

Nichtmetallische Bewehrung im Hoch- und Brückenbau: Lessons Learned aus aktuellen Zulassungen

Jan Bielak, Norbert Will, Josef Hegger

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

jbielak@imb.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Der Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen im Hoch- und Brückenbau in Deutschland ist noch nicht allgemein geregelt. Er erfordert in der Regel eine Zustimmung im Einzelfall mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung, sofern nicht allgemeine Zulassungen für Bewehrungsprodukte oder spezielle Bauteilzulassungen vorliegen. Dies wird sich mit der für Ende 2023 vorgesehenen Einführung der DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ im Hochbau ändern, deren Anwendung aber weiterhin eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Bewehrungsprodukte erfordert. Vor diesem Hintergrund lohnt der Blick auf bereits realisierte Vorhaben, bei denen das Institut für Massivbau der RWTH Aachen als Gutachter beteiligt war. Anhand ausgewählter Beispiele werden wichtige Erkenntnisse für die Forschung und Praxis, die sich in der Vorbereitung mit den Zustimmungsbehörden und der Bearbeitung durch Planer und ausführende Firmen ergaben, vorgestellt. Denn gerade über Irrwege, Planungsprobleme sowie materialspezifische Leistungsdefizite wird im Nachgang selten berichtet.

Die zentralen Erkenntnisse lassen sich in zwei Kategorien gruppieren: Erstens kommt es zu planerischen Fehleinschätzungen. Diese sind auf mangelnde Erfahrung mit den Materialeigenschaften sowie deren unzureichende Charakterisierung durch die Produkthersteller zurückzuführen. Beispielsweise wird die Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit – Rissbreiten- und Durchbiegungsbegrenzung – zum bemessungsrelevanten Kriterium, welches im Projektverlauf zu spät berücksichtigt wird und deshalb zu Umplanungen oder zur Erhöhung von Bewehrungsgraden führt. Zweitens kommt es in der Fertigung regelmäßig zu Problemen, die Ausführungsqualität wird den hohen Anforderungen (bei dünneren Querschnitten) häufig nicht gerecht. Bei dünnen Bauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung wirken sich absolute Lageabweichungen deutlich stärker aus als bei konventionellen, dickeren Stahlbetonbauteilen. Gleichzeitig treten Effekte wie das Schüsseln auf, die bei dickeren Bauteilen selten schädlichen Auswirkungen haben. Die Einhaltung der nach Planung geforderten Toleranzen bedingt somit einen höheren Aufwand und definierte Qualitätskontrollsysteme. Für das Bauen mit nichtmetallischer Bewehrung müssen Hersteller und Planer deshalb Erfahrungen sammeln und Kompetenzen aufbauen, um die inzwischen vorliegenden Bemessungsregeln zu flankieren. Jedes ausgeführte Projekt kann dazu beitragen.

Keywords: nichtmetallische Bewehrung; Praxisprojekt; Gebrauchstauglichkeit; Zulassung

Abstract

The use of non-metallic reinforcement in high-rise and bridge construction in Germany is not yet standardized. To date, the use of non-metallic reinforcements requires project-specific approvals unless general approvals for reinforcement products or full component approvals are available. This will change to some extent with the DAfStb guideline "Concrete components with non-metallic reinforcement", which will be available in white print at the end of 2023. However, a general approval for the reinforcement products will still be required. At this point, it is worth looking back at projects that have already been implemented and in which the Institute of Structural Concrete at RWTH Aachen University was involved as an expert. Based on selected examples, important findings for research and practice are presented, which emerged during the preparatory work with the approval authorities and the design by

planners and executing companies. Typically, the erroneous paths, planning problems and material-specific performance deficits are not usually reported afterwards.

The key findings can be grouped into two categories: First, planning errors occur due to a lack of experience with the material properties and insufficient characterization of these by the reinforcement manufacturers. For example, compliance with serviceability – crack width and deflection limits – becomes a design-relevant criterion that is taken into account too late in the course of the project and ultimately leads to rescheduling or to an increase in reinforcement ratios. Secondly, problems regularly occur in production, and the quality of workmanship often does not meet the high requirements (for thinner cross-sections). With thin non-metallic-reinforced components the absolute positional deviations have a disproportionately greater effect than with conventional, thicker reinforced concrete components. At the same time, effects such as dishing occur, which rarely have detrimental effects with thicker components. Compliance with the tolerances required by the design requires greater effort and defined quality control systems. For construction with non-metallic reinforcement, manufacturers and designers must gain experience and build up competencies to flank the design rules that are now available. Every project carried out can contribute to this.

Keywords: non-metallic reinforcement; practical project; serviceability; approval

1 Einleitung

Für den Einsatz von nichtmetallischen Bewehrungen in Deutschland ist derzeit in vielen Fällen noch eine Zustimmung im Einzelfall mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung erforderlich. Das Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen hat in den letzten zwei Jahrzehnten zahlreiche Praxisprojekte im Hoch- und Brückenbau mit solchen Einzelfallzustimmungen wissenschaftlich mit gutachterlichen Stellungnahmen begleitet. Erst mit der Ende 2022 im Gelbdruckverfahren fertiggestellten Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [1] vereinfacht sich der Einsatz nichtmetallischer Bewehrungen perspektivisch. Nach der vorgesehenen Einführung dieses ersten, umfassenden Regelwerkes für das Bauen mit nichtmetallischer Bewehrung Ende 2023 in Deutschland beschränkt sich die Notwendigkeit der Zulassung auf die Bewehrungsprodukte, die Bemessungskonzepte und Prüfverfahren werden allgemein über die Richtlinie festgelegt. Vor diesem Hintergrund lohnt der Blick zurück auf die ausgeführten Projekte und die „Lessons Learned“, die durch die federführende Mitarbeit des IMB im Unterausschuss „Nichtmetallische Bewehrung“ des DAfStb Eingang in den Richtlinienentwurf gefunden haben.

