

DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“

Norbert Will, Jan Bielak

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

nwill@imb.rwth-aachen.de, jbielak@imb-rwth-aachen.de

Kurzfassung

Nach Sammlung und Beratung der Einsprüche zum Gelbdruck der Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung" des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) im ersten Halbjahr 2023 ist der Entwurf nunmehr auf der Zielgeraden. Der Weißdruckentwurf der Richtlinie wurde an die technischen Ausschüsse verteilt und weitere Kommentare beraten und beantwortet. Umfangreiche Erläuterungen und Hintergründe zur Richtlinie sollen im DAfStb-Heft 660 veröffentlicht werden. In den fünf Teilen der Richtlinie werden die Bemessung, die Bewehrung, Empfehlungen für Prüfverfahren und Regeln zur Ausführung sowie Nachweise zur Verwendbarkeit der Bewehrungen behandelt. Die dort dokumentierten Regeln sind das Ergebnis von Forschungsarbeiten und Praxiserfahrungen und bilden den Stand des Wissens in Deutschland in diesem Bereich sehr gut ab.

Mit diesem Regelwerk wird das Bauen mit nichtmetallischen Bewehrungen in Stab- oder Gitterform in Deutschland erheblich erleichtert und der Anschluss an international bereits seit Jahren vorhandenen Normen (z. B. in den USA, Kanada, Japan, Italien) sichergestellt. Mit einem Umfang von über 200 Seiten geht die Richtlinie dabei hinsichtlich des Detailgrads und der Regelungstiefe bisweilen über international Übliches hinaus. Wenn im Sinne der Richtlinie zugelassene nichtmetallische Bewehrungen vorliegen, und die Richtlinie final bauaufsichtlich eingeführt ist, kann im Hochbau auf Zustimmungen im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen für viele Anwendungen verzichtet werden. Die intensiven Diskussionen im Rahmen des Gelbdruckverfahrens zeigen auch, dass an vielen Stellen noch Raum für Optimierung und Erweiterungen besteht. Die verabschiedeten Regeln wurden teilweise – insbesondere mit dem Blick auf eine rasche und vollumfängliche bauaufsichtliche Einführung – konservativ gewählt, da ausreichende experimentelle Untersuchungen zur Validierung progressiverer Regeln für die ganze Bandbreite an Bewehrungsmaterialien noch ausstehen.

Keywords: Nichtmetallische Bewehrung, Richtlinie, DAfStb, Bemessung, Prüfverfahren

Abstract

After collecting and discussing the objections to the yellow print of the DAfStb guideline "Concrete components with non-metallic reinforcement" of the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) in the first half of 2023, the draft is now on the home straight. The white print draft of the guideline has been distributed to the technical committees and further comments have been discussed and answered. Extensive explanations and background information on the guideline are to be published in DAfStb-book 660. The five parts of the guideline deal with the design, reinforcement, recommendations for test methods and directions for execution as well as notes on the required proofs for the usability of the construction products (non-metallic reinforcement). The rules documented there are the result of research work and practical experience and represent the state of knowledge in Germany in this area very well.

With this set of rules, construction with non-metallic reinforcement (bars or grids) is made considerably easier in Germany and the connection to standards that have existed internationally for years (e.g. in the USA, Canada, Japan, Italy) is ensured. With a length of more than 200 pages, the guideline goes beyond the usual international standards in terms of the level of detail and the depth of regulation. If approved non-metallic reinforcements in the sense of the directive are available and the directive has been finally introduced by the building authorities, approvals in individual cases and project-related type approvals can be dispensed for many applications in building construction.

The intensive discussions in the context of the yellow print procedure also show that there is still room for optimisation and expansions in many areas. The adopted rules were partly chosen conservatively -

in particular with a view to a rapid and comprehensive introduction by building authorities - as sufficient experimental investigations for the validation of more progressive rules for the whole range of reinforcement materials are still pending.

Keywords: non-metallic Reinforcement, guideline, DAfStb, design, test methods

1 Einleitung

Die Forschung im Bereich der Kompositwerk- und Faserverbundkunststoffe (FVK) hat wesentliche Fortschritte erzielt. Es sind praxistaugliche nichtmetallische Bewehrungssysteme für das Bauwesen international und in Deutschland am Markt verfügbar und in Gebrauch. Grundsätzlich lassen sich drei Arten von Bewehrungssystemen unterscheiden: Flächige Gitterbewehrung, stabförmige Bewehrungen (gerade Stäbe oder Bügel) sowie Vorspannbewehrung (Stäbe oder Litzen). Auch Formbewehrungen und Kombinationen aus Stab- und Gitterbewehrung wurden schon in Praxisprojekten eingesetzt (Bild 1).

