

Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter CFK-Stäbe in UHPC

Bewehrungsstäbe aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) haben bei bestimmten Anwendungen Vorteile gegenüber den derzeit eingesetzten Stahlbewehrungsstäben. Insbesondere die hohe Zugfestigkeit von CFK-Bewehrung verspricht bei einem Einsatz als Betonbewehrung potenzielle Materialersparnisse und der Werkstoff weist vergleichsweise gute Eigenschaften in Bezug auf die Korrosion auf. Die Autoren versuchen, CFK-Bewehrung zur Herstellung von filigranen Betonbauteilen zu verwenden und somit den ökologischen Fußabdruck zu senken. Für die Berechnung des Tragverhaltens solcher Bauteile ist fundamentales Wissen über das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton notwendig. Die Autoren untersuchen aktuell das Verbundverhalten von CFK-Stäben mit unterschiedlichen Betonzusammensetzungen. In einem ersten Schritt wurde das Verbundverhalten von subtraktiv bearbeiteten CFK-Stäben mit ultrahochfestem Beton (engl. Ultra-High Performance Concrete – UHPC) adressiert. Eingangs wird im vorliegenden Beitrag eine Übersicht über das Verbundverhalten von Faserverstärkten Kunststoff (FVK)-Stabbewehrungen in Beton gegeben. Anschließend werden zwei Serien von Ausziehversuchen von helikal eingefrästen CFK-Stäben in UHPC präsentiert. Die verwendeten Materialien, die Versuchsaufbauten, die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse werden vorgestellt und im Detail analysiert.

Stichworte Ultrahochfester Beton; UHPC; Carbonbeton; carbonfaserverstärkte Kunststoffe; CFK-Stäbe; Hochleistungsmaterialien im Betonbau; Carbonfaserbewehrung; Verbundverhalten

Bond behavior of subtractive machined CFRP rods in UHPC

Reinforcing rods made of carbon fiber reinforced polymers (CFRP) have several advantages compared to conventional steel-reinforcement. Especially the high tensile strength of CFRP potentially allows savings in construction material. In addition, the high corrosion resistance of the reinforcement is advantageous regarding durability. The aim of the authors is to use CFRP reinforcement to construct filigree mineral bonded building components to lower the ecologic impact of concrete structures. However, to accurately predict the load bearing behaviour of such structural members, knowledge about the bond behaviour of the constituent materials is required. The authors are therefore currently investigating the bond of CFRP rods with different concrete types. In a first step the bond behaviour of subtractive machined CFRP rods with ultra-high performance concrete (UHPC) was examined. The first part of this paper provides an overview of the topic of bond behaviour of fibre reinforced polymers (FRP) rods in concrete. Subsequently two series of pull-out tests using helically grooved CFRP rods in UHPC are described. The used materials, the test setup, the experimental procedure and the results are presented and discussed in detail.

Keywords ultra-high performance concrete; UHPC; carbon reinforced concrete; carbon fiber reinforced polymers; CFRP rods; high performance materials in concrete engineering; carbon fiber reinforcement; bond behavior

1 Einleitung

Die Verwendung von Stäben aus faserverstärkten Kunststoffen (FVK, engl. Fiber Reinforced Polymers – FRP) als Bewehrung für Beton ist derzeit für spezielle Anwendungen, bei denen beispielsweise besondere Korrosionsbeständigkeit, Schlankheit oder Durchbohrbarkeit von Betonbauteilen von Vorteil ist, verbreitet [1–3]. Für andere Anwendungen zeigt FVK-Stabbewehrung in Beton in den momentan am Markt verfügbaren Ausführungen Nachteile gegenüber der üblichen Stahlstabbewehrung, insbesondere in Bezug auf die auftretenden Rissbreiten, die geringere Steifigkeit bzw. größeren Verschiebungen bei gleicher Dimensionierung und die höheren Kosten [1, 2]. Die geringere Steifigkeit der FVK-Bewehrung ist entweder durch den geringeren E-Modul des Materials (z. B. bei Alkalirestistentem Glas oder Basalt als Fasermaterial) oder bei carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) durch die hohe Zugfestigkeit des Materials und die geringere erforderliche Betondeckung

bedingt. Während CFK einen ähnlichen E-Modul wie Bewehrungsstahl aufweisen kann, wird aufgrund der sehr hohen Zugfestigkeit des Materials ein kleinerer Bewehrungsquerschnitt verwendet. Zudem wird meist der Vorteil der geringeren erforderlichen Betondeckung für die Reduktion der Bauteilabmessungen genutzt. Auch dadurch wird die Gesamtsteifigkeit des Bauteils reduziert.

Aktuell wird intensiv an neuen Ausführungsformen von FVK-Bewehrungsstäben geforscht, beispielsweise an verschiedenen Fasertypen, Matrixmaterialien und Oberflächengeometrien. Insbesondere besitzen Carbonfasern im Vergleich zu AR-Glas- oder Basaltfasern eine besonders hohe Zugfestigkeit und hohe Steifigkeit bei vergleichsweise geringem Eigengewicht. Bei der umhüllenden Kunststoffmatrix handelt es sich im Falle von FVK-Stäben (und auch in der Ausführung mit Carbonfasern-CFK) für Anwendungen im Bauwesen meist um eine Epoxidharzmatrix [1–5].

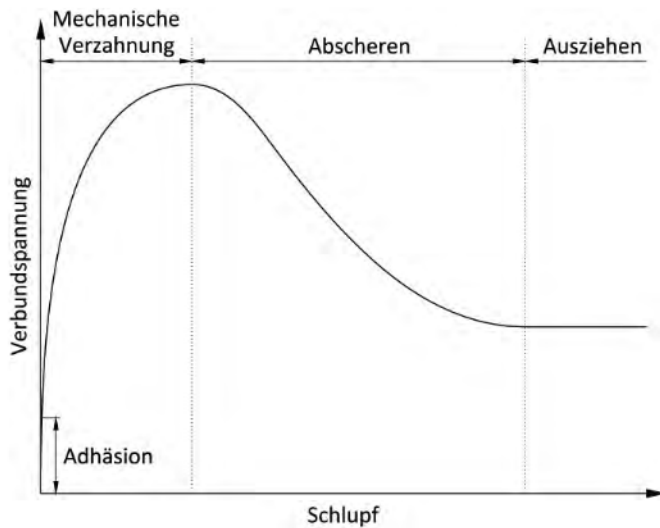


Bild 1 Schematische Darstellung einer Verbundspannungs-Schlupfkurve für profilierte Stahlstäbe in Beton, nach [15]
Schematic bond-slip diagram for profiled steel rods in concrete, according to [15]

Auf die Geschichte, Herstellung sowie die Vor- und Nachteile von CFK-Stäben als Betonbewehrung wird in [6] genauer eingegangen.