2 Fragen der Tragwerks- und Ausführungsplanung

2.1 Tragfähigkeit vor Gebrauchstauglichkeit

Nichtmetallische Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen ist neben der sehr guten Korrosionsresistenz durch hohe Zugfestigkeit gekennzeichnet. Wird analog zum Stahlbeton zunächst der Biegetragfähigkeit nachgewiesen, ist i.d.R. eine geringere Bewehrungsquerschnittsfläche als bei Einsatz konventioneller Betonstahlbewehrung erforderlich. Die auf die Kompositquerschnittsfläche bezogenen E-Moduln handelsüblicher FVK-Bewehrungen als Stäbe oder Gitter auf Glasfaserbasis liegen im Bereich 60.000 N/mm², bei CFK werden höhere Werte zwischen 100.000 und 180.000 N/mm² erreicht. Die großen Unterschiede sind auf die verwendeten Fasermaterialien und Faservolumengehalte zurückzuführen, letztere spielen bei der Betrachtung als Komposit (Nettofläche) eine große Rolle. Beide Effekte, die geringere absolute Fläche und der zugehörige geringere E-Modul, bedingen, dass bei gleichem Bau-Teilquerschnitt die Gebrauchstauglichkeitsnachweise in aller Regel die Bewehrungswahl dominieren.

Schon beim Plattenbauteilen tritt häufig der Fall auf, dass die Querkraftbemessung größere Längsbewehrungsgrade als die Biegebemessung erfordert. Beispielsweise musste bei den Endplatten der Brücken im Remstal, die eine größere Spannweite und ein anderes statisches System als die Regelplatten aufweisen, die Bewehrungsmenge (CFK-Gitterbewehrung) und Querschnittsdicke wegen des Querkraftnachweises erhöht werden [2]. Verformungsnachweise wurden nicht geführt. Auch bei zwei Brücken in Kreuzau, die 2022 ohne neue Versuche mit einer Zustimmung im Einzelfall errichtet wurden, musste die notwendige Biegezugbewehrung für den Querkraftnachweis gegenüber der aus Biegung erforderlichen Bewehrung erhöht (bzw. bis vor das Auflager durchgeführt) werden (Bild 1).

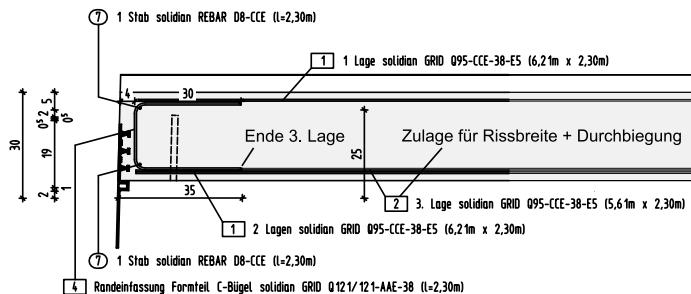


Bild 1 Detailauszug aus Bewehrungsplan Überbau Carbonbetonbrücken Kreuzau (Quelle: Cornelissen + Partner Beratende Ingenieure mbB)

Schlussendlich hätte der rechnerische Verformungsnachweis im gerissenen Zustand der Brücke eine noch höhere Bewehrungsmenge erfordert; dies konnte aber durch die Anordnung einer Überhöhung der Platte vermieden werden. Der Rissbreitennachweis konnte rechnerisch nicht erbracht werden, da seitens des Bewehrungsherstellers noch keine statistisch abgesicherten Verbundspannungen für den Nachweis im Gebrauchszustand dokumentiert waren. Hilfsweise wurde auf vorhandene Versuchsergebnisse aus einem anderen Projekt zurückgegriffen [3]. Bei ähnlichem Bewehrungsgrad der Zugzone wurden dort Rissabstände und Rissbreiten experimentell ermittelt.

Die experimentelle Untersuchung für den Rheinsteg Albbrück [3] war erforderlich, da wegen der Ort beton herstellung zwischen bestehenden Stahlträgern planmäßig zentrischer Zwang erwartet wurde und etwaige Trennrisse zwecks Wasserundurchlässigkeit der Betonplatte in der Rissbreite begrenzt werden sollten. Hier wurde zu Projektbeginn seitens der Entwurfsplaner die Verbundfestigkeit der Bewehrung überschätzt bzw. die Rissbreiten und Rissabstände unterschätzt. Zum damaligen Zeitpunkt existierten noch keine abgesicherten Materialkennwerte und Bemessungskonzepte für die Rissbreitenbegrenzung mit der eingesetzten nichtmetallischen Bewehrung. Da eine nachträgliche Erhöhung der Bewehrungsmenge planerisch schwierig umzusetzen war wurde entschieden, die Gebrauchstauglichkeit mittels einer nachträglichen Besandung der oberen Lage zu verbessern. Die so behandelte Bewehrung war in der Lage, die Risse in ihrer Breite wirksam zu begrenzen und die Rissanzahl zu verdoppeln (Bild 2).