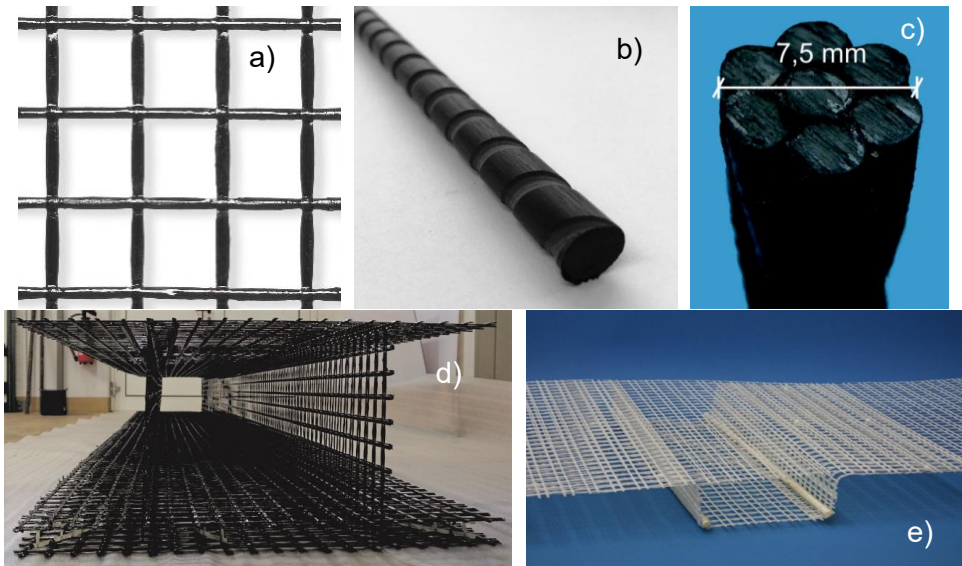


Bild 1 Bewehrungssysteme aus Carbon; getränkte Gitterbewehrung (a), Foto IMB RWTH); Carbonstab (b), Foto IMB, TU Darmstadt); CFK-Spannlitze (c), Foto IMB-RWTH); Formbewehrung (d), Foto IMB-RWTH); kombinierte Bewehrung (e), Foto IMB-RWTH)

Die baupraktischen Umsetzungen sind in Deutschland durch projektbezogene Forschungsarbeiten und die daraus abgeleiteten, vorhabenbezogenen Genehmigungen geprägt. Vorhandene allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (z. B. [1]) haben einen sehr eingegrenzten Anwendungsbereich oder sind nur für bestimmte Bauteile oder Bauobjekte [2], [3] nutzbar. Die wesentliche Einschränkung der Anwendbarkeit ergibt sich daraus, dass die verschiedenen nichtmetallischen Bewehrungselemente wegen der vielfältigen Ausbildungsformen sehr unterschiedliche Materialkennwerte aufweisen und deshalb anders als Betonstahl nicht normativ geregelt sind. Somit sind für die Tragwerks- und Ausführungsplanung individuelle Werkstoffkennwerte der eingesetzten nichtmetallischen Bewehrung festzulegen.

2 Forschungsaktivitäten

Neben ersten Einzelvorhaben Mitte der 1990er Jahre wurden in Deutschland die Grundlagen zum Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen in Betonbauteilen in zwei Sonderforschungsbereichen im Zeitraum 1999 bis 2011 systematisch untersucht. Während der Schwerpunkt des SFB 528 an der TU Dresden im Verstärken vorhandener Bauteile mit nichtmetallisch bewehrten Betonschichten lag, konzentrierte sich die Forschung des SFB 532 an der RWTH Aachen auf die Bereitstellung von Grundlagen für den Einsatz von Neubauteilen aus Textilbeton [4], [5]. In beiden Sonderforschungsbereichen wurden experimentelle und numerische Methoden zur Charakterisierung, Analyse und Bemessung von

dünnwandigen zementgebundenen Verbundwerkstoffen entwickelt sowie Versuchsanordnungen zur Charakterisierung des Tragverhaltens konzipiert und umgesetzt. Weiterhin wurde mit Transferprojekten die baupraktische Umsetzung der neuen Technologie vorbereitet.

Diese grundlagenorientierte Forschung wurde seit 2000 durch zahlreiche weitere Forschungs- und Anwendungsprojekte begleitet, um die baupraktische Anwendbarkeit von nichtmetallisch-bewehrten tragenden Betonbauteile zu demonstrieren. Im BMBF-Cluster „Carbon Concrete Composite – C³“ standen seit 2013 neben Technologieaspekten (Materialien, Tragverhalten, Bemessung, Konstruktion, Regelwerke, Prüfverfahren) auch Fragen zur Überführung der Technologie in den Markt (Produktion, Wirtschaftlichkeit, Gesundheit, Recycling, Ausführung, Ausbildung) im Vordergrund.

Neben dem Zugtragverhalten wurde das Verbundverhalten der nichtmetallischen Bewehrungen als eine wesentliche Materialeigenschaft erkannt. Weiterhin beeinflusst die Tränkung (Material, Tränkungsprozess) signifikant die Eigenschaften der Bewehrung. Ein wesentlicher Punkt ist eine Schädigung des Bewehrungselementes durch Langzeitbeanspruchungen. Für die Werkstoffkenngrößen waren teilweise weder Untersuchungsmethoden, Prüfkonzepte noch Be- und Auswertemodelle verfügbar. Diese mussten in Forschungsprojekten entwickelt und validiert werden. Nachfolgend werden einige dieser Untersuchungen, die am Institut für Massivbau der RWTH Aachen (IMB) durchgeführt hat, exemplarisch vorgestellt.

Ziel des Verbundvorhabens C3-V2.1 war die Beurteilung des Langzeittragverhaltens der nichtmetallischen Bewehrung. Neben der Entwicklung von Prüfkonzepten, Versuchsaufbauten und Bewertungsmodellen waren umfangreiche experimentelle Untersuchungen unter Langzeitbeanspruchungen bis zu 10.000 h für die entwickelten Bewehrungsmaterialien unter einer kombinierten Beanspruchung aus Last, Temperatur, Feuchtigkeit und Alkalität durchzuführen, um eine ausreichende Datenbasis bereitzustellen (Bild 2).

