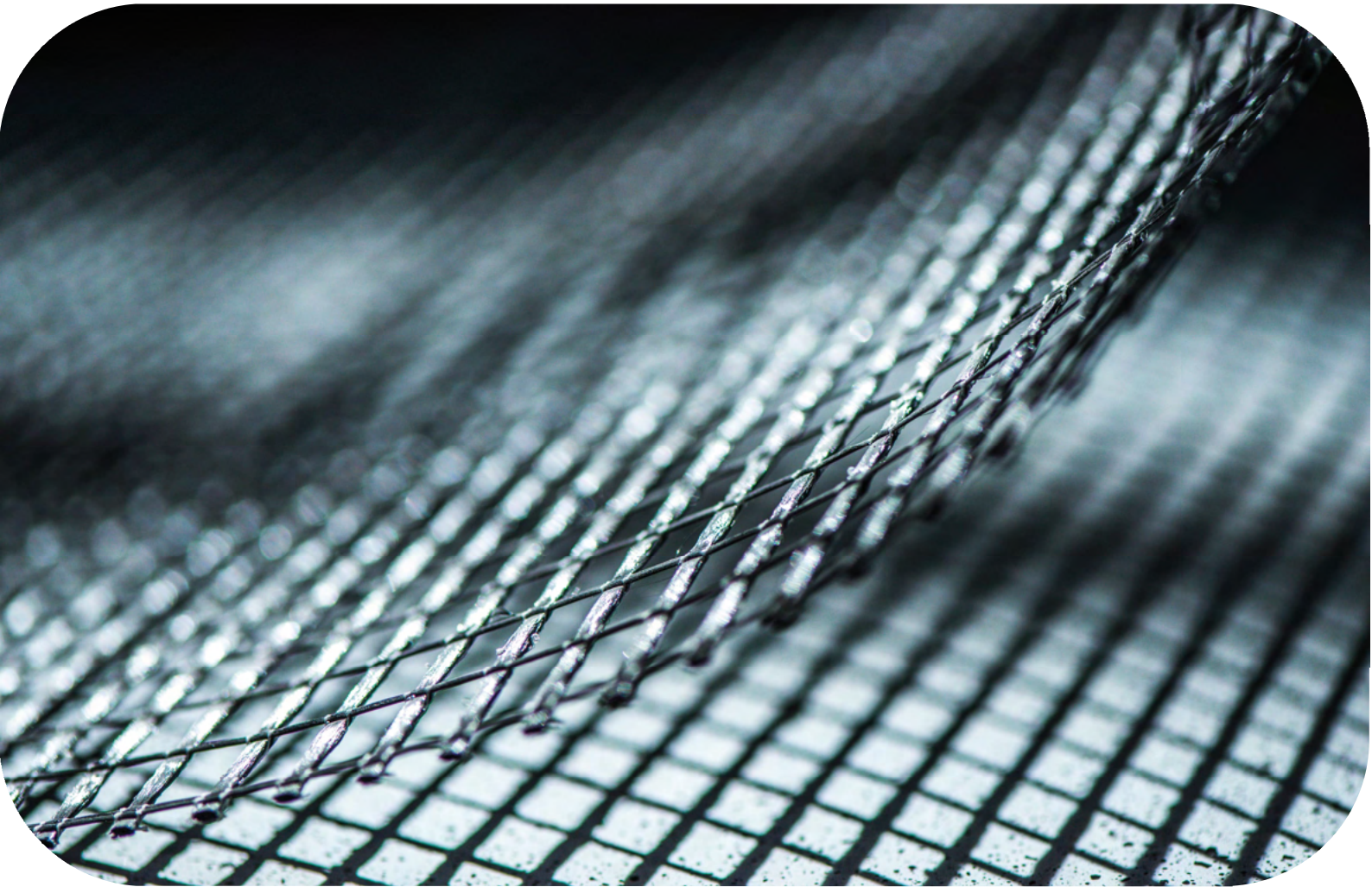
Carbon Concrete Composite

16. Carbonbetontage

Herausgeber:
C³Verband

Tagungsband

24.–25.09. 2024
Dresden



16. Carbonbetontage

«Jede neue Situation verlangt eine neue Architektur.»

- Jean Nouvel

Die Veranstaltung wird unterstützt von:

HOLCIM

K&T ARCHITEKTUR BAUSYSTEME

SFB TRR 280

Wirtschaftsförderung Sachsen

solidian.

ZEISBERG

Inhalt

VORTRÄGE	7
Carbon im Brückenbau – Innovationen aus dem Blick des Auftraggebers	8
Carbonbetonaufbereitung mittels Elektroimpulsverfahren	10
Druckbeanspruchung von Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen – Ergebnisse experimenteller Untersuchungen	12
CARBOrefit®-Verstärkung von historischen Stahlbetonrippendecken mit Hohlziegel-Füllkörpern	14
Materialgerechtes und ressourcenschonendes Konstruieren mit Carbonbeton	16
Leichte Deckenelemente aus vorgespanntem Carbonbeton - Ökologisch, effizient & wirtschaftlich	18
Tragende Fertigbauteile aus vorgespanntem Carbonbeton – Vorstellung wichtiger Pilotprojekte	20
Sichere Ausschreibungen von Carbonbetonbauteilen – mithilfe standardisierter Textbausteine und Kennwerte	22
Ausgeführtes Praxisbeispiel in Anlehnung an die DAfSTb – Richtlinie	24
DAfSTb–Richtlinie einfach erklärt – mittels Erläuterungen und Beispielen aus dem DAfSTb-Heft 660	26
Schnell errichtet – Vollmodulare Straßenbrücke aus Carbonbeton	30
Ermittlung und Beurteilung der Gefährdungen bei der mechanischen Bearbeitung von Carbonbeton	32
Planung und Bau deutlich vereinfacht – durch Zulassung und Richtlinie	34
Smarte Instandsetzung von weißen Wannen mit Konstruktionsmängeln	36
Anforderungen | Handlungsempfehlungen für das Recycling von Carbonbeton	38
Einsatz von recycelten Kohlenstofffasern und rezyklierter Gesteinskörnung für die Carbonbetonbauweise	40
FiberConnect: Sichtbarmachung des perfekten Kunden und Lieferanten im Stoffkreislauf	42
CPC-Bauweise erobert den Hochbau – Nachhaltigkeit zeigen und diskutieren	44

Herstellverfahren der nächsten Generation	46
Textilbetonrückenabdichtung auf Eisenbahngewölbebrücken	48
70m langen Seeblickwegbrücke aus Holz-Carbonbeton	50
Rissbreitenbegrenzung: Zielsichere Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Bewehrungsgittern	52
Biegesteifen Ecken aus Carbonbeton – Konstruktive Lösungen getestet und nachgerechnet	54
Zum Feuerwiderstand vorgespannter Carbonbetondecken	56
Innovative nichtmetallische Verbindungsmittel für dünne Schalen	58
Effizient testen – durch neuen Versuchsaufbau für Carbonbeton-Fugenüberbau von Betonstraßen	60
Effiziente Bauteilüberwachung mit faseroptischen Sensoren	62
Bauen mit rCF-Rebar | Stoffkreislauf geschlossen – mit dem Bewehrungsstab aus recycelten Kohlenstofffasern	64
PARTNER & IMPRESSUM	70
Übersicht der Partner	70
Impressum	74

solidian.
solidian GRID
hat die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
Der Weg für die Planung und den Bau mit Carbonbeton ist jetzt geebnet! solidian GRID ist beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) als Carbon-Bewehrungsgitter erstmalig in Form einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) inklusive einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) zugelassen. solidian GRID Bewehrungen können damit auf Basis der abZ/aBG und
solidian • kelteks
Croatia
Dr. Slavka Rozgaja 3
47000 Karlovac Croatia - EU
Germany
Sigmaringer Straße 150
72458 Albstadt, Germany - EU
Türkiye
Cinarli Mah. Ozan Abay Cad. Ege Perla
No:10/222 35170 Konak
35500 Izmir, Türkiye
EU
build solid.
CERTIFIED
ISO 9001
ISO 14001
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) vom Deutschen Institut für Bautechnik
DIBt
Zulassung
Z-1.6-308
solidian GRID

Carbon Concrete Composite

Vorträge

Carbon im Brückenbau – Innovationen aus dem Blick des Auftraggebers

Die Entwicklung und Erforschung nachhaltiger Materialien und Bauarten ist von großer gesellschaftlicher Bedeutung. Vor Einführung von Regelwerken können Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) bzw. vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen (vBg) für Pilotprojekte insbesondere im Brückenbau einen wertvollen Beitrag leisten.

Wir Ingenieurinnen und Ingenieure können unsere tägliche Arbeit Dank der uns zur Verfügung stehenden Normen und Richtlinien effizient und mit einem äußerst hohen Maß an Sicherheit erbringen. Möglicherweise wird jedoch nur die zweitbeste Lösung umgesetzt, da für eine nachhaltigere und wirtschaftlichere Variante keine Vorschrift vorliegt.
Genau hier müssen wir Ingenieurinnen und Ingenieure uns auf unsere Tugenden, unser Wissen und unsere Kompetenz besinnen.

Richtungsweisende, innovative Materialien und/oder Bauweisen werden erforscht, entwickelt und durch erste Versuche erprobt. Weitere zahlreiche Versuchsreihen folgen. Es kommt der Zeitpunkt, an dem eine Bauweise in der Praxis Anwendung finden muss, um die gewonnenen Erkenntnisse aus der Forschung am Bauwerk umzusetzen.

Für die Wiederherstellung einer Spannbandbrücke in Stuttgart war eine Bewehrung aus Carbonmatten erste Wahl, um die maximal mögliche Dicke der Fahrbahnplatte von 10 cm realisieren zu können. Als Folgeprojekt konnte eine in Ortbeton hergestellte, 70 m lange integrale Holz-Beton-Verbundbrücke geplant und umgesetzt werden, bei der die Überbaubewehrung vollständig aus nicht metallischen Bewehrungsmaterialien besteht. Die Einzelstützweiten der FuR-Brücke betragen beachtliche 30 m.

Eine weitere, am Innenrand gestützte Carbonbetonbrücke steht kurz vor der Realisierung. Die 9 cm dünne Fahrbahnplatte trägt die Lasten durch L-förmige Aussteifungsrippen in das Gesamtsystem ein. Die Führung der nichtmetallischen Bewehrung bedurfte einer intensiven Planung und versuchstechnischen Begleitung in der Formfindung.

Am Rande sei die neue, mehrfach preisgekrönte Stadtbahnbrücke über die A8 erwähnt, deren Seile des Netzwerkbogens aus Carbon bestehen.

In den Landesbauordnungen wird der Einsatz von nicht geregelten Bauweisen und Materialien nicht ausgeschlossen. Durch die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBg) stehen uns Ingenieurinnen und Ingenieure Instrumente zur Verfügung, das maximal Beste für die gestellte Aufgabe umzusetzen und so einen wertvollen Beitrag für die nachfolgenden Generationen zu leisten.

Als Auftraggeber müssen wir all unser Wissen und unsere Erfahrung in den Prozess mit einbringen. Am Ende müssen wir die Zustimmung erteilen und Verantwortung übernehmen - die Planungshaftung der Berater ist endlich! An dieser Stelle sei auf die besondere Sorgfaltspflicht aller Wissenschaftler, Materialhersteller und Fachberater hingewiesen.

Dennoch möchte ich Sie ermutigen, Innovationen im Brückenbau den Weg mit Hilfe einer ZiE bzw. aBg zu bereiten. In der Planung und Bauausführung von neuartigen Bauweisen werden sich einige Aufgabenstellungen ergeben. Am Ende steht jedoch eine große Menge an positiven neuen Erkenntnissen und die wertvolle Zuarbeit für künftige Regelwerke. Nicht zu vergessen: der Zugewinn an Freude am Beruf des Bauingenieurs!

Ein Zeitpuffer von ca. einem Jahr sollte für eine Sonderbauweise eingeplant werden. Bei der Umsetzung von Projekten kann es auch aus anderen Gründen zu Verzögerungen kommen.

Die Kommunen sind Straßenbaulastträger und somit selbst für die Erteilung einer ZiE/aBg verantwortlich. Bauwerke von Bund und Land bedürfen der Genehmigung durch das BMDV bzw. der Landesbehörden. Diese Zustimmung ist wiederum Grundlage für den Abschluss der bautechnischen Prüfung durch den Prüfingenieur.

Unterstützen Sie durch Ihren Mut, Ihr Engagement und Ihr Verantwortungsbewusstsein die wertvolle Arbeit aller Forschenden zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung durch Innovation!

Dipl.-Ing.
Joachim Andelfinger
studierte nach Abschluss einer Berufsausbildung an der Universität Stuttgart Bauingenieurwesen. Von 1993 bis 2011 war er im Ingenieurbüro Leonhardt, Andrä und Partner, Stuttgart als Projektleiter im Brückenbau bei diversen Großprojekten im In- und Ausland tätig. Von 2011 bis 2016 betreute er die Planung von Bundesautobahn- und Bundesstraßenbrücken im Regierungspräsidium Stuttgart, Referat Ingenieurbau. Seit 2016 ist er Sachgebietsleiter ‚Neubau Brücken und Sonderbauwerke' im Tiefbauamt der Landeshauptstadt Stuttgart.

Carbonbetonaufbereitung mittels Elektroimpulsverfahren

Versuchsstand zur Carbonbetonaufbereitung mittels Elektroimpulsverfahren (© Erik Anders)

Die Trennung der Carbonfasern aus der Betonmatrix ist ein entscheidender Schritt, um den Carbonstoffkreislauf zu schließen. Sie hängt maßgeblich von den verfügbaren Technologien ab. Konventionelle Prozesse, wie Brechen, Schneiden oder Rütteln, können zwar einen Großteil der Faser aus der Betonmatrix abtrennen, aber die Rückstände bzw. die erreichte Faserqualität lassen nur begrenzte Möglichkeiten zur Nachnutzung der Fasern zu. Eine vielversprechende Erweiterung der Technologien stellt das Elektroimpulsverfahren (EIV) dar.

Es basiert auf der Wirkung elektrischer Entladungen durch den Feststoff und der durch die Entladung erzeugten Druckwelle. Dazu werden eine aktive Impulselektrode, und eine passive, geerdete Elektrode mit dem zu bearbeitenden Stoff kontaktiert. Der Stoff kann sich dabei zwischen den Elektroden oder unterhalb der Elektroden befinden. Sowohl der Stoff als auch die Elektroden werden von einem flüssigen Medium, wie bspw. Leitungswasser, umgeben. Wenn geeignete Spannungsimpulse angelegt werden, verhält sich das Fluid wie ein Isolator. Als geeignete Spannungsimpulse werden Spannungen größer als 100 kV bei Spannungsanstiegszeiten von weniger als 120 ns bezeichnet. Der Energiebedarf des Verfahrens wird dabei durch die Impulsenergie und die Impulswiederholrate definiert. Anschlussleistungen von 2 bis 15 kW sind dabei üblich, während im Impuls selbst kurzzeitig Leistungen von > 1 MW umgesetzt werden.

