

Zukunft Bau

KURZBERICHT

Titel

Lückenforschung Faserkunststoffbewehrung (FKB)

Untersuchung des Langzeitverbundverhaltens von Bewehrung aus faserverstärktem Kunststoff
SWD-10.08.18-17.62

Anlass/ Ausgangslage

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton ist maßgebend abhängig vom Korrosionswiderstand des Betonstahls. Der Korrosionsschutz wird durch die hohe Alkalität des umgebenden Betons gewährleistet. Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, Luft- und Wasserverschmutzungen sowie chemische und biologische Medien können die Alkalität des Betons beeinflussen und die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton herabsetzen. Durch die hohe Beständigkeit gegen aggressive Medien bietet die nichtmetallische Faserkunststoffbewehrung (FKB) eine Lösungsmöglichkeit für Bauteilschäden infolge Stahlkorrosion. Speziell Bauwerke die einem hohen Korrosionsrisiko unterliegen, eröffnet sich durch den Einsatz einer nichtmetallischen Bewehrung ein hohes Potential diese als dauerhafte und wartungsarme Betonkonstruktionen auszuführen.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) gelten als korrosionsfrei. Hiermit ist jedoch rostfrei gemeint. Das Wort „Korrosion“ stammt aus dem lateinischen und bedeutet „Zersetzen“ und beschreibt damit die chemische Reaktion eines Werkstoffs mit seiner Umgebung. Da es sich bei GFK um keinen metallischen Werkstoff handelt, rostet diese Bewehrung nicht, jedoch werden unter bestimmten Umwelteinflüssen auch die beiden Komponenten Glas und Kunststoff mit der Zeit geschädigt. Diese Alterung von Glas und Kunststoff führt ebenfalls wie die Korrosion metallischer Werkstoffe zu einer messbaren Degradation der Festigkeiten. Daher ist dieser Werkstoff nicht korrosionsfrei und das mechanische Kurzzeittragverhalten weicht von dem Langzeittragverhalten ab. Um die Dauerhaftigkeit von Bauwerken mit diesem Material sicherstellen zu können, muss das zeitabhängige Materialverhalten quantifizierbar sein. Es ist bereits belegt, dass sowohl die Zugfestigkeit als auch die Verbundfestigkeit mit der Zeit degradieren. In Deutschland existiert zurzeit keine allgemeine Normierung für FKB. In der kanadischen und amerikanischen Norm wird bereits das Langzeitzugtragverhalten von FKB berücksichtigt, jedoch existieren keine Anforderungen an das Langzeitverbundtragverhalten. In der Literatur sind im Gegensatz zum Langzeitzugtragverhalten kaum Informationen zum Langzeitverbundtragverhalten zu finden.

Die Materialalterung sowie das stabspezifische Verbundtragverhalten der FKB führen zu einem abweichenden Verbundtragverhalten gegenüber Betonstahl. Hierdurch besteht zurzeit eine offene Wissenslücke im Bereich der Bemessung von Endverankerungslängen von Betonbauteilen mit FKB unter Kurzzeit- sowie Langzeitbeanspruchung.

Gegenstand des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsprojektes ist ein Beitrag zur Bemessung der Endverankerungslänge mit Bewehrung aus glasfaserverstärktem Kunststoff auf Grundlage des aktuellen Arbeitsentwurfs des Neuvorschlags des Eurocode 2. Der Fokus liegt auf der Anpassung des Bemessungsansatzes unter Berücksichtigung des Kurz- und Langzeitverbundtragverhaltens.

Zur Untersuchung des Tragverhaltens der Endverankerung unter Kurzzeitbeanspruchung wird der Einfluss der konstruktiven Parameter Betonfestigkeit, Stabdurchmesser, Verankerungslänge, Betondeckung, Querbewehrung und Querdruck untersucht (Bild 1). Die Ergebnisse sollen zeigen, welche der jeweilige Parameter abhängig oder unabhängig vom Bewehrungsmaterial sind. Abhängige Parameter werden auf das stabspezifische Verhalten angepasst, um mit der Bemessungsgleichung der Endverankerungslänge nach die Tragfähigkeit der Endverankerung unter Kurzzeitbeanspruchung sicherzustellen.

Im Rahmen der Langzeituntersuchungen werden die Auswirkungen einer Alterungs- und Kriechbeanspruchung auf den Verbund von FKB und Beton untersucht. Hierzu wird ein Versuchsstand entwickelt (Bild 2), mit welchem unter den äußeren Einflüssen Feuchtigkeit, erhöhte Temperatur und Betonalkalität die Degradation der Verbundfestigkeit erforscht wird. Die hiermit ermittelten Ergebnisse werden genutzt, um eine Mindestverankerungslänge in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur zu definieren, welche die Tragfähigkeit der Endverankerung über den gesamten Bemessungszeitraum sicherstellt.

