

# Untersuchungen zur Dübelwirkung in Carbonbetonbauteilen

Sven Bosbach, Josef Hegger, Martin Claßen

*Lehrstuhl und Institut für Massivbau,  
RWTH Aachen University,  
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Germany*

[sbosbach@imb.rwth-aachen.de](mailto:sbosbach@imb.rwth-aachen.de)

## Kurzfassung

Bauteile mit textiler CFK-Bewehrung zeichnen sich durch hohe Druck- und Zugfestigkeiten aus und haben ein großes Potenzial für den Einsatz in dünnwandigen Bauteilen wie Schalentragwerken oder Trägerstegen. Allerdings sind die Tragmechanismen von Carbonbeton unter Schubbeanspruchung bisher nur in Ansätzen untersucht. Vor allem die Dübelwirkung der querpressungsempfindlichen Carbonbewehrung weist noch deutlichen Forschungsbedarf auf. Für Stahlbetonbauteile wurde die Dübelwirkung der Längsbewehrung seit mehreren Jahrzehnten untersucht und es wurden zahlreiche konstitutive Gesetze für den Traganteil der Dübelwirkung entwickelt. Im Gegensatz dazu wird erwartet, dass die Querdruckempfindlichkeit der CFK-Bewehrung einen wesentlichen Einfluss auf die Aktivierung der Dübelwirkung in Schubrisen hat. Bisher sind weder die Schädigung und der Bruch der CFK-Gitter infolge Querdruck noch eine schubinduzierte Delamination der Bewehrung im Einflussbereich von Schubrisen untersucht worden. Im Gegensatz zur klassischen Stahlbewehrung haben Carbonfaserstränge einen annähernd elliptischen Querschnitt, sodass auch die Ausrichtung der Faserstränge im Riss zu berücksichtigen ist. Zudem fehlen geeignete konstitutive Gesetze, um die Dübelwirkung von Carbonbewehrung zutreffend zu beschreiben. In diesem Beitrag werden Dübelversuche mit textilen CFK-Gittern vorgestellt, wobei der im Vergleich zu Stahlbewehrung geringe Quer-Elastizitätsmodul und die Querschnittsgeometrie der CFK-Gitter im Fokus stehen. Weiterhin werden die Haupteinflussgrößen auf das Dübeltragverhalten von Biege- und Querkraftbewehrung aus CFK-Gittern diskutiert.

Keywords: CFK, Carbonbeton, Querkraft, Dübelwirkung

## Abstract

Composite structures with textile CFRP (carbon fibre reinforced polymer) reinforcement are characterised by high compressive and tensile strength and have great potential for use in thin-walled structures such as shell structures or girder webs. However, the stress transfer mechanisms of carbon reinforced concrete under membrane stresses have not been sufficiently investigated yet. For the structural behaviour of carbon reinforced concrete (CRC) structures, the dowel action of CFRP yarns has not been investigated yet in detail. For steel reinforced concrete elements, the dowel action of the longitudinal reinforcement has been studied for several decades and numerous constitutive laws for the shear contribution of the dowel action have been developed. In contrast, the sensitivity to transverse pressure of CFRP reinforcement is expected to have a significant influence on the activation of dowel action in cracks. Neither the damage and fracture of impregnated textiles due to transverse compression nor the shear-induced delamination of reinforcement in the vicinity of cracks have been investigated in detail. In contrast to conventional steel reinforcement, CFRP yarns have an approximately elliptical cross-section, thus the orientation of the yarns in cracks needs to be considered too. In addition, suitable constitutive laws to describe the dowel effect of CFRP reinforcement are not available. This paper presents dowel tests with textile CFRP grids, focusing on the low transverse Young's modulus compared to steel reinforcement and the cross-sectional geometry of the CFRP grids. Furthermore, the main influencing parameters on the dowel behaviour of flexural and shear reinforcement made of CFRP grids are discussed.

Keywords: CFRP, carbon reinforced concrete, shear, dowel action

## 1 Grundlagen zur Dübelwirkung

Textile Gitterbewehrungen aus CFK (Carbonfaserverstärkter Kunststoff) haben ein hohes Anwendungspotenzial in dünnwandigen Betonbauteilen. Erste Praxisbeispiele in Deutschland zeigen die Anwendbarkeit dieser neuen Bauweise Carbonbeton, z. B. bei Brücken, Fassadenplatten oder Schalentragwerken (z. B. [1–8]). Während das Verhalten solcher Bauteile unter Belastungen wie Biegung oder einaxialen Zug bereits umfassend untersucht wurde (z. B. [9–13]), sind die Querkrafttragmechanismen in Carbonbeton noch nicht ausreichend erforscht. So wird beispielsweise der Tragmechanismus der Dübelwirkung der Carbonbewehrungen aufgrund ihrer Querdruckempfindlichkeit [14] bei der Ermittlung des Querkraftwiderstands von Carbonbetonbauteilen oft vernachlässigt.

Die Dübelwirkung beschreibt dabei den Widerstand gegen eine Verschiebung oder Kraftkomponente senkrecht zur Stabachse der im Beton eingebetteten Bewehrung. Dieser Verschiebungszustand tritt vor allem durch eine gegenseitige parallele Verschiebung von Rissufern auf [15, 16]. Während der Dübelwiderstand von Bewehrungen mit großer Betondeckung hauptsächlich durch den Materialwiderstand der Bewehrung beeinflusst wird (Versagensmodus I), ist der Zugwiderstand des Betons in der Bewehrungsebene für den Dübelwiderstand bei Biegezugbewehrungen in Balken und Platten maßgebend (Versagensmodus II, Bild 1) [17–19]. Beim Versagensmodus I (Versagen der Bewehrung) bleibt die Betondeckung intakt, allerdings kann es zu lokalen Abplatzungen des Betons unterhalb der Bewehrung kommen. Bei Betonstahlbewehrungen tritt dies erst nach Bildung eines Fließgelenks in der Bewehrung auf. Beim Versagensmodus II (Betonversagen mit Dübelrissbildung) wird zwischen einem Versagen der seitlichen und der unteren Betondeckung durch Überschreitung der Betonzugfestigkeit  $\sigma_{ct}$  unterschieden (*side* bzw. *bottom splitting*).

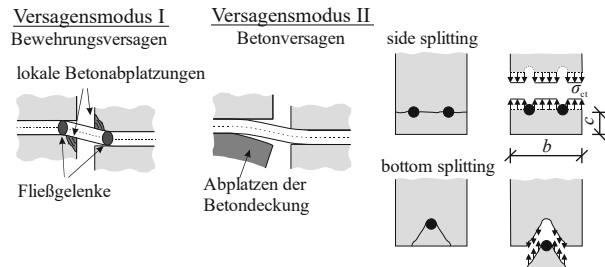


Bild 1 Dübelversagensarten in Stahlbetonbauteilen nach [16, 20]