Der Entladungsweg wird durch die elektrischen Eigenschaften des zu bearbeitenden Stoffes bestimmt. Carbonbeton ist ein idealer Einsatzbereich für das EIV, da in dieser Anwendung ein elektrisch leitfähiger Stoff (Carbon) mit einem elektrischen Isolator (Beton) kombiniert wird. Das EIV kann hier seine Vorteile hinsichtlich Selektivität ausspielen.

Das EIV wird seit mehreren Jahren an der TU Dresden erforscht. Es wurden EIV-basierte Prototypen und Versuchsanlagen für verschiedene Anwendungen entwickelt und umgesetzt. Dazu gehören neben Bohrwerkzeugen auch eine Anlage für die kontinuierliche Erzaufbereitung.

Basierend auf dieser Erfahrung wird im Rahmen des Forschungsverbundes WIRreFa im Projekt AMELIE ein zunächst diskontinuierlich arbeitender Demonstrator entwickelt und umgesetzt. Mit diesem wird die Funktion des EIV für Carbonbeton sowie die Skalierbarkeit dieses Demonstrators unter ökonomischen Gesichtspunkten hin zu industriell relevanten Durchsatzmengen untersucht.

Die grundsätzliche Machbarkeit wurde in Vorversuchen bereits nachgewiesen. Für die Entwicklung wurden zunächst energieoptimale Prozessparameter anhand von Versuchsreihen bestimmt. Das Ziel hierbei war, minimale Impulsspannungen und Impulsenergien zu ermitteln und eine möglichst vollständige Trennung von Fasern und Beton zu erreichen. Anhand dieser Parameter wurden anschließend sowohl die notwendigen Arbeitselektroden als auch die Stoßspannungsquelle ausgelegt und umgesetzt. Beide Komponenten wurden in einem eigens dafür entworfenen Versuchsbehälter erprobt.

Der so entstandene Versuchsstand wird nun für weitere Materialtests verwendet. Dazu gehört die weitere Anpassung der Impulsparameter und die Validierung von Berechnungsmodellen zur Prognose notwendiger Prozessparameter in Abhängigkeit des Aufgabegutes. In den Fokus rücken dabei aufgrund zunehmender Nachfrage auch die Aufbereitung von Kompositwerkstoffen oder Baustoffen mit Beschichtungen, wie Teer, Kaltanstrichen oder Farben.

Der letzte Projektschritt wird die Modifikation der Stoßspannungsquelle für einen Dauerbetrieb sein. Zudem wird die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens im Kontext bestehender Aufbereitungstechnik beurteilt.

Erik Anders, geboren 1982, hat in Dresden Maschinenbau mit der Vertiefung Baumaschinentechnik studiert. Seit 2007 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Baumaschinen. Zu seinen Forschungsgebieten gehören innovative Abtragverfahren für Baustoffe und Naturstein. Über die Umsetzung des Elektroimpulsverfahren in der tiefen Geothermie hat er 2021 promoviert. Als Leiter der Arbeitsgruppe Elektroimpulsverfahren entwickelt er Verfahren für den Bereich Bohren, Scaling-Removal, Mining und Aufbereitungstechnik.

Druckbeanspruchung von Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen – Ergebnisse experimenteller Untersuchungen

Versuchsproben (© Lukas Bujotzek)

Nichtmetallische Bewehrungsmaterialien sind spätestens seit der Einführung der DAfStb-Richtlinie "Nichtmetallische Bewehrung" Anfang 2024 deutschlandweit auf dem Vormarsch. Während die Vorteile dieser Materialien unter Zugbeanspruchung seit vielen Jahren Stand der Technik sind, wird eine Verwendung von Faserverbundkunststoff (FVK) - Bewehrungen unter Druckbeanspruchung derzeit von führenden Richtlinien ausgeschlossen. Die aktuelle Fassung der DAfStb-Richtlinie für nichtmetallische Bewehrung sieht bei hohen Bewehrungsgraden ($\rho > 2{,}50\%$) aufgrund einer fehlenden adäquaten Druckfestigkeit der nichtmetallischen Bewehrung eine Abminderung der Betondruckfestigkeit vor. Diesen Umstand nahmen in den vergangenen Jahren verschiedene Forschende zum Anlass, um die Materialeigenschaften von FVK-Bewehrungsstäben unter Druckbeanspruchung experimentell zu bestimmen. Aufgrund fehlender Prüfvorschriften konnten jedoch kaum verlässliche und reproduzierbare Daten erzeugt werden.

Ziel von Untersuchungen am Institut für Massivbau der TU Darmstadt war es daher, in einem ersten Schritt ein Prüfkonzept zur Ermittlung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften stabförmiger FVK-Bewehrung zu erarbeiten und auf dieser Basis Experimente durchzuführen [1]. Hinsichtlich des Versuchsaufbaus bezog man sich auf Vorschriften aus der Laminattechnik. So wurde der Prüfaufbau mit einem Schlankheitsverhältnis von 6 sowie einer indirekten Lasteinleitung festgelegt. Ergebnisse von 95 Versuchen an FVK-Stabbewehrung aus Glas- (GFK), Carbon- (CFK) und Basaltfasern (BFK) zeigten Materialeigenschaften, welche mit theoretischen Überlegungen übereinstimmten. Der E-Modul unter Druckbeanspruchung entspricht unabhängig von den untersuchten Parametern (Stabdurchmesser, Faser- und Matrixart) dem E-Modul unter Zugbeanspruchung. Dagegen wurden verschiedene Versagensmodi beobachtet, welche mit unterschiedlich hohen Druckfestigkeiten von 465 MPa (BFK) bis 781 MPa (GFK) einhergingen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass, aufgrund der hohen Steifigkeit für CFK-Stäbe, die geringste Bruchstauchung mit 3,8 ‰ ermittelt wurde.

Der zweite Teil der experimentellen Untersuchungen befasste sich mit dem Langzeitverhalten von GFK-Bewehrungsstäben unter Druckbeanspruchung [2]. Dazu wurden GFK-Bewehrungsstäbe über einen Zeitraum von 1000 h unter konstanter Druckbeanspruchung getestet. Die resultierenden Kriechraten ($\leq 0{,}05$) liegen in der gleichen Größenordnung wie die Kriechzahlen unter Zugbeanspruchung, was aus dem ähnlichen mikromechanischen Hintergrund der beiden Verformungsmechanismen resultiert.

Neben dem Kriechverhalten der GFK-Bewehrungsstäbe wurde der Einfluss des GFK-Kriechens auf das Lastumlagerungsverhalten FVK-bewehrter Betonproben unter Druck untersucht.

Dazu wurden insgesamt 18 Proben über 190 Tage bei unterschiedlichen Spannungsniveaus belastet. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen eine ausgeprägte Umlagerung von Spannungen vom Beton auf die GFK-Bewehrung. Bei einer abschließenden Untersuchung der Tragfähigkeit konnte kein negativer Effekt des FVK-Kriechens und der Lastumlagerung auf das Tragverhalten der bewehrten Proben erkannt werden. Der Anteil der FVK-Bewehrung an der Gesamttragfähigkeit lag erwartungsgemäß zwischen 19 und 24 %.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen ist eine generelle Vernachlässigung von FVK-Bewehrung unter Druckbeanspruchung als unwirtschaftlich zu bewerten. Die Einführung eines einheitlichen Prüfkonzeptes für nichtmetallische Stabbewehrung unter Druckbeanspruchung wird als notwendige Voraussetzung betrachtet, um Herstellern die Möglichkeit zu geben in den Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen entsprechende Materialkennwerte zur Verfügung zu stellen.

[1] Bujotzek, L., Beck, D., Apostolidi, E., and Waldmann, D. 2024: Experimental and statistical investigations of the material properties of FRP reinforcement in compression. Construction and Building Materials, Vol. 414. DOI=10.1016/j.conbuildmat.2023.134782.
[2] Bujotzek, L., Apostolidi, E., and Waldmann, D. 2024: Novel model for the determination of stress redistribution in GFRP reinforced concrete members under long-term compression based on experimental results. Construction and Building Materials 432, 136619. DOI=10.1016/j.conbuildmat.2024.136619.

Lukas Bujotzek M. Sc.

studierte Bauingenieurwesen an der TU Darmstadt. Danach arbeitete er ein Jahr als Projektingenieur in der Tragwerksplanung im Bereich des konstruktiven Wasserbaus. Seit Oktober 2019 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Darmstadt wo er im Bereich der nichtmetallischen Bewehrung forscht. In seiner Dissertation befasst sich Herr Bujotzek mit dem Materialverhalten von FVK-Bewehrung unter Druckbeanspruchung. Seit 2024 ist er Mitglied im DAfStb - Unterausschuss "Nichtmetallische Bewehrung".

CARBOrefit® - Verstärkung von historischen Stahlbetonrippen-decken mit Hohlziegel-Füllkörpern

Mit CARBOrefit® verstärkter Deckenstreifen beim Belastungsversuch (© Simeon Burkhardt)

Im Rahmen des im Jahr 2022 begonnenen Umbau- und Neubauprojektes ‚Revitalisierung des Deutschen Optischen Museums' in Jena soll u. a. das 1924 errichtete Bestandsgebäude der ersten deutschen Optikerschule für den Museumsbetrieb fit gemacht werden. Die vorhandenen Stahlbetonrippendecken des fünfgeschossigen Gebäudes müssen für die Museumsnutzung mit 500 kg/m² Nutzlast nachgerechnet werden. Gegenüber den bauzeitlichen Nutzlastansätzen von teils nur 200 kg/m² ergeben sich damit nicht unerhebliche Laststeigerungen. Die Stahlbetonrippendecken sind in Abgrenzung zu den bauzeitlich sehr gebräuchlichen Stahlsteindecken mit Hilfe von Hohlziegel-Füllkörpern als verlorener Schalung hergestellt. Im Unterschied zu diesen beteiligen sich die Hohlziegel jedoch nicht am Tragverhalten. Es liegt ein einachsig tragender Deckenquerschnitt aus Stahlbeton-Stegen und Obergurten aus bewehrtem Aufbeton vor. Querbewehrung im Aufbeton oder eine Querkraftbewehrung in den Stegen ist nicht vorhanden.

Nachdem in einem ersten Vorplanungskonzept der Austausch der historischen Decken gegen neue Stahlbetonflachdecken im Raum stand, wurde die IngenieurGruppe Bauen für die weitere Tragwerksplanung hinzugezogen und ein nachhaltiges Konzept zur Erhaltung der Deckentragwerke entwickelt. Dieses sieht eine lastneutrale einlagige Verstärkung mit CARBOrefit® an den Deckenunterseiten vor. Die Decken, die als Zwei- und Dreifeldsysteme in Gebäudequerrichtung von Außenwand über zwei Mittellängswände bzw. Unterzüge zu Außenwand spannen, sollen dabei nur an der Unterseite verstärkt werden, da oberseitig historische Fußbodenbeläge zu erhalten sind. Eine Verstärkung im Bereich von Stützmomenten kann somit nicht erfolgen.

Der Einsatz von CARBOrefit® zur Verstärkung von Stahlbetonrippendecken mit Hohlziegel-Füllkörpern ist in Deutschland bisher nicht erprobt und auf Grund von Abweichungen zur gültigen AbZ ‚CARBOrefit® - Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton' bauaufsichtlich nicht geregelt, sodass eine Zustimmung im Einzelfall erwirkt werden muss. Bei der Planung der hierfür erforderlichen Bestanduntersuchungen und Belastungsversuche an verstärkten Deckenstreifen, sowie der Antragsstellung, wurde die IngenieurGruppe Bauen durch die Carbocon GmbH aus Dresden unterstützt. Die Durchführung der Bestanduntersuchungen und Belastungsversuche erfolgte durch das Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden. Gutachter für den Antrag auf ZiE ist Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach.

Das Verstärkungskonzept für die historischen Decken sieht den flächigen Auftrag einer einlagigen Schicht CARBOrefit® vor. Eine Übertragung der infolge Biegung auftretenden Schubkräfte von der Carbonbetonschicht in den 6 cm breiten Betonsteg der Rippendecke soll durch eine unterseitige Reprofilierung des Steges mit einem faserverstärkten PCC-Betonersatz erfolgen. Für die Freilegung der Betonstege an der Deckenunterseite werden die Hohlziegel geöffnet und anschließend durch einen Hartschaumstoff aufgefüllt, sodass über einen Ausgleichsmörtel eine flächige Grundlage für den Auftrag des Carbonbetons geschaffen wird.

Mit den in Bestandsuntersuchungen gewonnen Materialparametern, konnten alle erforderlichen statischen Nachweise für eine ausreichende Tragfähigkeit bei gestiegenem Nutzlastniveau geführt werden. Dabei wurden die materialseitigen Teilsicherheitsbeiwerte auf Grundlage des DBV-Merkblatts ‚Bauen im Bestand – Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte' reduziert. Die Belastungsversuche an zwei ausgewählten und vorab mit CARBOrefit® verstärkten Deckenstreifen bestätigen die rechnerischen Ergebnisse. Bei einer mittels Belastungsrahmen aufgebrachten maximalen Zielbelastung von 10,5 kN/m² zeigte sich ein rein lineares Verformungsverhalten mit Verformungen bis max. 2,3 mm. Schädigungen in Form von Rissen oder Abplatzungen traten nicht auf. Auf Basis dieser Ergebnisse wird die Planung weitergeführt.

Dipl.-Ing. (FH) Simeon Burkhardt M. Eng. studierte zunächst Bauingenieurwesen an der FH Potsdam. Anschließend vertiefte der sein Wissen im Bereich des Bauens im Bestand in einem Masterstudiengang für Bauerhaltung. Seit 2009 ist er bei der IngenieurGruppe Bauen tätig. In seiner Funktion als Gruppenleiter ist er ab 2020 mitverantwortlich für den Berliner Standort des mittelständigen Ingenieurbüros mit Leistungsschwerpunkten in der Tragwerksplanung und der bautechnischen Prüfung. Sein beruflicher Schwerpunkt liegt im Umbau und der Instandsetzung vorhandener Bauwerke des Hochbaus.

Materialgerechtes und ressourcenschonendes Konstruieren mit Carbonbeton

Carbonbeton ermöglicht sehr dünne und filigrane Bauteile. Durch bloße Substitution der Bewehrung von Stahl durch Carbon können bereits der Materialverbrauch gesenkt und Ressourcen geschont werden. Doch das ist nur der Anfang. Ein weitaus größeres Potential an Ressourcenschonung und an CO2-Einsparung kann Carbonbeton entfalten, wenn nicht nur das Bewehrungsmaterial substituiert wird, sondern wenn die Konstruktion der Bauteile materialspezifisch auf Carbonbeton maßgeschneidert ist.