Die Verwendung von carbonfaserverstärktem Kunststoff verspricht Vorteile im Hinblick auf die für die Herstellung von Betonbauteilen notwendigen natürlichen Ressourcen im Vergleich zu konventionellen Stahlbetonkonstruktionen, wie bereits in numerischen Simulationen und Bauteilversuchen gezeigt werden konnte. Beispielsweise können die guten Eigenschaften von CFK bei Auswahl eines geeigneten Bauteildesigns zu einer deutlichen Reduktion des Eigengewichts genutzt werden [7, 8]. Dies führt zu einem reduzierten Rohstoffbedarf (durch den geringeren Materialaufwand) bei der Herstellung (Cradle to Gate) und in weiterer Folge zu geringeren Aufwänden beim Transport zur Baustelle und bei der Manipulation (Heben mit Kran, Einbau durch Personal) auf der Baustelle. Zudem wirkt sich die hohe Dauerhaftigkeit positiv auf die mögliche Nutzungsdauer aus. Bezüglich des Verbundverhaltens sind CFK-Bewehrungselemente aber noch wenig erforscht. Erste Ergebnisse sind beispielsweise in [6, 9, 10] beschrieben.

Kenntnisse über das Verbundverhalten sind aber für die Modellierung solcher schlanken, bewehrten Bauteile essenziell, um das Tragverhalten zuverlässig voraussagen zu können [6].

Die allgemeine Beschreibung des Verbundverhaltens von FVK-Bewehrung in Beton wird durch die Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Betonarten mit unterschiedlichen FVK-Ausführungsformen (z. B. Glas, Aramid, Carbon als Fasermaterial und Epoxidharz, Styrol-Butadien etc. als Matrixmaterial hergestellt von unterschiedlichen Produzenten) in verschiedenen Formen (verschiedene Stäbe mit unterschiedlichen Profilierungen, Litzen etc.) erschwert [1, 2, 8].

Aktueller Inhalt der Forschungsarbeit der Autoren ist die Untersuchung unterschiedlicher Stabkonfigurationen in Kombination mit verschiedenen Betonzusammensetzungen. In einem ersten Schritt (Inhalt des vorliegenden Beitrags) wurde die Kombination aus CFK-Stäben mit einer helikal eingefrästen Wendel mit ultrahochfestem Beton (engl. Ultra-High Performance Concrete – UHPC) untersucht. Die Intention der Autoren durch die Verwendung von UHPC ist eine nochmalige Reduktion der Bauteildimensionen. Ziel ist, die Sinnhaftigkeit der Verwendung von CFK-Bewehrung, aber auch von UHPC mit Blick auf die ökologische und ökonomische Effizienz beispielsweise im Vergleich zu konventioneller Stahlbewehrung, hochfestem Beton oder auch normalfestem Beton in weiteren Forschungsarbeiten kritisch zu beleuchten.

2 Verbundverhalten von Bewehrungsstäben

Die Verbundwirkung von Bewehrungsstäben in Beton kann allgemein in ihren inneren und äußeren Verbund unterteilt werden. Der äußere Verbund bezeichnet die direkte Interaktion der Bewehrungsstäbe mit dem umgebenden Beton an deren Kontaktfläche und setzt sich weiter aus Adhäsion, Reibung und mechanischem Verbund zusammen [11–14]. Die Adhäsionskräfte sind in der Regel sehr gering. Die auftretende Reibung an der Bewehrungs Oberfläche hängt von deren Oberflächenbeschaffenheit und der auftretenden Querpressung ab. Der mechanische Verbund bildet den betragsmäßig wichtigsten Anteil der übertragbaren Verbundkraft und beschreibt die Verzahnung profilierter Bewehrungselemente mit dem umgebenden Beton. Beispielsweise ist eine schematische Verbundspannungs-Schlupfbeziehung für profilierte Stahlbewehrung in Beton in [15] zu finden (Bild 1).

Der innere Verbund bezeichnet die Schubspannungsübertragung von der Oberfläche des Bewehrungsstabs in das Innere des Stabs. Bei Stahlbewehrung ist diese Kraftübertragung durch die hohe Scherfestigkeit des isotropen Bewehrungsmaterials auch bei vergleichsweise kleinen Stabrippen in großen Abständen gewährleistet.

Bei anisotropen FVK-Stäben ist die innere Übertragung von Schubspannungen vor allem von den Eigenschaften der Kunststoffmatrix, insbesondere von deren Schubsteifigkeit und Schubfestigkeit, abhängig [1, 2].

In einer Vorarbeit der Autoren wurden bereits Ausziehversuche mit glatten, eingekerbten und mit besandeten CFK-Stäben in UHPC durchgeführt [7, 16]. Für die drei genannten Stabvarianten wurden in diesen Versuchen jeweils maximale mittlere Verbundspannungen von 4,0 MPa, 13,8 MPa und 16,0 MPa bei einer Verschiebungsrate von 1,2 mm/min erreicht. Die Prüfkörper versagten alle durch ein Ausziehen des Stabs. Die Ergebnisse zeigten die Notwendigkeit von detaillierteren Untersuchungen des Verbundverhaltens von unterschiedlichen Stabkonfigurationen und bildeten die Grundlage für die beiden in weiterer Folge in diesem Beitrag vorgestellten

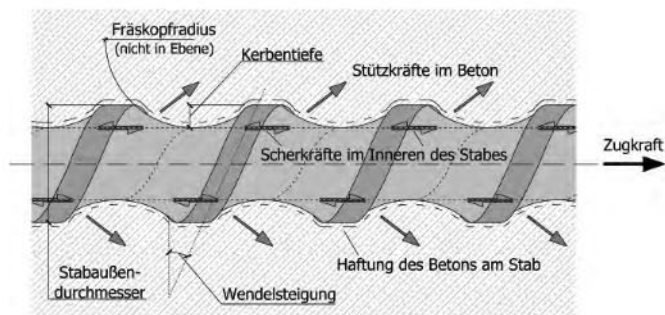


Bild 2 Schematische Darstellung der an einem im Verbund liegenden CFK-Stab auftretenden Kräfte und der wichtigsten Geometrieparameter
Overview of forces acting in at a CFRP rod bonded in concrete and the most important geometric parameters

Versuchsserien. Aufgrund der großen Anzahl der Einflussparameter besteht bis zu einer klaren Aussage über die unterschiedlichen Auswirkungen enormer Forschungsbedarf. Ziel des Beitrags ist die Vorstellung von ersten Erfahrungen, die auch als Grundlage für weitere Untersuchungen durch andere Forschungsteams dienen sollen.

Die unterschiedlichen Einwirkungen auf die Stabrippen eines CFK-Stabs mit einer eingefrästen helikalen Wendel sind in Bild 2 dargestellt. Bei der Verwendung von FVK- bzw. CFK-Bewehrung ist die Duktilität der Kunststoffmatrix besonders von Interesse, da auch bei CFK-Stäben, charakterisiert durch ein sprödes Versagensverhalten, ein wünschenswertes quasiduktilen Verhalten von Bauteilen durch plastisches Verbundversagen erreicht werden kann. Hierzu muss das Bauteil planmäßig durch ein progressives Abscheren der Bewehrungsoberfläche anstatt durch Reißen der Bewehrung oder eine Zerstörung der Druckzone versagen [1, 2].