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte dieser Arbeit aufgeführt:

1. Literaturrecherche der Grundlagen zu:
 - der Verbundverankerung von Betonstahl und Beton.
 - der Zusammensetzung und dem Schädigungsverhalten von FKB.
 - der abweichenden Materialcharakteristik zwischen Betonstahl und FKB und deren Auswirkung auf die Verbundtragfähigkeit.
2. Experimentelle Untersuchungen:
 - der stabspezifischen Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung.
 - des Einflusses konstruktiver Parameter auf die Verbundtragfähigkeit.
 - der zeitabhängigen Verbundfestigkeit unter Dauerlast und der Einwirkung von Feuchtigkeit, Betonalkalität und erhöhter Temperatur.
3. Modell zur Berechnung des Verbundspannungsverlaufs entlang der Verankerungslänge:
 - zur Ableitung einer Verbundspannung im Bruchzustand.
 - zur Berücksichtigung des Verbundkriechens auf die Verbundtragfähigkeit.
4. Anpassung des Bemessungsansatzes zur Sicherstellung Verbundtragfähigkeit:
 - Endverankerungslänge unter Berücksichtigung der konstruktiven Parameter unter Kurzzeitbeanspruchung.
 - Mindestverankerungslänge unter langandauernder Belastung in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur.

Fazit

Die Kurzzeitverbunduntersuchungen zeigen, dass aufgrund des geringen E-Moduls und der variierenden Oberflächenprofilierung Faserkunststoffbewehrungsstäbe zu einer erhöhten Spaltwirkung tendieren. In den eigenen Versuchen werden für drei unterschiedliche Faserkunststoffbewehrungsstäbe (Bezeichnung GFK1-3) Bemessungsverbundspannungen in Höhe von $\tau_{bd} = 3,7 - 4,5 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Diese stellen eine Überbeanspruchung des Verbunds unter ungünstigen Randbedingungen sicher. Hieraus ergeben sich Verankerungslängen bei einer zu verankernden Normalspannung von $f_{nm,k} = 580 \text{ N/mm}^2$ von $l_{bd} = 28 - 33 \cdot d_s$. Des Weiteren wird der Einfluss der Betonfestigkeit, der Betondeckung, des Stabdurchmessers, der Verankerungslänge, der Querbewehrung sowie des Querdrucks auf die Verbundtragfähigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Betondeckung, des Stabdurchmessers, der Querbewehrung sowie des Querdrucks stabspezifisch sind und unzureichend mit dem Bemessungsansatz der Verankerungslänge beschrieben werden. Diese vier Parameter zeigen in den Untersuchungen folgenden Einfluss auf die Verbundtragfähigkeit:

- Erhöhung der Betondeckung von 16 ($1,5 d_s$) auf 32 mm ($2,0 d_s$): +19 bis +23 %
- Reduzierung des Stabdurchmessers von 20 auf 12 mm: +8 bis +33 %
- Erhöhung des Querbewehrungsgrades von 0,0 auf 1,0: +18 bis +36 %
- Erhöhung des Querdrucks von indirekter zu direkter Lagerung: +24 bis +45 %

Bei günstigen Randbedingungen wie einer hohen Betonfestigkeit, guten Verbundbedingungen und einer maximalen Umschnürung kann die Bemessungsverbundspannung für die geprüften Faserkunststoffbewehrungsstäbe auf maximal $\tau_{bd} = 15,0 - 17,9 \text{ N/mm}^2$ erhöht werden, wodurch die Verankerungslänge auf $l_{bd} = 7 - 8 \cdot d_s$ reduziert wird.

Um das Langzeitverbundverhalten zu quantifizieren, werden in diesem Forschungsprojekt Standzeit-Verbundversuche unter Dauerlast und den Expositionen Betonalkalität, Feuchte und erhöhter Temperatur durchgeführt. Durch dieses aggressive Milieu findet ein Zersetzungsprozess der Oberflächenprofilierung statt (Bild 3-5), welcher den Verbund von FKB und Beton mit der Zeit löst. Die experimentellen Untersuchungen haben hierbei ergeben, dass nach einer Prüfdauer von $t = 1.000 \text{ h}$ und einer Prüftemperatur $T = 60^\circ\text{C}$ die aufnehmbare Verbundspannung der Faserkunststoffbewehrungsstäbe auf ein Niveau von 47 – 70 % der Kurzzeitverbundfestigkeit sinkt. Bei einer Extrapolation dieser Ergebnisse auf $t = 100$ Jahre ergibt dies eine aufnehmbare Verbundspannung bei $T = 60^\circ\text{C}$ von 26 – 48 % der Kurzzeitverbundfestigkeit.