Um Carbonbeton-spezifische Konstruktionsstrategien zu entwickeln, ist die Vergegenwärtigung der zentralen Eigenschaften dieses Komposits wichtig. Carbon ist inert und korrosionsbeständig. Dies erfordert eine geringe Betondeckung. Zusammen mit einer hohen Materialeffizienz führt dies zu sehr dünnen und filigranen Bauteilen. Durch die Verwendung einer textilen Bewehrung eignet sich der Carbonbeton sowohl für ebene, als auch für gekrümmte Bauteile und darüber hinaus auch für gefaltete Strukturen. Für alle diese Strukturformen erfolgt die Herstellung aus flächigen Teil-Bauteilen oder Halbzeugen heraus. Die Flächigkeit und die Korrosionsbeständigkeit der textilen Bewehrung sind zwei zentrale Eigenschaft von Carbonbeton und bilden den Ausgangspunkt für die Entwicklung neuer, materialgerechter Konstruktionsansätze.

Bei der Untersuchung neuer Konstruktionsansätze stehen zunächst Tragwerke mit flächiger Umrandung wie Wände und Decken im Mittelpunkt, da diese etwa 90 % der Bauaufgaben entsprechen. Das Ziel ist nicht die Formoptimierung eines Carbonbeton-Bauteils für einen speziellen Lastfall, sondern die Entwicklung von Konstruktionsprinzipien, mit denen Bauteile für verschiedene, wechselnde Lastsituationen gebaut werden können. Dabei wird auch eine perspektiv industrielle Herstellung einbezogen.

Für Carbonbeton ist das Verhältnis aus Festigkeit zu Steifigkeit ca. 4–5mal höher als für Stahlbeton. Das äußert sich darin, dass für klassische Rechteckquerschnitte Carbonbetonbauteile hohe Durchbiegungen bzw. Deformationen aufweisen. Wird für Stahlbeton und für Carbonbeton quantifiziert, für welche Biegeschlankheiten die Tragfähigkeit oder aber die Deformationskriterien bemessungsentscheidend sind, kann dabei nachgewiesen werden, dass für Carbonbeton-Rechteckquerschnitte weitaus häufiger das Deformationskriterium relevant wird als für Stahlbeton [1]. Wenn das Deformationskriterium bzw. die Gebrauchstauglichkeit relevant wird, bedeutet dies eine geringe Materialauslastung und – letztendlich – Ressourcenverschwendung. Um sowohl die Grenzwerte für die Gebrauchstauglichkeit einzuhalten als auch eine ressourceneffiziente Materialausnutzung zu erzielen, sind andere Konstruktionen erforderlich, bei denen Biegung vermieden wird und Normalkräfte dominieren.

Um solche neuen Konstruktionsstrategien zu entwickeln, werden unterschiedliche Ansätze erforscht: Schalenstrukturen im Inneren von Bauteilen, auf algebraischen Triangulierungen basierende gefaltete Strukturen (s. Bild) und gitterrostartige Strukturen. Außerdem stehen Fugen und Kreuzungspunkte von Träger-Teilstrukturen im Fokus. Außerdem wird untersucht, wie die effektive Steifigkeit durch Vorspannung erhöht werden kann. Dabei hat sich gerade für Carbonbetonbauteile die chemische Vorspannung als vielversprechende Methode erwiesen. Um materialgerechtes Konstruieren zu ermöglichen, ist die genaue Charakterisierung des Carbonbetons und die Untersuchung der Spannungsübertragungsmechanismen essentiell. Dies gilt umso mehr, wenn mit Carbonbeton neue, klinkerreduzierte und damit CO2-ausstoßarme Betonrezepturen verwendet werden können.

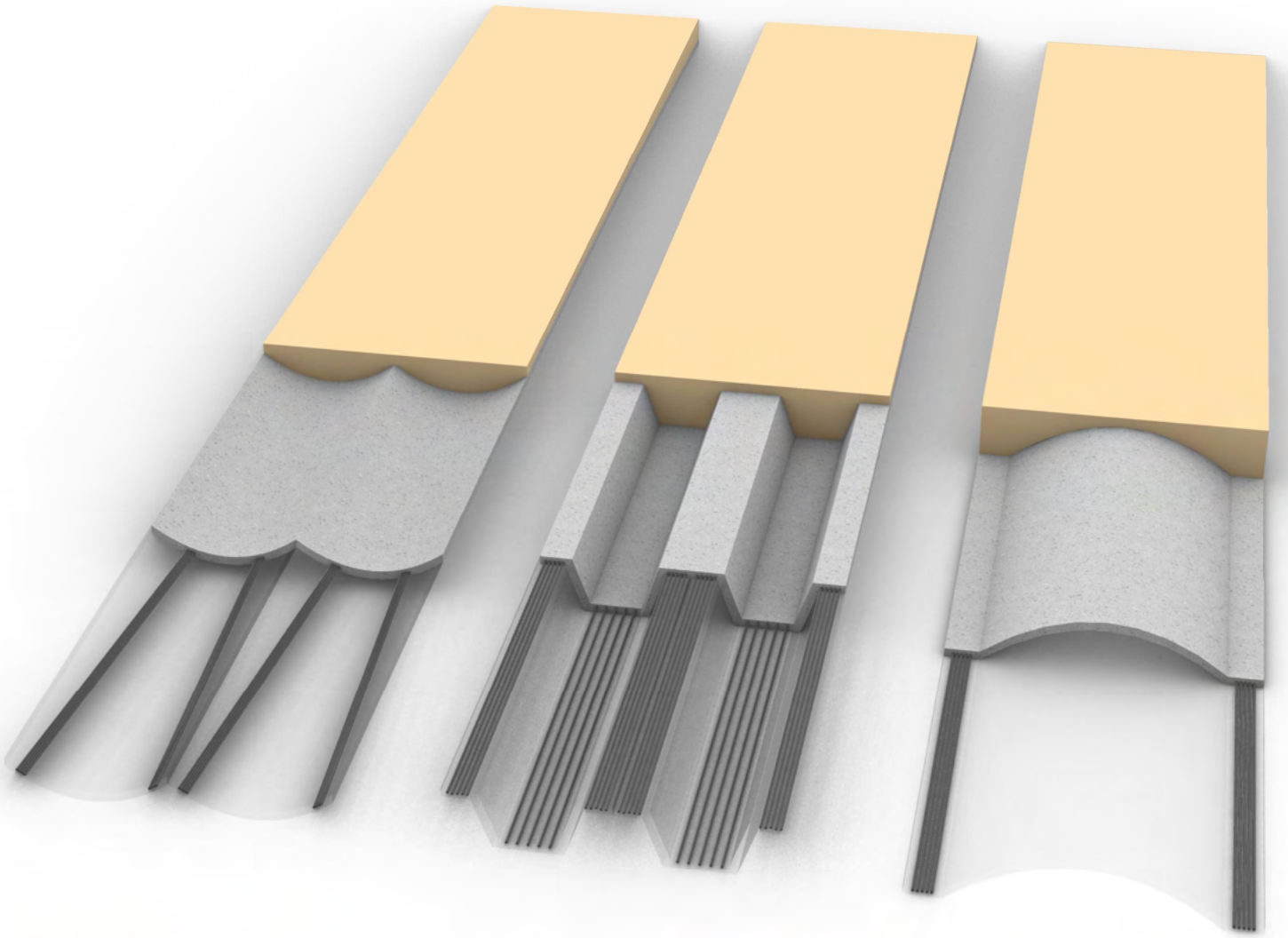
[1] Spartali, H.; Hegger, J.; Beckmann, B.; Chudoba, R.: Closed-form design concept for fully utilized FRP-reinforced rectangular concrete cross-sections accompanied by experimental validation on carbon-reinforced beams. Structures, 61 (2024), 106042, 22 p, doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106042

Prof. Rostislav Chudoba verbindet Grundlagenforschung im Bereich Carbonbeton mit der Entwicklung innovativer Konstruktionsansätze. Während seiner langjärigen Tätigkeit am Institut für Massivbau der RWTH Aachen hat er zahlreiche DFG-Projekte zur Entwicklung von Modellierungs-, Charakterisierungs- und Bemessungsansätzen für Carbonbeton erfolgreich geleitet. Diese Erfahrungen bringt er aktuell im Rahmen von internationalen Netzwerken (RILEM) und als Aachener Standortsprecher des SFB Transregio 280 - Materialminimierte Konstruktionsansätze für Carbonbeton in die koordinierte Weiterentwicklung ein.

Außerdem sind weitere Forscherinnen und Forscher an dieser Publikation beteiligt, namentlich: Viviane Adam, Martin Claßen, Silke Scheerer, Steffen Marx und Birgit Beckmann.

Leichte Deckenelemente aus vorgespanntem Carbonbeton – ökologisch, effizient & wirtschaftlich

Im Projekt CaPreFloor untersuchte Geometrien für vorgespannte Deckenelemente aus Carbonbeton (Grafik © TU Berlin)



Im Verbundforschungsprojekt CaPreFloor wird im Zeitraum 2023 bis 2026 ein ressourceneffizientes Deckensystem aus Fertigteilen mit maximal 10 cm Betondicke für den Hochbau entwickelt. Dabei wird die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigt, vom Entwurf über die Herstellung bis hin zur Installation vor Ort.

Das Projekt wird durch ein interdisziplinäres Team aus Forschung und Praxis bearbeitet. Forschungsrelevante Themen werden vertreten durch die TU Berlin (Koordination und Tragverhalten), die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Brandschutz) und die Hochschule für Technik Stuttgart (Bauakustik). Die Themen Tragwerksplanung und Baupraxis werden durch Züblin und schlaich bergermann partner bearbeitet. Die SKM GmbH (Anlagenbau), Ginkgo-Projektentwicklung GmbH (Vorspanntechnik) und thomas betonbauteile GmbH (Betonfertigteile) sind für die Entwicklung einer automatisierten Produktionsanlage verantwortlich.

In der Entwurfsphase werden vier Geometrien gegenübergestellt: Plattenbalken, Faltwerk, Hyperboloidschale und Tonnenschale. Zuerst erfolgt eine statische Vorbemessung der Elemente für ein übliches Bürogebäude. Danach wird ihr Anwendungspotential in den Kategorien Brandschutz und Schallschutz, Wirtschaftlichkeit, Praktikabilität, Ökobilanz und Wiederverwendbarkeit bewertet. Das leistungsfähigste System soll bis zur Praxisreife entwickelt werden. Dafür ist ein ausführliches Versuchsprogramm mit Klein- und Großversuchen in den Bereichen Tragverhalten, Brandschutz und Bauakustik geplant.

Das bauakustische Verhalten der Deckenelemente wird zunächst mit vereinfachten Vorstudien zum bewerteten Norm-Trittschallpegel mit Finite-Elemente-Software untersucht. Erste Ergebnisse zeigen, dass die oben genannten Geometrien gegenüber einer Platte mit gleicher Dicke leicht verbesserte Werte aufweisen. Dennoch können die dünnen Deckenelemente allein die Mindestanforderungen an den Trittschallschutz nach DIN 4109:2018 nicht einhalten, sodass Verbesserungsmaßnahmen wie z.B. fließender Estrich oder abgehängte Decken erforderlich sind. Im nächsten Schritt werden Messungen an Platten mit verschiedenen Vorspanngraden durchgeführt, um Erkenntnisse zum bauakustischen Verhalten von vorgespanntem Carbonbeton zu gewinnen und eine Grundlage für weitere Finite-Elemente-Simulationen zu schaffen.

Das Verhalten von Carbonbeton unter Hochtemperatureinfluss wird zunächst anhand von Kleinversuchen untersucht. Schwerpunkte sind die Abplatzneigung des Betons, das Erwärmungsverhalten der dünnwandigen Elemente sowie das Trag- und Verbundverhalten.

Es werden CFK-Gelege mit acrylat- und epoxidharzbasierter Tränkung eingesetzt. Aus diesen und weiteren Versuchen sollen Erkenntnisse zur Weiterentwicklung der Betonrezeptur, Wahl der Gelege und Planung des konstruktiven Brandschutzes gewonnen werden.

Die Herstellung der Deckenelemente soll im industriellen Maßstab erfolgen. Dafür wird ein Normalbeton entwickelt, der mindestens Konsistenzklasse F6 besitzt, um trotz kleiner Gitterweiten eine gute Betonierbarkeit zu gewährleisten. Darüber hinaus wird ein günstiges Verhältnis aus hoher Frühfestigkeit für ein frühzeitiges Ablassen und einem möglichst geringen Treibhauspotential angestrebt. Die Fertigung der im sofortigen Verbund vorgespannten Elemente erfolgt in einem Spannrahmen. Es wird eine Konfektionierungsanlage entwickelt, in der die Gelege zugeschnitten und mit Ankerkörpern aus Kunststoff versehen werden, die das Vorspannen mehrerer Lagen mit einem Greifer ermöglichen.

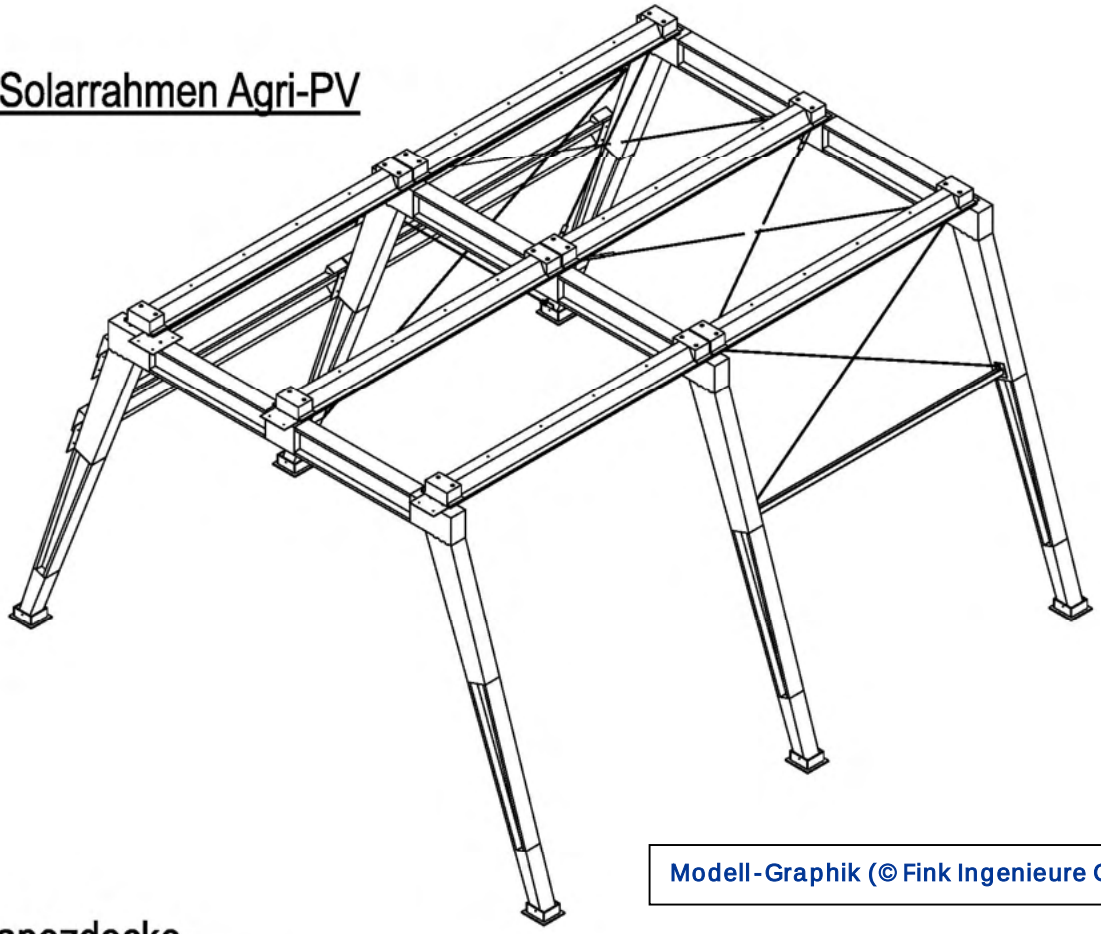
Im Forschungsprojekt CaPreFloor werden materialeffiziente Deckenelemente aus vorgespanntem Carbonbeton für den üblichen Hochbau entwickelt. Das Projekt leistet somit einen Beitrag zum Transfer dieser Bauweise in die Baupraxis.