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Allgemeines

Für die nachfolgend beschriebenen zwei Reihen von Verbundversuchen wurden würfelförmige Prüfkörper in Anlehnung an die von RILEM empfohlenen Prüfkörper für Stahlbewehrungsstäbe gewählt [17, 19]. Der in den Verbundspannungs-Schlupfdiagrammen (Bilder 4 bis 8 und 10 bis 14) dargestellte Schlupf wurde am freien, nicht belasteten Stabende gemessen. Die Versuchsaufbauten sind in Bild 3 für die erste Serie und in Bild 9 für die zweite Serie dargestellt.

3.2 Verwendete Materialien

3.2.1 Ultrahochfester Beton (UHPC)

Die Zusammensetzung des in der ersten Versuchsreihe VR1 verwendeten UHPC ist in Tab. 1 aufgelistet. Dieser entspricht der in [7] beschriebenen Mischung (bereits durchgeführte Auszugsversuche). Die Rezeptur des in der zweiten Versuchsreihe VR2 verwendeten UHPC ist eben-

falls in Tab. 1 aufgelistet. Die Ergebnisse der Materialprüfungen für beide Versuchsreihen sind in Tab. 2 aufgelistet. Die Biegezugfestigkeit und der Elastizitätsmodul wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN196-1:2005 [20] an Prismen mit $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ bestimmt. Die Druckfestigkeit wurde jeweils an Würfeln mit 40 mm bzw. 100 mm Kantenlänge nach 35 bzw. 48 Tagen ermittelt.

3.2.2 CFK-Stäbe

Um die Geometrie der verwendeten Stabprofilierungen in den Verbundversuchen festzulegen, wurden zuvor zur Abschätzung Finite-Elemente-Berechnungen (FE-Berechnungen) mit Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens des Betons durchgeführt. Dabei wurden Stäbe mit unterschiedlicher Wendelgeometrie untersucht. Die Berechnungen beruhen zugunsten von kurzen Rechenzeiten und aufgrund noch nicht bekannter Materialeigenschaften auf Annahmen bzw. Literaturangaben. Ein mögliches Spalten der Prüfkörper wurde in diesen Modellen nicht berücksichtigt. Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wurden drei verschiedenen eingefräste Wendelgeometrien (Varianten a), b) und c), jeweils mit einem Durchmesser von 8 mm) und als vierte Konfiguration eine bereits vom Hersteller bearbeitete Stabvariante (Variante d) – Thyssen C4R, mit einem Durchmesser von 10 mm) experimentell untersucht. Zu Vergleichszwecken wurden auch als fünfte Konfiguration glatte, unbearbeitete Stäbe getestet (Variante e)).

Die Geometrieparameter der Stäbe der Varianten a), b), c) und d) sind in Tab. 3 aufgelistet und in Bild 2 eingetragen. Die angegebenen Eigenschaften der in den Versuchsreihen verwendeten CFK-Stäbe sind in Tab. 4 aufgelistet und beruhen auf internen Untersuchungen der Hersteller. Als Nenn Durchmesser und als Basis für die Berechnung der auftretenden Verbundspannungen wird von den Autoren der pultrudierte Durchmesser herangezogen. Dies bedeutet, dass der Kerndurchmesser bei den subtraktiv bearbeiteten Stäben geringer ist.

Tab. 1 Zusammensetzung der in den beiden Versuchsreihen VR1 und VR2 verwendeten UHPC Mischungen
Contents of the UHPC mixtures used in the test series VR1 and VR2

Bestandteil	VR1 [kg/m ³]	VR2 [kg/m ³]
Wasser	10	154
Hochleistungsfließmittel 1	40	31
Hochleistungsfließmittel 2	20	14
Entschäumer	1	1
Zement (CEM I 52,5 NC3A-frei)	750	692
Schwindkompensator	40	7
Zusatzmittel, reaktiv (Mikrosilika-Slurry)	310	0
Zusatzmittel reaktiv (Mikrosilika)	0	173
Zusatzmittel, inert (Gesteinsmehl)	200	346
Quarzsand 1 (0,1 – 0,5 mm)	490	928
Quarzsand 2 (1,0 – 1,6 mm)	490	0

Tab. 2 Festbetoneigenschaften des in den Versuchsreihen verwendeten UHPC
Hardened concrete properties of the UHPC used in the test series

Parameter	Versuchsreihe VR1 (Prüfung nach 35 Tagen)	Versuchsreihe VR2 (Prüfung nach 48 Tagen)
Biegezugfestigkeit [MPa] (Prismen $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$)	12,1	15,2
Druckfestigkeit [MPa] (Würfel $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$)	167,5	180,7
Druckfestigkeit [MPa] (Würfel $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$)	176,3	176,7
E-Modul [MPa] (Prismen $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$)	56276	45617

Tab. 3 Geometrieparameter der verwendeten Stabvarianten
Geometric parameters of the used rod variants

Parameter	Variante a)	b)	c)	d)
Wendelsteigung [°]	20	15	15	22
Kerbtiefe [mm]	0,5	0,5	0,75	0,75
Durchmesser des sphärischen Fräskopfes [mm]	6,0	6,0	10,0	9,0
Stabaußendurchmesser [mm]	8,0	8,0	8,0	10,0

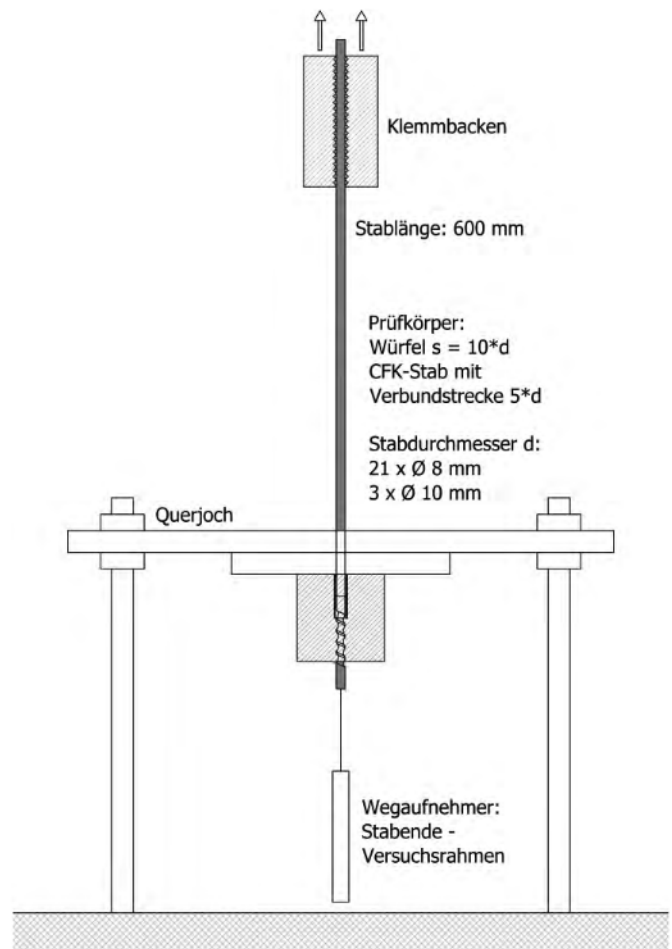
Tab. 4 Eigenschaften der verwendeten CFK-Stäbe (Herstellerangaben (intern) – bezogen auf den Außendurchmesser der Stäbe)
Properties of the CFRP rods used in tests (Manufacturer's specifications (internal) – relating to the outer diameter of the rods)

