

Prüfkonzepte für Bewehrungsmaterialien mit zeitabhängigen Widerständen

A. Weber

Zusammenfassung Neuartige Bewehrungsmaterialien aus Glasfaser- oder Carbonfaserverbundkunststoff zeigen zum Teil deutliche Unterschiede zwischen Kurzzeit- und Langzeitwerten, insbesondere in Hinblick auf die Zugfestigkeit und den Verbund. Dieser Aufsatz zeigt verschiedene Wege auf, mit denen charakteristische Werte für diese Eigenschaften für den Bemessungszeitraum vorhergesagt werden können. Berücksichtigt werden dabei das semiprobabilistische Sicherheitskonzept der aktuellen und kommenden Normenfamilie sowie langjährige Erfahrungen mit den deutschen und ausländischen Zulassungsbehörden.

Test concepts for reinforcement materials with time dependent resistances

Abstract Novel composite reinforcement materials made of glass- or carbon fibre reinforced plastics exhibit significant differences between short-term and long-term values, especially for tensile strength and bond strength. This paper shows different ways to predict characteristic values at the end of service life for these material characteristics. The semi-probabilistic safety concept of the current and upcoming family of codes as well as many years of experience with German and other approval authorities are taken into account.

1 Einleitung

Für Betonbauteile mit Faserverbundkunststoff- (FVK-) Bewehrung wird international und speziell in Europa schon seit einigen Jahrzehnten intensive Forschung betrieben. Erfolgreich ausgeführte Referenzen und Praxisvorhaben sind in vielen Bereichen des Hoch- und Ingenieurbaus zu finden [1]. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde jedoch der Schwerpunkt bei Forschung und Anwendung auf das externe Verstärken von Betonbauteilen insbesondere mit Carbonfaserverbundkunststoff- (CFK-) Lamellen gelegt [2]. Ein weiterer großer Forschungsschwerpunkt speziell in Deutschland und Österreich bildet der Textilbeton, der mit den Sonderforschungsbereichen 528 und 532 in Dresden und Aachen seinen Anfang nahm [3], [4], [5], [6] und derzeit im Großprojekt C⁵ weiter intensiv erforscht wird. Bei Textilbeton (bzw. weitgehend synonym verwendet auch Carbonbeton) handelt es sich um FVK-Bewehrungen, die durch textile Verarbeitungsprozesse meist zu gitterförmigen Gelegen verarbeitet werden und insbesondere als gerichtete interne Bewehrung in dünnwandigen Betonbauteilen zum Einsatz gebracht werden. Auch für diese Form der neuartigen Bewehrungselemente stellen sich für die Anwendung die Fragen nach dem zeitabhängigen Materialverhalten [7].

In den einschlägigen europäischen Normen und Richtlinien sind neuartige interne Bewehrungsmaterialien bisher nur vereinzelt geregelt. Daher geht der Weg in die Anwendung rein rechtlich nur über Zustimmungen im Einzelfall (ZiE), allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) sowie europaweit auch über die Europäische Technische Zulassung (ETA). Dafür ist es notwendig, alle für den geplanten Anwendungsbereich und die Anwendungsdauer relevanten Eigenschaften in geeigneter Form nachzuweisen. Dies stellt häufig eine große zeitliche und finanzielle Hürde für die Planer, Bauherren und Nutzer bei der Anwendung der innovativen Bewehrungsmaterialien dar.

Für all diese Genehmigungsvarianten wird hierfür zunächst ein charakteristischer Wert eines Widerstandes mit einer definierten Statistik notwendig. Zur Ermittlung des Kurzzeitwiderstandes ist die Auswertung einer definierten Anzahl von idealerweise standardisierten Versuchen hinreichend. Für die Charakterisierung der Langzeiteigenschaften sind jedoch weitere Überlegungen zu berücksichtigen, um einerseits den geplanten Anwendungszeitraum in einer akzeptablen Zeitspanne realitätsnah abzubilden und andererseits eine statistisch fundierte Aussage zur Versagenswahrscheinlichkeit treffen zu können [8]. Dazu wurden im Rahmen der Zulassungsverfahren für FVK-Bewehrungen der letzten Jahre verschiedene Methoden und Nachweisverfahren entwickelt und erfolgreich angewendet [9], [10], [11], [12]. Auch für Verbindungsmittel und Sandwichanker aus FVKs wurden diese Methoden schon erfolgreich angesetzt [14].

Bei der in diesem Artikel beschriebenen Langzeitfestigkeit $f_{tk,100}$ [13] handelt es sich daher nicht um eine charakteristische Restfestigkeit nach einer bestimmten Alterung sondern um den charakteristischen Widerstand gegenüber allen statischen (insbesondere langzeitigen und kurzzeitigen) Lasten. Essenziell bei diesen Methoden ist die repräsentative Abbildung der Umwelteinflüsse hinsichtlich verwendetem Medium und Temperaturen sowie die auf das verwendete Vorhersagemodell abgestimmte Wahl der Lastniveaus und Prüfzeiten.

2 Zeitabhängiges Materialverhalten

2.1 Dauerhaftigkeit und Zugtragfähigkeit

Für die meisten FVKs ist bekannt, dass sie ihre hohen Festigkeitswerte nicht über beliebige Zeiten aufrechterhalten können [13], [15], [16]. Es wird bei ständigen Lasten das sogenannte Zeitstandbruch-Phänomen („creep rupture“) beobachtet. Am einfachsten lässt sich dieses Phänomen wie folgt beschreiben. Je größer die Belastung auf ein Element ist, desto geringer ist die Standzeit unter einer konstanten Last. Dabei kann der Widerstand je nach Werkstoff, Verarbeitung, verwendeten Rohstoffen, Temperatur und Feuchte recht unterschiedlich abfallen. Glasfaserkunststoff (GFK) und die chemisch sehr ähnlichen Basaltfaserkunststoffe gelten hier als besonders empfindlich [16], [13], [17]. Auch bei CFK ist der Langzeitwiderstand nicht gleich dem Kurz-