Dieser Text entstand unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Ahmad Eiz Eddin, Ludwig Stelzner, Dustin Häßler, Sascha Hothan), der Hochschule für Technik Stuttgart (Steffi Reinhold, Lucas Heidemann, Berndt Zeitler), der thomas betonbauteile GmbH & Co. KG (Heiko Theuerkauf), der SKM GmbH (Steffen Söll), der Ginkgo Projektentwicklung GmbH (Tankred Lenz, Lorenz Staub), der Ed. Züblin AG (Jale Früke, Duc Le), schlaich bergermann partner se (Boris Reyher) und der TU Berlin (Mike Schlaich).

Herr Dipl.-Ing. Tankred Lenz gelang das serienfähige Vorspannverfahren von Carbonbeton in Fertigteilbauweise zu entwickeln und zu patentieren. Dünne, steife Schalenkonstruktionen wurden in Kleinserie gefertigt bzw. zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit als Verstärkung eingesetzt.

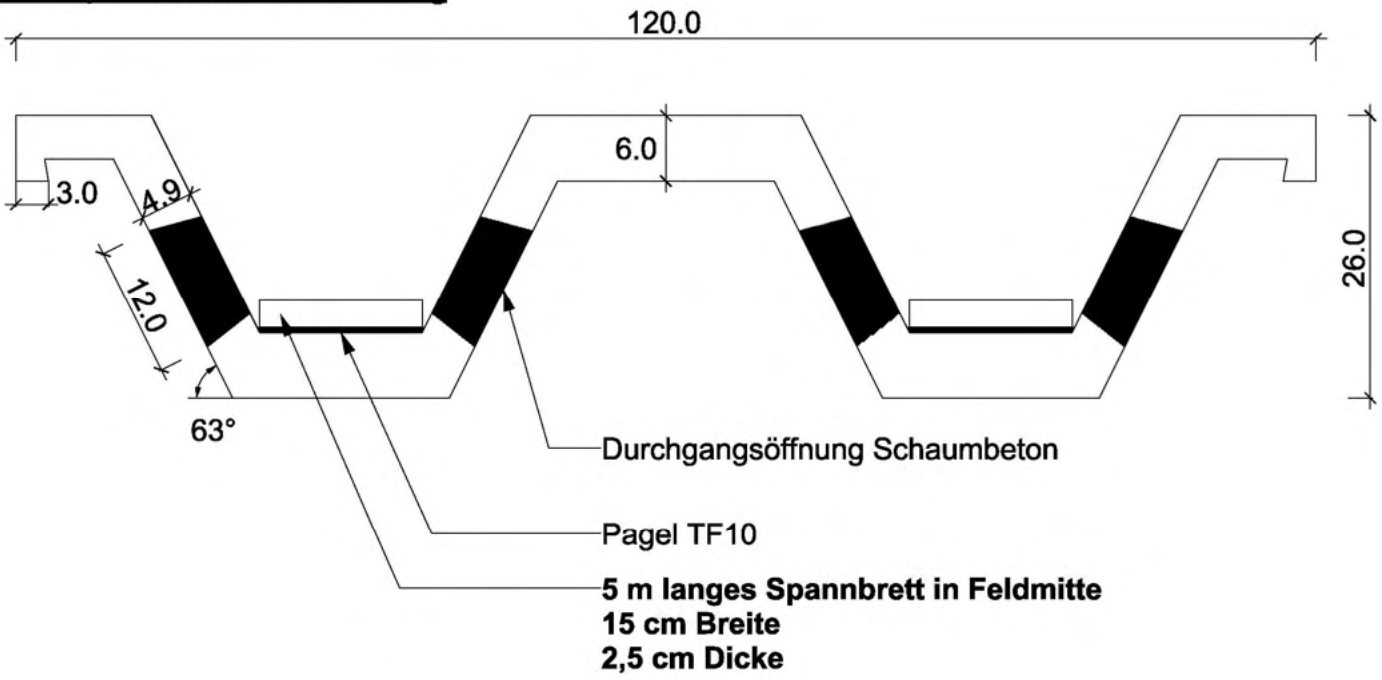
M.Sc. Max Dombrowski arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin am Entwurf und der Bemessung materialeffizienter Deckenelemente aus vorgespanntem Carbonbeton. Nach seinem Abschluss in Bauingenieurwesen an der TU Berlin war er fünf Jahre bei schlaich bergermann partner tätig, zuletzt als Projektleiter für Bautechnische Prüfung.

Isometrie Solarrahmen Agri-PV



Modell-Graphik (© Fink Ingenieure GmbH)

Schnitt Trapezdecke
mit Spannbrettverstärkung



Modell-Graphik (© GINKGO Projektentwicklung GmbH)

GINKGO Projektentwicklung GmbH (Dresden), eines der führenden Unternehmen zur wirtschaftlich-technologischen Entwicklung von vorgespanntem Carbonbeton, konzentriert sich seit 2012 auf die Entwicklung von vorgespannten Carbonbetonfertigteilen, die Vorteile gegenüber der herkömmlichen nicht vorgespannten Bauweise anbieten und die Anforderungen an eine dauerhafte, umweltfreundliche und leichte Ausführung erfüllen.

Dieses Jahr soll ein neuartiges Dachsystem mit linienförmiger Nachverstärkung vorgestellt werden, welches im Jahr 2024 die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) zur Anwendung als Fertigteil für ein Bauvorhaben erhalten hat. In einem weiteren Pilotprojekt werden biegesteife 3-teilige Rahmen in Fertigteilbauweise unter Verwendung einer hybriden Carbon- und Stahlbewehrung verwendet, die als Stützkonstruktionen für Agri-PV-Anlagen und Überdachungen für Parkplätze dienen sollen.

Ein neues Dachsystem aus vorgespanntem Carbonbeton

Die Trapezplatten als ein neues Dachsystem weisen ein geringes Eigengewicht von etwa 2kN/m bei einer Breite von 1,2m auf und können die nach Norm geforderten Lasten für die Anwendung als Dach bei einer Spannweite von etwa 8,5m tragen. Die Tragfähigkeit der Trapezplatten wurde bereits unter statischer Beanspruchung und Dauerlast untersucht. Im Jahr 2024 erhielt das Produkt die Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für ein Bauvorhaben, bei dem die Trapezplatten zusätzlich mit Aussparungen in den Stegen versehen wurde. Dies dient zur späteren Umschäumung der Querschnitte mit Schaumbeton zur Erzielung eines brandtechnisch geschützten Tragwerkes. Außerdem wurden vorgespannte Carbonbetonbretter im Feld der Trapezplatten als Verstärkung der Feldbewehrung mineralisch eingeklebt. Dies erhöht die Gebrauchslast um 50 %.

Ein Zweigelenkrahmen aus 3 einzelnen Fertigteilen gefügt

Bei dem Bauvorhaben wird eine kleine Demonstrationsanlage eine Parkplatzfläche von ca. 1000m2 mittels zwei Reihen mit je acht Zweigelenkrahmen aus vorgespannten Carbonbeton (VCB) überdachen. Die Tragwerksplanung wurde von Fink Ingenieure GmbH (Radebeul) übernommen. Sowohl die dünnwandige Dach- und Wandpfette als auch die Stiele und Riegel wurden als vorgespannte Carbonbeton-Elemete (VCB) geplant. Das Hauptziel des Projekts ist es, Carbonbetonrahmen als Ersatz für Stahlkonstruktionen zu nutzen.

Dies ist besonders sinnvoll, wenn die Konstruktion im Freien stehen muss, da Carbonbeton im Gegensatz zu Stahl unter diesen Bedingungen dauerhaft beständig ist. Die Tragfähigkeit der Bauteile wurde durch 1:1-Versuche in Abstimmung mit der Landesstelle für Bautechnik (Sachsen) sowie gemäß den vorhandenen Regelwerken nachgewiesen. Der Antrag auf Zustimmung im Einzelfall (ZiE) befindet sich in Bearbeitung

GINKGO Projektentwicklung GmbH (Dresden) verwendet ihre patentgeschützten modernen Verfahren zur Produktion von Betonfertigteilen mit Vorspannung in sofortigem Verbund. Durch die Vorspannung bei z.B. 950N/mm² werden die Carbonfasern mit Ihrer hohen Festigkeit komplett ausgenutzt. Generell erlaubt die von Ginkgo patentierte Vorspanntechnik den Einsatz im kurzen und langen Spannbett. Die mehrlagigen vorgespannten Textilstreifen gestatten mit einer filigranen Verteilung des Spannrovings mit meist nur 2mm Durchmesser dennoch einen hohen Vorspanngrad zu erreichen, der bei Spannbrettern schon bis 30N/mm2 und mehr liegen kann. Randabplatzungen können durch die gute Verteilung des Rovings vermieden werden. Vielseitige Querschnitte bis zu filigranen Doppel-T-Querschnitten wurden bereits erfolgreich hergestellt.

Der Betonbau kann durch die Anwendung der Vorspannung der Hochleistungsfasern zum Leichtbau aufschließen. Eine Durchdringung aller Stahl-, Beton- und Holzbaubereiche wird bei dieser neuen Technologie möglich. Gebäude, die vom Dach bis zum Fundament 80 % leichter sind, können gebaut werden. Neue Wege für ressourcensparendes Bauen werden möglich.

Prof. Dr.-Ing. Roland Fink:

- Inhaber und Geschäftsführer von Fink Ingenieure GmbH Radebeul
- Studium Bauingenieurwesen und Promotion an der Universität Stuttgart
- seit 1999 Prüfingenieur für Bautechnik
- seit 2002 Fachplaner für vorbeugenden baulichen Brandschutz
- seit 2006 Professor an der Hochschule für Technik Stuttgart Fakultät Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt Bauen im Bestand
- Roland Fink betreut seit vielen Jahren verschiedene Projekte im Rahmen des C3 Klusters zur Erlangung der ZiEs (Zustimmung in Einzelfall) und deren Umsetzung

Sichere Ausschreibungen von Carbonbetonbauteilen – mithilfe standardisierter Textbausteine

Neues LV vom 06.06.2024, 16:01 Uhr

Ordnungszahl (Pos.-Nr.)	Bezeichnung	Einheitspreis EUR	Gesamtbetrag EUR
0001	0,000 m3	0,00	0,00
	Elementwandtafel L 6-8m H 4m D 25cm P 4+6cm Außenwand bewehrter Beton Normalbeton C 25/30 mit Wärmedämmung PF WZ 0,024W/(mK) D 40-50mm Betonfertigteil aus Elementwandtafel, Länge der Wandtafel über 6 bis 8 m, Wandhöhe 4 m, Gesamtwanddicke 25 cm, Dicke Fertigteilplatte ohne Ortbetonergänzung 4 + 6 cm, als Außenwand, geschalte Betonflächen SB 2, bewehrter Beton als Normalbeton, Größtkorn = 8 mm, Betondeckung = 15 mm, C 25/30, DIN EN 206, DIN 1045-2, XF2, XM1, XA1, XC2, XD1, XS2, WO, F3, mit hohem Wassereindringwiderstand, natürliche Gesteinskörnung, größer gleich 15 Prozent, Füllbeton als Ortbeton wird gesondert vergütet, mit Wärmedämmung aus Phenolharz-Hartschaum PF DIN EN 13166, Anwendungsgebiet DIN 4108-10 WZ, Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit max. 0,024 W/(mK), Nennwert der Wärmeleitfähigkeit max. 0,027 W/(mK), Brandklasse B1 (schwerentflammbar) DIN 4102-1, Dämmdicke über 40 bis 50 mm 10 Grad, rechteckige Aussparung wird gesondert vergütet, Ausführungsunterlagen gemäß Einzelbeschreibung		
0002	0,000 m2	0,00	0,00
	Carbonfasergitter M = 12mm -20/60°C Biegesteifigkeitsklasse II Außenwand Bewehrungsgitter aus Carbonfaser, lichte Gitterweite = 8*1,5 = 12 mm, Temperaturbeständigkeit - 20 bis 60 °C, Verbundwert (GZG) = 50, E-Modul = 4560 N/mm², Biegesteifigkeitsklasse nach Richtlinie II - mittel: 3 - 10 10^5 N*mm²/m, charakteristische Kurzzeit-Zugkraftübertragung Fnm,k = 247 kN/m, charakteristische Langzeit-Zugkraftübertragung Fnm,α,k = 198 kN/m, charakteristische Kurzzeit-Verbundfestigkeit Fnm,k = 450 N/mm², charakteristische Langzeit-Verbundfestigkeit Fnm,α,k = 7 N/mm², Ausführungsunterlagen gemäß Zeichnung, DAfStb-Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung" beachten		
0003	0,000 m	0,00	0,00
	Glasfaserstab d= 8mm gerippt -20/80°C Außenwand Bewehrungsstab aus Glasfaser, Nenndurchmesser 8 mm, Außendurchmesser 10 mm, gerippt, Temperaturbeständigkeit - 20 bis 80 °C, Verbundwert (GZG) = 43, E-Modul = 3000 N/mm², charakteristische Kurzzeit-Zugfestigkeit Fnm,k = 58 kN/m, charakteristische Langzeit-Zugkraftübertragung Fnm,α,k = 195 kN/m, charakteristische Kurzzeit-Verbundfestigkeit Fnm,k = 4 N/mm², charakteristische Langzeit-Verbundfestigkeit Fnm,α,k = 4 N/mm², Ausführungsunterlagen gemäß Zeichnung, DAfStb-Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung" beachten		
	Summe netto		**0,00**
	Umsatzsteuer (19.00%)		0,00
	Summe brutto		**0,00**

Standardausschreibungstext (© F. Härtel)

Im Bauwesen ist der öffentliche Auftraggeber grundsätzlich verpflichtet, produktneutral auszuschreiben. Dies bedeutet, dass keine spezifischen Produktnamen für die zu verwendenden Materialien genannt werden dürfen, um zu verhindern, dass bestimmte Hersteller einen Wettbewerbsvorteil erhalten. Grundlage der produktneutralen, standardisierten Textbausteine sind technische Materialparameter, die im Rahmen des Forschungsprojektes „RUBIN“ in einem Excel-basierten Ausschreibungstool analysiert und vergleichbar zur STLB-Bau online Datenbank zusammengeführt wurden.