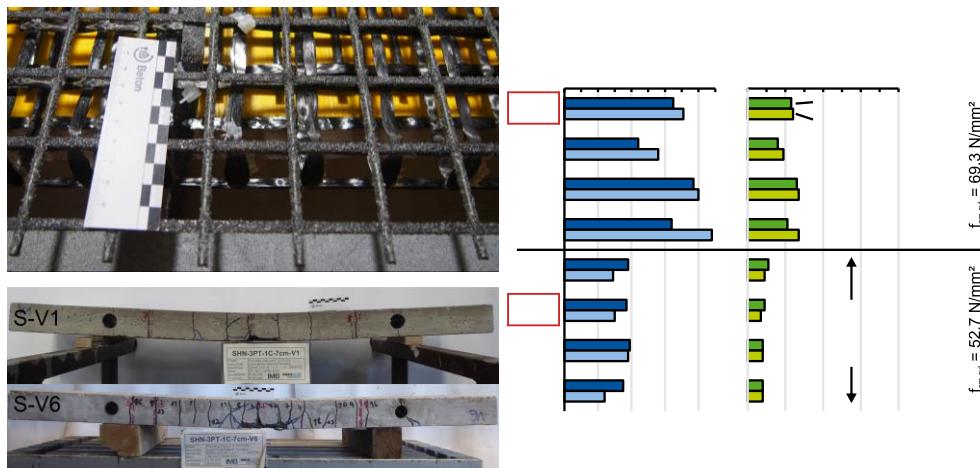


Bild 2 Besandete Bewehrung in oberer Lage beim Rheinsteg Albbrück (links oben), Vergleich Rissanzahl unbesandete (S-V1)/besandete Bewehrung (S-V6) (links unten); Vergleich der mittleren Trennrissbreiten bei besandeter und unbesandeter Bewehrung (Quelle: IMB RWTH, Bild rechts nach [3])

Das Beispiel der schwarz pigmentierten Fassadenplatten des St. Leonard-Gymnasiums in Aachen zeigt ein nicht direkt von der Bewehrung beeinflusstes Verformungsproblem, das der Bauweise mit nichtmetallischer Bewehrung immanent ist. Erklärtes Ziel des Einsatzes von nichtmetallischen Bewehrungen ist es, materialoptimierter, dünner und schlanker zu bauen. Typischerweise vergrößern sich dann bei gleichen Belastungen die Verformungen, zum Beispiel infolge eines äußeren Temperaturgradienten, weil die Steifigkeit der Bauteile geringer ist. Bei den Platten am St. Leonard-Gymnasiums, für deren Zustimmung im Einzelfall im Jahr 2012 das IMB der RWTH ein Gutachten zur Tragfähigkeit erstellt hat, ist bei Sonnenschein auf den Platten der Südfront (Bild 3, links) ein deutlicher Stich in Querrichtung erkennbar. In dieser Richtung weisen die Bauteile (Dicke 30 mm) eine signifikant geringere Steifigkeit als in vertikaler Richtung auf, da die Bauteildicke vertikal durch Verstärkungsrippen 10 cm beträgt (Bild 3, rechts).

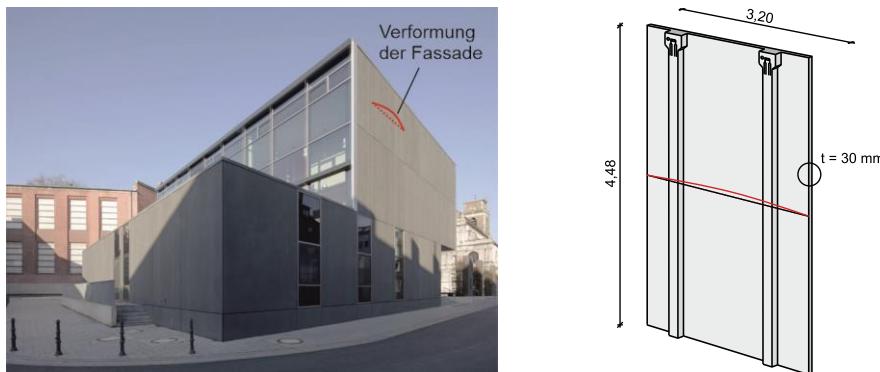


Bild 3 Textilbetonfassade Gymnasium St. Leonard in Aachen (Quelle: Robert Mehl); Skizze der Fassadenplatten mit vertikalen Verstärkungsrippen (Quelle: IMB RWTH)

Dabei spielte die Farbe der Platten eine wesentliche Rolle: Das gleiche Fassadensystem mit weißer Betonfarbe wurde auch zur Verkleidung der Hörsäle des Bauingenieur-Sammelgebäudes der RWTH Aachen genutzt, und dort sind die Verformungen optisch nicht auffällig bzw. störend. In jedem Fall ist der Gebrauchstauglichkeit hier auch im ungerissenen Zustand beim Einsatz nichtmetallischer Bewehrung eine größere Beachtung zu schenken oder geeignete Konstruktionsstrategien zu wählen, die die hervorragenden Materialeigenschaften ohne Steifigkeitsverlust zu nutzen wissen. Dies ist ein Thema des derzeit laufenden Sonderforschungsbereichs/Transregios 280 [4].

Die Beispiele zeigen, dass die Bemessung bei nichtmetallisch bewehrtem Beton in der Regel mit den Gebrauchstauglichkeitsnachweisen beginnen sollte. Abgesicherte Kennwerte zum Verbundverhalten (auf Gebrauchslastniveau) und zur Bewehrungssteifigkeit sind hier unerlässliche Eingangsgrößen für eine rechnerische Nachweisführung. Häufig stehen diese herstellerseitig (noch) nicht zur Verfügung und müssen dann projektbezogen ermittelt werden.