Dr.-Ing. André Weber

Schöck Bauteile GmbH
Vimbucherstr. 2, 76534 Baden-Baden
andre.weber@schoeck.de

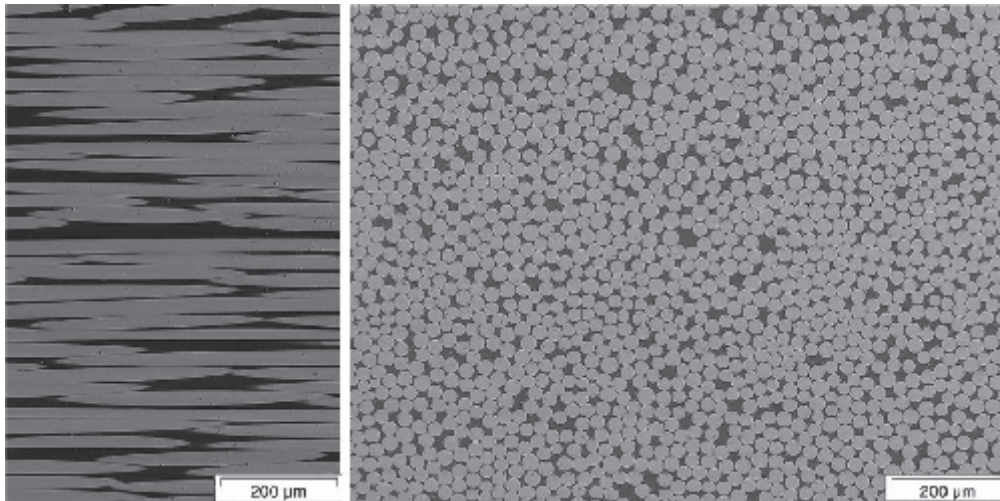


Bild 1. Längsschliff und Querschliff durch ein unidirectionales Glas Komposit (Faserdurchmesser hier etwa 0,025 mm)
 Fig. 1. Longitudinal and perpendicular microsection of glass UD composite (fibre diameter about 0.025 mm)

zeitwiderstand, wobei hier insbesondere die Kunststoffmatrix sowie der interne Verbund zwischen Fasern, weniger die Fasern selbst einer zeitabhängigen Schädigung unterliegen [16], [15], [17].

In einem unidirectionalen Komposit sind in der Regel mehrere Hunderttausend Einzelfasern weitgehend parallel im Einsatz. In Bild 1 ist ein vergrößerter Längsschnitt eines solchen Komposits dargestellt. Man sieht hier die überwiegend parallele Ausrichtung der Fasern, aber auch einige Fasern mit Abweichungen zur Längsachse.

Alle Fasern besitzen eine statistisch verteilte Festigkeit und je nach Verarbeitung eine statistisch enger oder breiter verteilte unterschiedliche Ausrichtung im Stab. Nun kommt es je nach Belastung und Temperatur zu einer unterschiedlichen Bruchwahrscheinlichkeit für die Einzelfaser. Solche Einzelfaserbrüche können innerhalb von sehr kurzen Strecken von Nachbarfasern kompensiert und die frei gewordene Kraft wieder auf die ursprüngliche Faser geleitet werden [15]. Dieser Mechanismus funktioniert je nach Faser-Matrix-Haftung unterschiedlich gut und beeinflusst damit unterschiedlich große Bereiche in die Längsrichtung der Bewehrungselemente. Temperatur, Feuchte und Alkalität können die Faser-Matrix-Haftung in unterschiedlicher Weise über die Zeit beeinflussen [15]. Treten lokal gehäuft Fehlstellen der Einzelfasern auf, werden die ungeschädigten durchlaufenden Fasern durch die notwendigen Umla-

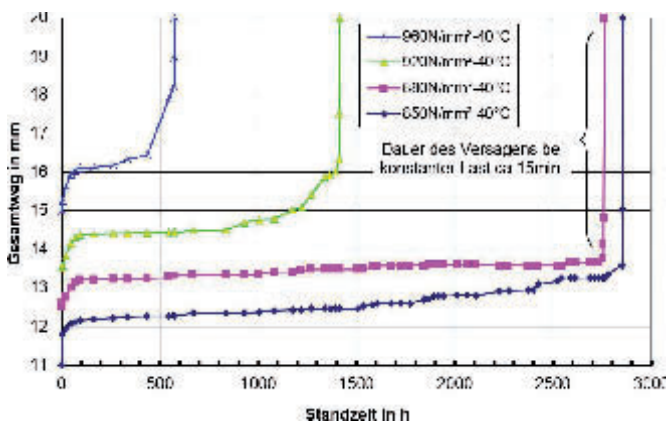


Bild 2. Kriechversuch unter ständiger Last in 40°C feuchtem Beton
 Fig. 2. Creep experiment with constant load at 40°C in wet concrete

gerungen überproportional belastet, wodurch ihrerseits die Bruchwahrscheinlichkeit steigt. Dieses führt zu einem lokal akkumulierten beschleunigten Schadensfortschritt, welcher schlussendlich in einem progressiven Versagen des gesamten Bewehrungselements mündet. Eine typische Serie von Kriechkurven unter hoher Last, die diese Ereignisse durch sichtbare Zunahmen des Gesamtweges (vertikale Achse) zeigt, ist in Bild 2 dargestellt. Der Gesamtweg setzt sich aus Verformung des Stabes und dem Schlupf in der Betonverankerung zusammen.

In diesem Diagramm sind nach einer degressiven Anpassungsphase Kriechkurven mit weitgehend konstantem Verlauf sichtbar. Weiterhin sind jedoch zu einigen Zeiten sowohl kleinere Wegzunahmen als auch zum Teil eine anschließende Veränderung der Steigung der Kriechkurve festzustellen. Nach solchen Steigerungen geht die Kurve schließlich in einen progressiven Bereich über, der unter Erzeugung von größeren Kriechwegen in einem Bruch endet. Dieser Übergang kann je nach Grad der Schädigung unterschiedlich schnell vonstattengehen.

Für eine sichere Bemessung gilt es, die Grenzen der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von Dauerhaftigkeitsaspekten für das jeweilige Material in der entsprechenden Umgebung und für die geplante Standzeit ausreichend genau zu bestimmen. Prüf- und Sicherheitskonzepte für die Charakterisierung von unterschiedlichen Bewehrungssystemen werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

Einige Richtlinien und Normen aus dem nordamerikanischen Raum [16], [17] versuchen dieses Verhalten ohne Untersuchung des einzelnen Bewehrungsmaterials durch pauschale Faktoren für Materialgruppen (GFK, CFK) zu beschreiben. Je nach Produkt, Verwendungsort (innen/außen), geplanter Nutzungsdauer und Bauteiltemperatur ist dieses Vorgehen entweder einerseits vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit oder andererseits zur Erzielung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus kritisch zu hinterfragen. Dabei werden in [16], [17] durchaus Dauerhaftigkeitsprüfungen gefordert. Die Lasten für die Dauerhaftigkeitsprüfungen liegen mit einer Prüfdehnung von 0,2 % und 0,3 % in der Regel noch unterhalb der erlaubten Grenze für ständige Lasten oder werden bei Raumtemperatur in Luft geprüft [19].