Für Stahlbetonbauteile wurde die Dübelwirkung seit den 1960er Jahren intensiv erforscht. Aufbauend auf den erzielten Ergebnissen wurden mehrere empirische konstitutive Gesetze für den Traganteil der Dübelwirkung abgeleitet (z. B. [15, 20–23, 17]). Da sich die Materialeigenschaften und das Tragverhalten von CFK deutlich von denen der Stahlbewehrung unterscheiden, können die abgeleiteten Gesetze nicht auf textile CFK-Bewehrungen übertragen werden. Zum Beispiel wurde in Versuchen zur Dübelwirkung von CFK-Stäben als Biegezugbewehrung in [24] festgestellt, dass CFK-Stäbe 30 % geringere Dübelkräfte als Betonstahl mit ähnlichem Durchmesser und gleichen Verbundeigenschaften übertragen können. Allgemein existieren nur wenige Untersuchungen zum Dübeltragverhalten von textilen CFK-Bewehrungen. Für ungetränkte textile Bewehrung schlug Voss vor, die Dübelwirkung zu vernachlässigen, da sie eine noch geringere Quersteifigkeit als nichtmetallische Stabbewehrung aufweist [25]. Bei Versuchen an I-Trägern mit imprägnierter Textilbewehrung wurde von KULAS [26] ein Anteil der Dübelwirkung am Gesamtschubwiderstand von weniger als 15 % ermittelt. Um die Dübelwirkung von textilen CFK-Gittern als Biegezugbewehrungen genauer zu untersuchen, erweiterte BIELAK [27] den Versuchsaufbau von BAUMANN & RÜSCH [15], um die aus der Biegung resultierenden Längszugspannungen in der Biegezugbewehrung zu berücksichtigen. Es zeigte sich, dass sowohl das Lastniveau, bei dem sich die Dübelrisse bilden, als auch die Dübelsteifigkeit des Faserstrangs von der Längszugkraft beeinflusst werden. In Dübelversuchen mit Betonstahlbewehrung [28, 29] sowie mit CFK-Spanngliedern [30] wurde ebenfalls der Einfluss von Längszugspannungen in der Bewehrung auf das Dübeltragverhalten festgestellt. Dabei führten höhere Zugkräfte in der Bewehrung zu einem steiferen Dübelverhalten. Weitere Untersuchungen fokussierten die Auswirkungen von schrägen Schubrisen auf das Dübelverhalten von Betonstahlbewehrung [31, 22] sowie von CFK-Spanngliedern [30] mit dem Ergebnis, dass die Dübeltragfähigkeit bei Schubrisenneigungen  $< 90^\circ$  sowohl für Betonstahl als auch für CFK-Spannglieder reduziert wurde.

Bild 2 (a) zeigt einen Schubriss in einem auf Biegung und Schub belasteten Carbonbetonbalken mit textilen CFK-Gittern als Biegezug- und Querkraftbewehrung. Durch die Rissuferverschiebung treten in den vertikalen und horizontalen Fasersträngen Dübelkräfte ( $F_{da}$ ) auf. Dabei ist zu beachten, dass aufgrund des ungleichmäßigen Querschnitts der Faserstränge zwischen der Dübelwirkung der Biegezug- und der Querkraftbewehrung unterschieden werden muss (Bild 2 (b)). Während die Faserstränge der Biegezugbewehrung in Richtung ihrer schwachen Achse belastet werden (geringes Flächenträgheitsmoment  $I_{yy}$ ), werden die Faserstränge der vertikal ausgerichteten Querkraftbewehrung in Richtung ihrer starken Achse belastet (großes  $I_{yy}$ ). In Bild 2 (b) wird der Querschnitt der Faserstränge vereinfacht mit einem elliptischen Querschnitt approximiert. Die Neigung des Schubrisses  $\alpha$  ist über die Höhe des Probekörpers variabel und im Bereich der Biegezugbewehrung sehr steil (ca.  $85^\circ$ ), während die Neigung mit dem Anwachsen des Schubrisses in Richtung der Druckzone flacher wird. Bei kleineren Winkeln  $\alpha$  stützt sich der Faserstrang aufgrund der vertikalen Relativverschiebung der Rissufer auf eine geringere Betonfläche ab, sodass die resultierenden Spannungen über ein kleineres Betonvolumen abgetragen werden müssen [17, 22]. Darüber hinaus variieren die Längsdehnungen in den Fasersträngen über die Balkenhöhe sowie in den einzelnen vertikalen Fasersträngen. Somit beeinflusst die Bewehrungsdehnung auch die über den Riss übertragene Dübelkraft.

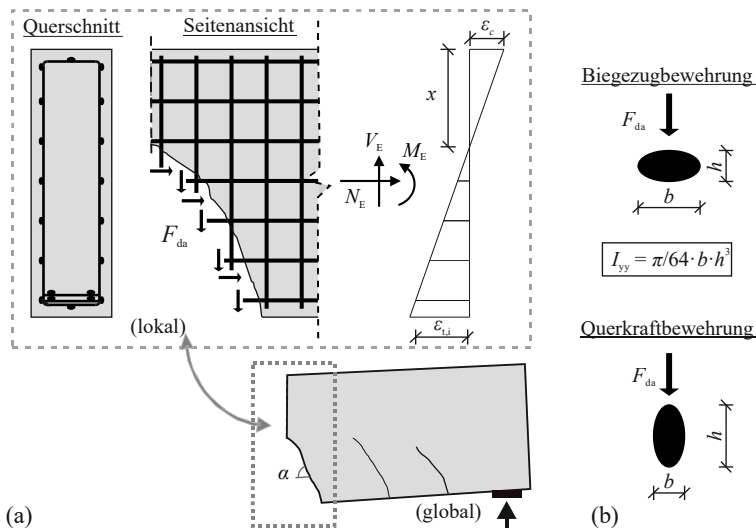


Bild 2 Dübelwirkung in einem Carbonbetonbalken mit CFK-Gittern als Biegezug- und Querkraftbewehrung in Anlehnung an [16, 32] (a) und Orientierung der Dübelkraft relativ zum Faserstrangquerschnitt (b)

Um das Dübeltragverhalten von getränkter CFK-Gitterbewehrung bzw. den einzelnen CFK-Fasersträngen umfassend zu untersuchen, wurde ein weiterentwickelter Versuchsaufbau in Anlehnung an [27] verwendet, mit dem u. a. unterschiedliche Bewehrungslängsdehnungen und Risswinkel untersucht werden können. Anhand von zwei Versuchsreihen wird im Folgenden das grundlegende Dübeltragverhalten von textilen CFK-Biegezug- und Querkraftbewehrungen und die Haupteinflussfaktoren auf das Dübelverhalten beschrieben und diskutiert.

## 2 Experimentelle Untersuchung des Dübeltragverhaltens von CFK-Fasersträngen

### 2.1 Verwendete Materialien

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein hochfester, selbstverdichtender Beton mit einem Größtkorn von 4 mm verwendet. Die Würfel- ( $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ ) und Zylinderdruckfestigkeit ( $d/h = 150/300 \text{ mm}$ ) [33] und der E-Modul [34] wurden für die Versuchsreihen am Tag der Prüfung ermittelt. Darüber hinaus wurden die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit [35] mit Prismen ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) bestimmt. Die Mittelwerte der Betonkennwerte nach einer Erhärtungszeit von 14 Tagen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Mittlere Betonkennwerte nach einer Erhärtingszeit von 14 Tagen

| Erhärtingszeit | Prismendruck-<br>festigkeit | Biegezugfestig-<br>keit | Würfeldruck-<br>festigkeit | Zylinderdruck-<br>festigkeit | E-Modul |
|----------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|---------|
| [-]            | [MPa]                       | [MPa]                   | [MPa]                      | [MPa]                        | [GPa]   |
| 14             | 99,7                        | 11,6                    | 106,5                      | 9,5                          | 42,8    |

Für alle Probekörper wurde ein symmetrisches biaxiales CFK-Gitter mit einem Achsabstand von 38 mm in beiden Richtungen und einer Epoxidharztränkung verwendet. Zur Bestimmung der Zugfestigkeit und des E-Moduls des Bewehrungsmaterials wurden Faserstrangzugversuche nach [36] in Kett-(0°) und Schussrichtung (90°) durchgeführt. Tabelle 2 zeigt die ermittelten Materialeigenschaften.