Grundsätzlich erfolgt eine Differenzierung der Carbonbewehrungselemente analog zu Stahlbetonbauteilen in „Bewehrungsgitter“ und „Bewehrungsstäbe“. Im Vergleich zu herkömmlichen Betonstahlbewehrungen sind die Maschenweiten bei Carbonbewehrungsgittern relativ klein. Die lichte Gitterweite definiert ein wichtiges Kriterium in der Ausschreibung, weil diese in Abhängigkeit zum Größtkorn des Betons gewählt werden muss, damit ein ausreichender Verbund von Beton und Bewehrung gewährleistet werden kann. Das Ausschreibungstool sieht Spannen in mehreren Abstufungen für Gitterweiten zwischen 8 mm und 63 mm vor.

Die um mehr als das Zwanzigfache geringere Wichte von Carbon- im Vergleich zu Stahlbewehrung, verbunden mit veränderten Biegesteifigkeitseigenschaften, beeinflusst das Handling auf der Baustelle erheblich. Daher muss das Bewehrungselement gemäß der DAfStb-Richtlinie Nichtmetallische Bewehrung mit einer Angabe zur Biegesteifigkeit versehen werden. Zur Vereinfachung der Ausschreibung erfolgt eine Klassifizierung in drei Biegesteifigkeitsklassen: flexibel (< 3), mittel (3 - 10) und steif (> 10 [10^5 N*mm²/m]). Biegesteifere Carbonbewehrungsgitter (> 10 [10^5 N*mm²/m]) sind spröder und dadurch anfälliger für Beschädigungen. Gleichzeitig können sie von weniger Personen innerhalb der Baustelle transportiert werden, da diese in sich wesentlich stabiler sind. Weniger biegesteife Carbonbewehrungen müssen hingegen von mehr Menschen auf der Baustelle transportiert werden, da das Bewehrungsgitter stark durchhängen kann.

Aufgrund der vielfältigen Kombinationen von Harzen, Härtern, Zuschlag- und Verstärkungsstoffen zur Tränkung von Carbonfasern ist eine allgemeine Quantifizierung der Materialeigenschaften nicht möglich. Zudem sind die Mischungsverhältnisse oft Betriebsgeheimnisse. Dementsprechend sind in Ausschreibungen die Spezifika der Tränkungen zu definieren. Ein weiteres Ausschreibungskriterium ist die charakteristische Zugfestigkeit der eingesetzten Carbonbewehrung. Insgesamt ist jene von Carbonbewehrung deutlich höher als die von Stahlbewehrung, woraus sich eine hohe Belastbarkeit bei gleichzeitig geringerem Gewicht ergibt. Dieser Faktor ist für alle Ausschreibungsbeteiligten von großer Bedeutung.

Weitere relevante bewehrungsspezifische Ausschreibungskriterien sind die charakteristische Kurzzeit-Zugkraftübertragung in Kett- und Schussrichtung [kN/m], der E-Modul [N/mm²], sowie der Verbundwert im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Zur Ausschreibung des Betons wird sich an etablierten Normbetonsorten orientiert, da im Rahmen des Forschungsprojektes „RUBIN – Industriestandard Carbonbeton“ die Eignung von Normbetonen zur Herstellung von Carbonbetonbauteilen verifiziert werden konnte. In der Ausschreibung sind Größtkorn und Betondeckung wesentliche Parameter.

Die Einführung von standardisierten Ausschreibungstexten für Carbonbetonbauteile im Bauwesen ist ein bedeutender Schritt zur Förderung von Innovationspotenzialen und zur Schaffung fairer Wettbewerbsbedingungen. Durch die produktneutrale Ausschreibung und die klare Differenzierung der Materialparameter können alternative und effizientere Bauweisen wie Carbonbeton erfolgreich in die Praxis integriert werden.

Florian Härtel studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität in Dresden und ist aktuell am Institut für Baubetriebswesen selbiger Universität tätig. Im Rahmen des Regionalen unternehmerischen Bündnisses für Innovation (RUBIN) ist er im Forschungsbereich „Industriestandard Carbonbeton“ beteiligt. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der Ermittlung von Kostenansätzen und Ausschreibungstexten für Carbonbetonbauteile. Grundlage hierführt stellt die qualitativen und quantitativen Auswertungen von laufenden und abgeschlossenen Carbonbetonprojekten.

Ausgeführtes Praxisbeispiel in Anlehnung an die DAfStb-Richtlinie

Montage-Sockelplatten (© Oliver Heppes)

Die wirtschaftliche Dimensionierung und Ausführung von vorgefertigten Neubauteilen mit Carbonbeton sind in der Praxis bisher nicht ganz einfach. Weiterhin ist die baurechtliche Situation mit diesem Werkstoff für viele Anwender eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Mit der im Weißdruck vorliegenden DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ hat sich dies deutlich vereinfacht, wobei diese Richtlinie baurechtlich noch nicht eingeführt ist.

In Anlehnung an diese Richtlinie wurden für ein Bauvorhaben Sockelplatten, in industrieller Serienproduktion, in Carbonbeton anstelle von Stahlbeton eingesetzt. Dabei wurde nicht nur die Stahlbewehrung durch Carbonbewehrung ersetzt, sondern die gesamte Konstruktion, inklusive der Anschlusssituation in Augenschein genommen, neu konstruiert und vereinfacht. Zudem wurden Produktion, Transport und Montage der Bauteile in einem 360°-Rundumblick bewertet, sodass dem Kunden eine wirtschaftliche und technische Gesamtlösung angeboten werden konnte.

Das zum Einsatz kommende Carbongelege bestand aus der gleichen Materialkombination von Carbon und Tränkung, wie es auch schon in verschiedenen C3 Vorhaben vorlag, sodass auf viele für die Bemessung maßgebende Parameter zurückgegriffen werden konnte, was sich zeitlich positiv auswirkte. Die Biegebemessung und -Ermittlung der Biegetragfähigkeit der Sockelplatte erfolgte nach DAfStb-Richtlinie, was zusätzlich durch Versuche unterstützt und bestätigt wurde. Da für die Materialkombination der eingesetzten Bewehrung lediglich Kennwerte vorlagen, die mit einem Feinbeton ermittelt wurden, wurde die Verbundfestigkeit für den Nachweis der Verankerung neu ermittelt, denn bei der Sockelplatte kam ein Normalbeton der Festigkeitsklasse C50/60 mit einem Großkorn von 16 mm zum Einsatz.

Da Erfahrungen von flächen- bzw. plattenartigen Neubauteilen mit Normalbetonen und einem Großkorn von 16 mm aus vorangegangenen Projekten vorlagen, bei denen ebenfalls eine Carbonbewehrung mit ähnlichen Gitteröffnungen von ca. 20 mm x 50 mm vorlagen, wurde bei der Dimensionierung ein besonderes Augenmerk auf die Querkrafttragfähigkeit gelegt. Die Sockelplatten haben keine Querkraft-, sondern lediglich eine Biegebewehrung, welche optimiert und somit wirtschaftlich ausgenutzt ist. Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach DAfStb Richtlinie liegt für solche Bauteile deutlich auf der sicheren Seite, weshalb zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit ergänzende Versuche durchgeführt und der Bauteilwiderstand versuchsgestützt nachgewiesen wurde.

Das Genehmigungsverfahren für die Zustimmung im Einzelfall mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung dauerte von Antragstellung bis zur Erteilung lediglich 3 Monate.

Somit waren in der Summe für die Sockelplatten aus diesem Projekt eine wirtschaftliche Lösung in Carbonbetonbauweise bereitgestellt, welche 50 % weniger Beton und 75 % weniger Transportkosten mit sich brachte. Zudem eine ca. 50 % größere Querkrafttragfähigkeit als nach DAfStb Richtlinie und auf Grund der komplett überarbeiteten Konstruktion konnte die Montagezeit der Carbonbetonplatten zusätzlich um mehr als 70 % gegenüber der Stahlbetonvariante reduziert werden.

Das Projekt ist ein Erfolg nicht nur für die Carbonbetonbauweise, sondern auch für das Carbon 360 Team und insbesondere den Kunden!

Dr. Oliver Heppes studierte Bauingenieurwesen an der TU Kaiserslautern. 2007 wurde er in die Unternehmensgruppe Goldbeck gerufen. Dort leitete er die Entwicklungsabteilung und war für zahlreiche Innovationen verantwortlich. Seine langjährigen Erfahrungen mit Carbonbeton im Bereich Neubau, wurden 2021 in seiner Dissertation zusammengefasst. Im Jahr 2022 wechselte er zu "Huber Parking Deutschland GmbH", wo er ebenfalls in leitender Funktion für den Werkstoff Carbonbeton verantwortlich ist. Seit 2023 ist er zudem geschäftsführender Gesellschafter des Start Up „Carbon 360 GmbH“.

DAfStb-Richtlinie einfach erklärt – mittels Erläuterungen und Beispielen aus dem DAfStb-Heft 660

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

DAfStb-Richtlinie

Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung

Ausgabe Januar 2024

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

Notifiziert gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (kodifizierter Text) (ABl. L 241/1 vom 17.09.2015).

Bezüglich der in dieser Richtlinie genannten Normen, anderen Unterlagen und technischen Anforderungen, die sich auf Produkte oder Prüfverfahren beziehen, gilt, dass auch Produkte bzw. Prüfverfahren angewandt werden dürfen, die Normen oder sonstigen Bestimmungen und/oder technischen Vorschriften anderer Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder der Türkei oder einem EFTA-Staat, der Vertragspartei des EWR-Abkommens ist, entsprechen, sofern das geforderte Schutzniveau in Bezug auf Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit gleichermaßen dauerhaft erreicht wird.

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb
Budapester Straße 31
D-10787 Berlin
Telefon: 030 2693-1320
info@dafstb.de

Der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) beansprucht alle Rechte, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen. Ohne ausdrückliche Genehmigung des DAfStb ist es nicht gestattet, diese Veröffentlichung oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege oder auf andere Art zu vervielfältigen.

Verkauf durch den Beuth Verlag GmbH, Berlin, Vertriebs-Nummer 65886

Heft 660

DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON

Erläuterungen und Beispiele zur DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung"

Berlin 2024

DIN Media

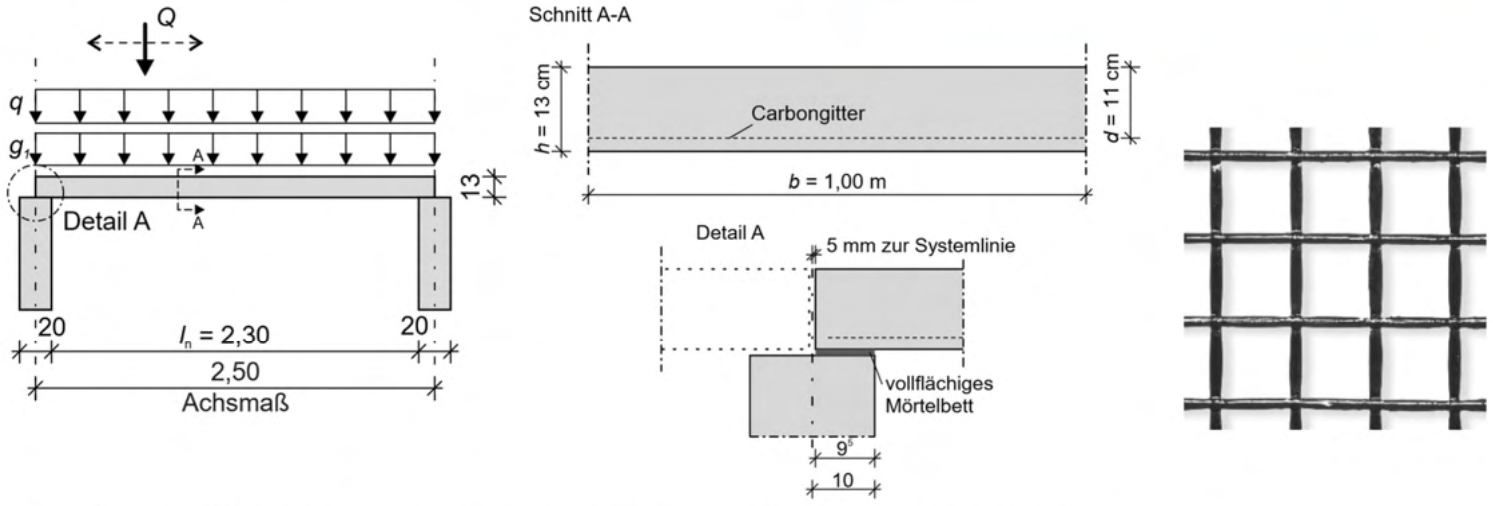
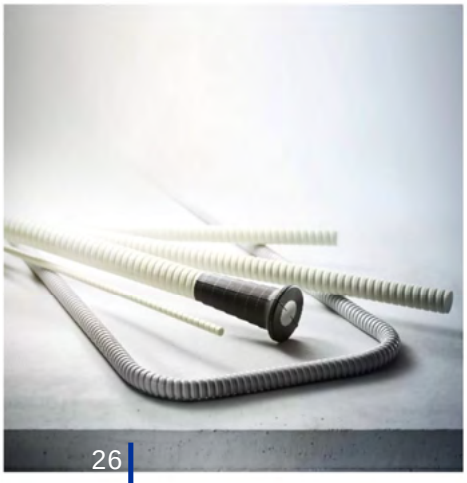


Bild B1-1: Statisches System, Belastung und Querschnitt der Carbonbetonplatte und Auflagerdetail



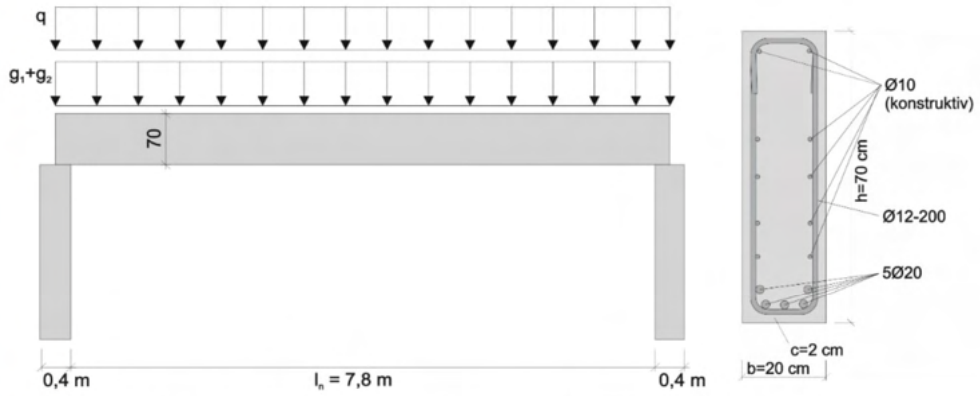


Bild B2-1: Statisches System, Belastung und Querschnitt des Betonbalkens mit nichtmetallischer Bewehrung

Grafik (© DAfStb; IMB-RWTH; CARBOCON; solidian; Schöck)

Die DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“, erstellt vom DAfStb-Unterausschuss „Nichtmetallische Bewehrung“, wurde Anfang 2024 in der ersten Fassung veröffentlicht. Die dort dokumentierten Regeln sind das Ergebnis von langjährigen Forschungsarbeiten und Praxiserfahrungen und bilden den Stand des Wissens in Deutschland in diesem Bereich sehr gut ab.