2.2 Dauerhaftigkeit des Verbundes

Verglichen mit den umfangreich in der Literatur dokumentierten Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit der Zugfestigkeit liegen zum Verbundtragverhalten deutlich weniger Quellen vor. Auch für den Bereich des Textilbetons liegt hier noch ein Defizit vor, welches in aktuell laufenden Forschungsvorhaben im Rahmen des Großprojekts C⁵ (carbon concrete composites) erkannt wurde und adressiert wird,

zum Beispiel C⁵-V1.2 und C⁵-V2.1. Der Verbund zwischen Betonmatrix und FVK-Stäben wird über die Staboberfläche und damit über eine harzreiche Schicht mit Besandung, aufgeklebter oder eingeschliffrer Profilierung (Rippen) oder auch durch eine enge Umwicklung der Außenkontur mit einem spiralförmig gewundenen zusätzlichen Faserstrang. In **Bild 3** sind exemplarisch verschiedene Oberflächenbehandlungen zur gezielten Steuerung des Verbunds zwischen Beton und Stab dargestellt.

Durch den direkten Kontakt zwischen Kunststoffoberfläche und Betonmatrix in der Grenzschicht ist neben dem Beton ein weiterer Werkstoff mit ausgeprägt zeitabhängigem Verhalten am Verbund beteiligt. Hierbei sind sowohl der zunehmende Schlupf durch Kriechen als auch der zeitabhängig reduzierte Bruchwiderstand des Kunststoffs gegen Abscheren zwischen Staboberfläche und des Kernquerschnitts zu berücksichtigen. Insbesondere Letzteres kann zum Versagen eines Bauteils durch Herausziehen des Kernquerschnitts im Verankerungsbereich führen. Auch Kriterien der Gebrauchstauglichkeit wie Durchbiegung oder Rissbreite können ohne fundiertes Wissen über das zeitabhängige Materialverhalten nicht korrekt beschrieben werden. Eine Arbeit zum Dauerstandverbundverhalten [18] von einigen um das Jahr 2000 auf dem kanadischen Markt erhältlichen Stäben zeigte einen deutlichen Handlungsbedarf. Einer der im Rahmen dieser Untersuchungen geprüften besandeten Stäbe zeigte trotz akzeptablem Verbundverhalten im Kurzzeitversuch signifikant reduzierte Verbundwerte im Langzeitversuch, sodass die Oberflächengestaltung des Stabs komplett überarbeitet werden musste. Trotzdem sind weder in der amerikanischen [16], [19] noch in der kanadischen [17] Normen- und Richtlinienfamilie Anforderungen oder Versuche zum Langzeitverhalten im Verbund zu finden. Im Gegensatz dazu hat das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) beim Zulassungsverfahren von GFK-Bewehrungsstäben für den deutschen Markt die gleichen Anforderungen des Nachweises der Dauerhaftigkeit der Zugfestigkeit auch an die Verbundfestigkeit gestellt. Besonders interessant in diesem Zusammenhang ist das Verbundverhalten bei hohen Belastungen in höherfesten Betonen, da die möglichen Verbundversagensmechanismen hier deutlich von denen bei Betonstahl abweichen. Von den Gutachtern wurde daher ein Versuchsaufbau zur Bestimmung der maximalen Dauerverbundfestigkeit der Oberfläche definiert [11]. Dieser besteht aus einem durch ständige Lasten, Temperatur, Alkalität und Feuchte belasteten Verbundkörper nach RILEM RC6 [20]. In **Bild 4** ist eine Prinzipskizze des medienbelasteten Verbundversuchs dargestellt.

Analog zu den Dauerstandversuchen für einaxiales Zugtragverhalten kann bei Verbundversuchen die Lastaufbringung mittels Hydraulikzylinder, Hebel oder Feder erfolgen. Wenn Zweifel an der Dauerhaftigkeit des verschieblichen Verbunds bestehen, müssen die Langzeitversuche auch im Nachbruchverhalten erfolgen. Dazu werden die Verbundproben weggeregelt bis über das Maximum belastet, und danach mit etwa 40 % dieser Last auf Dauer belastet [11]. Die sich unter konstanter Last ergebende Kriechkurve muss dabei im Rahmen der nachzuweisenden Zeiträume auch im logarithmischen Maßstab degressiv sein [11]. Bei diesem Versuchsaufbau soll eine Schädigung der Staboberfläche (d.h. Abscheren der Rippung, der Besandung oder der ganzen Oberfläche) provoziert werden. Ein Spalten soll durch die Bügel vermieden werden.



Bild 3. Verschiedene Oberflächengestaltungen bei GFK-Bewehrungsstäben
Fig. 3. Different surfaces geometries of GFRP-rebars

Wichtig ist bei der Belastung auch der verwendete Beton. Einerseits muss er stark genug sein, um die Rippen oder die besandete Oberfläche abzuscheren, andererseits darf er nicht zu viele Feinanteile enthalten, die einen Feuchte-transport vom Medium an den Stab behindern könnten [10], [11]. Planmäßig ist der Beton im Verankerungsbereich nicht gerissen, sodass der Feuchte-transport nur über die Kapillaren erzielt wird. Für den Bewehrungsstab Combar konnten erst ab einer Würfeldruckfestigkeit von über 80 N/mm², einem Durchmesser bis 16 mm und kurzen Verbundlängen von 80 mm die Rippen sicher abgeschert werden. Für den Versagensmechanismus „Abscheren der Betonkonsolen“ liegt ein Verbundverhalten ähnlich zu dem bekannten Verbundverhalten von Betonstahl vor. Letztendlich geht es bei dem gewählten Prüfkonzept um den Nachweis, dass eine sichere Vorhersage des Verbundtragverhaltens unter dauerhafter Belastung möglich ist, egal welche Seite der Profilierung (Beton oder der Kunststoff) stärker geschädigt wird [11].

2.3 Medieneinwirkung und künstliche Alterung unter Last

Um den jahrzehntelangen Einsatz von FVK-Bewehrung in Beton abzubilden, werden in der Literatur verschiedene Ansätze verfolgt. In der nordamerikanischen Forschung werden die reinen Stäbe in der Regel einer künstliche Betonporenlösung bestehend aus 0,9 g NaOH, und 4,2 g KOH je Liter Wasser und gesättigtem CaOH mit einem pH-Wert von 12,7 ausgesetzt [19], [17]. In Deutschland wird meist die ähnlich zusammengesetzte, aber 10-fach stärker konzentriertere Lösung mit 9 g NaOH und 42 g KOH sowie CaOH Sättigung (auch „Masthoff-Lösung“ genannt) mit einem pH-Wert von 13,7 verwendet [10]. Bei allen wässrigen Lösungen stellt sich allerdings die Frage, ob der pH-Wert alleine tatsächlich die Wirkung auf den Stab ausreichend beschreibt. Meist wird davon berichtet, dass zwar der pH Wert in der Lösung geringer als in einem realen Beton sei, aber die Wirkung in der Lösung stärker sei [10], [16]. Eine mögliche Erklärung dafür könnte an der mangelnden Beweglichkeit der schädlichen Ionen in realen Betonporen liegen. Damit scheint eine Übertragung der Ergebnisse einer Prüfung des reinen Bewehrungsmaterials in Alkali-Lösung auf realen Beton mit Diskussionen verbunden zu sein. Ein Ausweg aus diesem Dilemma ist die Verwendung von realem Beton als umgebendes Zwischenmedium während der künstlichen Alterung. Für die Untersuchung des dauerhaften Zugtragverhaltens werden Proben mit einem Zylinder aus Beton umgeben und im Wasserbad geprüft [10], [12]. Der Pro-