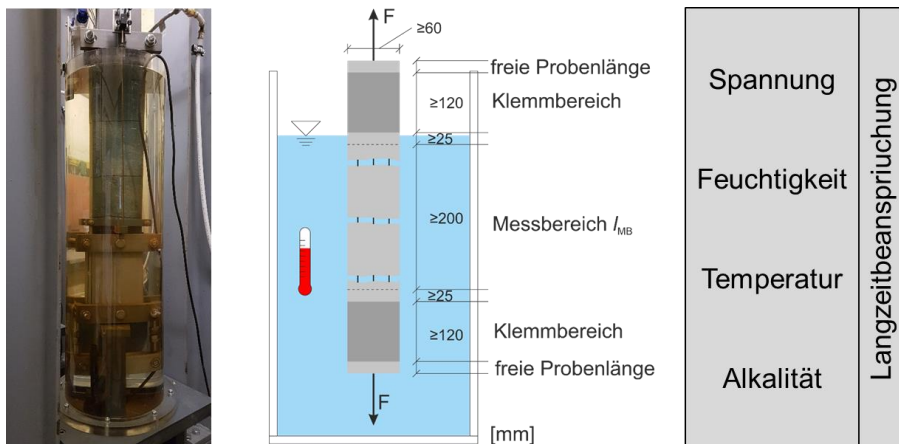


Bild 2 Versuchsstand zur Ermittlung der Langzeitzugfestigkeit einer getränkten Gitterbewehrung unter kombinierter Beanspruchung aus Last, Temperatur, Feuchtigkeit und Alkalität (IMB-RWTH)

Die entwickelten Konzepte und Ergebnisse sind in [6], [7], [8] dokumentiert. Sie können für das Zug- und das Verbundtragverhalten genutzt werden. Für Carbonbewehrungen wurden keine signifikanten Zugfestigkeitsverluste ermittelt. Durch die Bereitstellung eines Auswertemodells ist eine Extrapolation auf eine Nutzungsdauer von 100 Jahren möglich.

Das Querkrafttragverhalten von nichtmetallisch bewehrten Betonbauteilen stand im Fokus des Projektes C3-I.14. Ziele waren der Aufbau einer Versuchsdatenbank und die Evaluation der Anwendbarkeit des Querkraftmodells nach Eurocode 2 [9] bzw. der kommenden Neufassung prEC2 [10] für Bauteile mit einer Querkraftbewehrung aus Carbongittern. Durch umfangreiche Versuche an Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung konnte gezeigt werden, dass C- und I-förmige Querkraftbewehrungen aus nichtmetallischen Gittern erst ab Bauteilhöhen von 120 mm einen signifikanten Beitrag zur Querkrafttragfähigkeit leisten können (Bild 3).

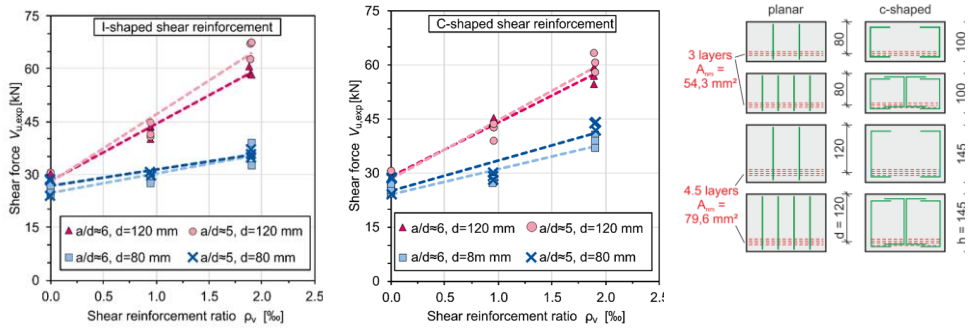


Bild 3 Querkrafttragfähigkeit für gitterbewehrte Betonbauteile mit Querkraftbewehrung nach [11]

Die Auswertung aller Untersuchungsergebnisse sowie die Ableitung von Bemessungsmodellen zur Querkrafttragfähigkeit sind in [11] dokumentiert. Die Endverankerung der Querkraftbewehrung hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit. Zur Bereitstellung der erforderlichen Prüfmethode und einer ausreichend abgesicherten Datenbasis laufen aktuell weitere Untersuchungen am IMB der RWTH Aachen.

Alle Forschungsergebnisse wurden in einer Form bereitgestellt, auf deren Basis Regelwerke abgeleitet werden können. Dies erfolgte im Vorhaben C3-V1.2, das die Erkenntnisse aus den Forschungsvorhaben gesammelt, verallgemeinert und konsolidiert hat. Weiterhin wurden sowohl Nachweis- und Prüfkonzpte und die zugehörigen Prüf- und Auswertemethoden beschrieben als auch die Anforderungen an die Bewehrungsprodukte und die Bauausführung dokumentiert. Insgesamt entstanden vier Arbeitspapiere (Bemessung, Bewehrung, Prüfverfahren, Ausführung), deren Inhalte auf den im Stahlbetonbau geltenden Normen basieren. Die Arbeiten wurden im Projekt C3-L9 „Regelwerke“ fortgesetzt, um die theoretischen Fragestellungen der Modellierung und Bemessung von Carbonbeton sowie der experimentellen Validierung der Ansätze zu vervollständigen.