Das DAfStb-Heft 660 gibt darüber hinaus gehende Erläuterungen und Beispiele, die der Praxis das Verständnis und den Gebrauch der Richtlinie erleichtern sollen. Das Heft besteht aus zwei Teilen: Der erste Teil enthält auf der linken Seite den Richtlinientext und auf der rechten Seite Erläuterungen und Anwendungshinweise zu den entsprechenden Abschnitten der Richtlinie, bestehend aus Informationen zu den Hintergründen und den wissenschaftlichen Grundlagen sowie weiterführenden Literaturhinweisen.

So werden beispielsweise für die Querkraftmodelle die Validierung anhand von Versuchen gezeigt und die einzelnen Komponenten der Gleichungen erläutert. Bei den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Hintergründe der Rissbreitenberechnung detailliert aufgeführt und die nötigen Anpassungen für Bauteile mit nichtmetallischer Bewehrung hergeleitet.

Des Weiteren werden die derzeitigen Anwendungsgrenzen der Richtlinie und Einschränkungen bei einzelnen Regelungen begründet und eingeordnet. Dabei werden auch Hinweise zu jetzt schon möglichen Erweiterungen im Rahmen von Ver- und Anwendbarkeitsnachweisen gegeben. Während sich die Erläuterungen zum Teil 1 der Richtlinie im Wesentlichen an die Planer von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung richten, geben die Erläuterungen zu den Teilen 2 und 4 Hinweise für Hersteller von Bewehrungsprodukten und für im Rahmen von Produktentwicklung und Zulassungsverfahren beteiligte Prüfinstitutionen.

Der zweite Teil des Heftes enthält zwei Bemessungsbeispiele. Exemplarisch wurden zwei Anwendungsfälle aus dem Hochbau gewählt: Im ersten Beispiel wird eine Platte für ein Parkhaus bemessen, bei der eine CFK-Gitterbewehrung als Längsbewehrung eingesetzt wird (siehe Bild B1-1). Die Platte ist direkt befahrbar, ohne zusätzlichen Belag oder Abdichtung, und ist frei bewittert. In diesem Beispiel ist rechnerisch keine Querkraftbewehrung nötig, für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird nachgewiesen, dass die Platte im Zustand I verbleibt, der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung wird über die direkte Berechnung der Rissbreite geführt.

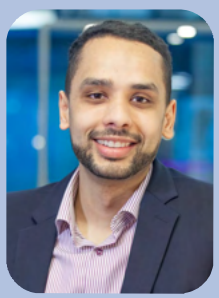
Das zweite Beispiel behandelt einen Betonbalken mit stabförmiger GFK-Längsbewehrung (siehe Bild B2-1), der als Teil einer Parkhauskonstruktion zwischen Stützen als Einfeldträger spannt und eine aufgelagerte Fertigteildecke aus Carbonbeton trägt. Als rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung dienen werksmäßig vorgefertigte GFK-Bügel. Neben dem Querkraftnachweis wird auch der vereinfachte Torsionsnachweis geführt. Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit kann der gerissene Zustand nicht ausgeschlossen werden. Der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung wird indirekt über den Grenzdurchmesser geführt und wird für die Festlegung der Bewehrungsmenge maßgebend.

Die Beispiele zeigen die Bandbreite der von der Richtlinie erfassten Bewehrungstypen sowie sämtliche erforderliche Nachweise einschließlich Einhaltung der Bewehrungs- und Konstruktionsregeln anhand realistischer Belastungen und Abmessungen. In beiden Beispielen werden zudem Hinweise zu Abweichungen gegenüber dem Stahlbetonbau und zu möglichem Optimierungspotential gegeben.

Auch nach Abschluss der Arbeiten am Heft 660 endet die Arbeit des DAfStb-Unterausschusses „Nichtmetallische Bewehrung“ nicht: Die Arbeiten an der zweiten Fassung der Richtlinie wurden bereits begonnen, mit der weitergehende Erkenntnisse, z. B. zur Ermüdung oder zur Vorspannung, erfasst werden und eine Anpassung auf den neuen Eurocode 2 vorbereitet wird.

Dr.-Ing. Jan Bielak studierte Bauingenieurwesen im Bachelor und Master und Wirtschaftswissenschaften im Master an der RWTH Aachen. Nach einer Tätigkeit im Ingenieurbüro in Frankfurt kehrte er zur Promotion zurück nach Aachen. Seit Ende 2021 ist er Oberingenieur am Institut für Massivbau.

Dipl.-Ing. Anett Ignatiadis studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar und war von 2003 - 2011 als Projektingenieurin in Planungsbüros im konstruktiven Ingenieurbau tätig. Seit 2012 ist sie in der Geschäftsstelle des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e. V. tätig.



Alexander Schumann studierte Bauingenieurwesen von 2010-2015. Anschließend wissenschaftlicher Mitarbeiter und Forschungsgruppenleiter am Institut für Massivbau der TU Dresden und 2020 Promotion. Von 2018-2019 war er als Projektleiter und ab 2019 Geschäftsführer der CARBOCON. Seit 2022 zudem Professor für Bauingenieurwesen an der IU Internationale Hochschule in Dresden.

CARBON 360

BAUEN IN NEUEN DIMENSIONEN

Innovation in Aktion

Systembauteile in Carbonbeton

Korrosionsbeständig · **Dauerhaft** · **Verbesserte CO_2-Bilanz**

Carbonbeton vs. Stahlbeton

75 %	weniger	Gewicht
50 %	weniger	Beton
70 %	weniger	Montagezeit
75 %	weniger	Transporte

MADE IN GERMANY - WWW.CARBON360.DE -

Ergebnisse aus dem letzten Projekt

carbon360.de

K&T BAUSYSTEME

Nachhaltige CARBONBETON Fassadensysteme

Kahnt & Tietze GmbH

Automatisierung, Digitalisierung und gesellschaftlicher Wandel: Die wirtschaftliche und technische Welt verändert sich radikal, und auch das Bauen wird durch die vierte industrielle Revolution sowie die Herausforderungen des Klimawandels neu geprägt.

Heute, wie in Zukunft, ist ein deutlicher Umbruch im Bauwesen notwendig, um den Anforderungen des gesellschaftlichen Wandels und des Umweltschutzes gerecht zu werden. Die Carbonbeton-Bauweise stellt hierbei einen vielversprechenden Ansatz dar, um Materialverbrauch und CO2-Emissionen zu senken und somit aktiv zum Schutz der Umwelt beizutragen.

Das Tätigkeitsfeld der Kahnt & Tietze GmbH liegt in der Entwicklung neuer Gebäudekonzepte für urbane Bereiche und speziell für die städtebauliche Nachverdichtung. Unser Ziel ist es, nachhaltige Lebensräume für alle Bewohner zu schaffen. Die Bauwerke sollen nicht nur filigran und flexibel, sondern gleichzeitig auch robust genug sein, um den Bedürfnissen der Nutzer gerecht zu werden. Um dies zu erreichen, setzt unser Unternehmen auf schlanke Gebäudehüllen aus Carbonbeton, kombiniert mit Hochleistungsdämmungen für Fassaden- und Wandsysteme.

Dank dieser leichten und platzsparenden Carbonbeton-Bausysteme kann bei gleicher Grundfläche mehr Nutzfläche geschaffen werden. Zudem reduzieren sich die Aufwände für Produktion, Transport und Montage, was zu einem geringeren Einsatz von Rohstoffen und einer Verringerung der Emissionen im gesamten Lebenszyklus des Gebäudes führt. Die Verbindung aus Carbonbeton und Hochleistungsdämmung gewährleistet zudem eine besonders hohe Langlebigkeit der Konstruktion.

Diese innovativen Bausysteme sind ein wichtiger Schritt hin zu einer nachhaltigeren Zukunft für unsere Städte.

Dieser mehrschichtige und materialoptimierte Aufbau der Wand- und Fassadenelemente von Kahnt & Tietze GmbH erlaubt es, die Wandstärke so weit zu reduzieren, dass bis zu 50 % an Konstruktionsfläche eingespart und bis zu 10 % mehr Nutzfläche auf gleicher Grundfläche gewonnen werden kann. Die Außenwände sind somit ab eine Wandstärke von 240 mm realisierbar, wobei die Carbonbetonschalen jeweils ab 30 mm und die Dämmung ab 70 mm zur Anwendung kommen. Hergestellt werden diese innovativen Bausysteme in der Fertigteil- oder Halbfertigteilbauweise.

Durch die Wahl von Carbonbeton als Material für die Wandschalen werden mehrere Vorteile erzielt: die Carbonbeton-Fertigteile sind im Vergleich zu traditionellen Stahlbetonelementen wesentlich schlanker, was das Gewicht beim Transport und bei der Montage deutlich reduziert. Gleichzeitig zeichnet sich Carbonbeton durch eine außergewöhnliche Robustheit aus, was eine hohe Langlebigkeit der gesamten Konstruktion sicherstellt.

Insgesamt bieten die Fassaden- und Wandsysteme der Kahnt & Tietze GmbH eine nachhaltige, ressourcenschonende und langlebige Lösung für den Bau neuer Wohn- und Bürogebäude sowie für die energetische Sanierung bestehender Bauten. Carbonbeton ermöglicht dabei filigrane und flexible Bauweisen, die den höchsten architektonischen Ansprüchen gerecht werden.

www.kahnttietze.de

Schnell errichtet – Vollmodulare Straßenbrücke aus Carbonbeton

Montage der Expressbrücke aus vorgespanntem Carbonbeton (© Hentschke Bau GmbH)

Das Bauwesen und alle darin agierenden Akteure stehen vor großen Herausforderungen. Mit einem Anteil von etwa 40 % am weltweiten CO2-Ausstoß ist dieser Sektor einer der Haupttreiber der globalen Erwärmung. Dieser Status quo bietet jedoch auch ein enormes Potenzial zur Optimierung. Zwei vielversprechende Wege sind die Verkürzung der Bauzeit und die Verlängerung der Nutzungsdauer durch dauerhafte und adaptierbare Bauwerke.

Im vom BMWK geförderten Verbundforschungsvorhaben PAMB (Pilotanwendung modularer Brückenbau) entwickelten die Projektbeteiligten einen ausschließlich mit Carbon bewehrten und vollmodularen Brückenprototyp. Dieser wird aktuell unter realen Randbedingungen im offenen Testfeld erprobt. Es befindet sich in einer bauzeitlichen Behelfsumfahrung im Zuge der B173 westlich von Freiberg in Sachsen. Der Montageprozess des innovativen Systems kommt ohne jeden Ortbeton oder Nassverguss zur Fügung der Carbonbetonfertigteile aus, sodass das Bauwerk umgehend voll tragfähig ist. Die Grundidee basiert auf dem trockenen Verspannen durch Querspannglieder in der Fahrbahnplatte. Das aktiviert die Reibung in den Längsfugen zwischen den fünf 16 m langen Modulen und fügt diese kraftschlüssig. Die Längsbewehrung in der Zugzone besteht aus im Spannbett vorgespannten CFK-Litzen der Firma Tokyo Rope. Der Vorspanngrad wurde so gewählt, dass die Trägerdurchbiegung infolge des Eigengewichts egalisiert wird. Diese moderate Spannkraft hält eine ausreichende Reserve zur Aufnahme der Biegezugspannungen vor. Um die in fünf Lagen angeordneten 22 Litzen je Träger optimal auszunutzen, wurden diese graduell vorgespannt. Die Spannkraft ist in der untersten Lage am geringsten und erreicht ihr Maximum in der obersten, sodass im GZT eine nahezu gleichmäßige Beanspruchung aller Litzen vorliegt.

Textile Formbewehrung von Solidian bildet die Oberflächen- und die statisch relevante Querkraftbewehrung im Steg. Als weitere Bewehrungsform sind schlaffe Bewehrungsstäbe vom selben Hersteller verbaut. Sie schließt den Obergurt an den Steg sowie den integralen Endquerträger an. Der Bewehrungskorb wurde vorab zusammengesetzt und erst im Anschluss in die Schalung gehoben.

Auf Grund der vorgespannten Trockenfuge besteht während der Montage keine Möglichkeit zur Egalisierung von Passungenauigkeiten, sodass sehr hohe Standards während der Fertigung einzuhalten waren. Entscheidender Faktor für die sehr hohe Maßhaltigkeit war das Match-Cast-Verfahren. Ein jeweils fertiger und ausgehärteter Träger diente als Schalung für den direkten Kontaktpartner. Im Anschluss wurden alle Oberflächen mittels Laserscanning digitalisiert. So konnte die Bauteilfügung vorab simuliert werden, was eine zusätzliche Qualitätskontrolle darstellte. Die maximal gemessene Abweichung über die gesamte Trägerlänge zwischen zwei Kontaktpartnern lag im Submillimeterbereich, was als herausragendes Ergebnis gewertet werden kann.