2.2 Flächenlast oder Einzellast: Kritische Bemessungsstelle

In frühen Planungsphasen ist essenziell, den maßgebenden Lastfall und die maßgebende Laststellung für eine überschlägige Abschätzung der notwendigen Bauteildicken und Bewehrungsmengen zu kennen. Im Stahlbetonbau wird bei der Querkraft typischerweise der Bemessungsschnitt im Abstand d vom Auflager maßgebend. Ersatzeinzellasten (z. B. Mannlast oder Punktlast aus PKW-Reifen) bestimmen hingegen seltener den Querkraftnachweis.

Nichtmetallisch bewehrte Betonbauteile können wegen der geringeren notwendigen Betondeckung (im Außenbereich, bei Frost-Tausalzexposition) dünner ausgeführt werden. Gleichzeitig kann und soll auf eine Abdichtung und Schutzschicht, z. B. aus Asphalt, verzichtet werden, was wiederum Eigengewicht und Kosten spart sowie den CO₂-Fußabdruck verkleinert. Dies führt aber dazu, dass sich Einzellasten mit geringen Lastaufstandsflächen nicht in der Schutzschicht aufteilen bzw. in der dickeren Betonplatte verteilen und somit bemessungsrelevant werden. Als Folge daraus ist dann ein Querkraft- bzw. Durchstanzversagen maßgebend. Verstärkt tritt das Problem bei randständigen Lasten auf. Beispielhaft sei hier die Brücke in Ottenhöfen genannt, bei der die Querkrafttragfähigkeit bei Einzellast-

beanspruchung in Plattenmitte unter Rückgriff auf experimentelle Untersuchungen nachgewiesen werden konnte; die gleiche Einzellast am Rand aber wegen der geringeren Verteilbreite nur durch Zulage von konzentrierten nichtrostenden Betonstahl-Zulagen sicher abgetragen werden konnte (Bild 4, links) [2].

Durch das von der Schub schlankheit abhängige Querkraftbemessungsmodell aus [5], das Eingang in die DAFStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ gefunden hat [1], liegt die bemessungsmaßgebende Stelle nicht notwendigerweise im Abstand d vom Auflager. Bei Flächenlasten ist in der Regel ein weiter vom Auflager entfernter Schnitt maßgebend, sodass der Nachweis an allen Stellen ausserhalb der Diskontinuitätsbereiche geführt werden muss. Bei Einzellastbeanspruchung kann dies ebenfalls auftreten, allerdings ist hier die mitwirkende Breite (für Biegung) zu berücksichtigen. So lag der Bemessungspunkt bei der Deckplatte der geplanten Brücke über die Ludwigsburger Straße in Stuttgart [6] im Randfeld im Abstand d (Bild 4, rechts), wenn die mitwirkende Breite für die Ermittlung des Biegemomentes gesondert von der mitwirkenden Breite für Querkraft berechnet wurde.

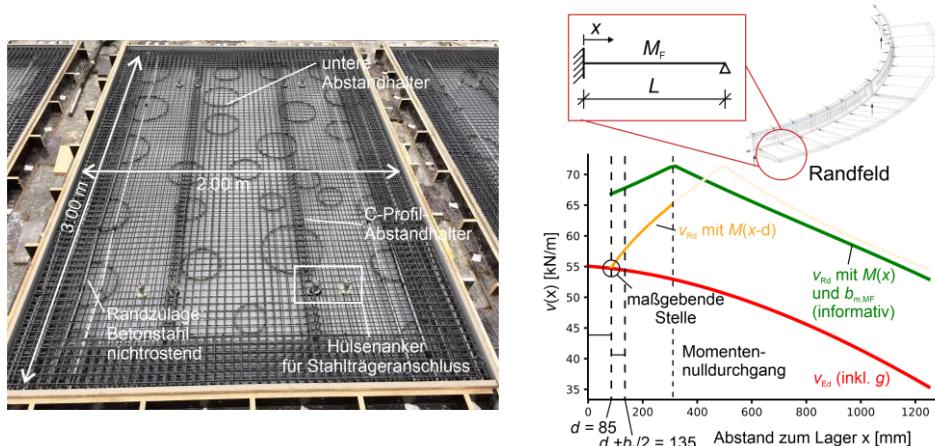
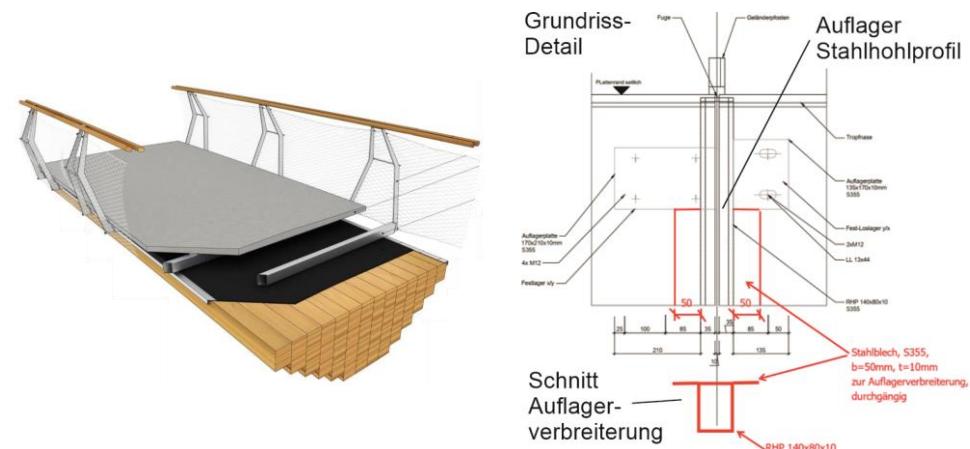


Bild 4 Fertigteilplatte für die Brücke in Ottenhöfen mit Zulage aus Betonstahl NR (links, aus [2]), Vergleich der einwirkenden Querkraft v_{Ed} und Querkraftwiderstand v_{Rd} im Randfeld der Carbonbetonbrücke über die Ludwigsburger Straße (rechts, Grafik: Jan Bielak)

Solange der Erfahrungsschatz für eine schnelle Vorbemessung noch klein ist, müssen Planerinnen und Planer mehr Gedanken und Energie in frühen Planungsphasen aufwenden.