Ein wesentlicher Unterschied einer nichtmetallischen Bewehrung zur Betonstahlbewehrung liegt im linearelastischen Spannungs-Dehnungsverhalten bis zum Bruch. Das Fehlen von plastischen Verformungsanteilen in der Versagensankündigung kann nur durch ein entsprechendes Verformungsvermögen des Bauteils bis zum Versagen ausgeglichen werden. Weiterhin können in nichtmetallisch bewehrten Betonbauteilen in einem Querschnitt auch unterschiedliche Bewehrungstypen (z. B. Gitterbewehrung Hersteller A und Stabbewehrung Hersteller B) mit unterschiedlichen Zugfestigkeiten und Verbundeigenschaften eingesetzt werden. Eingangsgrößen für die Nachweisformate sind die Verbundspannungs-Schlupfbeziehungen der eingesetzten Bewehrungen, die im Rahmen der Produktcharakterisierung der Bewehrung bereitzustellen sind.

3 Pilotprojekte

Mit den Erkenntnissen aus Forschungsprojekten wurden viele Praxisprojekte im Neubau mit Zustimmung im Einzelfall (ZiE) unter Verwendung von nichtmetallischer Bewehrung realisiert. Hierzu zählen klein- und großformatige Fassadenplatten, Sandwichfassaden, Schalenkonstruktionen, Brücken und Anwendungen im Bereich des Denkmalschutzes. Die Leistungsfähigkeit des innovativen Materials wird hierdurch eindrucksvoll demonstriert. Beispielhaft sollen die doppelt gekrümmte HP-Schale an der RWTH Aachen aus dem Jahr 2012 (Bild 4a+b, [12]) sowie Fassadenfertigteile mit getränkter textiler Carbonbewehrung im lediglich drei Zentimeter dicken Mittelbereich für das Bauvorhaben „Neuer Markt“ (Bild 4c+d, [14]) genannt werden. Als Brückenneubauten mit nichtmetallischer Bewehrung werden stellvertretend die Fußgängerbrücken in Albstadt-Lautlingen (AR-Glas-Bewehrung und Längsvorspannung mit Spannstahl ohne Verbund) und Albstadt-Ebingen (erste Brücke nur mit Carbongitterbewehrung) vorgestellt (Bild 4e und Bild 4f.)

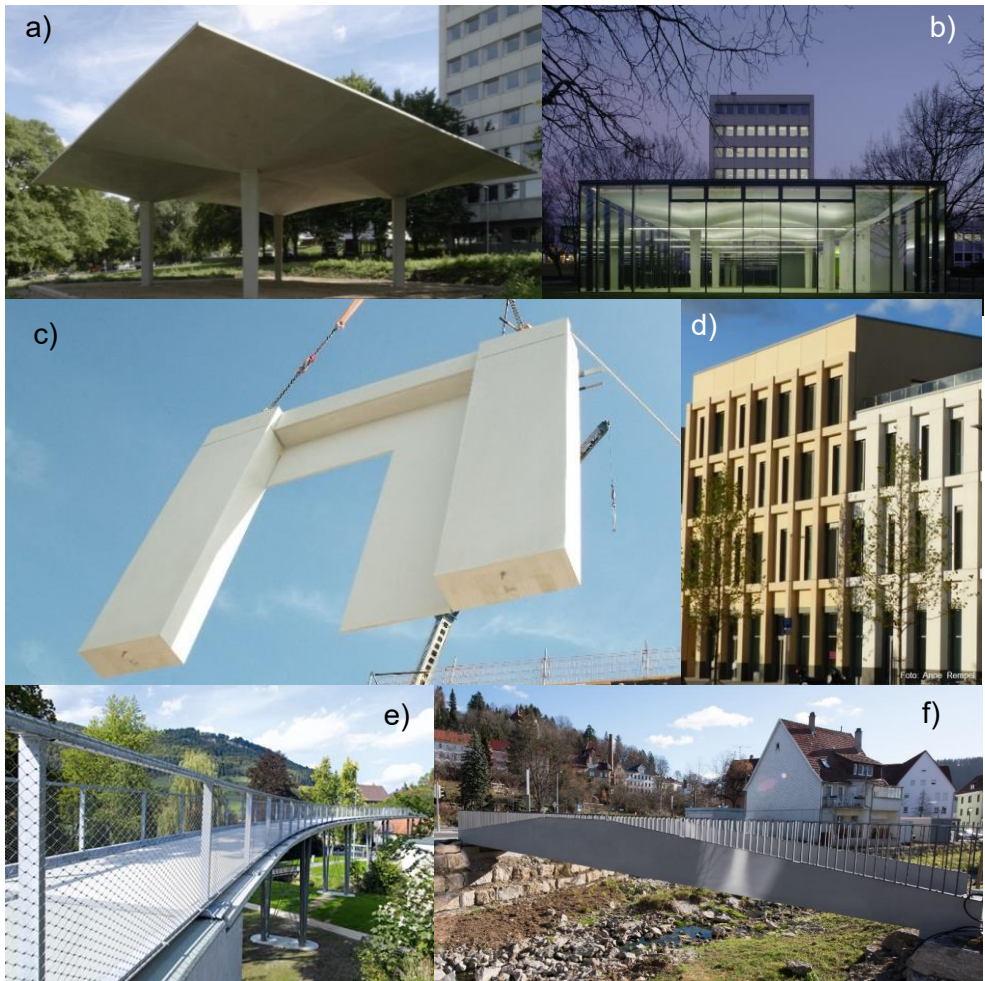


Bild 4 Anwendungsbeispiele; a+b) HP-Schalen aus Carbonbeton an der RWTH Aachen, c+d) Fasadenfertigteile „Neuer Markt“, e) Fußgängerbrücke Albstadt-Lautlingen mit Stahlvorspannung, f) Carbonbeton-Fußgängerbrücke Albstadt-Ebingen. Fotos: a+b) Robert Mehl, c) Max Bögl, d) Anne Rempel, e+f) solidian