Stabtyp	Zugfestigkeit [MPa]	E-Modul [GPa]
S+P Clever 8 mm (erste Versuchsreihe, Varianten a), b), c), e))	2048	161
DPP 8 mm (zweite Versuchsreihe, Varianten a), b), c), e))	2350	153
Thyssen C4R 10 mm (beide Versuchsreihen, Variante d))	1650	151

3.3 Erste Versuchsreihe VR1 (kleinere Betondeckung)

In der ersten Versuchsreihe betrug die Seitenlänge der Würfelprüfkörper nach RILEM [18] jeweils das Zehnfache (DM 8 – 80 mm; DM 10 – 100 mm) und die Verbundlänge jeweils das Fünffache (DM 8 – 40 mm; DM 10 – 50 mm) des äußeren Stabdurchmessers. Die Prüfkörper wurden normal zur Stabachse betoniert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Die Versuche wurden mithilfe einer hydraulischen Prüfmaschine weggesteuert mit einer Verschiebungsrate von 1,0 mm/min durchgeführt. Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe sind in den Bildern 4 bis 8 dargestellt. Die Verbundspannung wurde jeweils für den pultrudierten Stabdurchmesser (ohne Abzug der Einfassung) ermittelt. Die Mittelwertkurven wurden durch Mittelung der aufgetretenen Verbundspannungen bei einem bestimmten Schlupf, gegebenenfalls mit interpolierten Werten, berechnet.

Die Anzahl der Versuche betrug für Variante a): fünf, für Variante b): sechs, für Variante c): fünf sowie für Variante d): drei. Zusätzlich wurden zwei glatte Stäbe als Vergleich getestet. Bei der gesamten Serie trat aufgrund der sehr hohen erreichten Verbundspannungen bei einem Großteil der Prüfkörper ein Spaltversagen des Betonwürfels ein. Bei den Stäben der Varianten a), b) und c) konnte auch eine Beschädigung der Stabwendel beobachtet werden. Bei diesen Stäben traten Spaltrisse großteils, ebenso wie bei zwei der drei Versuche mit den Stäben der Variante d), erst nach Erreichen einer Maximallast auf.

**Bild 3** Versuchsaufbau der ersten Versuchsreihe VR1
Test setup for the first series of pull-out tests VR1

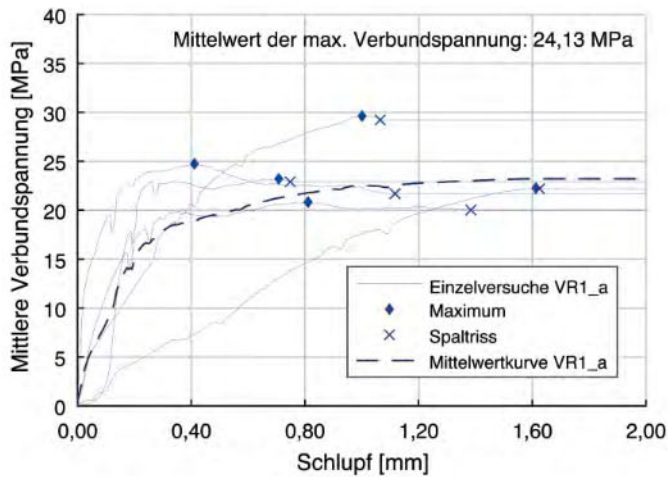


Bild 4 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante a) der ersten Versuchsreihe VR1
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant a) in the first test series VR1

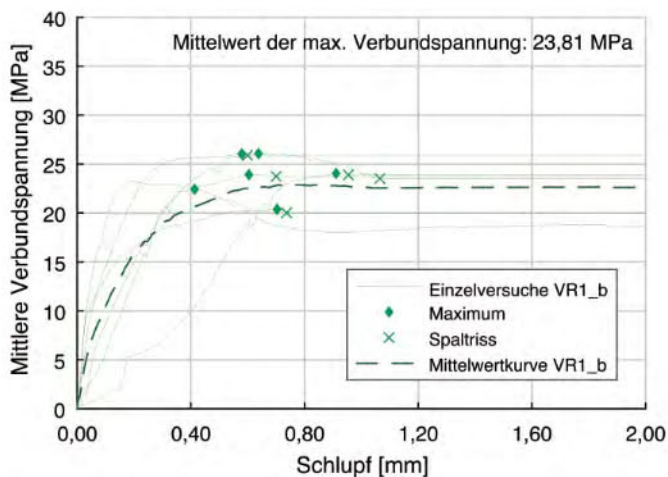


Bild 5 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante b) der ersten Versuchsreihe VR1
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant b) in the first test series VR1

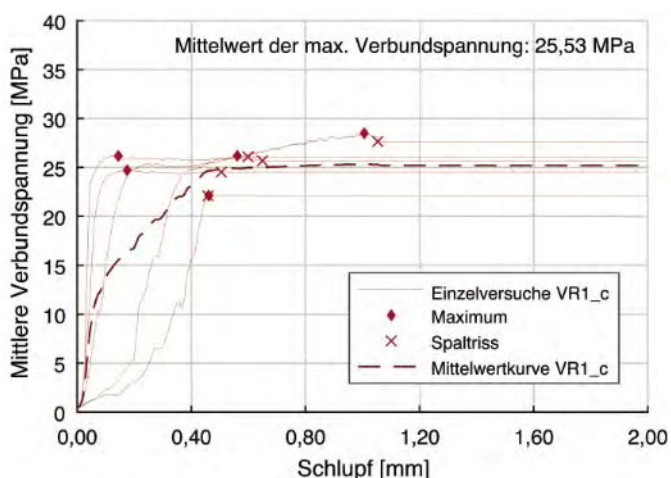


Bild 6 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante c) der ersten Versuchsreihe VR1
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant c) in the first test series VR1

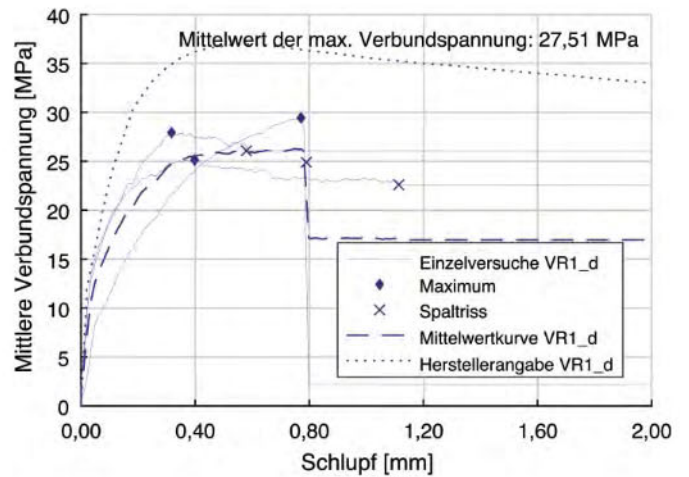


Bild 7 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante d) der ersten Versuchsreihe VR1 mit Herstellerangabe der Stabvariante d) (für die vom Hersteller angegebenen Daten ist die Betonfestigkeit nicht bekannt)
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant d) in the first test series VR1 and manufacturer's specification for rod variant d) (concrete type is for manufacturer values not specified)

