

Bemessungsregeln für Betonbauteile mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung

Josef Hegger

Jörg Niewels

RWTH Aachen, Institut für Massivbau (IMB)

1. Veranlassung und Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Herleitung eines wirtschaftlichen und mechanisch konsistenten Bemessungskonzeptes zur Biege- und Querkrafttragfähigkeit von temporären Bauteilen, die mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung (FVK) bewehrt sind. Einsatzgebiete sind z.B. Start- oder Zielschächte für Schildvortriebe oder andere Vortriebsmaschinen. Aufgrund der besseren Zerspanbarkeit sowie der Korrosionsbeständigkeit bietet der Einsatz von FVK-Bewehrung hier wirtschaftliche und bauverfahrenstechnische Vorteile gegenüber einer Betonstahlbewehrung. Da die Verwendung von FVK-Bewehrung in Deutschland bisher nicht normativ geregelt ist, muss für die Erstellung derartig bewehrter konstruktiver Betonbauteile eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden.

2. Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen

Faserverbundkunststoffe bestehen zu etwa 40 bis 70 Vol.-% aus Verstärkungsfasern, der restliche Anteil aus Kunststoffmatrix. Da diese sich wegen ihrer geringen Dehnsteifigkeit kaum am Lastabtrag beteiligt, werden die mechanischen Eigenschaften der FVK in Längsrichtung hauptsächlich von den verwendeten Verstärkungsfasern bestimmt. In Querrichtung hängen die Eigenschaften der anisotropen Faserverbundkunststoffe im Wesentlichen von dem verwendeten Kunststoff ab. Wie die Fasern verhalten sich Faserverbundkunststoffe unter Zugbeanspruchung bis zum Versagen linear-elastisch. Der E-Modul ist für CFK mit bis zu 580.000 N/mm² am größten. Für aramid- bzw. glasfaserverstärkten Kunststoff (AFK bzw. GFK) beträgt der E-Modul mit bis zu 125.000 N/mm² bzw. 60.000 N/mm² nur etwa die Hälfte bis ein Viertel des Wertes von Betonstahl (Tabelle 2-1). Es ist anzumerken, dass auch die meisten derzeit angebotenen carbonfaserverstärkten Kunststoffe (CFK) aus Kostengründen einen geringeren E-Modul als Betonstahl aufweisen. Bei der Bemessung von Betonbauteilen kommt der Beschränkung der Durchbiegung sowie der Rissbreiten daher je nach verwendeter FVK-Bewehrung eine besondere Bedeutung zu. Die maximale Bruchdehnung ist für AFK bzw. GFK mit bis zu 44 bzw. 31 % deutlich größer als für CFK, so dass sich ein Bauteilversagen je nach Produkt durch ähnlich große Verformungen ankündigt wie bei der Verwendung von Betonstahl. Generell ist die Zugfestigkeit der Faserverbundkunststoffe sehr hoch und beträgt ein Vielfaches der Festigkeit von Betonstahl. FVK sollten nach den bekannten Bemessungskonzepten [ACI06, CSA02, Jap97] sowie [Riz01, FIB07] generell nicht als Druckbewehrung angesetzt werden.

FVK	E-Modul	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Dichte	Querdehnzahl	Wärme- dehnzahl axial / radial
	$\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	$\text{N/mm}^2 \cdot 10^3$	[‰]	g/cm^3	[-]	$10^{-6} / \text{K}$
GFK	35-60	0,5-1,6	12-31	1,25-2,1	0,30	6...10 / 21...23
AFK	41-125	1,0-2,5	19-44	1,25-1,4	0,34	-6...-2 / 60...80
CFK	120-580	0,6-3,5	5-17	1,5-1,6	0,21	-9...0 / 74...104

Tabelle 2-1 Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen [ACI06], [FIB07], [Ma193]

Bauteile, die eine hohe Feuerwiderstandsklasse erfordern, sollten nicht bzw. nur mit zusätzlichen Schutzmaßnahmen mit FVK bewehrt werden [ACI06, Riz01]. Wegen der relativ niedrigen Glasübergangstemperatur T_g der verwendeten Kunststoffe kann für manche Materialien bereits bei Temperaturen ab etwa 70°C eine deutliche Entfestigung der Kunststoffmatrix auftreten.