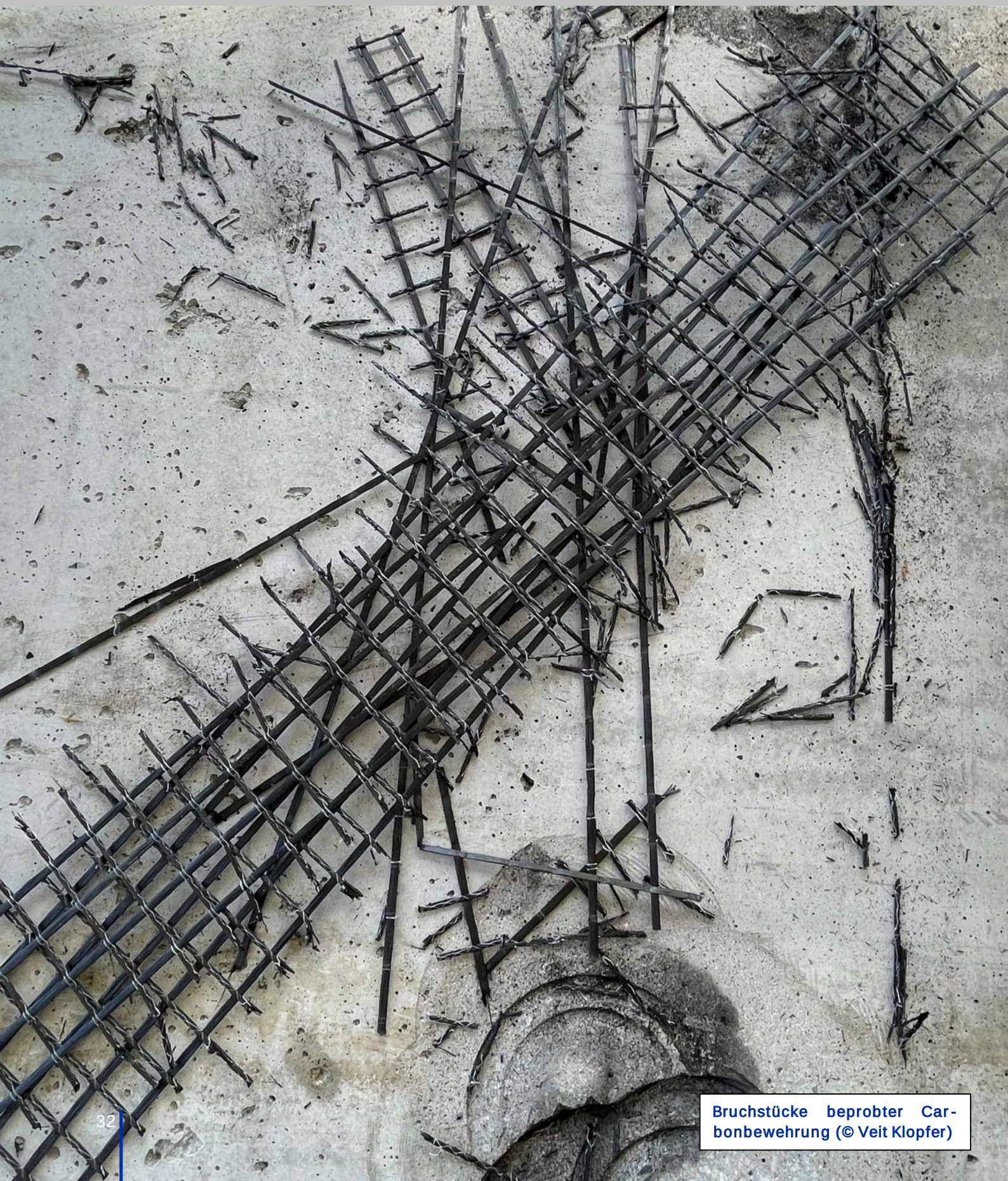
Die Anlieferung und Montage der fünf 1,50 m breiten Träger erfolgte an einem Vormittag. Noch am selben Tag wurden die Stabspannglieder 47WR von DSI in die vorgesehenen Hüllrohre eingelegt. Wegen des Einbaus von Sensoren fand das Verspannen selbst am folgenden Tag statt. Jedes der 15 Spannglieder wurde mit knapp 1,5 MN vorgespannt. Ohne zusätzliches Monitoringsystem kann die gesamte Montage von der Anlieferung bis zum finalen Fügeprozess an einem Arbeitstag durchgeführt werden. Direkt nach dem Verspannen ist der Überbau voll tragfähig und dennoch reversibel, was den zerstörungsfreien Rückbau, und damit auch die potenzielle Wiederverwendung, erlaubt. Am 18.09.2023 fand die Probebelastung unter messtechnischer Begleitung und am Folgetag die Verkehrsfreigabe statt. Seitdem überwacht ein autarkes Monitoringsystem den Bauwerkszustand in Echtzeit. Die Nutzungsdauer endet mit Abschluss der Gesamtbaumaßnahme voraussichtlich Ende 2024.

Dr.-Ing. David Schaarschmidt hat Bauingenieurwesen an der HTW Dresden studiert und war von 2017 bis 2024 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Brücken- und Ingenieurbau. Im Februar 2024 wurde er erfolgreich am Institut für Massivbau der TU Dresden promoviert. Seit 2022 ist er geschäftsführender Partner im Ingenieurbüro sbf ingenieure.

Dr.-Ing. Frank Jesse studierte Bauingenieurwesen an der TU Dresden und wurde am Institut für Massivbau der TU Dresen promoviert. Seit 2013 ist er bei Hentschke Bau GmbH tätig und dort zuständig für Forschung und Entwicklung im Bereich Carbonbeton.

Prof. Dr.-Ing. Holger Flederer studierte Bauingenieurwesen an der TU Dresden und wurde im Jahr 2002 im Verbundbau am Institut für Stahl- und Holzbau der TU Dresden promoviert. Im Jahr 2011 wurde er als Professor für Brücken- und Ingenieurbau an die HTW Dresden berufen. Seit 2022 ist er Partner im Ingenieurbüro sbf ingenieure.

Ermittlung & Beurteilung der Gefährdungen bei der mechanischen Bearbeitung von Carbonbeton



Bruchstücke beprobter Carbonbewehrung (© Veit Klopfer)

Die Vermutung einer möglichen Faserbelastung der Umgebung, hervorgerufen durch den Umgang mit Carbonbewehrung, wird von Kritikern der Carbonbetonbauweise immer wieder geäußert. Eine wiederkehrende Frage lautet dazu: Welche Faserbelastung ist beim Umgang mit Carbonbewehrung zu erwarten und kann eine unmittelbare Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden?

Um dieser Fragestellung nachzugehen, wurden die bisher bekannten Messungen der Jahre 2017 und 2018 durch dezidierte Untersuchungen im Jahr 2023 validiert. Die Untersuchungen zur Bestimmung der chemischen und physikalisch-morphologischen Eigenschaften wurden im Rahmen eines Prüfstandes ermittelt. Mittels der eingesetzten, handgeführten Geräte wurden baustellentypische Bearbeitungsverfahren von Betonbauteilen durchgeführt. Dazu zählten unter anderem das Schleifen mittels Betonschleifer und das Schlitzen mittels einer Mauernutfräse.

Als Versuchsgegenstand wurden Probekörper mit vier unterschiedlichen Bewehrungsarten eingesetzt. Ein Gitter mit einer Gitterweite von 22 x 22 mm, ein unidirektionaler Bewehrungsstab d = 8 mm, ein Formflechtstab mit d = 4,11 mm und ein weiteres Gitter mit einer Gitterweite von 59 x 25 mm. Die Untersuchungen erfolgten an Probekörpern aus Carbonbeton mit den Festigkeitsklassen C30/37 und C50/60. Ziel der Untersuchung war die Bewertung des Einflusses der Betonfestigkeit und Bewehrungsart auf die Staub- und Faserfreisetzung. Mittels eines Aerosolmonitors wurden die anfallenden Expositionskonzentrationen für die jeweilige Bearbeitungsmethode über einen definierten Messzeitraum dokumentiert.

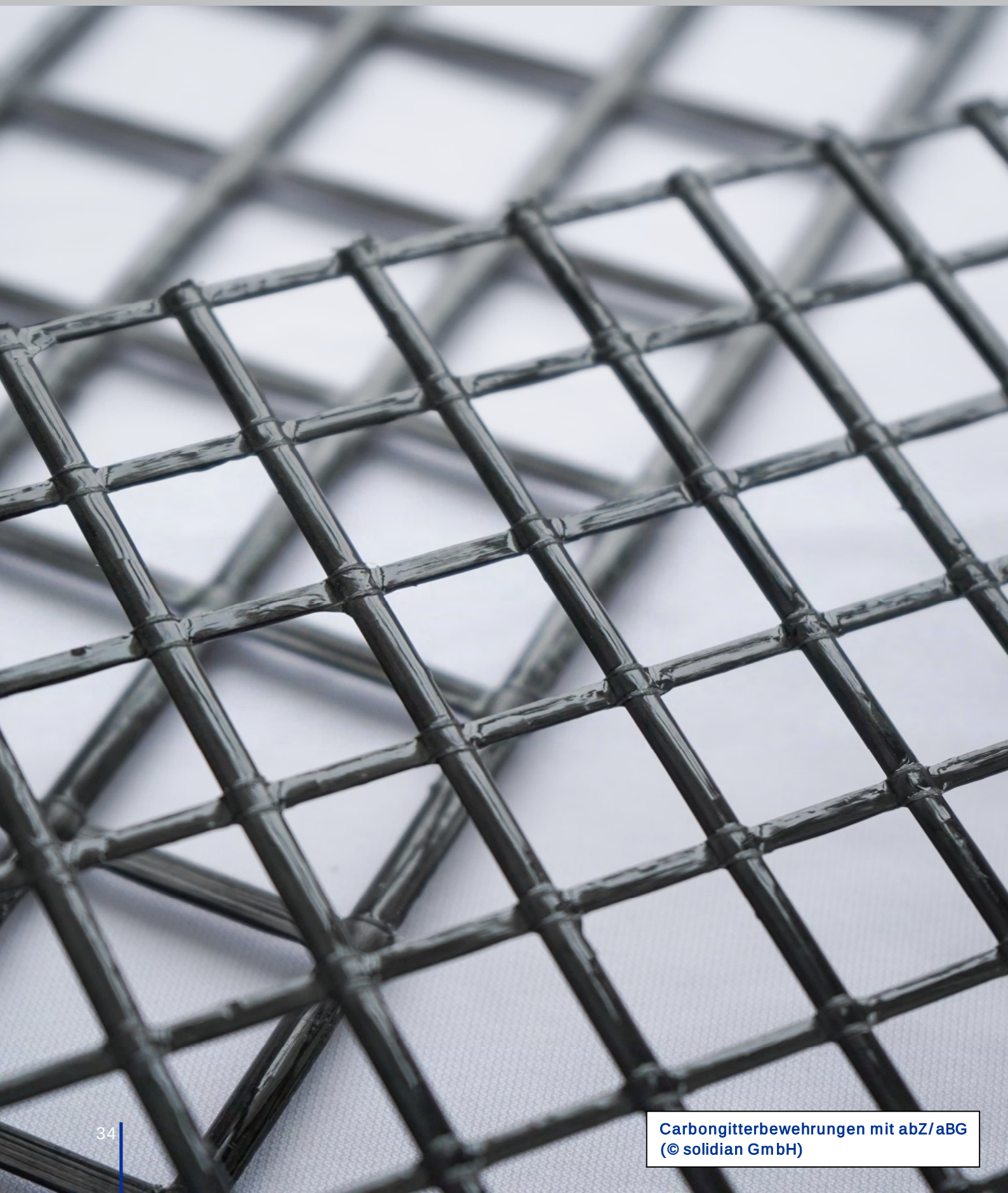
Der Abstand vom Probekörper zur ortsfesten Expositionsmessung betrug 1,00 m und 5,00 m. In der geschützten Atmosphäre des Prüfstandes wurde die Raumluft durch einen Detektor gesaugt, der mit einem Goldfilter versehen war. Ergebnis der jeweiligen Messung war ein bestaubter Filter pro Bewehrungstyp und Bearbeitungsverfahren. Die Auswertung der bestaubten Goldfilter erfolgte im Labor mittels eines Rasterelektronenmikroskops.

Bestimmt wurden die Konzentrationen für E-Staub (einatembarer Staub), A-Staub (aveolengäniger Staub), Quarzstaub sowie Kohlenstofffasern, sonstigen anorganische Fasern und organische Fasern. Die aktuellen Messergebnisse aus dem Jahr 2023 zeigen, dass bei sachgemäßer Handhabung und bei Einhaltung der geltenden Sicherheitsvorschriften keine unmittelbare Gesundheitsgefährdung durch Faserstäube, resultierend aus der Bearbeitung der Carbonbetonprüfkörper, besteht.

Die aktuell geltenden Kurzzeitgrenzwerte konnten eingehalten werden. Die unterschiedlichen Betongüten von C30/ 37 und C50/ 60 haben keinen Einfluss auf die Expositionswerte der gemessenen Parameter. Allerdings hat die Wahl des Bearbeitungsverfahrens maßgeblichen Einfluss auf die Menge der freigesetzten Betonstäube. Daher sind die spezifischen Schutzmaßnahmen und Arbeitsschutzrichtlinien auch individuell an die situativen Rahmenbedingungen anzupassen, um den Gesundheitsschutz zu gewährleisten. Dies umfasst unter anderem die Verwendung geeigneter Absaug- und Filteranlagen, persönliche Schutzausrüstung oder geeignete Nassverfahren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die durchgeführten Untersuchungen wichtige Erkenntnisse zur Faserbelastung im Umgang mit Carbonbewehrung geliefert haben. Sie tragen dazu bei, die Sicherheit und Akzeptanz der Carbonbetonbauweise zu erhöhen, indem sie eine dezidierte Betrachtung der tatsächlichen Gefährdungspotenziale ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass die maßgebliche Exposition von Faserstäuben nicht, wie zunächst angenommen, aus der Carbonbewehrung resultiert, sondern aus dem Beton. Dies konnte durch die ortsfesten Expositionsmessungen und die Analyse der Staubkonzentrationen in verschiedenen Abständen und bei unterschiedlichen Nachbearbeitungsmethoden bestätigt werden.

Nach seinem Studienabschluss und mehrjähriger Tätigkeit als Projektleiter im Innenausbau sowie Bauüberwacher gemäß Leistungsphase 8 ist **Veit Klopfer** nunmehr als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baubetriebswesen der TU Dresden tätig. In seiner Forschungstätigkeit konzentriert er sich maßgeblich auf den Sicherheits- und Gesundheitsschutz im Zusammenhang mit Carbonbeton sowie auf die Themen Lärm und Staub auf Baustellen.

Planung und Bau deutlich vereinfacht – durch Zulassung und Richtlinie



Carbongitterbewehrungen mit abZ/aBG (© solidian GmbH)

Mit der Veröffentlichung der DAfStb-Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung" gibt es nun eine anerkannte Regel der Technik für Carbonbeton. Diese Richtlinie definiert die Anforderungen an Material, Konstruktion und Ausführung von Carbonbetonbauteilen, was die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bauwerke gewährleistet. In Kombination mit entsprechenden Produktzulassungen für Bewehrungsgitter und -stäbe aus Glas- und Carbonfasern werden ehemals erforderliche Bauartgenehmigungen größtenteils überflüssig, was die Planung und Umsetzung von Carbonbetonbauteilen erleichtert.

solidian ist der erste Anbieter von nichtmetallischen Bewehrungen, der neben der aktiven Mitgestaltung der DAfStb-Richtlinie auch die erforderliche Produktzulassung (abZ) für solidian GRID, ein Bewehrungsgitter aus Carbonfasern, und eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) erwirkt hat. Diese erste bauaufsichtliche Zulassung für Carbongitterbewehrungen ist ein bedeutender Meilenstein in der Bauindustrie und stellt sicher, dass die neuen Baumaterialien den notwendigen Sicherheits- und Leistungsanforderungen entsprechen. Für die Carbongitterbewehrungen wurden umfangreiche Prüfungen und Bewertungen durchgeführt, um ihre Eignung und Zuverlässigkeit zu bestätigen. solidians Bewehrungsstäbe aus Glasfasern sowie besandete Carbonbewehrungsgitter befinden sich ebenfalls in einem laufenden Zulassungsprozess.