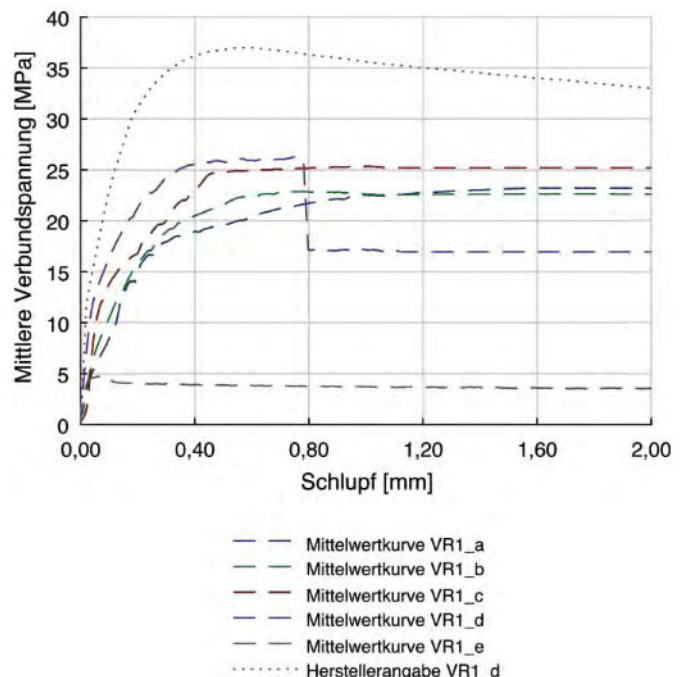


Bild 8 Mittlere Verbundspannungskurven der ersten Versuchsreihe VR1 mit Herstellerangabe der Stabvariante d) (für die vom Hersteller angegebenen Daten ist die Betonfestigkeit nicht bekannt)
Mean bond-slip diagram for test specimens in the first test series VR1 and manufacturer's specification for rod variant d) (the concrete type for manufacturer values is not specified)

Ein Versuch mit dem Stab der Variante d), bei dem der Stab durch eine Schädigung an der Klemmvorrichtung versagte, ist am plötzlichen Spannungsabfall bei annähernd gleichem Schlupf zu erkennen (Bild 7). Da eine höhere maximale Verbundspannung erreicht wurde als bei den übrigen beiden Versuchen, wurde dieser Versuch trotzdem in die Auswertung aufgenommen. Die Stäbe der Variante e) wurden alle aus den Betonwürfeln ausgezogen, ohne dass nennenswerte Schäden an den Stäben

oder den Betonkörpern erkennbar waren. Das klare Ziel von besseren Verbundeigenschaften und höheren Verbundspannungen im Vergleich zu den bereits durchgeführten Versuchen [7, 16] konnte mit dieser Serie erreicht werden (vgl. Abschn. 2). Da der Versagensmechanismus oftmals anders als erwartet jeweils durch ein Spalten des Versuchskörpers anstatt eines Abscherens der Stabwende oder Versagen der Betondruckstreben eintrat, wurde entschieden, eine weitere Serie mit größeren Würfelabmessungen (nun abweichend von den RILEM-Empfehlungen) durchzuführen.

3.4 Zweite Versuchsreihe VR2 (größere Betondeckung)

Um den Spaltwiderstand der Betonkörper zu erhöhen, wurde bei der zweiten Versuchsreihe die Kantenlänge der Würfelprüfkörper auf 150 mm erhöht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 9 dargestellt. Die Verbundlänge wurde wieder in Anlehnung an die RILEM-Empfehlungen [18] jeweils als das Fünffache des äußeren Stabdurchmessers gewählt. Die Prüfkörper wurden wieder normal zur Stabachse betoniert und die Versuche auch hier mithilfe einer hydraulischen Prüfmaschine weggesteuert mit einer Verschiebungsrate von 0,5 mm/min durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit wurde im Vergleich zur VR1 für eine präzisere Erfassung eines etwaigen Spaltens halbiert.

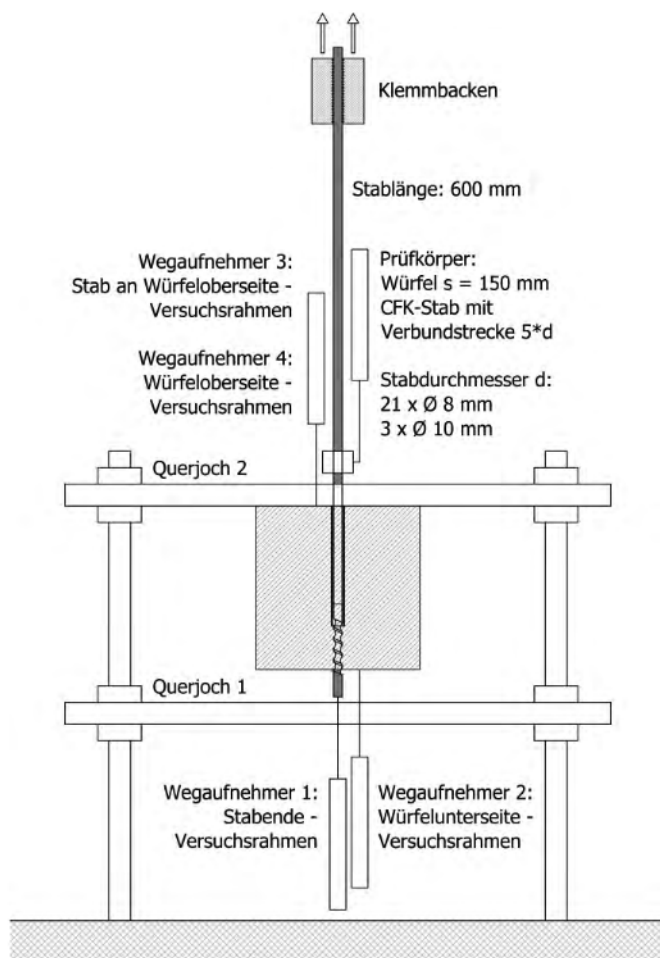


Bild 9 Versuchsaufbau der zweiten Versuchsreihe
Test setup for the second series of pull-out tests

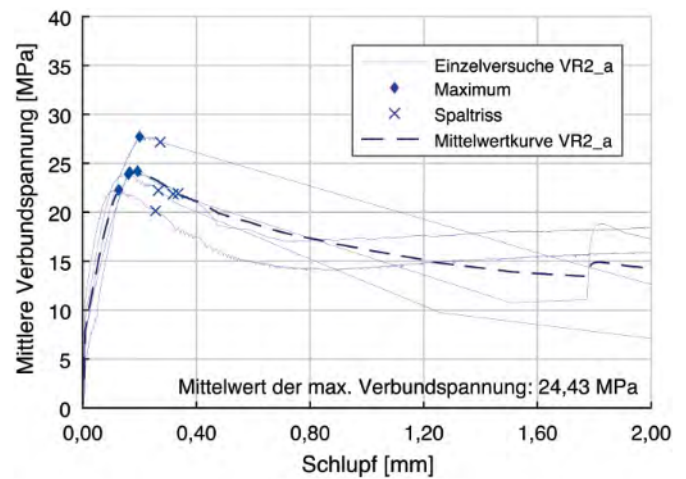


Bild 10 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante a) der zweiten Versuchsreihe VR2
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant a) in the second test series VR2