Diese Beispiele stellen eine Auswahl der vom IMB der RWTH Aachen gutachterlich betreuten Anwendungsprojekte dar.

4 DAfStb-Richtlinie

Die Forschungsprojekte und deren baupraktische Umsetzung in Pilotprojekten haben immer wieder verdeutlicht, dass zur mittelfristigen Etablierung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung am Markt technische Regelwerke erforderlich sind. Die Erkenntnisse aus den Forschungs- und Praxisprojekten haben aber auch gezeigt, dass es nicht ausreicht ein Regelwerk nur für die Tragwerksplanung bereitzustellen. Wegen der Vielzahl der möglichen Bewehrungstypen müssen auch Anforderungen an die Bewehrungsprodukte und die zu ihrer Nutzung im Rahmen der Tragwerksplanung erforderlichen Materialkennwerte, Prüfverfahren und Auswertemethoden zur Bestimmung der Materialkennwerte sowie Hinweise zur Bauausführung festgelegt werden (Bild 5).



Bild 5 Abzudeckende Bereiche der DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“

Grundlage der DAfStb-Richtlinie [12] waren die Arbeitspapiere aus dem C³-Vorhaben L9. Diese beinhalten vorrangig Carbonbewehrung und die Arbeiten der C³-Partner. Sie wurden in der DAfStb-Richtlinie auf andere Bewehrungsmaterialien ausgedehnt und um die Ergebnisse weiterer Forschungsvorhaben und Anwendungsprojekte außerhalb von C³ sowie Regelungen aus allgemeinen bzw. vorhabenbezogenen Zulassungs- bzw. Genehmigungsverfahren erweitert. Weiterhin wurden die Regelungen des neuen EC 2, Anhang R bewertet und berücksichtigt. Während im EC 2, Anhang R nur stabförmige Bewehrungen behandelt werden, werden in der DAfStb-Richtlinie die Bewehrungen weiter gefasst. Neben Gitterbewehrungen können auch Kombinationen aus Gittern und Stäben eingesetzt werden. Ziel ist eine Verdichtung und Präzisierung der vorliegenden Erkenntnisse für die baupraktische Anwendung.

Das Konzept sowie die umfangreichen Inhalte der Richtlinie erforderten eine Unterteilung in die folgenden fünf Bereiche:

- Teil 1: Bemessung und Konstruktion;
- Teil 2: Bewehrungsprodukte;
- Teil 3: Hinweise zur Bauausführung;
- Teil 4: Empfehlungen für Prüfverfahren;
- Teil 5: Hinweise zu den erforderlichen Nachweisen für die Verwendbarkeit der Bauprodukte (nichtmetallische Bewehrung) und der Anwendbarkeit der Bauart.

Die Richtlinie [12] behandelt Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit von Tragwerken aus Beton, die mit nichtmetallischen Bewehrungselementen bewehrt sind. Andere Anforderungen, wie z. B. Wärmeschutz oder Schallschutz werden nicht berücksichtigt. Der Teil 1 der Richtlinie ist inhaltlich entsprechend DIN EN 1992-1-1 [9] aufgebaut und ergänzt bzw. ersetzt die dort vorhandenen Regelungen um die Anforderungen aus dem Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen. Ansonsten gelten die entsprechenden Abschnitte der DIN EN 1992-1-1 und des zugehörigen Nationalen Anhangs.

Um die praktische Anwendung für einige Standardfälle zu erleichtern, wurde im Teil 1 der Anwendungsbereich eingeschränkt. Dies betrifft zum einen die Art der Bauteile, die ohne ergänzende Bemessungsregeln in Zulassungen mit der Richtlinie bemessen werden dürfen, und zum anderen Gültigkeitsgrenzen der Modelle (z. B. Mindest- oder Maximalwerte für bestimmte Materialkennwerte). Die Richtlinie gilt für den Entwurf, die Berechnung und die Bemessung von Hoch- und Ingenieurbauten aus Beton, die mit nichtmetallischen Bewehrungselementen bewehrt sind. Bewehrungselemente sind dabei in der Regel Stäbe und biaxiale Bewehrungsgitter. Der Gültigkeitsbereich wurde wie folgt festgelegt:

- Neubauteile mit „schlaffer“ nichtmetallischer Bewehrung aus Stäben oder Gittern ;
- keine Bauteile mit einer vorgespannten nichtmetallischen Bewehrung ;
- kein Ansatz der nichtmetallischen Bewehrung als Druckbewehrung ;
- Bauteile mit Querkraftbewehrung aus stabförmigen Elementen (keine Gitterbewehrungen) ;
- Beton nach EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 [17] (ohne Leichtbeton) ;

- Bauteile mit überwiegender statischer Beanspruchung (keine Ermüdungsbeanspruchung) ;
- Flachgründungen.