Tabelle 2 Materialeigenschaften der verwendeten CFK-Gitter

| Material | Querschnittsfläche* |     | Achsabstand Fasersträng |     | Zugfestigkeit |      | E-Modul |     |
|----------|---------------------|-----|-------------------------|-----|---------------|------|---------|-----|
| [-]      | [mm²/m]             |     | [mm]                    |     | [MPa]         |      | [GPa]   |     |
|          | 0°                  | 90° | 0°                      | 90° | 0°            | 90°  | 0°      | 90° |
| CFK      | 95                  | 95  | 38                      | 38  | 3710          | 3490 | 231     | 244 |

\* Faserquerschnittsfläche ohne Harz

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Untersuchung des Dübeltragverhaltens von CFK-Gitterbewehrung wurde der in Bild 3 dargestellte Versuchsaufbau verwende, der eine Weiterentwicklung des Versuchsaufbaues von [27] ist und für die Untersuchung der Biegezug- sowie der Querkraftbewehrung genutzt wurde. Analog zu [15] handelte es sich bei den Probekörpern um Biegebalken, die durch vorgebene Risse und Öffnungen in zwei separate Körper unterteilt sind. Während der äußere Balkenteil auf zwei Auflagern gelagert wurde, war das Innenteil nur durch die zu untersuchenden Faserstränge mit dem Rest des Probekörpers verbunden. PE-Folien sorgten dafür, dass außer den Dübelkräften keine weiteren Kräfte zwischen den beiden Teilen übertragen wurde. Bei den Versuchen wurde zunächst eine exzentrische Zugnormalkraft ( $N$ ) über Stahlprofile in den Probekörper eingeleitet, wobei die Last und das daraus resultierende Moment über zwei eingebettete Stahllanker je Seite an definierten Stellen in den Versuchskörper eingeleitet wurden. Die Normalkraft und die daraus resultierende Dehnung in der Bewehrung wurde während des anschließenden Aufbringens der vertikalen Dübelkraft konstant gehalten. Die Dübelkraft wurde über eine Stahltraverse und Elastomerstreifen mit zwei Einzellasten ( $F/2$ ) aufgebracht, wodurch das daraus resultierende zusätzliche Biegemoment im Vergleich zum ansonsten für Dübelversuche gebräuchlichen 3-Punkt-Biegeversuch minimiert wird [37]. Der Auflagerabstand zu den Sollrissen wurde für die Versuche mit Querkraftbewehrung zu  $x_r = 172$  mm gewählt, sodass sich keine direkte Druckstrebe ins Auflager ausbilden kann, aber zeitgleich das Zusatzmoment aus der Dübelkraft minimiert wird. Bei den Versuchen mit Biegezugbewehrung wurde hingegen ein etwas vergrößerter Abstand von  $x_r = 300$  mm gewählt, um die Entwicklung und Fortpflanzung der Dübelrisse besser untersuchen zu können.

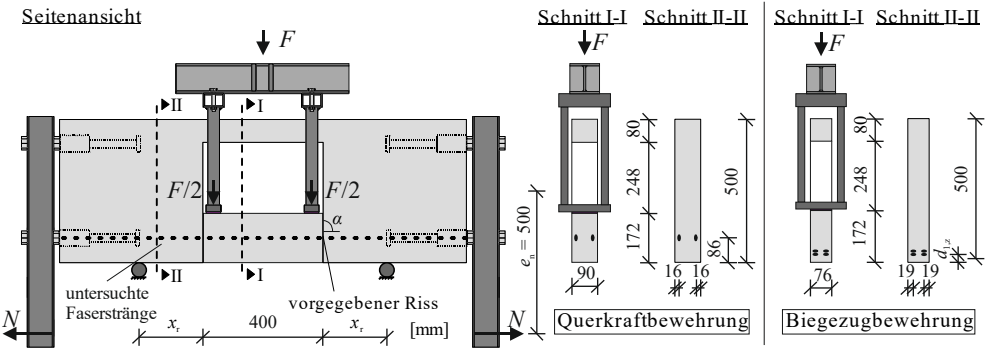


Bild 3 Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Dübelwirkung von textiler CFK-Querkraft- und -Biegezugbewehrung inkl. Abmessungen und Querschnitt der Probekörper

Alle Probekörper wurden in zwei Schritten hergestellt. Nach dem Ausschalen des Innenteils wurde eine 0,75 mm dicke PE-Folie mit zusätzlichem Trennmittel an den vertikalen Fugen angebracht, um einen vordefinierten Riss auszubilden. Die Oberseite des Innenteils wurde mit extrudiertem Polystyrolschaum abgedeckt, um die notwendigen Öffnungen für den Einbau der Stahltraverse und der Elastomerstreifen auszubilden. Dadurch wurde zudem sichergestellt, dass der Obergurt während des gesamten Versuchs überdrückt ist und keine Risse infolge der exzentrischen Normalkraft entstehen.

Bei der Versuchsdurchführung wurde zunächst die exzentrische Normalkraft ( $N$ ) bis zu einer vorgegebenen Dehnung in der Bewehrung erhöht und für den Rest der Prüfung konstant gehalten. Anschließend wurde der mittlere Teil des Balkens weggesteuert mit 0,3 mm/min senkrecht zur Faserstranglängsrichtung belastet. Die Außenabmessungen der Probekörper betrugen für die Versuche mit Querkraftbewehrung  $1100 \times 500 \times 90 \text{ mm}^3$ , während die horizontale Betondeckung 15 mm und der vertikale Achsabstand der Faserstränge zur Bauteilunterseite 86 mm betrug. In den Versuchen wurden die Einflüsse aus Neigung des Sollrisses  $\alpha$  und der Dehnung in Faserstranglängsrichtung  $\epsilon_{nm}$  an jeweils zwei die Sollrisse kreuzenden Fasersträngen untersucht. Bei den Versuchen mit Biegezugbewehrung waren die Außenabmessungen aufgrund der Faserstrangachsabstände von 38 mm und der Auflagerabstände mit  $1300 \times 500 \times 76 \text{ mm}^3$  leicht angepasst und es wurde ein vertikaler Achsabstand zwischen den Gitterlagen von ca. 5,4 mm ( $\triangleq 2 \cdot h_{\text{Faserstrang}}$ ) gewählt. In den Versuchen wurden die Einflüsse aus vertikaler Betondeckung, Faserstranglängsdehnung und Lagenanzahl an Bewehrungsgittern (zwei Faserstränge je Gitterlage) untersucht. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche und die variierten Parameter ist in den Tabellen 3 und 4 gegeben.