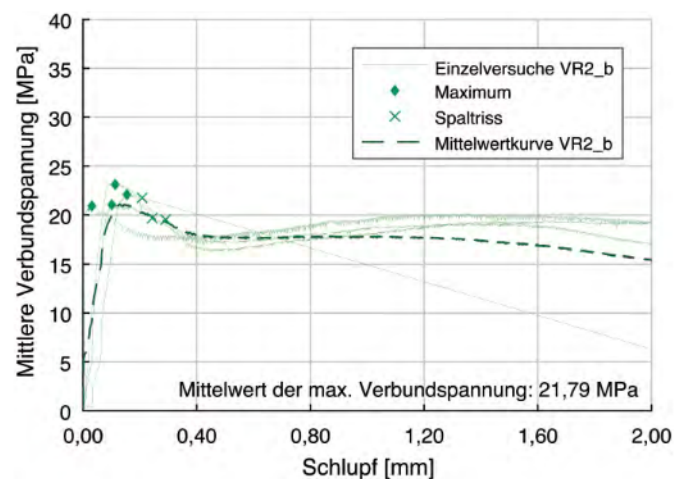


Bild 11 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante b) der zweiten Versuchsreihe VR2
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant b) in the second test series VR2

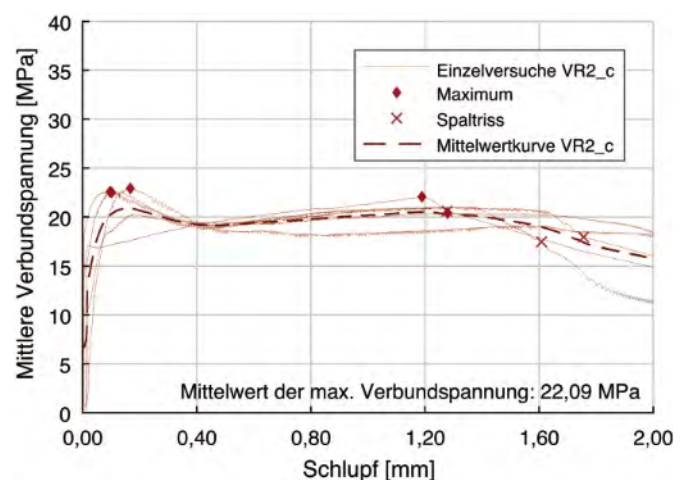


Bild 12 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante c) der zweiten Versuchsreihe VR2
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant c) in the second test series VR2

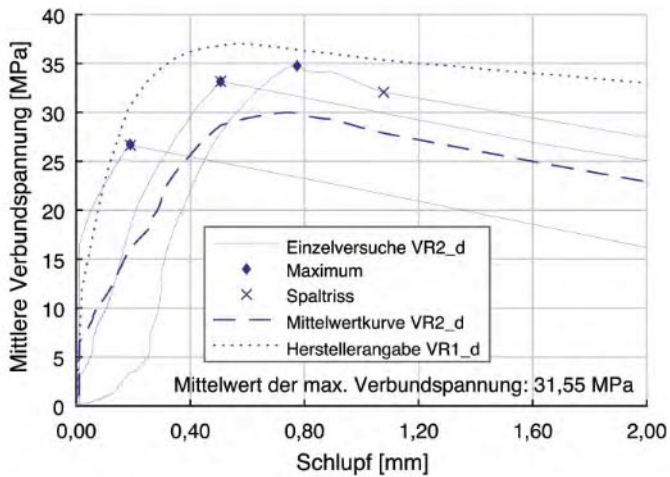


Bild 13 Verbundspannungs-Schlupfdiagramm für Prüfkörper mit der Stabvariante d) der zweiten Versuchsreihe VR2
Bond-slip diagram for test specimens with rod variant d) in the second test series VR2

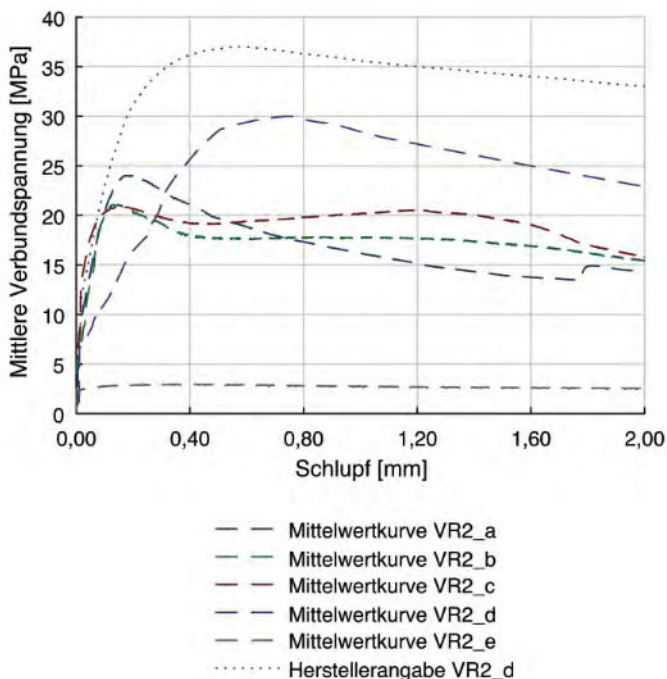


Bild 14 Mittlere Verbundspannungskurven der zweiten Versuchsreihe VR2 mit Herstellerangabe der Stabvariante d) (für die vom Hersteller angegebenen Daten ist die Betonfestigkeit nicht bekannt)
Mean bond-slip diagram for test specimens in the second test series VR2 and manufacturer's specification for rod variant d) (the concrete type for manufacturer values is not specified)

Ebenso wurde eine Prüfmaschine mit einer geringeren Nennlast (63 kN) eingesetzt. Dies machte auch eine Neukonstruktion des Versuchsaufbaus notwendig. Durch die geringere Steifigkeit der Anordnung im Vergleich zur Serie eins wurden zusätzliche Wegaufnehmer positioniert, um die Dehnungen im Versuchsaufbau mitmessen zu können. Die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe sind in den Bildern 10 bis 14 dargestellt. Die Verbundspannung wurde wieder jeweils für den pultrudierten Stabdurchmesser (ohne Abzug der Einfräsung) ermittelt. Die Mittelwertkurven wurden durch Mittelung der aufge-



Bild 15 Abgeschnittene Stabwendel eines Stabs der Variante d)
Sheared off helical rib of a rod of variant d)

tretenen Verbundspannungen bei einem bestimmten Schlupf, gegebenenfalls mit interpolierten Werten, berechnet. Es wurden fünf Versuche für Variante a), vier Versuche der Variante b), fünf Versuche für Variante c) sowie drei Versuche der Variante d) durchgeführt. Zusätzlich wurden auch hier drei Versuchskörper mit glatten Stäben als Vergleich getestet.