Die wesentlichen Anpassungen ergeben sich aus dem im Vergleich zu Betonstahl anderen Zug- und Drucktragverhalten, den abweichenden Verbundeigenschaften sowie den Auswirkungen von Langzeitbeanspruchungen auf die ansetzbaren Materialkennwerte der nichtmetallischen Bewehrungen, die Schnittgrößenermittlung, die Biege- und Querkraftbemessung sowie die Bewehrungsregeln.

Das Sicherheitskonzept wurde weitgehend vom Stahlbetonbau übernommen, die Teilsicherheitsbeiwerte der Bewehrung wurden neu festgelegt (Bild 6).

	1	2	3	4	5	6
	Nachweisgegenstand	Bemessungssituationen	γ_c für Beton	γ_{fm} für Gitter	γ_{fm} für Stäbe	γ_b für Verbund
1	Biegung mit Normalkraft	Ständig und vorübergehend	1,5	1,3	1,3	1,5
2		Außergewöhnlich	1,3	1,1	1,1	1,3

Bild 6 Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit gemäß [12], Tab. R2.1 (Auszug)

Exemplarisch werden nachfolgend die Regelungen für die ansetzbaren Festigkeiten der Bewehrung, die Dauerhaftigkeit, die Biegebemessung und die Querkraftbemessung kurz vorgestellt. Für die Betondruckzone sind reduzierte Betondruckfestigkeiten bei Längsbewehrungsgraden der Betondruckzone von $> 2,5 \%$ zu beachten. Die Bemessungszugfestigkeit der Bewehrung $f_{nm,d}$ ist gemäß Gleichung (1) anzunehmen:

$$f_{nm,d} = \alpha_{nmt} \cdot f_{nm,k} / \gamma_{nm} \quad (1)$$

Dabei sind sowohl die charakteristische Zugfestigkeit $f_{nm,k}$ als auch der Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen α_{nmt} der nichtmetallischen Bewehrung produktabhängig den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen des Bewehrungsproduktes zu entnehmen, die gemäß Teil 2 unter Beachtung der Hinweise zu den Prüfverfahren in Teil 4 der Richtlinie festzulegen sind. Alle Festigkeitswerte werden auf den Nennquerschnitt (Kompositquerschnitt) bezogen. Die linear-elastische Spannungsdehnungslinie darf nur im Zugbereich angesetzt werden, eine Druckfestigkeit der Bewehrung wird nicht berücksichtigt. Ein Einfluss von Krümmungen auf die Festigkeitswerte ist zu erfassen.

Zur Dauerhaftigkeit wurden weitgehend nur redaktionelle Anpassungen vorgenommen. Ein direkter Kontakt einer Carbonbewehrung mit metallischen Einbauteilen und Bewehrungen ist nicht zulässig. Der Schutz vor einer Bewehrungskorrosion erfolgt durch einen Beständigkeitsnachweis der Bewehrung gemäß Teil 2, die Berücksichtigung der Alkalibeständigkeit über den α_{nmt} -Wert sowie der Angabe geeigneter Expositionsklassen in den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen. Für die Betondeckung gibt es keine Anforderungen aus der Dauerhaftigkeit. Für Gitter und Stäbe wurden Mindestbetondeckungen c_{min} aufgenommen, der Mindestwert $c_{min,b}$ aus der Verbundanforderung ist produktabhängig in den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen anzugeben.

Für die Schnittgrößenermittlung sind aktuell nur linear-elastische Verfahren zulässig, da Verfahren mit einer Schnittgrößenumlagerung oder nichtlineare Verfahren weitergehende Angaben zu den Verbundeigenschaften der Bewehrung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Grenzzustand der Tragfähigkeit erfordern, die von den im Teil 4 dokumentierten Prüfverfahren nicht abgedeckt sind.

Die Bemessung für Biegung entspricht weitgehend dem Vorgehen aus dem Stahlbetonbau, als Besonderheit ist zu beachten, dass wegen der in der Regel großen Zugfestigkeiten der Bewehrung immer das Biegedruck- und das Biegezugversagen überprüft werden müssen. Weiterhin mussten die statischen Nutzhöhen d für $d < 60$ mm genauer gefasst werden.

Die Querkraftbemessung wurde neu formuliert. Aktuell sind nur Bauteile ohne Querkraftbewehrung sowie Bauteile mit einer stabförmigen Querkraftbewehrung geregelt. Für Bauteile ohne Querkraftbewehrung wird der Betontraganteil dem Querkraftwiderstand gleichgesetzt. Dabei wurde das semiempirische Modell des aktuellen Eurocodes über einen empirischen Vorfaktor, den Size-Effect, die Schubslankheit und die Steifigkeit der Längsbewehrung modifiziert (Bild 7).

$$V_{R,c} = [C_{R,c} \cdot k \cdot k_{\lambda} \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot (E_{nm}/E_s) \cdot f_{ck})^{1/3}] \cdot b_w \cdot d$$

