügung. Sowohl im Hochbau als auch bei Infrastrukturbauwerken führt Carbon zu einer dauerhaften und somit nachhaltigen Bauweise. Sein volles Potenzial wird allerdings erst durch Vorspannung ausgenutzt. Schlaff carbonbewehrte Biegebauteile erfahren oft bereits unter Gebrauchslasten große Krümmungen bzw. Durchbiegungen. Vorgespannte Carbonbewehrungen führen zu schlankeren und gebrauchstauglichen Bauteilen. Gegenüber vorgespannten Bauteilen mit Carbonstäben oder -litzten können die Bauteilquerschnitte durch den Einsatz von Carbonbelegen weiter reduziert werden. Mit Belegen können dünnwandige Betonbauteile hergestellt werden, die sich durch Vorspannung mit sofortigem Verbund besonders als Fertigteile eignen. Solche Fertigteile wurden verschiedenen Belastungsversuchen unterzogen, die die erwartete Verbesserung des Verformungsverhaltens gegenüber schlaff bewehrten Bauteilen zeigten. Ein materialgerechtes Bemessungskonzept zur Versagensankündigung wurde vorgeschlagen und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen. Eines der entwickelten Bauteile wurden in einem realen Bauvorhaben umgesetzt. Dünnwandige Bauteile aus vorgespanntem Carbonbeton zeigen ein großes Potenzial für das Bauwesen auf und versprechen nach weiterer Forschung und Entwicklung eine Effizienzsteigerung, Materialreduzierung und daraus resultierende hohe CO₂-Einsparung für solche Bauteile.

Dank

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Unterstützung und Förderung des Projekts und den Partnern Ginkgo und solidian, die ihr Wissen geteilt und zum Erfolg des Projekts beigetragen haben.