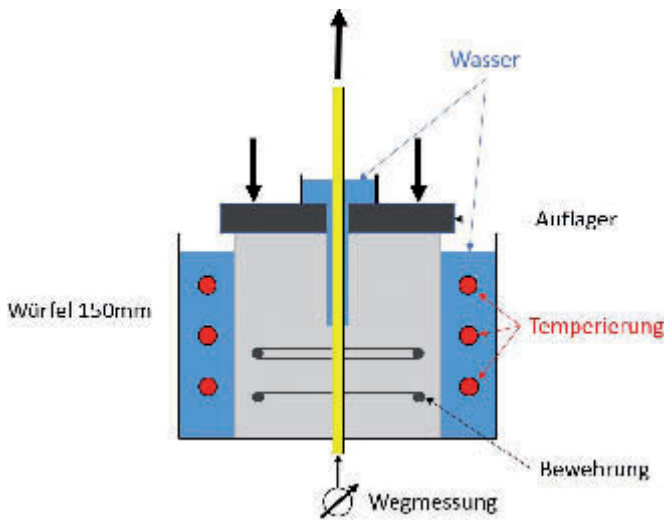


Bild 4. Versuchsaufbau für praxisnahe medienbelastete Langzeitverbundversuche
Fig. 4. Test setup for long-term bond tests with realistic environmental loading conditions

bekörper bei der Zeitstand-Zugprüfung soll so lang sein, dass unter Last mindestens ein Querriss entsteht. Dadurch wird in diesem Versuchsaufbau der Verbund aktiviert und es entsteht in der Rippe beziehungsweise in der Nähe der Betonrisse ein praxisnaher mehrdimensionaler Spannungszustand. Der Versuchsaufbau ist in Bild 5 dargestellt:

Der hierfür verwendete Beton soll mit einem CEM I Portlandzement mit ausreichender Alkalität hergestellt werden. Weiterhin sollen keine Stoffe wie zum Beispiel Microsilika enthalten sein, um ein Saugen des Betons und damit einen praxisnahen, beschränkten Weitertransport von Feuchtigkeit zu ermöglichen. Somit ist die Einwirkung im Versuchsaufbau sehr gut mit einer sehr aggressiven realen Einwirkung in der praktischen Anwendung vergleichbar [10]. Zu diskutieren ist daher bei Verwendung von feuchtem Beton nunmehr nur noch die Möglichkeit einer beschleunigten Versuchsausführung und deren Auswertung.

Als Referenztemperatur für alle Anwendungen wird 40°C definiert. Dieser Wert wirkt im Vergleich mit den Mitteltemperaturen in Deutschland von etwa 10°C recht hoch. Unter Berücksichtigung von sommerlicher Strahlungserwärmung können die Temperaturen in außenliegenden, nicht verschatteten Bauteilen durchaus auf über 60°C im Beton ansteigen. Unter Berücksichtigung einer Zeit-Temperatur-Verschiebung von 10K je logarithmischer Dekade, kommt man bei 7 cm dicken sonnenbeschienenen Fassaden [21], [22] oder auskragenden Bauteilen auf eine gewichtete Mitteltemperatur von 55°C bis 40°C. Bei dieser Wichtung wird

das gesamte Standzeitspektrum eines Jahres für die jeweiligen Temperaturen jeweils auf eine Referenztemperatur geschoben. Diese wird dann soweit geschoben, bis die aufsummierte Standzeit ein Jahr beträgt. Daraus ergibt sich eine gewichtete und repräsentative Temperatur. Die Referenztemperatur von 40°C sowie eine Lebensdauer von 100 Jahren wurde ebenso vom Sachverständigenausschuss des DIBt für nichtmetallische Bewehrung im Rahmen des Zulassungsverfahrens für die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) Z-1.6-238 [9] auch in Anlehnung an den Eurocode [24] festgelegt.

Für typische Anwendungen von FVK-Bewehrungen gilt es also einen Widerstand für eine Standzeit von 100 Jahren bei 40°C in feuchtem Beton nachzuweisen. Auch im internationalen Bereich wird von einer Standzeit für Bewehrung von 100 Jahren ausgegangen [13], [16], [17].

3 Nachweisverfahren für Langzeitwiderstände

Der für einen sicheren Einsatz benötigte und hier dargestellte Langzeitwiderstand des Materials ist der Widerstand gegenüber statischen Einwirkungen (ständige und veränderliche) über die gesamte Lebensdauer. Dieser Wert ist mit der zugehörigen Bruchwahrscheinlichkeit als charakteristischer Widerstand nachzuweisen.

Um eine spätere Bemessung zu vereinfachen, werden diese beiden Arten der Einwirkungen auf der sicheren Seite liegend addiert. Dieses Konzept wurde vom DIBt in vorangegangenen Zulassungsverfahren so akzeptiert [9], [10]. Nachfolgend werden drei Konzepte mit gleichwertiger Sicherheit in der Aussage vorgestellt und diskutiert.

Hier ist ausdrücklich nicht ein Widerstand gegenüber kurzzeitiger Belastung am Ende einer Nutzungszeit beschrieben. Dieser Widerstand könnte sinnvoll zum Beispiel bei außergewöhnlichen Einwirkungen wie Erdbeben oder Anprall eingeführt werden. Auch hierfür kann der oben beschriebene Langzeitwiderstand angesetzt werden.