Bei dieser Versuchsreihe VR2 wurde ebenfalls ein Großteil der Prüfkörper gespalten. Die Spaltrisse traten bei allen gespaltenen Prüfkörpern (außer bei zwei der Prüfwürfel mit Stäben der Variante d)) erst nach Erreichen der Maximallast auf. Bei einem Großteil der Prüfkörper wurde die Stabwendel teilweise oder vollständig abgeschiedert (Bild 15).

Bei dieser Serie war die unterschiedlich starke Ausprägung der Spaltrisse auffällig. Bei einem Stab der Variante b) traten keine sichtbaren Spaltrisse auf und bei zwei Stäben der Variante c) traten Spaltrisse erst bei hohem Schlupf (über 9 mm) auf.

In drei von fünf Prüfkörpern mit Stäben der Variante c), zwei von vier Prüfkörpern mit Stäben der Variante b) sowie zwei von fünf Prüfkörpern mit Stäben der Variante a) wiesen die Spaltrisse nur geringe Breiten auf und durchtrennten die Prüfkörper nicht vollständig. Dadurch konnten die Prüfkörper auch nach dem Entstehen des Risses höhere Lasten aufnehmen. Im Gegensatz dazu wurden alle Prüfkörper mit Stäben der Variante d) bei Risseintritt vollständig gespalten und versagten spröde. Zusätzlich konnte nach dem Versagen bei diesen Stäben eine Verdrehung des Stabs in der Prüfmaschine um seine Längsachse beobachtet werden.

Bei drei Versuchen der Variante a) und einem Versuch der Variante b) traten Spaltrisse mit größerer Rissweite auf, der Prüfkörper wurde aber nicht vollständig gespalten. Dies ist auch durch einen Sprung im Verbundspannungs-Schlupfdiagramm zu erkennen (vgl. Bilder 10 und

11). Der Anstieg der Spannung nach dem Sprung (bei drei der Versuchskörper außerhalb des Diagramms) kann durch ein Aufsitzen der Wendel in dem teilweise gespaltenen Prüfkörper erklärt werden. Die Prüfkörper der Variante e) versagten wiederum alle durch ein Ausziehen des Stabs, ohne nennenswerte Schäden an den Stäben oder den Betonkörpern.

3.5 Interpretation der Ergebnisse

In der ersten durchgeführten Versuchsserie VR1 wurden die Dimensionen der Versuchskörper an die RILEM-Empfehlungen [18] ($10 \cdot d - 80$ mm für Varianten a)–c) und 100 mm für Variante d)) angelehnt. Es zeigte sich, dass die Abmessungen für die untersuchten Konfigurationen nicht geeignet sind. Es konnte ein frühzeitiges Spalten der Versuchskörper beobachtet werden. Daher wurde eine weitere Serie mit größeren Prüfwürfelabmessungen von 150 mm durchgeführt. Auch hier kam es (meist nach Erreichen der Maximallast) zu einem Spalten der Versuchskörper. Von den Autoren wird daher empfohlen, abweichend von den RILEM-Empfehlungen, die Würfelabmessung zumindest auf den zwanzigfachen Stabdurchmesser zu erhöhen (bei einer Verbundlänge vom fünffachen Stabdurchmesser).

Des Weiteren kann aus dem Spalten der Versuchskörper abgeleitet werden, dass das Verbundverhalten bei dünnwandigen Bauteilen mit CFK-Bewehrung jedenfalls besonders zu beachten ist. Es müssen entsprechende konstruktive Maßnahmen vorgesehen werden. Beispiele sind die Anordnung einer entsprechenden Spaltzugbewehrung oder der zusätzliche Einsatz von Stahlfasern als Bewehrung.

Ein Einfluss der Betondeckung auf die Spaltneigung konnte aus den aktuellen Versuchen nicht eindeutig abgeleitet werden. Die Versuchsergebnisse zeigen die Bedeutung des inneren Verbunds zwischen den Stabrippen und dem Stabkern bei CFK- (und allgemein bei FVK-) Bewehrungsstäben. Bei den durchgeführten Untersuchungen war der innere Verbund neben einem globalen Spaltversagen der ausschließlich limitierende Faktor. Dies verdeutlicht die Wichtigkeit der Oberflächeneigenschaften der Fasern und der gewählten Kunststoffmatrix.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss der Wendelsteigung auf das Spaltisiko der Prüfkörper. Die Stäbe der Varianten b) und c) mit Wendelsteigungen von 15° wiesen die geringste Spaltneigung auf, die Stäbe der Variante a) mit einer Wendelsteigung von 20° eine höhere und jene der Variante d) mit einer Wendelsteigung von 22° die Höchste (wenn auch bei geringerer relativer Betondeckung). Bei der Versuchsdurchführung der Stäbe der Variante d) konnte zudem eine Verdrehung als Resultat der hohen Wendelsteigung während des Versuchs beobachtet werden. In Bild 16 sind die wirkenden Verbundkräfte eines belasteten Stabes dargestellt. Je größer die Wendelsteigung, desto größer die normal zur Stabachse

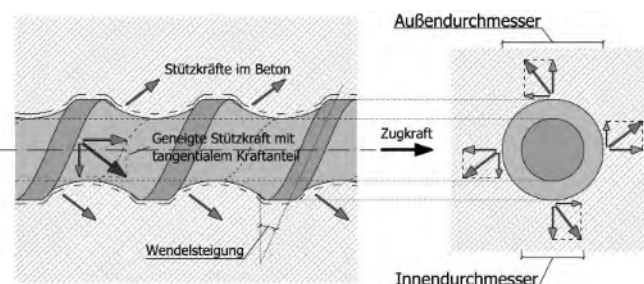


Bild 16 Wirkende Verbundkräfte am belasteten Stab
Acting bonding forces at the loaded rod

wirkende Kraft, die auch zum Spalten führt. Es wird daher die Verwendung von Stäben mit vergleichsweise geringer Wendelsteigung empfohlen.

Die große Ähnlichkeit der Verbundspannungs-Schlupfkurven der unterschiedlichen Konfigurationen kann durch den maßgebenden inneren Verbund erklärt werden. Durch die ähnliche Einfrästiefe der Stäbe wird eine ähnliche Scherfläche der Stäbe beansprucht. Diese entspricht jeweils der Mantelfläche des Stabkerns. Seitens der Autoren wird für weiterführende Versuche empfohlen, den Rippenabstand und die Einfrästiefe stärker zu variieren.