Faserverbundkunststoffe sind durch ein sehr gutmütiges Ermüdungsverhalten gekennzeichnet [ACI06]. Umgebungsbedingungen wie Feuchtigkeit, alkalisches oder saures Milieu, Frost-Tau-Wechsel und UV-Strahlung spielen beim Einsatz von FVK eine wichtige Rolle für die Dauerhaftigkeit. Insbesondere Glasfasern unterliegen je nach Fasertyp und verwendetem Harz auf lange Sicht einer spürbaren Alterung in alkalischer Umgebung.

3. Biegebemessung

In den internationalen Richtlinien und Normen für Bauteile mit Faserverbundkunststoffbewehrung wird für die Biegebemessung im Allgemeinen das Bemessungsmodell des Stahlbetonbaus unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Materialverhaltens übernommen. Die Richtigkeit dieses Vorgehens wird in internationalen Veröffentlichungen [Dur97] bestätigt. Für die Herleitung von Hilfsmitteln zur Biegebemessung können die gleichen Voraussetzungen und Annahmen wie für Stahlbetonbauteile angesetzt werden:

- Ebenbleiben der Querschnitte
- vollkommener Verbund
- Kein Ansatz der Betonzugfestigkeit
- Gleichgewicht der Kräfte
- Stoffgesetze für Beton (hier DIN 1045-1) und FVK

Auf dieser Grundlage wurde ein Allgemeines Bemessungsdiagramm für Betonquerschnitte mit der in den Versuchen verwendeten Glasfaserbewehrung ComBAR der Firma Schöck abgeleitet. Die Nachrechnung von 20 Biegeversuchen mit unterschiedlicher Bewehrung aus der Literatur zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen im Versuch ermittelter und

rechnerischer Bruchlast. Mit $\mu_{Edf} = \frac{M_{Edf}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$ als Eingangswert können analog dem aus dem

Stahlbetonbau bekannten Allgemeinen Bemessungsdiagramm die entsprechenden Werte abgelesen und die erforderliche Bewehrungsmenge ermittelt werden.