3.1 Bestimmung der Langzeitwerte durch Extrapolation von Zeitstandkurven

Eine Methode zur Bestimmung von sicheren Daten für 100 Jahre Standzeit ist die Extrapolation von Versuchen bei 40°C und erhöhter Last mit kürzeren Standzeiten in Richtung geringere Lasten und längere Standzeiten bei gleicher Temperatur. Wichtig ist die korrekte Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Standzeit und Spannung. In einschlägigen Normen wie zum Beispiel DIN 53768 und EN 705 [23], [25] wird eine lineare Abhängigkeit zwischen dem Logarithmus der Spannung und dem Logarithmus der

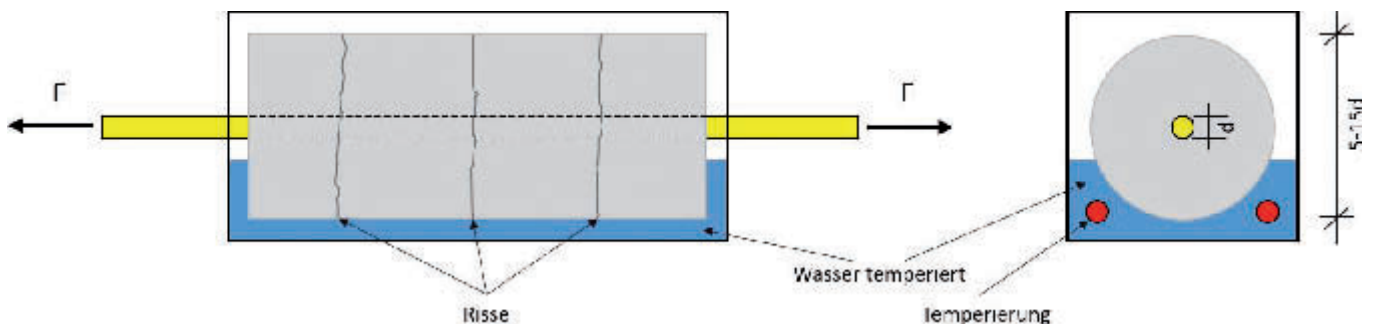


Bild 5. Praxisnahe Belastung eines Stabes mit Medieneinwirkung im gerissenen Betonzylinder
Fig. 5. Realistic loading and environmental conditions of rebar in cracked concrete cylinder

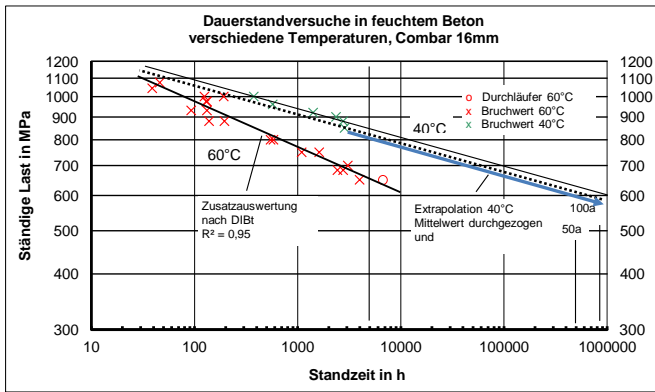


Bild 6. Extrapolationsverfahren für 40 °C unterstützt durch zusätzliche Standzeit-Gerade bei 60 °C

Fig.6. Extrapolation method at 40 °C with additional linearity check for 60 °C

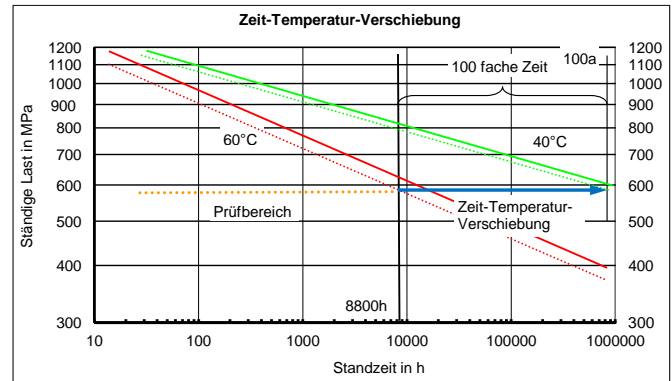


Bild 7. Zeit-Temperatur-Verschiebung zur Vorhersage der 100 Jahres Standzeit-Werte

Fig. 7. Time-temperature shift for prediction of 100 year values

Standzeit bis zum Bruch beschrieben. Die Möglichkeiten der Extrapolation sind allerdings in der Regel auf ein gewisses logarithmisches Zeitverhältnis von 1,5 bis 2 beschränkt. Dieses führt für übliche Lebensdauern von 50 bis 100 Jahren zu Prüfzeiten von über einem Jahr. Zudem müsste gleichzeitig eine ausreichende Anzahl von Versuchspunkten in diesem Zeitraum liegen. Da nur Bruchpunkte nach dieser Methode als Versuchspunkt ausgewertet werden dürfen, können Durchläufer eine größere Anzahl von Versuchsständen binden. Dieses Verfahren ist damit insgesamt schlecht zu planen und würde eine große Anzahl von fein abgestuften Versuchen erfordern.

Kürzere Versuchszeiten sind leichter zu realisieren, bewirken allerdings eine größere Unsicherheit in der Extrapolation. Um die Aussagewahrscheinlichkeit für derartige größere Zeitverhältnisse zu erhöhen, hat der oben genannte Sachverständigenausschuß (SVA) daher eine weitere Bedingung an die Versuchsdurchführung gestellt und eine weitere Reihe bei 60 °C gefordert. Die Anforderung an diese ergänzende Testreihe ist es, die ausreichende Linearität bis zu einem Spannungswert – vergleichbar mit dem zu erwartenden Extrapolationswert – nachzuweisen. Damit soll gezeigt werden, dass es bei höheren Standzeiten sowie höheren Schädigungsgraden nicht zu einem Abknicken der Kurve nach unten kommt. Eine Auswertung der jeweiligen Versuchsserien nach der Fehlerquadratmethode ermöglicht parallel zur Extrapolation der Ergebnisse auch eine quantitative Bewertung der Linearität. Hier wurden über die anwendbaren Normen wie EN 705, ISO 9080 und DIN 53768 [25], [25], [26] durch das DIBt Grenzen ergänzt, um die Sicherheit der Extrapolation weiter zu erhöhen. So darf nach dem oben genannten SVA die 40 °C Gerade um 2,2 Dekaden extrapoliert werden wenn die Varianz $R^2 > 0,85$ für die 60 °C Gerade nachgewiesen ist [10].

Es ist weiterhin wichtig den Übergang von Kurzzeitversagen zu Langzeitversagen sauber zu trennen. Langzeitwerte dürfen hierfür erst ab dem Übergang in den linearen Bereich in die Statistik genommen werden [10], [12]. Anderenfalls könnte der Extrapolationswert in die unsichere Richtung beeinflusst werden. Die für das Bewehrungssystem Combar angegebenen linearen Bereiche des Prüfzeitraums liegen bei 50 bis 5 000 Stunden für 40 °C, und für 60 °C zwischen 25 und 5 000 Stunden.