Tabelle 3    Dübelversuche mit textiler CFK-  
                  Querkraftbewehrung

| Versuchskörper | $\eta_{nm} = \epsilon_{nm} / \epsilon_{nm,max}$ | $\alpha$ |
|----------------|-------------------------------------------------|----------|
| [-]            | [%]                                             | [°]      |
| DA-S-90-50     | 50                                              | 90       |
| DA-S-90-70     | 70                                              | 90       |
| DA-S-45-25     | 25                                              | 45       |
| DA-S-45-50     | 50                                              | 45       |
| DA-S-45-70     | 70                                              | 45       |
| DA-S-60-50     | 50                                              | 60       |
| DA-S-30-50     | 50                                              | 30       |

$\eta_{nm}$ : anvisierte Längsdehnung als Anteil der Bruchdehnung;  
 $\epsilon_{nm,max}$ : Bruchdehnung der Faserstränge;  $\alpha$ : Rissneigung

Tabelle 4    Dübelversuche mit textiler CFK-  
                  Biegezugbewehrung

| Versuchskörper | $\eta_{nm}$ | $d_{1,z}$ | Lagen |
|----------------|-------------|-----------|-------|
| [-]            | [%]         | [mm]      | [-]   |
| DA-F-1-15-25   | 25          | 15        | 1     |
| DA-F-1-33-25   | 25          | 33        | 1     |
| DA-F-1-15-50   | 50          | 15        | 1     |
| DA-F-1-15-70   | 70          | 15        | 1     |
| DA-F-2-15-25   | 25          | 15        | 2     |
| DA-F-3-15-25   | 25          | 15        | 3     |
| DA-F-4-15-25   | 25          | 15        | 4     |

$d_{1,z}$ : Abstand zwischen unteren Fasersträngen und Bauteilunterkante; Lagen: Anzahl an Gitterlagen, die den Sollriss kreuzen

2.3    Messtechnik

Bei allen Versuchen wurden die Rissöffnung und die vertikale Relativverschiebung zwischen dem inneren und äußeren Teil der Probekörper von der Vorderseite mit digitaler Bildkorrelation (DIC) und auf der Rückseite mit vertikalen und horizontalen induktiven Wegaufnehmern (IWA) ermittelt (Bild 4). Zusätzlich wurden faseroptische Sensoren (FOS) mit Cyanacrylat-Klebstoff nach [38] auf den untersuchten Fasersträngen angebracht. Die FOS-Auswertung nach [39] diente u. a. zur Überprüfung der induzierten Vordehnung vor dem Aufbringen der Dübelkraft, die bei allen Versuchen dem Soll-Wert  $\eta_{nm}$  entsprach.

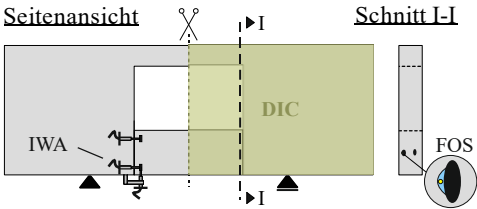


Bild 4    Verwendete Messtechnik für die Dübelversuche: IWA auf der Rückseite, DIC auf der Vorderseite der Probekörper und FOS auf den untersuchten Fasersträngen

### 3 Erkenntnisse zur Dübelwirkung der Querkraftbewehrung

In Tabelle 5 sind die in den Dübelversuchen mit Querkraftbewehrung erreichten Dübelkräfte pro Faserstrang  $V_{d,max}$  und die zugehörigen maximalen Dübelverschiebungen  $v_{d,max}$  für alle durchgeführten Versuche zusammengestellt. Die maximalen Dübelkräfte variieren zwischen 1,2 und 1,9 kN pro Faserstrang. Die aufgeführten maximalen Dübelverschiebungen sind der Durchschnitt der gemessenen Relativverschiebungen an den beiden vordefinierten Rissen. Bei allen durchgeführten Versuchen traten keine Dübelrisse auf und die Faserstränge versagten durch Abscheren (Versagensmodus I).

Tabelle 5 Versuchsergebnisse der Dübelversuche mit Querkraftbewehrung

| Versuchskörper | $f_{c,prisma}$ | $\sigma_{nm}$ | $F_u$ | $V_{d,max}$ | $v_{d,max}$ |
|----------------|----------------|---------------|-------|-------------|-------------|
| [-]            | [MPa]          | [MPa]         | [kN]  | [kN]        | [mm]        |
| DA-S-90-50     | 90,9           | 1902          | 7,7   | 1,9         | 3,4         |
| DA-S-90-70     | 111,8          | 2563          | 6,9   | 1,7         | 2,1         |
| DA-S-45-25     | 110,0          | 1229          | 5,9   | 1,5         | 6,0         |
| DA-S-45-50     | 90,9           | 1866          | 5,4   | 1,4         | 4,5         |
| DA-S-45-70     | 110,0          | 2582          | 4,7   | 1,2         | 3,2         |
| DA-S-60-50     | 95,7           | 1873          | 5,9   | 1,5         | 3,2         |
| DA-S-30-50     | 111,8          | 1872          | 4,8   | 1,2         | 5,0         |

$f_{c,prisma}$ : Prismendruckfestigkeit;  $\sigma_{nm}$ : Längsspannung in den Fasersträngen nach Aufbringen der exzentrischen Normalkraft;  $F_u$ : gesamte maximale Vertikalkraft;  $V_{d,max}$ : maximale Dübelkraft pro Faserstrang;  $v_{d,max}$ : Dübelverformung bei maximaler Dübelkraft

Das Dübeltragverhalten von textiler CFK-Querkraftbewehrung ist in Bild 5 am Beispiel von Probekörper DA-S-90-50 (mit  $\eta_{nm} = 0,5 \cdot \varepsilon_{nm,max}$  und  $\alpha = 90^\circ$ ) dargestellt. Dabei ist die Dübelkraft pro Faserstrang  $V_{d,exp}$  für eine zunehmende Dübelverschiebung  $v$  abgebildet. Das Dübeltragverhalten kann vereinfacht in drei Bereiche unterteilt werden. Zu Beginn der Dübelkraft-Verschiebungs-Beziehung ist die Steigung der Kurve am größten ( $t_0 - t_1$ ), mit zunehmender Dübelverschiebung nimmt die Steifigkeit ab ( $t_1 - t_2$ ). Ab dem Zeitpunkt ( $> t_2$ ) weist der Faserstrang ein wesentlich weiches Dübeltragverhalten auf, die Kraft steigt linear mit der Verschiebung bis zur maximalen Dübelkraft an. Hier versagen die ersten Fasern im oberen Bereich des Faserstrangs, wodurch kleinere Lastabfälle resultierten. Nach einem erneuten geringen Kraftanstieg schert der gesamte Faserstrang vollständig ab.