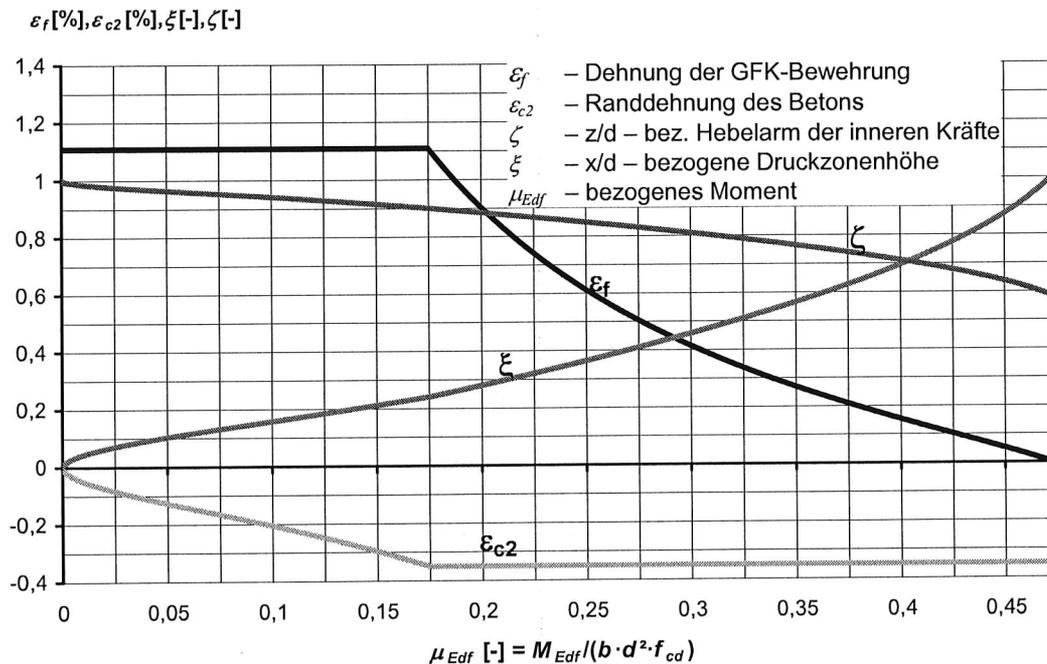


Bild 3-1 Bemessungsdiagramm für Betonquerschnitte mit FVK-Bewehrung (ComBAR)

4. Querkraftversuche

Der Versuchsbalken, der im Rahmen des Vorhabens hergestellt wurde, besaß eine Länge von 5,0 m bei einem Querschnitt von $b/h = 30 \text{ cm}/50 \text{ cm}$ (Bild 4-1). Zur Bestimmung des Betontraganteils an der Querkrafttragfähigkeit wurde der linke Trägerbereich für den ersten Teilversuch ohne Querkraftbewehrung ausgeführt. Der rechte Bereich für den zweiten Teilversuch wies mit $\rho_w = 0,11 \%$ einen niedrigen Querkraftbewehrungsgrad mit je zwei Bewehrungsstäben $\text{Ø}8 / 30$ auf. Um ein Versagen des Trägers im mittleren Bereich auszuschließen, wurde dort zusätzlich zur GFK-Querkraftbewehrung noch eine Bewehrung aus Betonstahl in Form von sich übergreifenden Steckbügeln $\text{Ø}12 / 30$ angeordnet. Da die GFK-Querkraftbewehrung möglichst hoch ausgenutzt werden sollte, wurden die Stäbe in aufbetonierten Vorsprüngen von 15 cm Höhe und 10 cm Breite verankert. Eine vollständige Verankerung der Bewehrungsstäbe durch auf die Stabenden geklebte Kopfbolzen oder gekrümmte Bügel ist materialbedingt nicht möglich.

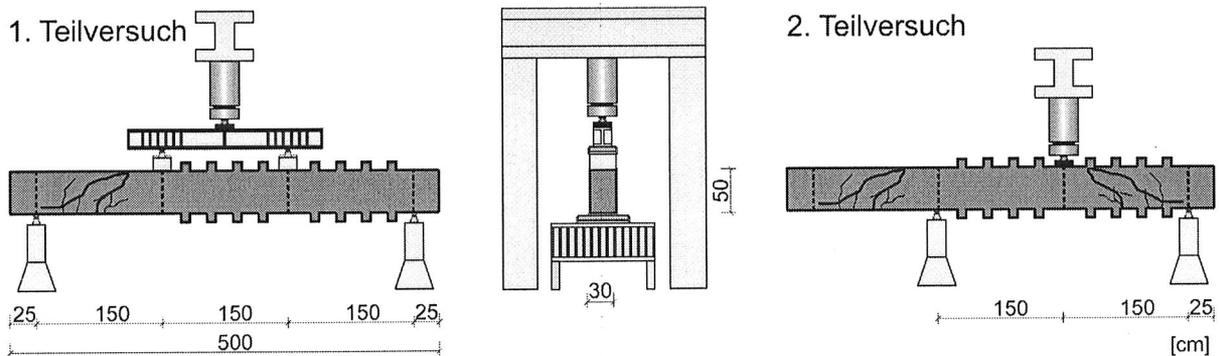


Bild 4-1 Prinzipskizze Versuchsstand

Teilversuch 1 (ohne Querkraftbewehrung)