Weiterhin ist es bei dieser Extrapolationsmethode über eine einfache statistische Vorgehensweise möglich, auch eine Bruchwahrscheinlichkeit anzugeben. Für diese Auswer-

tung wurden auch die 5 % Quantile der Wahrscheinlichkeit des Zugbruchversagens oder auch des Verbundversagens bestimmt. Es kann also unter Annahme einer statistischen Verteilung die Spannung bestimmt werden, bei der 95 % der Proben eine längere Standzeit als 100 Jahre unter den angegebenen Bedingungen erreichen. Dieser Wert ist der gesuchte charakteristische Wert der Zugfestigkeit. Bei den im Rahmen der Combar Zulassung durchgeführten Versuchsreihen wurde zum Beispiel ein Wert von 580 N/mm² bestimmt [9].

3.2 Bestimmung der Langzeitwerte mit der Zeit-Temperatur-Verschiebung

Auch bei diesem Verfahren werden Proben nach Abschnitt 3.1 in einem Zeitstandprüfstand geprüft. Allerdings wird auf die Testreihe bei 40 °C verzichtet und aus den Werten bei 60 °C und verkürzter Zeit auf die Werte für 40 °C geschlossen. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Gerade nur zwischen zwei ähnlichen Zuständen, also auf einer Linie mit gleicher Spannung, waagrecht verschoben werden kann (Bild 7). Grundsätzlich entspricht ein Zustand höherer Temperatur und kürzerer Zeit einem Zustand längerer Zeit und geringerer Temperatur. Dafür muss weiterhin die Höhe der Zeit-Temperatur-Verschiebung bekannt sein. Dies ist idealerweise durch Versuche nach 3.1 zu bestimmen. Allerdings ist in der Literatur und den einschlägigen Normen nur eine geringe Streubreite bei der Zeit-Temperatur-Verschiebung zu verzeichnen [13], [16], [17]. Wenn man von hohen Temperaturen in Richtung geringerer Temperaturen schiebt, liegt man auf der sicheren Seite, wenn man die nach Abschnitt 3.1 für ein sehr dauerhaftes und temperaturstabiles System von 10 K/dec bestimmte Zeit-Temperatur-Verschiebung annimmt. Das bedeutet, durch eine Temperaturerhöhung um 20 K von 40 °C nach 60 °C kann eine Standzeitverlängerung um den Faktor 100 simuliert werden [12]. So kann man bei 60 °C und 8 800 h Standzeit die Werte für 100 Jahre und 40 °C ablesen. Auch hier muss die Fehlerquadratmethode zur Bestimmung der Mittelwert- und 5 %-Quantilkurve angewandt werden. Nur so kann aus der Streuung der Bruchpunkte mittels statistischer Auswertung eine sichere Bestimmung der charakteristischen Festigkeit erfolgen.

Diese Methode wurde bei der Zulassungserweiterung Z1.6.-238 von $d = 16$ mm bei der ersten Zulassung auf die Durchmesser 8 mm, 12 mm, 16 mm, 20 mm und 25 mm angewandt [12]. Hier wurden für jeweils die kleinsten

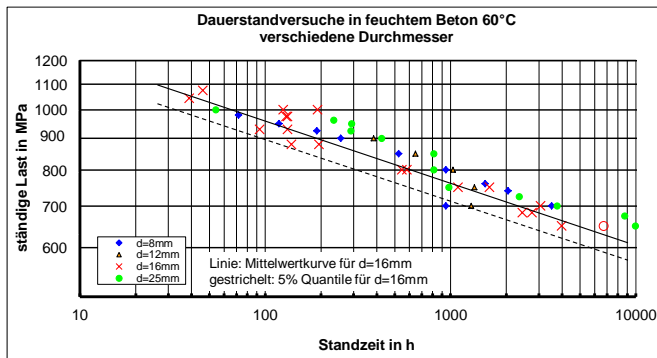


Bild 8. Standzeit als Funktion der ständigen Last und des Durchmessers in feuchtem Beton
 Fig. 8. Time-to-failure diagram as function of sustained load and diameter in wet concrete

(d = 8 mm) und größten Durchmesser (d = 25 mm) Versuche bei 60 °C durchgeführt. Gegenüber der Betrachtung der 40 °C Versuche ist bei 60 °C schneller eine Schädigung sowie eine Beurteilung der Linearität der sich ergebenden Gerade möglich. In **Bild 8** sind die Versuche für verschiedene Durchmesser in einem Diagramm dargestellt. Interessant ist bei dieser Darstellung, dass offensichtlich bei allen getesteten Durchmessern der gleiche Langzeitwiderstand vorliegt. Bei Kurzzeitversuchen zeigen kleinere Durchmesser zum Teil deutlich höhere Festigkeiten. Eine pauschale Abminderung des Kurzzeitwerts um einen bestimmten Faktor wird dem Materialverhalten also nicht gerecht. Stattdessen scheint für jedes Material eine bestimmte Grenzspannung als Funktion von Temperatur, Feuchte und Standzeit bestimmbar zu sein. Bei ansonsten linearelastischem Materialverhalten ergibt sich daraus eine konstante charakteristische Dehnung, welche eine Bemessung ähnlich wie bei Betonstahl mit durchmesserunabhängigen Werten ermöglicht.

3.3 Bestimmung von Langzeitwerte an Dauerstandversuchen bei erhöhter Last

Für spezielle Fälle ist es mitunter nicht notwendig die Grenzen der Standzeit zu bestimmen oder es ist schwierig, Bruchpunkte in dem gewünschten Zeitfenster zu planen. Dann bietet sich ein anderer Ansatz an, um Langzeitwerte sicher abzuschätzen.

Bei diesem Ansatz werden Zug- und auch Verbundversuche unter einer definierten Last für eine vorher definierte Zeit durchgeführt. Optional kann danach auch die Restfestigkeit bestimmt werden. Im nordamerikanischen Raum wird zum Beispiel nach CSA S807 [27] aus dem Quotient zwischen Restfestigkeit und Ausgangsfestigkeit auf die Dauerhaftigkeit geschlossen.

Auch bei den Versuchen nach diesem Konzept soll die typische Einwirkung hinsichtlich Temperatur, Feuchte und Alkalität abgebildet werden. Für die Ermittlung des Spannungsniveaus des Langzeitwiderstands wird jedoch ein charakteristischer Wert f_{lk} benötigt. Dieser kann nicht aus den Restfestigkeiten bestimmt, sondern muss aus der ständigen Last ermittelt werden, unter der die Versuche durchgeführt wurden. Für den Fall, dass 20 oder mehr Versuche ohne Bruch durchgeführt werden, liegt der Wert somit bei der Versuchsspannung. Für kleinere Versuchsserien kann die Versuchsspannung als Mittelwert f_{fmean} angesehen werden. Der charakteristische Wert eines Widerstands kann

grundsätzlich über die Standardabweichung beziehungsweise die Varianz bestimmt werden. Da bei Dauerstandversuchen in einer Serie alle Versuche unter gleicher Last stehen, besteht allerdings keine Möglichkeit aus dieser Last eine Streuung abzulesen. Daher kann hier der Weg über die Auswertung von Kurzzeitversuchen gewählt werden [11].

$$f_{lk} = f_{fmean} / (1 + V) \tag{1}$$

V wird hierbei mit der Varianz der Kurzzeitversuche abgeschätzt.