Empirischer Vorfaktor	size effect	Schubslankheit	Steifigkeit A_{nm}
$C_{Rm,c} = 0,219$ $C_{Rk,c} = 0,155$	$k = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{200}}}$	$k_{\lambda} = 1 + 2.824 \cdot e^{\left(\frac{-\lambda}{4.358}\right)}$	$\left(\frac{E_{nm}}{E_s}\right)^{1/3} = \left(\frac{E_{nm}}{200.000}\right)^{1/3}$
► Kalibriert an Daten mit $a/d \geq 2,5$	► nach Bažant & Kim [Baž84]	► Kalibriert an Daten mit $a/d \geq 2,5$	► Ansatz aus internationaler Literatur

Bild 7 Querkraftwiderstand für Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach [12]

Der Ansatz gilt für Stäbe und Gitterbewehrungen. Bei der Schubslankheit ist zu beachten, dass durch die große Zugfestigkeit der Bewehrung ein Schubversagen auch bei großen Schubslankheiten auftreten kann. Die Querkraftbemessung mit stabförmiger Querkraftbewehrung erfolgt durch die additive Berücksichtigung des Querkraftanteils der Querkraftbewehrung. Für Bauteile mit einer gitterförmigen Bauteilbewehrung liegt noch keine ausreichende Datenbasis vor. Erste Ansätze für eine mögliche Nachweisform, die Gegenstand zukünftiger Fassungen der Richtlinie sein werden, finden sich in [11]. Gleiches gilt für die Bemessung gegen Torsion oder Durchstanzen. Hierzu wurden im aktuellen Richtlinienentwurf nur Regelungen für sehr kleine Beanspruchungen aufgenommen.

Die Nachweise zur Gebrauchstauglichkeit werden wesentlich vom Verbundverhalten der Bewehrung bestimmt. Hier mussten die Modellansätze aus dem Stahlbetonbau verallgemeinert werden, so dass durch Angabe einer mittleren charakteristischen Verbundspannung, die in den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen der nichtmetallischen Bewehrung für eine Rissbreite von 0,4 mm anzugeben ist, ein Nachweis geführt werden kann.

In der baulichen Durchbildung beeinflussen die Verankerungen und die Stöße der Bewehrungen die Bewehrungsführung. Abweichend zum Betonstahl sind für nichtmetallische Bewehrungen aktuell keine Abminderungen der erforderlichen Verankerungs- und Stoßlängen durch Verankerungselemente (z. B. Haken, Winkelhaken) zulässig, da der Einfluss der damit verbundenen großen lokalen Querspannungen auf das Tragverhalten der nichtmetallischen Bewehrung noch nicht ausreichend untersucht wurde. Auch die Herstelltechnik zur Umsetzung der Krümmung am Verankerungselement ist dabei zu berücksichtigen.

In der Richtlinie werden vorrangig die Bemessung (Teil 1) und die Prüfkonzepte (Teil 4) für Stab- und Gitterbewehrungen geregelt, um der Tragwerksplanung Vorgaben zum statischen Nachweis und für die konstruktive Durchbildung bereitzustellen. Dazu enthält Teil 4 Empfehlungen für Prüfverfahren zur Ermittlung der benötigten Kennwerte der Bewehrungsprodukte. Voraussetzung für die Bemessung von Bauteilen nach Teil 1 der Richtlinie ist das Vorliegen der erforderlichen Nachweise für die Verwendbarkeit der Bauprodukte (nichtmetallische Bewehrung) und der Anwendbarkeit der Bauart (Ver- und Anwendbarkeitsnachweise). Die Teile mit den sich daraus ergebenden Anforderungen und Angaben zu den Bewehrungsprodukten (Teil 2) sowie der Ausführungsregeln (Teil 3) und Verwendbarkeitsnachweise der Bewehrungen (Teil 5) stellen sicher, dass die in der Tragwerksplanung getroffenen Annahmen eingehalten und die dazu notwendigen Kennwerte des Bewehrungsproduktes bereitgestellt werden.

5 Fazit und Ausblick

Der Richtlinienentwurf hat das Gelbdruckverfahren und die Einspruchsphase durchlaufen und wurde von den Technischen Ausschüssen des DAfStb freigegeben, so dass die Veröffentlichung der Richtlinie im Laufe des Jahres 2023 erfolgen soll. Die dokumentierten Regeln sind das Ergebnis von Forschungsarbeiten und Praxiserfahrungen und bilden den Stand des Wissens in Deutschland in diesem Bereich sehr gut ab. Umfangreiche Erläuterungen, Hintergründe zur Richtlinie sowie Anwendungsbeispiele werden im DAfStb-Heft 660 veröffentlicht, das sich aktuell erstellt wird.

Wenn im Sinne der Richtlinie zugelassene Bewehrungen vorliegen, und die Richtlinie bauaufsichtlich eingeführt ist, kann im Hochbau auf Zustimmung im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen für viele Anwendungen verzichtet werden. Viele Regelungen und Prüfverfahren sind aber außerhalb des aktuellen Anwendungsbereiches z. B. für den Brückenbau übertragbar, der noch nicht durch die Richtlinie in der aktuellen Fassung abgedeckt wird. Durch das Regelwerk wird das Bauen

mit nichtmetallischen Bewehrungen in Stab- oder Gitterform in Deutschland erheblich erleichtert und der Anschluss an international bereits seit Jahren vorhandenen Normen (z. B. in den USA, Kanada, Japan, Italien) gefunden.