Bis zur Entstehung des kritischen Schubrisse war das Tragverhalten als vergleichsweise steif zu bezeichnen. Das Rissbild war durch nur leicht geneigte Biegerisse mit geringen Rissbreiten geprägt. Eine Übertragung von Kräften über die Risse hinweg war daher möglich. Das Tragsystem ist in Bild 4-2, links dargestellt. Mit Entstehen des kritischen Schubrisse fiel dieser Traganteil aus, so dass die inneren Kräfte auf die Dübelwirkung der Längsbewehrung und die Druckzone umgelagert wurden (Bild 4-2, Mitte). Durch das Fortschreiten des Dübelrisse in Richtung Auflager wurde die Dübeltragwirkung zunehmend reduziert und die Querkraftbeanspruchung der Druckzone vergrößert (Bild 4-2, rechts). Im Bruchzustand lag ein Sprengwerk mit der Längsbewehrung als Zugband vor. Diese Entwicklung war mit einer Abnahme der Steifigkeit des Trägers verbunden. Das beschriebene Tragverhalten ist prinzipiell von Versuchen an Stahlbetonbauteilen bekannt [Heg06].

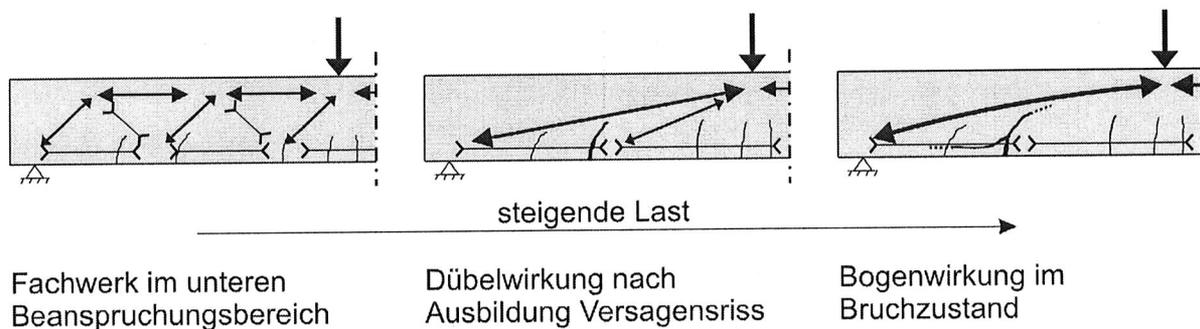


Bild 4-2 Tragverhalten von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung

Teilversuch 2 (mit Querkraftbewehrung)

Das Rissbild im Bruchzustand entsprach prinzipiell dem eines Stahlbetonträgers, so dass der Lastabtrag an einem Fachwerkmodell wie in Bild 4-3 verdeutlicht werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass durch das Anwachsen des Dübelrisse bis auf 3,2 mm und des kritischen Schubrisse bis auf 2,4 mm die Traganteile aus Dübelwirkung und Rissreibung im Bruchzustand weitestgehend entfielen. Dennoch kann ein Rissreibungsanteil über Versprünge des Rissverlaufs nicht ausgeschlossen werden. Da die Querkraftbewehrung anders als

Stahl sich nicht ab einer bestimmten Dehnung durch Fließen der Last entzieht, konnten die dabei freiwerdenden Kräfte nicht nur in die Druckzone (Bogentragwirkung) sondern auch auf die Bewehrung (Fachwerk) umgelagert werden. Mit steigender Last wurde die Bewehrung aufgrund der Kompatibilität der Verformungen zunehmend gedehnt und konnte so immer größere Kräfte aufnehmen.