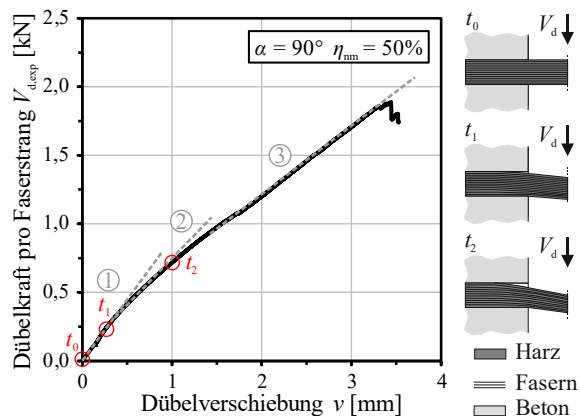


Bild 5 Allgemeines Dübeltragverhalten von textiler CFK-Querkraftbewehrung am Beispiel von Probekörper DA-S-90-50

Die drei Bereiche können auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der Fasern und des Harzes zurückgeführt werden. Im Nachgang der Versuche zeigte sich an den Fasersträngen, dass das Epoxidharz beschädigt wurde und sich die Fasern teilweise voneinander gelöst haben. Im ersten Bereich ( $t_0 - t_1$ ) wird der Faserstrang aufgrund des Querdruckes resultierend aus der aufgetragenen Einzellast komprimiert, während der Beton (mit ausreichender Betondeckung) als starre Bettung wirkt. Im Gegensatz zu Stahlbeton ( $E_s / E_c \approx 210000 / 30000 = 7$ ) war das Steifigkeitsverhältnis der Bewehrung

quer zur Faserrichtung ( $E_{nm,\perp} \approx 8000$  MPa) zum hochfesten Beton ( $E_c \approx 43000$  MPa) in den Versuchen deutlich kleiner ( $E_{nm,\perp} / E_c \approx 0,19$ ). Dies bedeutet, dass das Dübeltragverhalten nicht durch den Beton, sondern durch den Faserstrang gesteuert wurde. Im zweiten Bereich ( $t_1 - t_2$ ) kommt es aufgrund der deutlich geringeren Steifigkeit des Epoxidharzes im Vergleich zur Quersteifigkeit der CFK-Fasern im inhomogenen Faserstrang ( $E_{epoxy,\perp} \approx 2000$  MPa bei Druckbelastung [40]  $\Leftrightarrow E_{carbon,\perp} \approx 28000$  MPa [41]) zu einer ausgeprägteren Kompression des Epoxidharzes (Bild 5). Die daraus resultierenden hohen Spannungen im Epoxidharz führen zu Zwischenfaserbrüchen im Faserstrang, wodurch das Harz weiter komprimiert wird und die Biegewirkung des Bewehrungsstabes stellenweise in eine biegeweichere Seilwirkung übergeht. Danach sind nur noch die Fasern im Faserstrang am Lastabtrag beteiligt und werden durch Längsspannungen und Querdruk beansprucht.

Als Haupteinflussfaktoren auf das Dübeltragverhalten konnten in den Versuchen die Längszugspannung in der Bewehrung sowie der Risswinkel identifiziert werden. Bild 6 (a) zeigt die Ergebnisse von Versuchskörpern mit Risswinkeln von  $90^\circ$  und  $45^\circ$  mit unterschiedlichen Längsdehnungen in den Fasersträngen. Sowohl die maximale Dübeltragfähigkeit als auch die Dübelsteifigkeit werden durch die Längsdehnung deutlich beeinflusst. So zeigten die Versuche mit größerer Längsdehnung ein deutlich steiferes Dübelverhalten, während die maximale Dübelkraft etwas geringer ist als bei den Versuchen mit kleiner Längsdehnung.

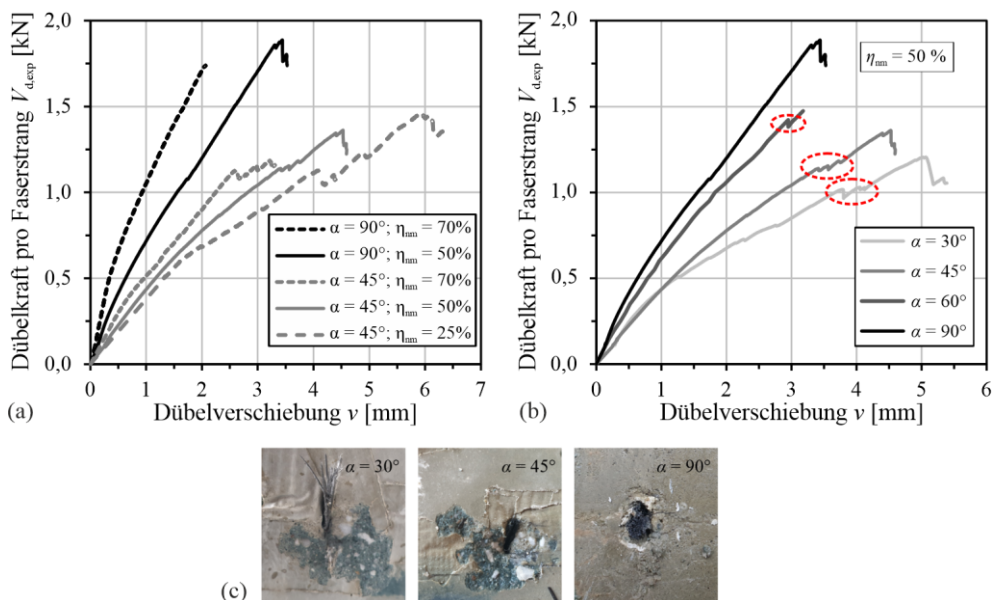


Bild 6 Einfluss der Vordehnung (a) und der Rissneigung (b) auf das Dübeltragverhalten, sowie Detailaufnahmen von Betonoberflächen im Bereich der Faserstränge nach dem Versagen (c)

Bild 6 (b) zeigt das Dübeltragverhalten von Probekörpern mit unterschiedlichen Rissneigungen ( $\alpha = 30 - 90^\circ$ ) und gleicher Vordehnung ( $\eta_{nm} = 0,5 \cdot \varepsilon_{nm,max}$ ). Bei den durchgeführten Versuchen nahmen die Dübelsteifigkeit sowie die maximale Dübeltragfähigkeit für kleinere Winkel  $\alpha$  ab. So war beispielsweise beim Versuchskörper DA-S-45-50 mit  $\alpha = 45^\circ$  eine 32% größere maximale Dübelverschiebung als beim Versuchskörper DA-S-90-50 mit  $\alpha = 90^\circ$  zu beobachten, während eine deutlich geringere maximale Dübelkraft erreicht wurde (-26%). Darüber hinaus zeigten die Versuchskörper mit  $\alpha < 90^\circ$  lokale Betonabplatzungen unterhalb der Faserstränge (Bild 6 (c)). Das Auftreten dieser lokalen Abplatzungen ist auch in den Dübelkraft-Verschiebungsbeziehungen zu erkennen (Bild 6 (b): rote Kreise).

#### 4 Erkenntnisse zur Dübelwirkung der Biegezugbewehrung

Bei den Dübelversuchen mit Biegezugbewehrung traten bis auf Versuch DA-F-1-33-25 (große Betondeckung) immer Dübelrisse auf (Versagensmodus II). Nach Ausbildung der Dübelrisse an beiden Sollrissen und Ausbreitung der Dübelrisse in Richtung der Auflager versagten die Faserstränge bei den



Versuchen mit ein oder zwei Bewehrungslagen durch Abscheren. Tabelle 6 zeigt die maximale Dübelkraft pro Rissfläche  $V_{d,max}$ , die zugehörige maximale vertikale Dübelverschiebung  $v_{d,max}$  sowie die entsprechenden Ergebnisse bei Beginn der Dübelrissbildung für alle durchgeführten Versuche. Hierbei wird die Kraft pro Rissfläche angegeben, da in den Versuchen unterschiedlich viele Faserstränge den Riss kreuzen und somit eine bessere Vergleichbarkeit gegeben ist.