Mit Fertigstellung der Richtlinie endet die Arbeit des Unterausschusses Nichtmetallische Bewehrung nicht. Die gesammelten Erkenntnisse bei der Erarbeitung der Richtlinie zeigen, dass es noch viele Fragestellungen gibt, die beantwortet werden müssen. Deshalb wurde bereits die Arbeiten an der zweiten Fassung der Richtlinie begonnen, mit der weitergehende Erkenntnisse erfasst werden. Neben der Anpassung auf den neuen Eurocode 2 sollen folgende Punkte in die nächsten Fassungen aufgenommen werden:

- Querkraftbemessung mit gitterförmigen Querkraftbewehrungen;
- Bauteile mit Torsionsbeanspruchungen;
- Durchstanzen von Bauteilen ohne Durchstanzbewehrung;
- Bauteile mit Ermüdungsbeanspruchungen;
- Vorspannung mit nichtmetallischer Bewehrung;
- Ansatz der nichtmetallischen Bewehrung bei einer Druckbeanspruchung.

Weiterhin ist das Verbundverhalten der Bewehrungen detaillierter zu erfassen. Bei der Verankerung der Bewehrung lag der Fokus bisher auf den erforderlichen Verankerungslängen, die zu einem Reißen der Bewehrung führen [18]. Für eine allgemeine Anwendung ist aber auch das Verhalten bis zum Erreichen der maximalen Tragfähigkeit und somit das belastungsabhängige Verbundverhalten von Bedeutung. Aktuell ist eine allgemeine Beschreibung des Verbundverhaltens noch nicht möglich. Entsprechend können Nachweisverfahren sowie praxistaugliche und belastbare Regelungen für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit oder zur Schnittgrößenumlagerung nicht verallgemeinert zur Verfügung gestellt werden.

Auch sind gemäß dem Slogan „Bauen neu denken“ neue Prinzipien für tragende Strukturen unter Berücksichtigung der Gebäudetechnik und Nutzbarkeit sowie unter Beachtung von neuen Fügeprinzipien erforderlich. So werden die Grundlagen für Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen im von der DFG geförderten Sonderforschungsbereich/Transregio 280 (SFB/TRR 280) seit dem Juli 2020 gemeinsam an der TU Dresden und RWTH Aachen untersucht.

Nichtmetallisch bewehrte Betonbauteile sind eine echte Innovation für das Bauen in Bezug auf Nachhaltigkeit, Dauerhaftigkeit, Tragwerksplanung und Bauausführung, wir müssen nur lernen mit dem neuen Verbundwerkstoff ressourceneffizienter und werkstoffgerechter zu planen und zu bauen sowie seinem Einsatz offen und ohne Vorbehalte gegenüberzustehen.

Dank

Neben dem Dank an die Mittelgeber (öffentliche Hand und Industrie), ohne deren finanzielle Förderung die umfangreichen erforderlichen Forschungsarbeiten nicht möglich gewesen wären, sei hier den Mitgliedern des DAfStb-Unterausschusses „Nichtmetallische Bewehrung“ für ihre kontinuierliche Bereitschaft der Mitarbeit bei der Zusammenstellung, fachlichen Diskussion und Überarbeitung des umfangreichen Richtlinienentwurfes sowie Frau Anett Ignatiadis und Herrn Christoph Alfes vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton e.V. für die fachlichen Gespräche und die umfangreiche redaktionelle Betreuung des Ausschusses gedankt.

Quellen

- [1] *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.6-238: Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm. 5. Juni 2014.
- [2] *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-71.3-40: solidian GmbH –Kleingebäude, Raumzellen (Fertigarage). 03.05.2018.
- [3] *Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)*: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-71.3-39: solidian Sandwichwand. 05.09.2019.
- [4] *Curbach, M.; Ortlepp, R.*: Sonderforschungsbereich 528 – Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung [Abschlussbericht]. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-86425>, 2012.
- [5] *Hegger, J.; Will, N.*: Sonderforschungsbereich 532: Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie [Abschlussbericht], 2012.

- [6] *Spelter, A.; Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.*: Prüfkonzep zur Untersuchung des Dauerstandverhaltens von textilbewehrtem Beton. Bauingenieur 92 (2017), H. 9, S. 364–369. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2017-09-48>.
- [7] *Spelter, A.; Bergmann, S.; Bielak, J.; Hegger, J.*: Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations. Applied Sciences 9 (2019), H. 8. <https://doi.org/10.3390/app9081651>.
- [8] *Spelter, A.*: Long-Term Durability of Carbon Reinforced Concrete,” Dissertation, RWTH Aachen University, Aachen, 2023.
- [9] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [10] DIN EN 1992-1-1:2021-10 – Entwurf: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke; Deutsche und Englische Fassung prEN 1992-1-1:2021.
- [11] *Bielak, J.*: Shear in slabs with non-metallic reinforcement [Dissertation] RWTH Aachen University, Aachen, 2021.
- [12] *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*: DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung; Stand 20.07.2023; Dokument D230 des DAfStb-UA-NMB.
- [13] *Scholzen, A., Chudoba, R., Hegger, J.*: Dünnwandiges Schalentragwerk aus textilbewehrtem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 767–776.
- [14] *Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J.; Beul, P.*: Filigrane Bauwerke aus Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), S. 83–93.
- [15] DIN EN 13670:2011-03: Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009.
- [16] DIN 1045-3:2012-03: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung.
- [17] DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [18] *Bielak, J.; Spelter, A.; Will, N.; Claßen, M.*: Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), H. 7.