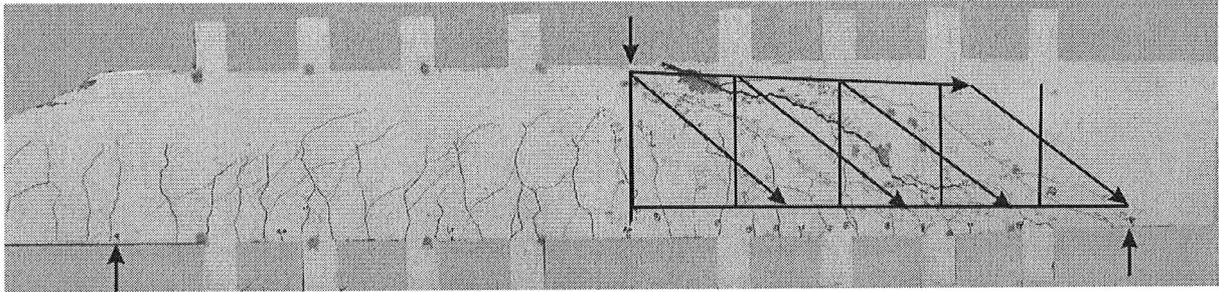


Bild 4-3 Rissbild und idealisiertes Fachwerk

Der Träger versagte schließlich bei einer Querkraft von 250 kN durch einen Riss durch die eingeschnürte Betondruckzone. Anders als bei betonstahlbewehrten Bauteilen war die Ursache nicht das Fließen der Querkraftbewehrung, sondern die großen elastischen Dehnungen der GFK-Bewehrung. So wurden im Versuch vor Erreichen der Bruchlast Dehnungen an der Schubbewehrung bis zu 12‰ gemessen. Beim Versagen handelte es sich demnach um ein Biegeschubversagen infolge der hohen Dehnungen der Querkraftbewehrung.

5. Querkraftbemessung

Bemessung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Für die Nachrechnung von Versuchen mit dem Ansatz nach DIN 1045-1 wird statt des Bemessungswertes $V_{Rd,cl}$ hier der Mittelwert $V_{Rm,cl}$ verwendet. Empirische Auswertungen an einer Datenbank weisen für den Nachweis hier einen Vorfaktor von 0,197 anstelle von 0,1 aus [Heg03]. Die Gleichung ergibt sich damit zu:

$$V_{Rm,cl} = 0,197 \cdot \kappa \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (5-1)$$

Ohne eine entsprechende Modifikation für FVK-bewehrte Bauteile ermittelt der Ansatz nach DIN 1045-1 deutlich zu große Traglasten. Da die Tragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung maßgeblich von der Druckzonenhöhe bestimmt wird und diese von der Dehnsteifigkeit (EA) der Längsbewehrung abhängt, wurde in Gleichung (5-2) der Längsbewehrungsgrad mit dem Verhältnis der Steifigkeiten von FVK und Stahl modifiziert. Der FVK-Bewehrungsquerschnitt wird also durch einen Stahlquerschnitt gleicher Steifigkeit abgebildet.

$$V_{calc} = 0,197 \cdot \kappa \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot f_{ck} \right)^{1/3} \cdot b_w \cdot d \quad (5-2)$$

Die Gegenüberstellung der Versuchsnachrechnung in Tabelle 5-1 lässt erkennen, dass der Ansatz nach Gleichung (5-2) wie auch die meisten übrigen internationalen Ansätze für FVK-bewehrte Bauteile eine gute Übereinstimmung mit dem eigenen Versuch liefern. Einzige Ausnahme ist der Ansatz aus Kanada [CSA02], der weit auf der sicheren Seite liegt. Der Längsbewehrungsgrad und die Steifigkeit der Längsbewehrung finden in diesem Ansatz keine Berücksichtigung. Der Ansatz von Razaqpur, der diese Aspekte berücksichtigt und eine Weiterentwicklung des kanadischen Ansatzes darstellt, ergibt die beste Übereinstimmung mit dem Versuchsergebnis. Da der Ansatz auf Basis von DIN 1045-1 die wesentlichen Einflussparameter Zugfestigkeit, Längsbewehrungsgrad und Maßstabseffekt berücksichtigt, und eine gute Übereinstimmung mit dem Versuchsergebnis aufweist, ist er in der Form von Gleichung (5-2) für FVK-bewehrte Bauteile anwendbar. Für eine abschließende Beurteilung sind jedoch zusätzliche Untersuchungen und weitere Versuchsdaten erforderlich. Daher werden derzeit am IMB weitere Versuche durchgeführt und eine umfangreiche Datenbank mit Querkraftversuchen an FVK-bewehrten Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung erstellt [Nie08].