2.3 Auflagertiefe und Verankerung

Ein häufig auftretendes Problem beim Einsatz hochzugfester Bewehrung ist die Auflagertiefe zur Verankerung der Bewehrung. Schon im Stahlbetonbau können Verankerungsnachweise am Auflager, z. B. bei Elementdecken mit Ortbetonergänzung, die Bewehrungswahl und die Auflagerausbildung bestimmen. Bei höheren ausnutzbaren Zugspannungen, insbesondere bei CFK-Bewehrungen, werden die Auflagerlängen in der Entwurfsphase häufig zu gering gewählt. Beispielhaft seien hier die Brücken im Remstal genannt [2], bei denen am Stoß zwischen zwei Platten die Auflagertiefe auf den quer zur Spannrichtung verlaufenden Stahlhohlprofilen (Bild 5, links) zu klein war und durch seitlich angeschweißte Bleche für den Verankerungsnachweis vergrößert werden musste (Bild 5, rechts). Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, ist die Kenntnis der ansetzbaren Verbundkräfte für die neuen Bewehrungen erforderlich, jedoch fehlt auch wegen der Variantenvielfalt der Bewehrungen für die neue Bauweise häufig das „Gefühl“ für die richtige bauliche Durchbildung.



Der Verankerung der Bewehrung muss bei hochzugfesten Bewehrungsmaterialien, die sich nachträglich nicht umformen lassen, eine besondere Aufmerksamkeit in puncto konstruktive Durchbildung geschenkt werden. Planerisch sind ausreichende Verankerungstiefen vorzusehen, wohlwissend, dass diese im Spannungsfeld einer schlanken und architektonisch ansprechenden Gestaltung stehen.

2.4 Herstellbarkeit und Betretbarkeit

Insbesondere bei gitterförmigen FVK-Bewehrungen wird planerisch der Herstellbarkeit und Betonierbarkeit zu wenig Beachtung geschenkt. Frühe Beispiele mit getränkten Gitterbewehrungen zeigen dies anschaulich: Bei den Straßenbrücken in Gaggenau wurden auf der Bauteilunterseite vier Lagen CFK-Gitter und auf der Bauteiloberseite zwei Lagen angeordnet [8]. Ein Problem in der Ausführung stellte aber nicht die Lagenanzahl sondern die C-Förmige Randeinfassung dar, die wegen der schiefwinkeligen Auflagerung der Brückenplatten nicht orthogonal zur restlichen Bewehrung ausgerichtet werden konnte (Bild 7, links oben). Die im Vorfeld der Brückenherstellung durchgeführten Bauteiluntersuchungen wurden an prismatischen Plattenstreifen ohne Abschrägung durchgeführt. Der zu steife Liefertbeton (F3), der überdies ein gemäß heutigem Wissenstand nicht geeignetes Größtkorn (8 mm) für diese Bewehrungsdichte aufwies, konnte zunächst nicht eingebaut werden. Erst durch in Absprache mit dem Prüfer und Gutachter nachträglich geschnittene Einfüll- und Verdichtungsöffnungen in der oberen Bewehrungslage konnte die Herstellung abgeschlossen werden (Bild 7, links unten).

Auch bei geometrisch komplexen Bauteilen und/oder bei Einsatz verschiedener Bewehrungsarten (Gitterbewehrung, Stabbewehrung) und Bewehrungsmaterialien (CFK, GFK) ist die Herstellbarkeit ein zentrales Thema, das in der Planung berücksichtigt werden muss. Mit geeigneten selbstverdichtenden Betonen können auch dichte Bewehrungskörbe im Gießverfahren satt umschlossen werden, wie das Beispiel der Carbonbeton-Trogbrücke in Albstadt-Ebingen verdeutlicht [9, 10]. Das aktuelle Beispiel der Brücke Ludwigsburger Straße in Bild 7, rechts zeigt erneut, dass bei nicht orthogonal zueinander stehenden Bewehrungsscharen in der Planung sorgfältig überprüft werden muss, ob ein Bauteil noch herstellbar und betonierbar ist [11].



Bild 7 Bewehrungskorb des Überbaus der ersten Straßenbrücke in Gaggenau (links oben, Foto: Sergej Rempel); Betonage mit nachträglich geschnittener Einbring- und Verdichtungsöffnung (links unten, Foto: Sergej Rempel); Bewehrungskorb und Knotendetail des Großversuchskörpers für die Brücke Ludwigsburger Straße (rechts, Foto: IMB RWTH, aus [11])

Durch den gevouteten Untergurt, die abgeschrägte Rahmenecke und die unterschiedlichen Neigungswinkel von Rückwand und außenliegendem Rand der Rippe treten Übergreifungen und Abdækungen in verschiedenen Raumrichtungen und Winkeln auf. Die engmaschigen Gitterbewehrungen wirken dann noch stärker als Trennebene bzw. als Sieb für den Beton. Der in Bild 7, rechts, dargestellte Versuchskörper konnte mit einem selbstverdichtenden Beton (Größtkorn 4 mm) erfolgreich betoniert

werden. Mit Blick auf eine geplante industrielle Herstellung der späteren Brücke ist damit aber eine Grenze des Sinnvollen erreicht.