Literatur

- [1] Lehne, J.; Preston, F. (2018) *Making Concrete Change – Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*.
- [2] Stark, A.; Hegger, J. (2013) *Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrungen in UHPFRC* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 108, H. 10, 701–710. <https://doi.org/10.1002/best.201300038>
- [3] Schlaich, M.; Hückler, A.; Goldack, A.; Osman-Letelier J. P. (2018) *Vorgespannte Flächentragwerke aus Carbonbeton – Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell* in: Technische Universität Kaiserslautern. Ernst & Sohn, S. 718–734.
- [4] Schlaich, J. (2000) *Leichtbau* in: *Stahlbau* 69, H. 8, S. 581–584.
- [5] Schlaich, M.; Bleicher, A. (2007) *Spannbandbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen* in: *Bautechnik* 84, H. 5, S. 311–319. <https://doi.org/10.1002/bate.200710028>
- [6] Schlaich, M.; Apitz, A.; Goldack, A. [Hrsg.] *Form optimized CFRP reinforced and post-tensioned integral concrete bridge using precast girders*.
- [7] Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M. [Hrsg.] (2019) *Application of Prestressed CFRP Textiles for the Development of Thin-Walled Concrete Structural Elements*.
- [8] Leonhardt, F. (1962) *Spannbeton für die Praxis*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.
- [9] Franz, G.; Schäfer, K. (1969 und 1988) *Konstruktionslehre des Stahlbetons – Band II: Tragwerke, Teil A: Typische Tragwerke*. Berlin: Springer Verlag.
- [10] Scheffler, T. (2017) *Development and application of precast hyperboloid shells in East and West Germany from the 1950s to the 1980s* in: Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017 “Interfaces: architecture.engineering.science” 25 – 28th September, 2017, Hamburg, Germany.
- [11] Haeussler, E. (1959) *Precast Prestressed Hyperboloids of Revolution* in: IASS Bulletin 6.
- [12] Ruppert, M. et al. (2002) *Zur Berechnung von vorgespannten Hyperboloidschalen* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 97, H. 4, S. 212–220. <https://doi.org/10.1002/best.200200890>
- [13] Terrasi, G. P. (2012) *Prefabricated Thin-walled Structural Elements Made from High Performance Concrete Prestressed with CFRP Wires* in: *JMSR* 2.
- [14] Forstlechner, F. X.; Freytag, B.; Peters, S. (2015) *Spannbett-Vorspannung dünner Carbonbeton-Platten* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 110, H. 6, S. 419–428. <https://doi.org/10.1002/best.201400087>
- [15] Sydow, A.; Kurath, J.; Steiner, P. (2019) *Extrem leichte Brücke aus vorgespanntem Carbonbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 114, H. 11, S. 869–876. <https://doi.org/10.1002/best.201800108>
- [16] Hegger, J. (2012) *Abschlussbericht des Sonderforschungsbereichs 532 „Textil-bewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“*. RWTH Aachen.
- [17] Curbach, M.; Ortlepp, R. [Hrsg.] (2012) *Sonderforschungsbereich 528 – Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung – Abschlussbericht – gekürzte Fassung*. Dresden: Saechsische Landesbibliothek-Staats- und Universitaetsbibliothek Dresden; Technische Universität Dresden.
- [18] Jesse, F. (2004) *Tragverhalten von Filamentgarnen in zementgebundener Matrix* [Dissertation]. Institut für Massivbau, TU Dresden.
- [19] Jesse, F. (2006) *Efficiency of Multi Filament Reinforcement in Cementitious Composites* in: *Brittle Matrix Composites* 8: Elsevier, S. 275–284.
- [20] Kulas, C. (2013) *Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile* [Dissertation]. Institut für Massivbau, RWTH Aachen.
- [21] Rempel, S. (2018) *Zur Zurverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung* [Dissertation]. RWTH Aachen.
- [22] Preinstorfer, P.; Kromoser, B.; Kollegger, J. (2018) *Einflussparameter auf die Spaltrissbildung in Textilbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 113, H. 12, S. 877–885. <https://doi.org/10.1002/best.201800071>
- [23] Preinstorfer, P.; Kollegger, J. (2020) *New insights into the splitting failure of textile-reinforced concrete* in: *Composite Structures* 243, H. 8, S. 112203. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112203>
- [24] Curbach, M.; Jesse, F. (2009) *Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 104, H. 1, S. 9–16. <https://doi.org/10.1002/best.200800653>
- [25] Scheerer, S.; Michler, H. (2015) *Freie Formen mit Textilbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 110, S1, S. 94–100. <https://doi.org/10.1002/best.201400113>
- [26] Rempel, S. et al. (2015) *Filigrane Bauwerke aus Textilbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 110, S1, S. 83–93. <https://doi.org/10.1002/best.201400111>
- [27] Burgoyne, C. J. (2001) *Rational use of advanced composites in concrete* in: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings 14.
- [28] Krüger, M. (2004) *Vorgespannter Textilbewehrter Beton* [Dissertation]. Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart.
- [29] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V. (2017) *Carbon Concrete Composites C 3 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 112, H. 12, S. 784–794. <https://doi.org/10.1002/best.201700058>
- [30] Dyckerhoff GmbH. www.dyckerhoff.com [Zugriff am: 16.02.2017].
- [31] solidian GmbH *Technisches Datenblatt der Carbongelege solidian GRID Q142/142-CCE-25, Version 170726GN* [online]. www.solidian.com [Stand: 26.07.2017].
- [32] C³-Vorhaben L9 (Stand 09.11.2020) *Arbeitspapier Bemessung – Sicherheitskonzept, Bemessungs- und Konstruktionsregeln (in Bearbeitung)*.
- [33] Schlaich, M.; Apitz, A.; Jesse, F. (2020) *Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton* in: *Beton- und Stahlbetonbau* 115, H. 9, S. 684–696. <https://doi.org/10.1002/best.202000018>
- [34] (1997) *JSCE Concrete Engineering Series 23 – Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials*.
- [35] (2000) *ISIS Canada Research Network: Prestressing Concrete Structures with FRPs*.
- [36] *ACI Committee 440 – Prestressing concrete structures with FRP tendons*.
- [37] *Canadian Standards Association – Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Mississauga, on: Canadian Standards Association, 2012 (CSA standard S806-12)*.
- [38] (2007) *Federation Internationale du Beton – FRP reinforcement in RC structures: Technical report – Bulletin 40*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete.
- [39] Niewels, J.; Hegger, J. (2010) *Betonbauteile mit Bewehrung aus Faserverbundkunststoff (FVK) – 1. Aufl.* Berlin [u. a.]: Beuth. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 582.
- [40] Apitz, A. (2020) *Vorgespannter Carbonbeton im Brückenbau: Beitrag zum werkstoffgerechten Entwerfen und Bemessung*.

sen [Dissertation]. Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin.

- [41] Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P. (2015) *Filigrane Bauwerke aus Textilbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 110 Spezial: Verstärken mit Textilbeton S1, Januar 2015, S. 83–93. <https://doi.org/10.1002/best.201400111>
- [42] Spelter, A. et al. (2019) *Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations* in: Applied Sciences 9, H. 8, S. 1651. <https://doi.org/10.3390/app9081651>
- [43] (2011) *Eurocode 2 für Deutschland. Kommentierte Fassung. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von*

Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1 Allgemeine Regeln für den Hochbau.

- [44] Lenz, T. *Verfahren und Verwendung einer Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens zur Herstellung von Betonbauteilen – Patent*. DE 10 2016 211 176 B4.
- [45] BCS NATUR- UND SPEZIALBAUSTOFFE GMBH www.bcs-dresden.de
- [46] Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH *Datenblatt der CarbonelegeSITgrid040* [online]. www.solutionsin-textile.com [Stand: April 2019]

Autoren



Dipl.-Ing. Juan P. Osman-Letelier
(Korrespondenzautor)
juan.p.osmanletelier@tu-berlin.de
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren –
Massivbau
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin



Dr.-Ing. Alex Hückler
alexander.hueckler@tu-berlin.de
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren –
Massivbau
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin



Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
mike.schlaich@tu-berlin.de
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren –
Massivbau
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

Zitieren Sie diesen Beitrag

Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M. (2021) *Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 10, S. 786–798. <https://doi.org/10.1002/best.202100019>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 9. Februar 2021; angenommen: 25. Juni 2021.