Versuch	112 kN (100%)
ACI [ACI06]	94,4 kN (85%)
CSA [CSA02]	60,7 kN (54%)
JSCE [Jap97]	99,6 kN (89%)
Razaqpur [Raz05]	115,2 kN (103%)
DIN 1045-1, modifiziert	121,7 kN (109%)

Tabelle 5-1 Gegenüberstellung der Versuchsnachrechnung als Mittelwerte mit unterschiedlichen Bemessungsansätzen für Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Bemessung für Bauteile mit Querkraftbewehrung

Anders als in den im Forschungsvorhaben untersuchten internationalen Ansätzen für FVK-bewehrte Bauteile findet der Betontraganteil im Ansatz der DIN 1045-1 nicht additiv, sondern nur indirekt über die Neigung der Druckstrebe Berücksichtigung. Der Betontraganteil (Rissreibung) wurde dabei für stahlbewehrte Bauteile unter Ansatz von Reibungsgesetzen hergeleitet. Er wird unabhängig vom Längsbewehrungsgrad ermittelt. Da der Längsbewehrungsgrad unter Berücksichtigung der Dehnsteifigkeit der Bewehrung jedoch von entscheidender Bedeutung für den Betontraganteil ist, erscheint eine einfache Modifikation des Ansatzes der DIN 1045-1 für FVK-bewehrte Bauteile nicht möglich.

Im Folgenden werden die Ansätze nach [ACI06, CSA02, Jap97, Raz05] auf ihre Anwendbarkeit überprüft. Nach Tabelle 5-2 wird die Querkrafttragfähigkeit des Versuchs von allen Ansätzen mit Ausnahme des japanischen Bemessungscodes, der weit auf der sicheren Seite liegt, zutreffend bestimmt. Razaqpur kann darüber hinaus in [Raz05] eine gute Übereinstimmung seines Ansatzes mit 47 weiteren Versuchen an FVK-bewehrten Bauteilen vorweisen. Die Traglast im Versuch ergab dort im Verhältnis zum Rechenwert einen Mittelwert von 1,1. Da der Ansatz auch die wesentlichen Einflussgrößen wie Zugfestigkeit, Längsbewehrungsgrad und –steifigkeit, Maßstabseffekt sowie einen variablen Druckstrebenwinkel berücksichtigt, erscheint er für FVK-bewehrte Bauteile anwendbar.

Versuch	250,0 kN
ACI [ACI06]	261,7 kN (105%)
CSA [CSA02]	224,5 kN (90%)
JSCE [Jap97]	128,0 kN (51%)
Razaqpur [Raz05]	266,3 kN (106%)
DIN 1045-1	./.

Tabelle 5-2 Gegenüberstellung der Versuchsnachrechnung als Mittelwerte mit unterschiedlichen Bemessungsansätzen für Bauteile mit Querkraftbewehrung

Trotz der guten Übereinstimmung der meisten Rechenwerte mit der Versuchslast ergeben sich folgende Kritikpunkte an den vorgestellten Bemessungskonzepten, aus denen sich weiterer Forschungsbedarf ableitet:

- Der Ansatz eines 45°-Fachwerks in den untersuchten Bemessungsansätzen entspricht für sehr hoch querkraftbewehrte Bauteile in etwa den tatsächlichen Verhältnissen und wurde mit rd. 30° im Versuch deutlich unterschritten. Auch nach [Raz05] ergibt sich für den Versuch ein rechnerischer Druckstrebenwinkel im Bereich von 45°.
- Anders als im Stahlbetonbau ist der Fachwerktraganteil nicht durch das Fließen der Bügelbewehrung beschränkt, sondern durch große Dehnungen bzw. die Festigkeit der FVK-Bewehrung. Ein Biegeschubversagen oder Schubzugbruch kann demnach nicht wie im Stahlbetonbau indirekt durch das Fließen der Bewehrung identifiziert werden. Beide Versagensarten können sich wegen des niedrigen E-Moduls wie im Versuch beobachtet bereits vor Erreichen der Zugfestigkeit der Bewehrung einstellen. Mit den vorgestellten Bemessungsmodellen wird das Bauteilversagen allein durch ein Bewehrungsversagen abgebildet. Als Ausnahme ist [Jap97] zu nennen, der die Dehnung der Querkraftbewehrung explizit bestimmt. In [ACI06] wird das Problem durch eine generelle Beschränkung der Dehnung der Querkraftbewehrung auf 4 ‰ umgangen.