Tabelle 6 Versuchsergebnisse der Dübelversuche mit Biegezugbewehrung

| Specimen     | $f_{c,prisma}$ | $\sigma_{nm}$ | $V_{d,crack}$ | $v_{d,crack}$ | $V_{d,max}$ | $v_{d,max}$ |
|--------------|----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| [–]          | [MPa]          | [MPa]         | [kN]          | [mm]          | [kN]        | [mm]        |
| DA-F-1-15-25 | 111,8          | 947           | 2,1           | 1,8           | 3,1         | 5,7         |
| DA-F-1-33-25 | 111,8          | 910           | -             | -             | 3,2         | 1,8         |
| DA-F-1-15-50 | 101,9          | 1797          | 2,4           | 1,3           | 2,7         | 5,1         |
| DA-F-1-15-70 | 101,9          | 2670          | 1,5           | 0,3           | 1,8         | 1,9         |
| DA-F-2-15-25 | 101,9          | 929           | 1,6           | 0,5           | 5,7         | 4,8         |
| DA-F-3-15-25 | 101,6          | 929           | 3,7           | 1,7           | 5,1*        | 18,8        |
| DA-F-4-15-25 | 111,8          | 992           | 3,0           | 0,9           | 5,1*        | 2,2         |

$f_{c,prisma}$ : Prismendruckfestigkeit;  $\sigma_{nm}$ : Längsspannung in den mittig angeordneten Fasersträngen nach Aufbringen der exzentrischen Normalkraft;  $V_{d,crack}$ : Dübelkraft pro Rissfläche bei Dübelrissbildung;  $v_{d,crack}$ : Dübelverformung bei Dübelrissbildung;  $V_{d,max}$ : maximale Dübelkraft pro Rissfläche;  $v_{d,max}$ : Dübelverformung bei maximaler Dübelkraft; \*kein Abscheren der Faserstränge (Versuchsabbruch)

Das allgemeine Dübeltragverhalten der textilen CFK-Biegezugbewehrung sowie der Einfluss der Betondeckung bei einer Gitterlage und unterschiedlichen Betondeckungen bei gleicher Längsspannung in den Fasersträngen ist in Bild 7 (a) dargestellt. Zu Beginn der Verläufe ist erneut eine leichte Reduzierung der Dübelsteifigkeit infolge der Komprimierung des Epoxidharzes zu beobachten. Diese ist aufgrund der Belastungsrichtung der Faserstränge und dem damit einhergehenden geringeren Einfluss auf das Flächenträgheitsmoment weniger ausgeprägt als bei der Querkraftbewehrung. Zudem ergibt sich aus der kleineren Betondeckung eine geringere Bettungssteifigkeit der Faserstränge im Vergleich zu den Versuchen an Querkraftbewehrung mit größerer Betondeckung.

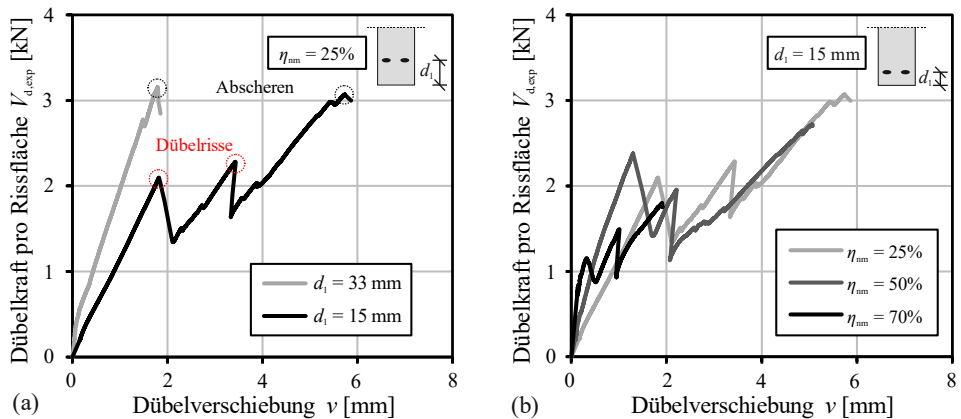


Bild 7 Einfluss der vertikalen Betondeckung (a) und der Faserstranglängsspannung (b) auf das Dübeltragverhalten von textiler CFK-Biegezugbewehrung

Bei geringer Betondeckung ( $d_1 = 15$  mm) entstand zunächst am linken und dann am rechten vorgegebenen Sollriss ein Dübelriss. Nach weiterer Laststeigerung kam es zum Abscheren der Faserstränge. Bei dem Probekörper mit einer größeren Betondeckung ( $d_1 = 33$  mm) war im Gegensatz dazu ein ähnliches Dübelverhalten wie bei den Versuchen mit Querkraftbewehrung ohne Dübelrisse mit reinem Abscheren der Faserstränge zu beobachten. Dies ist damit zu begründen, dass der Beton eine deutlich höhere Steifigkeit als der Faserstrang quer zur Faser besitzt und bei einer ausreichenden Bettung somit kein Betonversagen eintritt. In Bild 7 (b) sind die Ergebnisse von Probekörpern mit je einem Gitter und



einer Betondeckung von 14 mm ( $d_1 = 15$  mm) mit unterschiedlichen Längsdehnungen in der Bewehrung dargestellt. Analog zu den Versuchen mit CFK-Querkraftbewehrung ist zu erkennen, dass die Faserstranglängsdehnung einen deutlichen Einfluss auf das Dübeltragverhalten hat. Neben dem steiferen Dübeltragverhalten wird die maximale Dübeltragfähigkeit bei höherer Längsspannung reduziert.

In Bild 8 (a) ist der Einfluss der Gitterlagen für eine Betondeckung von 14 mm ( $d_1 = 15$  mm) und einer Vordehnung von  $0,25 \cdot \epsilon_{\text{nm,max}}$  dargestellt. Bei mehreren Bewehrungslagen resultiert ein deutlich steiferes Dübelverhalten, da das Bewehrungspaket insgesamt eine höhere Steifigkeit besitzt. Dies ist damit zu begründen, dass bei mehreren Bewehrungslagen bei gleicher Bewehrungsdehnung eine höhere Gesamtzugkraft im System wirkt. Bei den Versuchen mit einem oder zwei Gittern, scherten die Faserstränge nach der beidseitigen Dübelrissbildung ab, wobei die doppelte Faserstranganzahl zu einer verdoppelten maximalen Dübeltragfähigkeit führte. Beim Versuch mit drei Gitterlagen hingegen stellte sich eine ausgeprägte Dübelrissbildung ein, die mehrere Lastabfälle zur Folge hatte. Die Dübelrisse bildeten sich bis zum Auflager aus, sodass der Versuch abgebrochen werden musste. Die abgeschlossene Dübelrissbildung der drei Probekörper ist in Bild 8 (b) dargestellt.