Als Beispiel zu dieser Auswertungsmethode kann der Nachweis des Verbundverhaltens von Combar durch Dauerstand-Verbundversuche dienen. Hier wurde in mehreren Serien eine konstante Verbundspannung von 7,5 N/mm² über mehrere Tausend Stunden bei 60 °C nach Vorschädigung des Verbundes aufrechterhalten. Die Abminderung zwischen Versuchsspannung und charakteristischen Verbundspannungen aufgrund der Streuung der Kurzzeit-Verbundversuche wurde zu 0,65 bestimmt.

Somit konnte eine charakteristische Verbundspannung von 4,8 N/mm² für den Verbund in höherfestem Beton bestimmt werden [11].

Für die Bestimmung von charakteristischen Zugfestigkeiten sind nach diesem Konzept geringere Abminderungen als bei Verbundversuchen durch geringere Streuungen der Zugversuche denkbar. Somit kann auch bei Versuchen ohne Bruch eine sichere Standzeitprognose inklusive der Bruchwahrscheinlichkeit abgeschätzt werden. Diese Methode empfiehlt sich insbesondere für Nachweisversuche oder für Materialien, bei denen das Zeitstandverhalten noch unbekannt ist, oder wenn die Prüfungen innerhalb eines gewissen Zeitraums abgeschlossen sein müssen. Die Grenzen der Belastbarkeit unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens können mit diesem Verfahren nicht bestimmt werden. Weiterhin sollte die Zeit-Temperatur-Verschiebung prinzipiell bekannt sein. Ansonsten muss man sich bei ähnlichen Materialien auf Richtlinien aus dem nordamerikanischen Raum beziehen, welche durch pauschalisierte Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit durch Abminderungsfaktoren im europäischen Umfeld nur geringe Akzeptanz haben.

4 Diskussion

4.1 Zum Nutzen von sicheren Widerstandswerten

Im nordamerikanischen Raum wird gerne zwischen unterbewehrten und überbewehrten Querschnitten unterschieden. Für eine Bewehrung aus Betonstahl geht man aus Gründen der Duktilität in der Regel von einem Bewehrungsversagen als gewünschter Versagensform bei Überlastung aus. Aus ähnlichen Gründen wird für GFK- und CFK-Bewehrungen, die ein sprödes Zugbruchverhalten aufweisen, Betonversagen als gewünschte Versagensform bei Überlastung empfohlen. Damit sind gemischte Querschnitte und Übergänge von dem einen zum anderen Material schwer vorstellbar.

In Deutschland geht man seit dem Zulassungsverfahren für den Bewehrungsstab Combar andere Wege. Mit dem Nachweis eines auch unter strengen Maßstäben sicheren Widerstands sind auch biegebeanspruchte, mit FVK-bewehrte Querschnitte möglich, bei denen Bewehrungsversagen maßgeblich ist [28]. Diese Querschnitte zeigen zwar keine Duktilität im klassischen Sinne, aber ein großes Rotations-

vermögen. So sind Betonstahl und GFK-Bewehrung wesentlich leichter von der Bemessung in Einklang zu bringen. Dieser Argumentation wird voraussichtlich auch in der neuen Generation des EC2 gefolgt, um so FVK-Bewehrungen und gemischt bewehrte Bauteile gleichermaßen bemessen zu können. Das Europäische Komitee für Normung (CEN) hat die Aufgabe angenommen, interne Bewehrung aus GFK sowie externe Verstärkung mit Lamellen aus CFK in den EC2 aufzunehmen. Der Autor ist nationales Mitglied des CEN TC250-SC2-WG1-TG1 „Strengthening and Reinforcing with Fibre Reinforced Polymers“, welches diese Aufgabe fachlich betreut.

Ein wichtiger Diskussionspunkt hierbei ist, ob der nach den in diesem Beitrag genannten Verfahren ermittelte charakteristische Wert der Langzeitfestigkeit für Zug nur für den Anteil der ständigen Lasten gilt, wie in [16] empfohlen, und für veränderliche Lasten zum Beispiel die charakteristische Kurzzeitzugfestigkeit anzusetzen sei.

Eine einfache Abschätzung lässt erkennen, dass der Langzeitwert auch für veränderliche Lasten eine sinnvolle Grenze darstellt.

Nehmen wir einfach an, dass der Anteil der ständigen Lasten bei etwa 50% der Gesamteinwirkung liegt und die veränderlichen Lasten etwa 10% der Zeit einwirken würden. Dieses bedeutet, dass der Zeitstand dann nicht 100 Jahre sondern eine logarithmische Dekade weniger, nämlich zehn Jahre wirken würde. Dann würde sich der Widerstand bei einer Neigung der Widerstandskurve (Bild 6) von 15% je logarithmischer Dekade realistisch nur um $50\% \times 15\% = 7,5\%$ erhöhen.

Der Ansatz von Kurzzeitfestigkeiten erscheint grundsätzlich nicht sinnvoll und liegt tendenziell auf der unsicheren Seite. Eine geringere Abminderung der Festigkeit gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen wie Anprall oder Erdbeben ist noch zu erforschen. Hierbei könnte der Kurzzeitwiderstand nach Lagerung mit geringer Last zum Ansatz kommen. Auf der sicheren Seite liegend wird auch hier der Langzeitwiderstand empfohlen [10].

Bei allen anderen Anwendungen, und hier sind auch ausdrücklich Temporärbauten mit Standzeiten in der Größenordnung von einem Jahr gemeint, wird mit der Sicherheit gespielt, wenn mit Kurzzeitwiderständen bemessen wird. In den Widerstandskurven von Bild 6 wird sehr schnell deutlich, dass im logarithmischen Maßstab ein Jahr näher am Langzeit- als am Kurzzeitwert liegt.