Auf Basis der Ergebnisse der Kurzzeit- und Langzeituntersuchungen wird die Bemessungsgleichung für FKB angepasst. Gleichungen 1-3 zeigen den modifizierten Bemessungsansatz der Verankerungslänge. Hierbei sind die Parameter des Stabdurchmessers n_d , der Betondeckung n_c , der Querbewehrung α_{conf} , der maximalen Umschnürung $\alpha_{conf,max}$ sowie die Materialalterung $\alpha_{T,lb}$, $\alpha_{t,lb}$ und n_t stabspezifisch. Diese Parameter werden im Rahmen dieses Projektes für drei unterschiedliche Faserkunststoffbewehrungsstäbe abgeleitet (Tabelle 1).

$$l_{bd} = \alpha_{lbs} \cdot d_s \cdot \left(\frac{25 \text{ N/mm}^2}{f_{ck}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{nm,d}} \cdot \frac{\gamma_c}{1,5} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{d_s}{20 \text{ mm}} \right)^{n_d} \cdot \left(\frac{1,5 \cdot d_s}{c_{d,conf}} \right)^{n_c} \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$\geq \alpha_{lbs,min} \cdot d_s = (\alpha_{T,lb} \cdot T + \alpha_{t,lb} \cdot t^{n_t}) \cdot d_s$$

$$\geq 15 \cdot d_s$$

$$c_{d,conf} = c_d + \left(\alpha_{conf} \cdot k_{conf} \cdot \frac{n_t \cdot A_{st}}{n_b \cdot d_s \cdot s_{st}} + 8 \cdot \frac{\sigma_{ctd}}{\sqrt{f_{ck}}} \right) \cdot d_s \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$c_{d,conf} \leq \alpha_{conf,max} \cdot d_s \quad (\text{Gleichung 3})$$

Tabelle 1: Stabspezifische Parameter.

Bewehrungsstab	α_{lbs}	n_d	n_c	α_{conf}	$\alpha_{conf,max}$	$\alpha_{T,lb}$	$\alpha_{t,lb}$	n_t
GFK1	33	0,28	0,30	46	7,5	-	-	-
GFK2	28	0,46	0,25	40	14,4	-0,100	11,973	-0,031
GFK3	30	0,11	0,26	114	15,2	-	-	-

Eckdaten

Projektleitung:
Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn

Forscher:
Dipl.-Ing. Christian Caspari

Gesamtkosten: 272.721,92 €
Anteil Bundeszuschuss: 144.670,00 €

Projektlaufzeit: 34 Monate

BILDER/ ABBILDUNGEN:

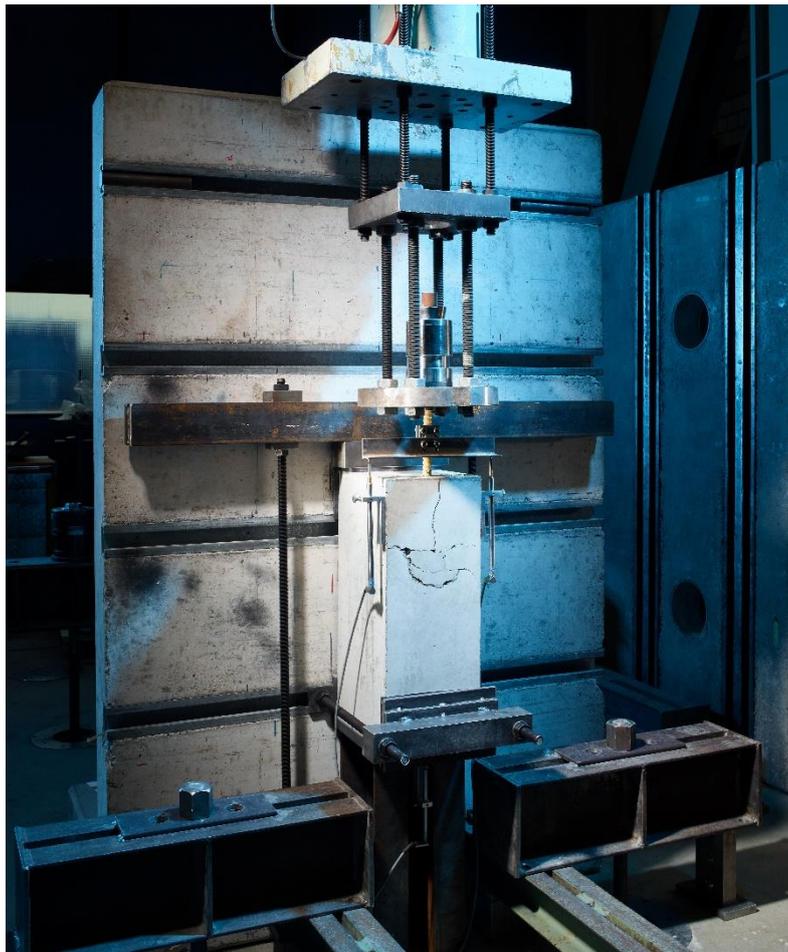


Bild 1: Bruchbild eines Beam-End Tests nach der Versuchsdurchführung.