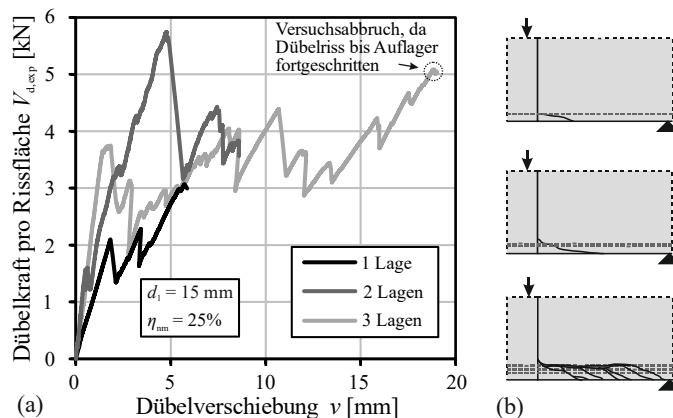


Bild 8 Einfluss der Gitterlagen auf das Dübeltragverhalten von textiler CFK-Biegezugbewehrung (a) und auf das Dübelrissbild (b)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen von zwei Versuchsserien mit CFK-Gittern eingesetzt als Querkraft- bzw. Biegezugbewehrung konnte gezeigt werden, dass auch mit querpressungsempfindlicher Carbonbewehrung Dübelkräfte in Schubrisen übertragen werden können. Insbesondere aufgrund der großen Anzahl von Fasersträngen, die einen Schubriss kreuzen, ist die Dübelwirkung ein wichtiger Querkrafttragmechanismus, der bei der Berechnung der Querkrafttragfähigkeit von Carbonbetonbauteilen berücksichtigt werden sollte. Für die Untersuchung des Dübeltragverhaltens von textilen CFK-Gittern wurde ein Versuchsaufbau weiterentwickelt, der sowohl für die Untersuchung von Biegezug- als auch von Querkraftbewehrung geeignet ist. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das Dübeltragverhalten von CFK-Fasersträngen bei ausreichender Betondeckung (i. d. R. bei Querkraftbewehrungen) wird hauptsächlich durch die Materialeigenschaften des Harzes und der Carbonfasern gesteuert, während die Betoneigenschaften bei für Carbonbeton üblichen hochfesten Betonen von untergeordneter Bedeutung sind. Für textile Biegezugbewehrung mit deutlich reduzierter Betondeckung und somit geringerer Bettungssteifigkeit, wurde hingegen die Betonzugfestigkeit überschritten, sodass sich Dübelrisse bildeten.
- Die wirkende Längsspannung in den Fasersträngen hat einen wesentlichen Einfluss auf das Dübeltragverhalten von CFK-Gitterbewehrung, sowohl beim Einsatz als Biegezug- als auch als Querkraftbewehrung. Bei größeren Längszugspannungen weisen die Faserstränge eine höhere Dübelsteifigkeit auf, sodass Dübelkräfte bereits bei kleinen Dübelverschiebungen übertragen werden können. Allerdings wird die Dübeltragfähigkeit durch die Interaktion von Dübelkraft und Längszugspannung reduziert. Bei allen durchgeführten Versuchen, insbesondere

bei denen mit geringen Längszugspannungen, waren große vertikale Dübelverschiebungen erforderlich, um die maximale Dübelkraft zu aktivieren.

- Das Dübeltragverhalten und die Dübeltragfähigkeit von textiler CFK-Querkraftbewehrung hängen von der Rissneigung ab. Bei kleineren Risswinkeln nimmt die Dübeltragfähigkeit ab, während die maximale Dübelverschiebung zunimmt. Bei allen Versuchen mit Rissneigungen  $< 90^\circ$  kam es zu lokalen Betonabplatzungen unterhalb der Faserstränge.
- Beim Einsatz als Biegezugbewehrung haben neben der Vordehnung der Faserstränge vor allem die untere Betondeckung und die Gitteranzahl einen Einfluss auf das Dübeltragverhalten. Bei einer ausreichend großen Betondeckung ( $c \approx 32$  mm bzw.  $d_1 = 33$  mm) und einer Gitterlage wurde aufgrund der steiferen Bettung die Dübelrissbildung verhindert und ein deutlich steiferes Dübeltragverhalten erzielt. Werden mehrere Gitter angeordnet, resultiert ein steiferes Dübeltragverhalten durch das Bewehrungspaket und die Dübelrissbildung wird deutlich beeinflusst, wobei sich der Dübelriss weiter in Richtung der Auflager ausbilden kann.

In Zukunft folgen noch weitere Untersuchungen zur Dübelwirkung, um u. a. den Einfluss von vorgeformter Gitterbewehrung zu untersuchen, die häufig in Form von geschlossenen Bewehrungskörben [42, 43] oder C-Profilen als Querkraftbewehrung [44] eingesetzt wird. Darüber hinaus ist die Ableitung von mechanisch basierten konstitutiven Gesetzen zur Beschreibung des Dübeltragverhaltens sowohl von Biegezug- als auch von Querkraftbewehrung ein Hauptaspekt zukünftiger Forschung.

## 6 Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 417002380 – TRR 280. Die Autoren danken der DFG für die Unterstützung des Forschungsvorhabens.

## 7 Quellen

- [1] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete – Part I: Structural design and construction. In: *Structural Concrete*, Vol. 16 (2015), Iss. 1, pp. 106-114. <https://doi.org/10.1002/suco.201300071>.
- [2] Hegger, J.; Curbach, M.; Stark, A. et al.: Innovative design concepts: Application of textile reinforced concrete to shell structures. In: *Structural Concrete*, Vol. 19 (2018), Iss. 3, pp. 637-646. <https://doi.org/10.1002/suco.201700157>.
- [3] Woerd, J.D. van der; Bonfig, C.; Chudoba, R. et al.: Construction of a vault using folded segments made out of textile reinforced concrete by fold-in-fresh. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (eds.): *Interfaces: architecture.engineering.science – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2017, Hamburg, Germany, 2017*.
- [4] Heid, A.-C. von der; Bosbach, S.; Hegger, J.: Production and Performance of Sandwich Elements with Textile Reinforced Facings Prestressed with CFRP. In: Zhao, B.; Lu, X. (eds.): *Concrete Structures for Resilient Society – Proceedings of the fib Symposium 2020, Online, 2020*, pp. 280-287.
- [5] Rempel, S.; Kulas, C.; Will, N. et al.: Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC). In: Hordijk, D.A.; Luković, M. (eds.): *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet – Proceedings of the 2017 fib Symposium*. Springer International Publishing, Maastricht, Netherlands, 2017, pp. 2530-2537.
- [6] Scheerer, S.; Chudoba, R.; Garibaldi, M.P. et al.: Shells Made of Textile Reinforced Concrete - Applications in Germany. In: *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 58 (2017), Iss. 1, pp. 79-93. <https://doi.org/10.20898/j.iass.2017.191.846>.
- [7] Beckmann, B.; Bielak, J.; Bosbach, S. et al.: Collaborative research on carbon reinforced concrete structures in the CRC/TRR 280 project. In: *Civil Engineering Design*, Vol. 3 (2021), Iss. 3, pp. 99-109. <https://doi.org/10.1002/cend.202100017>.
- [8] Stark, A.; Classen, M.; Knorrek, C. et al.: Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. In: *Structural Concrete*, Vol. 19 (2018), Iss. 6, pp. 1851-1861. <https://doi.org/10.1002/suco.201700288>.
- [9] Rempel, S.; Kulas, C.; Hegger, J.: Bearing behavior of impregnated textile reinforcement. In: Brameshuber, W. (ed.): *Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and Textile Reinforced Concrete 3rd ICTRC*, no. 98. RILEM Publications S.A.R.L, Aachen, 2015, pp. 71-78.