FVK-Gitterbewehrungen sind querdruckempfindlich und scheren bei Beanspruchung quer zur Faserrichtung leichter ab als eine querschnittsgleiche Stahlbewehrung. In der Planung ist deshalb zu berücksichtigen, dass Bauteile nur sehr eingeschränkt betreten werden können. Hilfskonstruktionen zum Schutz der Bewehrung müssen so steif ausgeführt sein, dass diese beim Betreten keine Verformungen in die Bewehrungskörbe einprägen. Beispiele zur Herstellung zeigt Bild 8.



Bild 8 Betreten von biegeweichen Latten bei der Produktion von Deckplatten prägt Lageabweichungen der nichtmetallischen Bewehrung ein (links, Foto: Jan Bielak); Schwebende Bühne und punktgestützte Trittplattformen beim Rheinsteg Albbrück (rechts, Foto: Jan Bielak)

Bei der Herstellung der Überbaufertigteile für die Remstalbrücken mussten die Latten, die als obere Abstandhalter für einen Carbonbewehrungskorb dienten (Bild 8, links), nach dem Verdichten mittels Tischrüttler entfernt werden. Das mit dem Kappen dieser Hochhängung der Bewehrung verbundenen Betreten der Latten kann aber zu Toleranzüberschreitungen der Bewehrungslage in Feldmitte führen. Einen anderen Ansatz zeigen die schwebende Bühne in Bild 8, rechts und die durch vier Schrauben gestützten Trittinseln für den Rheinsteg Albbrück. Dies sind kreative Lösungen für das der Bauweise verbundene Problem der Querdruckempfindlichkeit der nichtmetallischen Bewehrung, die aber eine frühzeitige Abstimmung zwischen Tragwerks- und Ausführungsplanung sowie der Bauausführung erfordern.

3 Ausführungsqualität

3.1 Toleranzen und Abstandhalter

Beim Bauen mit nichtmetallischen Bewehrungen sind im Gießverfahren – wie im Stahlbeton – Abstandhalter zur Sicherstellung der Betondeckung anzugeben, wenn die Bewehrung nicht (leicht) vorgespannt wird, z. B. durch seitliche Klemmung. Weil CFK- und GFK-Bewehrungen wegen der geringeren absoluten Querschnittsfläche sowie des geringeren E-Moduls biegeweicher als eine Betonstahlbewehrung sind, erfordern diese trotz ihrer geringeren Dichte typischerweise im Vergleich zu Stahlbetonbauteilen mehr Unterstützungs punkte je m^2 . Weiterhin ist zu beachten, dass die Bewehrung aufschwimmen kann, und daher zusätzliche Sicherungen gegen eine Lageabweichung entgegen der Eigengewichtsrichtung anzugeben sind.

Bei der Herstellung der ersten Überbauplatte für die Stadt Kreuzau lag die Bewehrung vor der Betonage innerhalb der vom Planer im Einklang mit dem Richtlinienentwurf definierten Toleranzgrenzen (+/- 5 mm). Durch die Betonage mit einem vergleichsweise steifen und klebrigen Beton (F4) bildeten sich allerdings Fladen auf der Bewehrung und drückten diese herunter (Bild 9, links). Unmittelbar nach der Betonage wurde eine Lageabweichung um 20-25 mm gegenüber der Solllage festgestellt, die nicht mehr korrigiert werden konnte. Bei der zweiten Betonage wurde mit zusätzlichen Abstandhaltern und fließfähigerer Konsistenz das Problem vermieden. Die erste Brücke wurde durch den Planer mit der neuen Ist-Lage neu nachgewiesen.

Lageabweichungen bei getränkten Gitterbewehrungen sind indes kein neues Phänomen und nicht auf dicke Bauteile beschränkt. Im Jahr 2008 wurde mit einer Zustimmung im Einzelfall die Vorhangsfassade der Versuchshalle G des IMB der RWTH Aachen mit einer GFK-Gitterbewehrung in der Platte

erstellt. Bei der von der zuständigen Bauaufsichtsbehörde angeordneten Qualitätsüberprüfung nach 10 Jahren wurden zuvor ausgelagerten Probekörper getestet: Die Bewehrungslage war zwar im Durchschnitt planmäßig mittig, allerdings mit einer Streuung von ± 15 mm (bei 30 mm Bauteildicke) (Hervorhebung mit roten Punkten in Bild 9, rechts unten).



Bild 9 Unzureichende Fließfähigkeit des Betons drückt obere Bewehrungslage herunter (links, Foto: Philipp Cornelissen); zentrische Bewehrungslage bei Probekörpern für Qualitätsüberwachung von Fassadenelementen nach 10 Jahren verfehlt (rechts, Foto: Jan Bielak)

Weiterhin wurden auch Plattenstreifen, Dehnkörper und Verbundkörper aus der Fassade geschnitten und zerstörend geprüft. Die Lageabweichungen waren zwar kleiner als bei den Rückstellproben, lagen aber deutlich oberhalb der heute im Richtlinienentwurf „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ für diese Bauteildicke geforderten Werten. Trotz der Abweichungen konnte in allen Prüfkörpern eine ausreichende Tragfähigkeit nachgewiesen werden. Ein im ursprünglichen Nachweiskonzept angenommener Festigkeitsverlust des (GFK-)Bewehrungsmaterials wurde auch nach 12 Jahren nicht festgestellt.