Die durchgeführten Versuche ermöglichten die grundlegende Definition von möglichen Versagensmechanismen von CFK-Bewehrungsstäben (in UHPC). Ziel des Beitrags ist, eine Orientierung für zukünftige Untersuchungen zu dieser Thematik zu bieten.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrags wurden subtraktiv bearbeitete CFK-Stäbe mit einer helikalen Wendel im Rahmen von Ausziehversuchen hinsichtlich ihres Verbundverhaltens in UHPC untersucht. Diese Stäbe erreichten deutlich höhere maximale mittlere Verbundspannungen von 20,4 MPa bis 34,8 MPa als gerillte oder mit Sand beklebte Stabvarianten in äquivalentem UHPC, welche bereits in vorhergehenden Experimenten untersucht worden waren. Als Nachteile dieser eingefrästen Stäbe sind der verminderte durchgängige Querschnitt zur Aufnahme von Zugkräften und die verminderte Mantelfläche dieses durchgängigen Querschnitts zur Übertragung von Verbundspannungen anzuführen. Des Weiteren ist das nachträgliche Entfernen von Material im Zuge des Herstellungsprozesses als Nachteil zu sehen.

Die Versuchsergebnisse zeigen die Bedeutung des inneren Verbunds zwischen den Stabrippen und dem durchgängigen Stabkern für CFK-Bewehrungsstäbe, da dieser die maximale Verbundspannung limitiert. Das innere Verbundverhalten ist maßgebend von den Eigenschaften der Kunststoffmatrix, mit der die einzelnen Fasern verbunden sind, und den Oberflächeneigenschaften der Fasern abhängig. Außerdem konnte bei fast allen Versuchskörpern

ein Spalten durch die hohen auftretenden Verbundkräfte beobachtet werden. Diesem Umstand sollte in weiteren Untersuchungen zur Herstellung von filigranen Bauteilen jedenfalls Beachtung geschenkt werden, da dadurch ein frühzeitiges Versagen ausgelöst werden kann. In keinem der Versuche konnte ein Versagen der Betondruckstreben beobachtet werden. Bei Verwendung von UHPC wäre daher eine andere (deutlich schlankere) Ausführung der Einfräsung (z.B. geringere Frästiefe) einhergehend mit einer besseren Materialausnutzung der CFK-Stäbe möglich. Maßnahmen zur Verhinderung des Versagens des inneren Verbunds der Stäbe und des Spaltens des Betons wären die Verwendung von Matrixmaterialien mit höherer Festigkeit, die Verwendung von Spaltzugbewehrung oder die Anordnung einer Endverankerung.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass das Verbundverhalten von CFK- und allgemein von FVK-Stäben von einer Vielzahl an Parametern wie dem Fasermaterial,

dem Matrixmaterial, der Art der Profilierung (subtraktiv oder additiv) abhängt und dass diesbezüglich noch enormer Forschungsbedarf besteht. Eine klare Empfehlung ist, diese Parameter, insbesondere den Einfluss des Matrixmaterials strukturiert zu untersuchen. Ziel der Autoren ist in weiteren Untersuchungen nun die unterschiedlichen Einflussparameter strukturiert zu erforschen. Aktuell werden Experimente zum Verbundverhalten von CFK-Stäben mit unterschiedlichen Konfigurationen einer nachträglich ergänzten Wendel in Form eines Faserbündels vorbereitet.

Dank

Die Autoren danken den Firmen S&P Österreich und ThyssenKrupp für ihre Kooperation sowie Matthias Braun und Mathias Hammerl für ihre Hilfe bei der Durchführung der Versuche.

Literatur

- [1] GangaRao, H. V. S.; Taly, N.; Vijay, P. V.: *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.
- [2] Nanni, A.; De Luca, A.; Zadeh, H. J.: *Reinforced Concrete with FRP Bars*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [3] Triantafyllou, T.; Matthys, S.: *Fibre-reinforced polymer reinforcement enters fib Model Code 2010*. Structural Concrete 14 (2013), No. 4.
- [4] AVK – Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e.V.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*, 4. Auflage Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [5] Schürman, H.: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, Darmstadt: Springer, 2007.
- [6] Schumann, A.; May, M.; Curbach, M.: *Carbonstäbe im Bauwesen*. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018); H. 12, S. 868–876.
- [7] Kromoser, B.; Preinstorfer, P.; Kollegger, J.: *Building light-weight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components*. Structural Concrete 20 (2019), No. 2, S. 730–744.
- [8] Stark, A.; Hegger, J.: *Verbundverhalten von CFK-Spannbewehrung in UHPFRC*. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), H. 10, S. 701–710.
- [9] Pritschow, A.: *Dissertation: Zum Verbundverhalten von CFK-Bewehrungsstäben in Bauteilen aus ultrahochfestem Beton*. Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [10] Ortlepp, S.; Zernsdorf, K.; Schladitz, F.; Bösch, T.: *Stab-bewehrung aus Carbonfaserverstärktem Beton (CFB) für den Betonbau*. Beton und Stahlbetonbau 113 (2018), H. 7, S. 551–557.
- [11] Rehm, G.: *Über die Grundlagen des Verbunds zwischen Stahl und Beton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 138, Ernst & Sohn Berlin, 1961.
- [12] Weiße, D.: *Some Aspects about the Bond of Reinforcement in Ultra High Strength Concrete*. Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER). 2003(8): 251–63.
- [13] Eligehausen, R.; Kreller, H.; Langer, P.: *Bond studies for deformed bars with practical concrete covers (Untersuchungen zum Verbundverhalten gerippter Bewehrungsstäbe mit praxisüblicher Betondeckung)*. Report, Universität Stuttgart IWB 1989/5.
- [14] Martin, H.: *Bond performance of ribbed bars (pull-out tests): Influence of concrete composition and consistency*. Bond in Concrete, Proceedings. Applied Science Publishers London, 1982, S. 289–299.
- [15] Afefy, H. M.; El-Tony, E.-T. M.: *Bond Behavior of Embedded Reinforcing Steel Bars for Varying Levels of Transversal Pressure*. Journal of Performance of Constructed Facilities, April 2015.
- [16] Preinstorfer, P.; Kromoser, B.; Kollegger, J.: *Development of prestressed T-beams made of textile reinforced UHPC*. 39th IABSE Symposium – Engineering the Future, Vancouver, 2017.
- [17] Leonhardt, F.; Mönning, E.: *Vorlesungen über Massivbau – Teil 1 Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau*. Berlin: Springer Verlag, 1984.
- [18] Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Construction: *RILEM Technical Recommendations for the testing and use of construction materials*. London: RILEM, E&FN Spon, 1994.
- [19] Windisch, A.: *A modified Pull-Out Test and new evaluation methods for a more real bond-slip relationship*. Materials and Structures, Bordas-Gauthier-Villars, 1985, S. 181–184.
- [20] Austrian Standards Institute/Österreichisches Normungsinstitut: *ÖNORM EN196-1:2005: ÖNORM EN196-1:2005 – Prüfverfahren für Zement Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*, 2005.

Autoren



Florian Suppanz, BSc (Korrespondenzautor)
florian.suppanz@baucon.at
Universität für Bodenkultur
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien



Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser, BSc
benjamin.kromoser@boku.ac.at
Universität für Bodenkultur
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien

F. Suppanz, B. Kromoser: Bond behavior of subtractive machined CFRP rods in UHPC

Zitieren Sie diesen Beitrag

Suppanz, F.; Kromoser, B. (2020) *Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter CFK-Stäbe in UHPC*. Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 7, S. 504–513. <https://doi.org/10.1002/best.201900088>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 9. November 2019; angenommen: 3. April 2020.