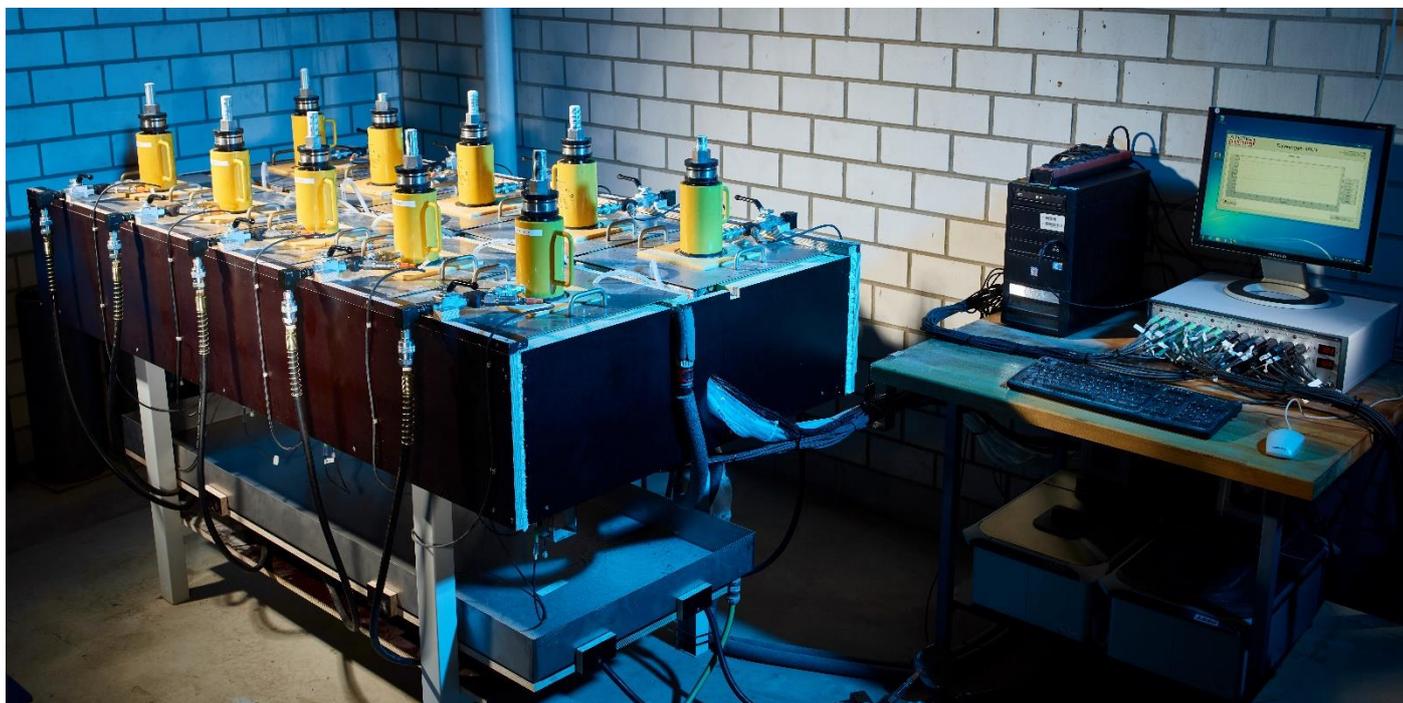


Bild 2: Entwickelter Versuchsstand zur Untersuchung der zeitabhängigen Verbundfestigkeit unter Dauerlast und den äußeren Einflüssen Feuchtigkeit, erhöhte Temperatur und Betonalkalität.



Bild 3: Zeitabhängige Zersetzung der Oberflächenprofilierung von GFK1 bei 60°C. Von links nach rechts abnehmende Auslastung mit zunehmender Standzeit.



Bild 4: Zeitabhängige Zersetzung der Oberflächenprofilierung von GFK2 bei 60°C. Von links nach rechts abnehmende Auslastung mit zunehmender Standzeit.



Bild 5: Zeitabhängige Zersetzung der Oberflächenprofilierung von GFK3 bei 60°C. Von links nach rechts abnehmende Auslastung mit zunehmender Standzeit.