Die in der Richtlinie vorgeschlagenen Toleranzgrenzen wurden von Rempel in [12] auf Basis von Sägeschnitten an dünnen Platten von vier verschiedenen Fertigteilherstellern abgeleitet. Die Festlegung des Teilsicherheitsbeiwertes für Biegung von 1,3 basiert auf der Einhaltung dieser Grenzen im 90% Quantil. Auf Basis der Erkenntnisse aus zahlreichen Praxisprojekten sind diese Werte projektbezogen kritisch zu prüfen und gegebenenfalls abhängig vom Fertigungsverfahren und den getroffenen Maßnahmen zur Lagesicherung der nichtmetallischen Bewehrung zu erhöhen.

3.2 Schwindrisse, Feuchte und Bewuchs

Je feinmaschiger das Bewehrungsmaterial, desto geringer muss auch das verwendete Größtkorn des gewählten Betons oder Mörtels festgelegt werden. In früheren Sonderforschungsbereichen 528 und 532 wurde dafür der Neologismus „Feinbeton“ geprägt. Diese Feinbetone sind durch einen vergleichsweise hohen Bindemittelgehalt geprägt, und neigen damit zum stärkeren Schwinden, sofern dieses nicht durch Zusatzmittel reguliert wird („Quellmörtel“). In der Folge kann bei hohen Bewehrungsgraden (innere Dehnungsbehinderung) und/oder unzureichender Nachbehandlung eine ausgeprägte Schwindrissbildung auftreten.

Im Innenbereich ist dies ein optisches Problem, wie auf der Unterseite beim dünnwandigen Schalentragwerk des Demonstratorbauwerks des SFB 532 [13, 14]. Im Außenbereich können schwindinduzierte Krakelee-Risse auf Bauteilen ohne Beschichtung oder Abdichtung allerdings Angriffspunkt für Feuchte und biologischen Bewuchs sein. Die nur 20 mm dünnten, mit sechs Lagen ungetränkten Carbontextil bewehrten Tonnenschalen auf dem RWTH-Campus [15], zeigten nach wenigen Jahren einen unschönen Bewuchs in den Rissen (Bild 10, links). Dies ist in Verbindung mit der kapillaren Saugwirkung der ungetränkten Textilien und gleichzeitiger Frostbeanspruchung äußerst kritisch zu werten. In Bild 10, rechts, ist deutlich zu sehen, wie das über die Bewehrungslagen ins Bauteilinnere gezogene Wasser beim Verdunsten Schmutzpartikel zurücklässt. Die dauerhaften Verfärbungen lassen sich, anders als der oberflächliche Bewuchs, nicht mehr entfernen. Welche zerstörerische Kraft Wasser in der

Ebene der (ungetränkten) textilen Bewehrung haben kann wurde durch die Schäden an der Textilbetonbrücke in Kempten (wissenschaftlich begleitet von der TU Dresden [16]) deutlich, über die in der Allgäuer Zeitung berichtet wurde [17].



Bild 10 Biologischer Bewuchs in oberflächlichen Schwindrissen an Beton-Tonnenschalen mit ungetränkter Carbonbewehrung (links, Bild: IMB RWTH); Stirn- und unterseitige Verunreinigungen durch kapillare Saugwirkung der Carbonmatten und Verdunstung (rechts, Bild: IMB RWTH)

Die Kapillarwirkung der Faserbündel kann durch vollständige Tränkung wirksam unterbunden werden, wie durch eigene Untersuchungen mittels MRT gezeigt wurde. Eine Hydrophobierung des Betons kann ein Mittel sein, um das Eindringen von Wasser zu reduzieren; diese muss aber regelmäßig erneuert werden, da sie in ihrer Wirkung nachlässt. Diese sollte unmittelbar nach der Herstellung appliziert werden. Im Fall der in Bild 10 dargestellten Tonnenschalen wurde nach einer sorgfältigen Reinigung hydrophobiert, um künftigen Bewuchs zu verzögern und das Risiko von Frostschäden zu senken. Zusätzliche flächige Kunststoff-Abdichtungsschichten sollten aber beim Bauen mit nichtmetallischer Bewehrung vermieden werden; vielmehr sollten die verwendeten Betone, Nachbehandlungsstrategien und eingesetzten Bewehrungen so aufeinander abgestimmt sein, dass es zu keiner flächigen Schwindrissbildung kommt und Wasser möglichst aus dem Bauteilinneren ferngehalten wird.

4 Fazit und Ausblick

Die im Vergleich zum Stahlbetonbau noch neue Bauweise mit nichtmetallischer Bewehrung erfordert an einigen Stellen ein Umdenken und eine sorgfältigere Planung in frühen Leistungsphasen. Beispielhaft wurden in diesem Beitrag einige Punkte angesprochen, die in vom IMB der RWTH begleiteten Demonstrator- und Praxisprojekten auftraten. Daraus lassen sich folgende „Lessons Learned“ zusammenfassen:

- Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind bei nichtmetallisch bewehrtem Betontragwerken i.d.R. maßgebend für die Bewehrungswahl und sollten frühzeitig schon in der Entwurfsplanung geführt werden.
- Die für die Querkragfähigkeit maßgebende Stelle liegt nicht notwendigerweise im Abstand d vom Auflager. Konzentrierte Einzellasten sind häufig bemessungsmaßgebend.
- Auch wenn Bauteile vermeintlich dünner/schlanker ausgeführt werden können, ist eine ausreichende Auflagertiefe zur Verankerung der hochzugfesten Bewehrung einzuplanen. Diese ist nicht immer kleiner als im Stahlbetonbau.
- Bei mehrlagiger Gitterbewehrung ist die Betonierbarkeit durch schräge Stöße oder verdrehten Ausrichtungen eingeschränkt. Hochfließfähige Betone bzw. SVB sowie geringe Größtkorndurchmesser sind das Mittel der Wahl. Einbringöffnungen sollten wie im Stahlbetonbau geplant werden.
- FVK-Bewehrungen, insbesondere FVK-Gitter, sollten nicht betreten werden. Auch temporäre elastische Verformungen, z. B. durch Mannlast oder Frischbetongewicht, können in die Endlage der Bewehrung im Bauteil eingeprägt werden. Art und Anzahl der Abstandhalter müssen hierauf angepasst werden.