- [10] Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.: Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete – Part II: Experimental characterization, ultimate limit state assessment and numerical simulation. In: *Structural Concrete*, Vol. 16 (2015), Iss. 1, pp. 115-124. <https://doi.org/10.1002/suco.201400046>.
- [11] Kueres, S.; Will, N.; Hegger, J.: Flexural design of a modular footbridge system with pretensioned carbon fiber reinforced polymer reinforcement. In: *Structural Concrete*, Vol. 20 (2019), Iss. 6, pp. 1858-1870. <https://doi.org/10.1002/suco.201900047>.
- [12] Rempel, S.: Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2018.
- [13] Preinstorfer, P.; Kromoser, B.; Kollegger, J.: Flexural behaviour of filigree slab elements made of carbon reinforced UHPC. In: *Construction and Building Materials*, Vol. 199 (2019), pp. 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.027>.
- [14] Stark, A.; Classen, M.; Hegger, J.: Bond behaviour of CFRP tendons in UHPFRC. In: *Engineering Structures*, Vol. 178 (2019), pp. 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.002>.
- [15] Baumann, T.; Rüsche, H.: Schubversuche mit indirekter Krafteinleitung. Versuche zum Studium der Verdübelungswirkung der Biegezugbewehrung eines Stahlbetonbalkens – DAFStb-Heft 210. Ernst & Sohn, 1970.
- [16] Classen, M.: Shear Crack Propagation Theory (SCPT) – The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement. In: *Engineering Structures*, Vol. 210 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110207>.
- [17] Poli, S. Dei; Prisco, M. Di; Gambarova, P.G.: Shear Response, Deformations, and Subgrade Stiffness of a Dowel Bar Embedded in Concrete. In: *ACI Structural Journal*, Vol. 89 (1992), Iss. 6, pp. 665-675. <https://doi.org/10.14359/9645>.
- [18] Jelić, I.; Pavlović, M.N.; Kotsovos, M.D.: A study of dowel action in reinforced concrete beams. In: *Magazine of Concrete Research*, Vol. 51 (1999), Iss. 2, pp. 131-141. <https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.2.131>.
- [19] Vintzeleou, E.N.; Tassios, T.P.: Mathematical models for dowel action under monotonic and cyclic conditions. In: *Magazine of Concrete Research*, Vol. 38 (1986), Iss. 134, pp. 13-22.
- [20] Krefeld, W.J.; Thurston, C.W.: Contribution of Longitudinal Steel to Shear Resistance of Reinforced Concrete Beams. In: *ACI Journal Proceedings*, Vol. 63 (1966), Iss. 3, pp. 325-344. <https://doi.org/10.14359/7626>.
- [21] Taylor, H.P.: Investigation of the dowel shear forces carried by the tensile steel in reinforced concrete beams, London Ausgabe 1969.
- [22] Maekawa, K.; Qureshi, J.: Stress transfer across interfaces in reinforced concrete due to aggregate interlock and dowel action. In: *J. Materials, Conc. Struc., Pavements, JSCE* (1997), Iss. 557, pp. 159-172. [https://doi.org/10.2208/jscej.1997.557\\_159](https://doi.org/10.2208/jscej.1997.557_159).
- [23] Pruijssers, A.F.: Theoretical and experimental analysis of the Behaviour of cracked concrete under monotonic and cyclic shear loading. In: *HERON*, Vol. 33 (1988), Iss. 4.
- [24] Tottori, S.; Wakui, H.: Shear Capacity of RC and PC Beams Using FRP Reinforcement. In: *ACI Special Publication* (1993), Iss. 138, pp. 615-632. <https://doi.org/10.14359/3944>.
- [25] Voss, S.: Ingenieurmodelle zum Tragverhalten von textilbewehrtem Beton. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2008.
- [26] Kulas, C.: Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2013.
- [27] Bielak, J.: On the role of dowel action in shear transfer of CFRP textile-reinforced concrete slabs. In: *Composite Structures*, Vol. 311 (2023), p. 116812. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116812>.
- [28] Maekawa, K.; Qureshi, J.: Embedded bar behavior in concrete under combined axial pullout and transverse displacement. In: *Proceeding of JSCE* 30 1996 (1996), Heft 532, S. 183-195. [https://doi.org/10.2208/jscej.1996.532\\_183](https://doi.org/10.2208/jscej.1996.532_183).
- [29] Autrup, F.; Jørgensen, H.B.; Hoang, L.C.: Dowel action of the tensile reinforcement in RC beams without shear reinforcement: Novel experimental investigation and mechanical modelling. In: *Engineering Structures* 279 (2023), S. 115471. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115471>.
- [30] Park, S.Y.; Naaman, A.E.: Shear Behavior of Concrete Beams Prestressed with FRP Tendons. In: *PCI Journal* (1999), pp. 74-85.
- [31] Dulácska, H.: Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete. In: *ACI Journal Proceedings*, Vol. 69 (1972), Iss. 12, pp. 754-757.

- [32] *Classen, M.; Kalus, M.*: Punching Shear Response Theory (PSRT) – A two degree of freedom kinematic theory for modeling the entire punching shear vs. deformation response of RC slabs and footings. *In: Engineering Structures* 291 (2023), S. 116197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116197>.
- [33] DIN EN 12390-3:2019-10: Prüfung von Festbeton- Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Norm, Ausgabe Oktober 2019.
- [34] DIN EN 12390-13:2021-09: Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Norm, Ausgabe September 2021.
- [35] DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Norm, Ausgabe November 2016.
- [36] DAfStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung. Richtlinie, Ausgabe Juli 2023.
- [37] *Autrup, F.; Jørgensen, H.B.; Hoang, L.C.*: Experimental Investigation of Dowel Action in RC Beams without Shear Reinforcement. *In: Zhao, B.; Lu, X.* (eds.): Concrete Structures for Resilient Society – Proceedings of the fib Symposium 2020, Online, 2020, pp. 540-548.
- [38] *Becks, H.; Bielak, J.; Camps, B. et al.*: Application of fiber optic measurement in textile-reinforced concrete testing. *In: Structural Concrete* (2021). <https://doi.org/10.1002/suco.202100252>.
- [39] *Janiak, T.; Becks, H.; Camps, B.H. et al.*: A unified approach to the evaluation of distributed fibre optic sensors in structural concrete. *In: Materials and Structures* (2023), accepted.
- [40] *Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen – Fasern und Matrices, Springer eBook Collection Life Science and Basic Disciplines, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [41] *Schürmann, H.*: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, VDI-Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [42] *Kueres, S.; Will, N.; Hegger, J.*: Shear strength of prestressed FRP reinforced concrete beams with shear reinforcement. *In: Engineering Structures*, Vol. 206 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110088>.
- [43] *Bosbach, S.; Knorrek, C.; Stark, A. et al.*: Investigations on the structural behaviour of CFRP reinforced concrete members for modular bridge constructions. *In: IABSE* (ed.): Proceedings of IABSE Congress: Structural Engineering for Future Societal Needs. IABSE, Ghent, Netherlands, 2021, pp. 1163-1171.
- [44] *Bielak, J.; Schöneberg, J.; Classen, M. et al.*: Shear capacity of continuous concrete slabs with CFRP reinforcement. *In: Construction and Building Materials*, Vol. 320 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126117>.