5 Fazit

Die in diesem Beitrag erläuterten Nachweisverfahren wurden alle in den letzten Jahren bei verschiedenen Zulassungsverfahren für GFK-Bewehrung oder GFK-Verbindungsmitel in Verfahren angewandt, die in abZ oder ZIE mündeten. Es werden im Moment von verschiedenen Seiten Europäische Beurteilungsdokumente (EADs) vorbereitet, welche zum Teil auf diesen Erkenntnissen und zum Teil auf anderen Konzepten basieren. Bei allen Prüfmethode muss sichergestellt sein, dass nachvollziehbar ein sicherer charakteristischer Wert für die Untersuchungsgröße ermittelt werden kann. Das zeitabhängige Materialverhalten muss dabei durch ein geeignetes Konzept zur Extrapolation der Messungen realitätsnah abgeschätzt werden. Mit den hier vorgestellten Verfahren „Extrapolation von Zeitstandkurven“, „Zeit-Temperatur-Verschiebung“ und „Dauerstandversuche bei erhöhter Last“ sowie sinnvoll bestimm-

ter und festgelegter Teilsicherheitsfaktoren ist man in der Lage hinsichtlich Sicherheit sowohl alle Anforderungen für den Einsatz in Bemessungsnormen mit semiprobabilistischem Sicherheitskonzept zu erfüllen, als auch die Leistung von Materialien mit ähnlichem Verhalten zu erproben. Beim Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) wurde mit der Erstellung einer Bemessungsrichtlinie für textile Bewehrung und Glasfaserbewehrung begonnen. Unter dem Dach des CEN wird vom TC250 an der Überarbeitung des aktuellen EC2 gearbeitet. Auch hier soll Glasfaserbewehrung aufgenommen werden. Mit den nach den obigen Konzepten erprobten sicheren Werten und den zur Zeit in der Arbeit befindlichen Technische Regeln wird in Zukunft ein weitergehender Einsatz dieser neuartigen Bewehrung, die vielen Vorteile aufweist, möglich sein.

Literatur

- [1] Mufti, A.; Onofrei, M.; Benmokrane, B. et al.: Durability of GFRP Reinforced Concrete in Field Structures. 2005.
- [2] DAfStb Technische Regel: Betonbauteile mit geklebter Bewehrung: 2012-03. Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Beuth Verlag, Berlin, 2012.
- [3] Curbach, M.; Jesse, F.: Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 1, S. 9–16.
- [4] Hegger, J.; Horstmann, M.; Voss, S. et al.: Textilbewehrter Beton. Tragverhalten, Bemessung und Anwendung. In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 6, S. 362–370.
- [5] Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F. et al.: Textilbeton – Grundlegende Untersuchungen im Überblick. In: Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 10, S. 711–722.
- [6] Hegger, J.; Will, N.; Curbach, M. et al.: Tragverhalten von Textilbewehrtem Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 6, S. 547–512.
- [7] Spelter, A.; Rempel, S.; Will, N. et al.: Prüfkonzept zur Untersuchung des Dauerstandverhaltens von textilbewehrtem Beton. In: Bauingenieur 92 (2017), Heft 9, S. 364–369.
- [8] Bau-Überwachungsverein (BÜV e. V.) (Hrsg.): Tragende Kunststoffbauteile: Entwurf – Bemessung – Konstruktion. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [9] Z-1.6–238 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung „Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff“. Deutsches Institut für Bautechnik, Z-1.6–238 vom 8.12.2008.
- [10] Schießl, P. et al.: Gutachterliche Stellungnahme zum Antrag der Firma Schöck beim DIBt auf allgemeine bauaufsichtliche Zulassung einer Betonbewehrung aus GFK-Stäben mit der Handelsbezeichnung „ComBAR“; Teil A 07/051/1.1.1 vom 31.03.2007.
- [11] Schießl, P. et al.: Gutachterliche Stellungnahme Teil A2 zum Antrag der Firma Schöck beim DIBt auf allgemeine bauaufsichtliche Zulassung einer Betonbewehrung aus GFK-Stäben mit der Handelsbezeichnung „ComBAR“; Teil A2: Ergänzungsuntersuchungen zu Grundlagenfragen 07/051/1.2.1 vom 5.12.2007.
- [12] Schießl, P. et al.: Gutachterliche Stellungnahme zum Antrag der Firma Schöck beim DIBt zur Zulassungserweiterung der Betonbewehrung aus GFK Stäben mit der Handelsbezeichnung „Combar“ 09/285/1.1.1, 2013.
- [13] International Federation for Structural Concrete/ Task Group FRP Reinforcement for Concrete Structures (Hrsg.): FRP reinforcement in RC structures: Technical report. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2007.

- [14] *Pahn, M.; Schnell, J.*: Einfluss der Verbundtragwirkung bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit innen liegender Wärmedämmung. In: *Beton und Stahlbetonbau* 106 (2011), Heft 8, S. 551–560.
- [15] *Ehrenstein, G. W.; Pongratz, S.*: Beständigkeit von Kunststoffen. Band 1, Hanser Verlag, München, 2007.
- [16] ACI 440.1R15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2015.
- [17] CSA-S806–10: Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Mississauga, Canadian Standards Association, 2010.
- [18] *Shahidi, F.*: Bond degradation between FRP bars and concrete under sustained loads. Saskatoon, University of Saskatchewan, PhD thesis, 2003.
- [19] ACI 440.3R04: Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures. Farmington Hills, Mich.: American Concrete Institute, 2004.
- [20] RILEM: RILEM technical recommendations for the testing and use of construction materials. London: E & FN Spon, 1994.
- [21] *Fouadh, N.*: Gutachtliche Stellungnahme Nr.: GS 109 Betreff: Untersuchungen zum Temperaturverhalten von dreischichtigen Stahlbetonwandtafeln mit Schöck Hohlwandankern HWA aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Hannover, 2009.
- [22] *Schießl, P.; Knab, F.*: Gutachterliche Stellungnahme Auswirkungen von in Deutschland auftretenden Temperatureinwirkungen in Stahlbetonvorsatzschalen auf die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit des ComBAR Thermoanker TA München 09/234/1.1.2.
- [23] DIN 53768:1990–06: Extrapolationsverfahren für die Bestimmung des Langzeitversagensverhaltens von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) zsg, DIN Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [24] DIN EN 1992–1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Deutsche Fassung, Ausgabe 2004.
- [25] DIN EN 705:1994–08: Rohre und Formstücke aus glasfaserverstärkten duroplastischen Kunststoffen (GFK). Verfahren zur Regressionsanalyse und deren Anwendung. Deutsche Fassung, Ausgabe 1994.
- [26] DIN EN ISO 9080:2003: Kunststoff-Rohrleitungs- und Schutzsysteme – Bestimmung des Zeitstand-Innendruckverhaltens von thermoplastischen Rohrwerkstoffen durch Extrapolation. Deutsche Fassung, Ausgabe 2003.
- [27] CSA S807 10: Specification for fibre-reinforced polymers. Mississauga, Canadian Standards Association, 2010.
- [28] *Knab, F.; Weber, A.; Schweinfurth, J.*: Sicherer Einsatz von Glasfaserbewehrung im Bauwesen. Hinweise und Anwendungsbeispiele für die Praxis. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015), Heft 12, S. 822–831.