- Ungetränkte Carbonfaserbündel sind anfällig für kapillaren Feuchttetransport und für Außenbauteile ungeeignet. Beton, Bewehrung und Nachbehandlung sind aufeinander abzustimmen, um oberflächliche Schwindrissbildung zu vermeiden.

Der Autor dieses Beitrages plädiert dafür, erkannte Fehler und Verbesserungspotentiale der neuen Bauweise mit nichtmetallischer Bewehrung offener zu kommunizieren und einen größeren Personenkreis am Gelernten teilhaben zu lassen. Nur so kann die Bauweise eine größere Verbreitung und Akzeptanz erfahren und ihren Beitrag zur unbedingt notwendigen Reduktionen von Treibhausgasemissionen im Bausektor leisten.

5 Quellen

- [1] DAFStb-Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung, Gelbdruck-Entwurf. Richtlinie, Ausgabe November 2022.
- [2] *Bielak, J.; Will, N.; Hegger, J.*: Zwei Praxisbeispiele zur Querkraftragfähigkeit von Brückenplatten aus Textilbeton. In: Bautechnik 97 (2020), Heft 7, S. 499-507. <https://doi.org/10.1002/bate.202000037>.
- [3] *Bielak, J.; Rempel, S.; Felber, M. et al.*: Sanierung des Rheinstegs bei Albbrück mit Carbonbeton. In: Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 7, S. 488-497. <https://doi.org/10.1002/best.202100024>.
- [4] *Beckmann, B.; Bielak, J.; Bosbach, S. et al.*: Collaborative research on carbon reinforced concrete structures in the CRC/TRR 280 project. In: Civil Engineering Design, Vol. 3 (2021), Iss. 3, pp. 99-109. <https://doi.org/10.1002/cend.202100017>.
- [5] *Bielak, J.*: Shear in slabs with non-metallic reinforcement. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2021.
- [6] *Bielak, J.; Claßen, M.; Walach, R. et al.*: Redefining the limits of concrete bridge construction with non-metallic reinforcement. In: : Proceedings of 11th International Conference on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2023), Rio de Janeiro, Brasil, 2023.
- [7] *Institut für Massivbau der RWTH Aachen*: Gutachten G-2018-03: Einsatz von Textilbetonplatten als Brückenbelag für den Neubau von vier Fuß- und Radwegbrücken aus Holz über die Rems. RWTH Aachen University, Aachen Ausgabe November 2018.
- [8] *Bielak, J.; Bergmann, S.; Hegger, J.*: Querkraftragfähigkeit von Carbonbeton-Plattenbrücken mit C-förmiger Querkraftbewehrung. In: Beton- und Stahlbetonbau 114 (2019), Heft 5, S. 465-475. <https://doi.org/10.1002/best.201900001>.
- [9] *Helbig, T.; Unterer, K.; Kulas, C. et al.*: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. In: Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 10, S. 676-685. <https://doi.org/10.1002/best.201600058>.
- [10] *Rempel, S.; Will, N.; Hegger, J. et al.*: Filigree Textile-Reinforced Concrete Constructions. In: *Teng, J.G.; Dai, J.G.* (eds.): Proceedings of the Eighth International Conference on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE 2016), Hong Kong, 2016, pp. 525-529.
- [11] *Bielak, J.; Walach, R.; Riederer, J. et al.*: Grenzen des Betonbrückenbaus mit nichtmetallischer Bewehrung neu definiert. In: *Krieger, J.; Isecke, B.* (Hrsg.): 5. Brückenkolloquium - Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken. Techn. Akademie Esslingen e.V. Weiterbildungszentrum, Tagungshandbuch / TAE, Technische Akademie Esslingen Heft 5. Technische Akademie Esslingen, 2022, S. 299-308.
- [12] *Rempel, S.*: Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2018.
- [13] *Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.*: Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete – Part I: Structural design and construction. In: Structural Concrete, Vol. 16 (2015), Iss. 1, pp. 106-114. <https://doi.org/10.1002/suco.201300071>.
- [14] *Scholzen, A.; Chudoba, R.; Hegger, J.*: Thin-walled shell structures made of textile-reinforced concrete – Part II: Experimental characterization, ultimate limit state assessment and numerical simulation. In: Structural Concrete, Vol. 16 (2015), Iss. 1, pp. 115-124. <https://doi.org/10.1002/suco.201400046>.

- [15] *Sharei, E.; Scholzen, A.; Hegger, J. et al.*: Structural behavior of a lightweight, textile-reinforced concrete barrel vault shell. In: Composite Structures, Vol. 171 (2017), pp. 505-514. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.069>.
- [16] *Michler, H.*: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton - Rottachsteg Kempten im Allgäu. In: Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 5, S. 325-334. <https://doi.org/10.1002/best.201300023>.
- [17] *Sentner, J.* Der Leichtbau-Steg über die Rottach in Kempten muss abgerissen werden - nach nur 15 Jahren [online]. In: Allgäuer Zeitung, 2022, https://www.allgaeuer-zeitung.de/allgaeu/kempten/der-leichtbau-steg-ueber-die-rottach-in-kempten-muss-abgerissen-werden-nach-nur-15-jahren_arid-475108.