Zur genauen Klärung dieser Punkte sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Mindestbewehrung

Wie in DIN 1045-1 ist eine Mindestbewehrung zur Aufnahme der Kräfte nach Überschreitung der Querkrafttragfähigkeit des unverbügelten Querschnitts vorzusehen. Zur Bestimmung des Mindestquerkraftbewehrungsgrades wurde die Tragfähigkeit des unverbügelten Querschnitts mit der des verbügelten Querschnitts gleichgesetzt. Analog zu dem Vorgehen nach DIN 1045-1 in [Heg03] ergibt sich der Mindestbewehrungsgrad für die in den Versuchen verwendete Bewehrung zu:

$$\rho_w = 0,11 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{fd,w}} \quad (5-3)$$

Wegen der geringeren Tragfähigkeit des unbewehrten Querschnitts für einen Träger mit FVK-Längsbewehrung ist dieser Wert kleiner als der nach DIN 1045-1 ermittelte

$$(\rho_w = 0,16 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}}).$$

Nachweis der Druckstrebentragfähigkeit

Der Nachweis der Druckstrebentragfähigkeit kann mit dem nach [Raz05] bestimmten Druckstrebenwinkel wie in DIN 1045-1 geführt werden. Wegen der größeren zu erwartenden Rissbreiten wird der Abminderungsbeiwert α_c von 0,75 für Normalbeton auf 0,5 herabgesetzt. Für eine genauere Festlegung von α_c sind weitere Versuche an FVK-bewehrten Balken im Bereich des Druckstrebenversagens erforderlich.

6. Danksagung

Die Untersuchungen wurden vom Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V. (DBV) gefördert (DBV-Nr. 260). Der Beratergruppe gehörten die Herren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Hans-Wolf Reinhardt

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch

an. Dem Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V. und den Herren der Beratergruppe sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

7. Literaturverzeichnis

- [ACI06] ACI 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2006.
- [CSA02] Can/CSA-S806-2: Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, Mai 2002.
- [Dur97] Duranovic, N.; Pilakoutas, K.; Waldron, P. : FRP Reinforcement for Concrete Structures: Design Considerations. In: International Symposium Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), S. 527-534, Sapporo, Japan, 1997.
- [FIB07] FIB Task Group 9.3: FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report on the Design and use of fibre reinforced polymer reinforcement (FRP) for reinforced concrete structures, draft, 2007.
- [Heg03] Hegger, J., Görtz, S.: Zur Mindestquerkraftbewehrung nach DIN 1045-1. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 525, Teil 2, Berlin, Beuth, 2003.
- [Heg06] Hegger, J.; Görtz, S.: Querkraftmodell für Bauteile aus Normalbeton und Hochleistungsbeton, Beton- und Stahlbetonbau 101, Heft 9; S. 695-705, Berlin, Verlag W. Ernst & Sohn 2006.
- [Jap97] Japan Society of Civil Engineers (JSCE): Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforced Materials. Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan, 1997.

- [Mal93] Mallick, P. K.: Fiber Reinforced Composites, Materials, Manufacturing and Design. Marcell Dekker Inc., New York, 1993.
- [Nie08] Niewels, J.: Zum Tragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoffbewehrung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, Dissertation in Vorbereitung.
- [Raz05] Razaqpur, A. G., Isgor, O. B.: General Shear Design Method for FRP Reinforced Concrete Members. In: Third International Conference Composites in Constructions (CCC), S. 533-540, Lyon, Frankreich, 2005.
- [Riz01] Rizkalla, S.; Mufti, A.: Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, Design Manual No.3. ISIS Canada Corporation, 2001.