Der Vortrag beleuchtet den Zusammenhang zwischen den zugelassenen Bewehrungsgittern und der DAfStb-Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung". Er bietet Einblicke in die Anwendung und Bestimmungen für die Planung, Bemessung und Ausführung der zugelassenen Carbonbewehrungsgitter. Die DAfStb-Richtlinie bildet die technische Grundlage und definiert die Anforderungen an Materialeigenschaften, Dimensionierung und konstruktive Ausführung der Bauteile. Diese Richtlinie ist essenziell, um die Sicherheit und Qualität der Bauwerke zu gewährleisten, die Carbongitterbewehrungen verwenden.

Die bauaufsichtliche Zulassung ergänzt die DAfStb-Richtlinie, indem sie sicherstellt, dass die festgelegten Anforderungen in der Praxis erfüllt werden. Bevor solidian die Zulassung erhielt, musste nachgewiesen werden, dass die Produkte den Richtlinien entsprechen und die notwendigen Prüfungen bestehen. Dies umfasste Belastungstests, Langzeitstudien zur Haltbarkeit und Korrosionsbeständigkeit sowie praktische Anwendungsversuche.

Neu ist die Familienzulassung der Bewehrungsgitter, bei der durch Grenzwertbetrachtungen die Anwendungsgrenzen der Zulassung auf andere Gittertypen aus den gleichen Grundmaterialien erweitert werden. Technische Produktdatenblätter zu den geometrischen und mechanischen Kennwerten ergänzen die Betrachtung. Anhand ausgewählter realisierter Projekte wird praxisnah gezeigt, wie sich die Planung und Realisation von Bauwerken mit Faserverbundwerkstoffen durch die Richtlinie verändert und weiterentwickelt hat. Wo früher Gutachten oder Bauteilversuche nötig waren, kann nun nach Regelwerk geplant werden.

Das Zusammenspiel von DAfStb-Richtlinie und bauaufsichtlicher Zulassung für Carbongitterbewehrungen hat positive Auswirkungen auf die Bauindustrie:

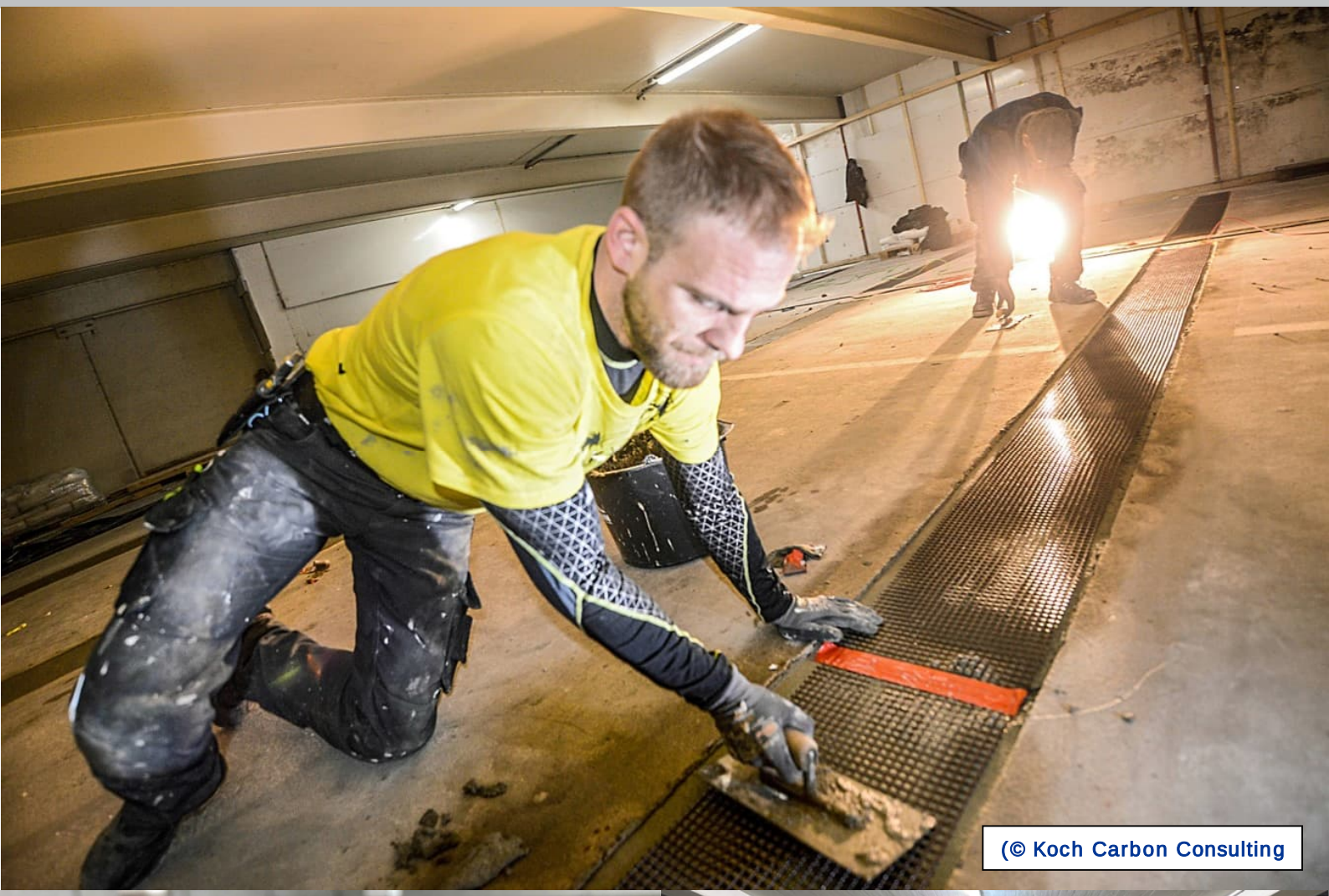
- Erhöhte Sicherheit: Strikte Anforderungen und Prüfungen gewährleisten die Zuverlässigkeit der Carbongitterbewehrungen.

- Innovation: Klare Richtlinien und Zulassungsverfahren fördern die Einführung neuer Technologien im Bauwesen.

- Nachhaltigkeit: Carbongitterbewehrungen bieten eine langlebige und korrosionsbeständige Alternative zu Betonstahl, was die Lebensdauer von Bauwerken verlängert und deren Instandhaltungskosten reduziert.

Torsten Knobloch studierte Bauingenieurwesen mit der Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der TU Dortmund. Nach seiner Tätigkeit in einem Ingenieurbüro und dem Zusatzstudium zum Wirtschaftsingenieur wechselte er 2005 in die Bauzulieferindustrie. Neben der Leitung des internationalen technischen Supports, verantwortete er das internationale Produktmanagement der HALFEN GmbH, zuletzt bei der mageba sa, Schweiz. Seit Mitte 2020 ist er Teil des solidian Teams und verantwortet das Produktmanagement, mit Fokus auf die lasttragenden Bewehrungen und entsprechenden Anwendungen.

Smarte Instandsetzung von Weißen Wannen mit Konstruktionsmängeln



(© Koch Carbon Consulting

Weiße Wannen sind eine, seit Jahrzehnten anerkannte Bauweise. Zum Einsatz kommen dabei Betonrezepturen mit hohem Wasser-Eindringwiderstand. Auf diese Weise findet keine Diffusion von der Außenseite der Betonoberfläche bis zur Innenseite statt. Lediglich während des Trocknungsprozesses nach der Hydration wird Feuchtigkeit aus dem Beton an das Innere des Gebäudes abgegeben.

Damit diese Technik funktioniert, müssen verschiedene technische Anforderungen erfüllt werden. Dies gilt z.B. für Betonieransätze und Anschlüsse. Sind Konstruktionen so groß, dass die Ausbildung von Dehnungsfugen notwendig ist, sind entsprechende Profile bei der Betonage einzubauen. Die Bewehrung ist so zu dimensionieren, dass die zu erwartende maximale Rissbreite im Beton auf ein Maximum von 0,2 mm begrenzt wird. Nur so kann sichergestellt werden, dass kein kapillarer Wassertransport stattfindet. In verschiedenen Fällen lässt man bewusst zu, dass sich Risse an Betonieransätzen oder auch in der Fläche bilden. Dort, wo dies planerisch zu erwarten ist, werden vorab bereits Injektionsschläuche eingebaut. Entstehen ungeplante Risse, erfolgt eine abdichtende Injektion durch entsprechend eingebohrte Packer. In Ecken und Winkeln ist dies häufig allein durch geometrische Herausforderungen schwierig. Auf Grund von Spannungen und Zwängung sind allerdings genau diese Bereiche besonders gefährdet. Zudem wird durch die Bohrkanäle und das meist austretende Harz die optische Erscheinung negativ beeinflusst.

Egal ob bei der Herstellung der Betonkonstruktion in der Planung oder bei der Ausführung Fehler gemacht wurden, jeder mit etwas Erfahrung in diesem Metier kennt weiße Wannen, die ihre Funktion nicht erfüllen, und wo auch nach mehrfachem Verpressen weitere Undichtigkeiten vorhanden sind. Dies hat vielfältige Gründe, z.B. Beschädigung der eingebauten Fugenbänder, verrutschte Injektionsschläuche, Bildung unerwarteter Risse, zu große Bewegung in verpressten Bereichen oder Fehler bei der rissbreitenbeschränkenden Bewehrung.

Mit Hilfe von Carbonbewehrung können nahezu alle der oben beschriebenen Unzulänglichkeiten beherrscht und abgedichtet werden. Da Carbon korrosionsbeständig ist, können sehr hoch bewehrte Schichten mit wenigen Zentimetern Einbaudicke hergestellt werden. Auf diese Weise werden Risse zusätzlich armiert oder fehlende oder falsch liegende Bewehrung nachträglich ergänzt und korrigiert.

Zudem wird kein flüssiges Reaktionsharz verpresst, bei dem man später die chemische Aushärtung nicht mehr zerstörungsfrei prüfen kann. Zusätzlich können mit Hilfe von Abdichtungsstreifen selbsttragende Rissbandagen hergestellt, und Risse mit signifikanter Breitenänderung können auf diese Weise dauerhaft abgedichtet werden. Versuche an der RWTH Aachen haben nachgewiesen, dass durch den hohen Bewehrungsgrad singuläre, sehr breite Risse durch die Carbonbewehrung in eine Vielzahl sehr feiner, nicht mehr wasserführende Risse aufgeteilt werden. Eine Technik, die bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in einem eigenen Merkblatt geregelt ist. Auf Grund der sehr geringen Aufbauhöhe des Carbonbetons können solche Bandagen in einer Stärke von weniger als 2 cm hergestellt werden, bei Bedarf wird die Bandage in Nuten ausgeführt und ist damit oberflächenbündig. Bei multiplen Rissbildern z.B. in einer Bodenplatte kann auch eine flächige Anwendung erfolgen.

Für die Verwendung von Reaktionsharzen werden in Europa bereits besondere Befähigungsnachweise gefordert und es gelten Nutzungsbeschränkungen. Mittels Carbonbeton stehen innovative, zuverlässige Verfahren zur Verfügung, die einen neuen Standard für die Instandsetzung weißer Wannen etablieren werden. Große Referenzprojekte wurden bereits erfolgreich ausgeführt, alle Voraussetzungen sind erfüllt. Sprechen Sie uns gerne an.

Detlef Koch

Ist geschäftsführender Gesellschafter der Koch Carbon Consulting GmbH. Er ist Spezialist auf dem Gebiet Carbonbeton, für Mörteltechnologie, und für kathodischen Korrosionsschutz. Seit über 30 Jahren führte er sein eigenes Unternehmen in diesen Bereichen. In dieser Zeit hat er unzählige Projekte von Parkhäusern über Kläranlagen bis hin zu verschiedensten Industrieanlagen und große Sportstätten instandgesetzt.

Mit der Koch Carbon Consulting GmbH führt Herr Koch den Weg weiter, innovative Techniken zu entwickeln und durch die Kombination technischer Möglichkeiten neue Lösungen zur Marktreife zu bringen

Anforderungen | Handlungsempfehlungen für das Recycling von Carbonbeton

Abbruchmaterial Carbonbeton (© Jan Kortmann)

Die beim Recycling von Stahlbeton eingesetzten Verfahren der Separation von Bewehrungen mit Magnetabscheidern sind hinlänglich bekannt und baupraktisch umgesetzt. Die Substitution der Stahlbewehrung durch kohlenstoffbasierte Carbonfasern (CFK) hat unmittelbaren Einfluss auf die üblichen Abbruch-, Recycling- und Entsorgungsprozesse.

Die Carbonfasern werden aus kohlenstoffhaltigen Ausgangsmaterialien hergestellt, sind chemisch inert und nicht magnetisch. Die bereits realisierten Carbonbetonbauwerke und der jährlich steigende Verbrauch an CFK (Wachstum des CFK-Bedarfs ca. 9 % jährlich seit 2019, globaler CFK-Bedarf im Bauwesen ca. 7.740 t in 2022) zeigen, dass zukünftig signifikante Mengen an Carbonfasern in Bauwerken verbaut sind. Die verbaute Carbonbewehrung wird über viele Jahrzehnte die sichere und ressourceneffiziente Nutzung von Gebäuden sicherstellen, jedoch sind bereits jetzt Recyclingprozesse zu betrachten. Zudem entstehen faserhaltige Abfälle nicht erst am Ende der Nutzungszeit, sondern schon heute bei der Bewehrungsproduktion, der Bauteilherstellung sowie dem Umbau von Carbonbetonbauwerken.

Vor dem Hintergrund des Ressourcenverbrauches, dem CO2-Ausstoß bei der Gewinnung von Carbonfasern und der Minimierung etwaiger Entsorgungskosten ist die Rückführung der Fasern in den Stoffkreislauf das angestrebte Ziel. Zur Einhaltung der rechtlichen Recyclingquoten im Sinne der stofflichen Verwertung (70 % Massenanteil für nicht gefährliche Bau- und Abbruchabfälle und 85 % Massenanteil für die Kunststoffausbringung) muss das Carbonfasermaterial im Recyclingprozesses durch geeignete Aufbereitungsverfahren von der Betonmatrix gelöst und in einem nachfolgenden Aufbereitungsprozess vom Betonrezyklat separiert werden. Für die Recyclingfähigkeit des Baustoffes Carbonbeton ist die Trennbarkeit der Komponenten Beton und Carbonbewehrung sowie die ressourceneffiziente Verwertung der Fraktionen entscheidend.

Bau- und Abbruchunternehmen benötigen hierzu Handlungsempfehlungen. Mit den C³-Forschungsprojekten zum Recycling von Carbonbeton und dem branchenübergreifenden Einsatz recycelter Carbonfasern konnte vor einigen Jahren der Nachweis erbracht werden, dass das Recycling von Carbonbeton mit vorhandenen Technologien bereits umsetzbar ist. An dieser Stelle sei auf den Fact Sheet „Recycling von Carbonbeton“ verwiesen. Für die baupraktische und wirtschaftliche Umsetzung des Recyclings von Carbonbeton, wie es bei metallischer Bewehrung der Fall ist, bedarf es einer effizienten Sortierung, Aufbereitung und stofflichen Verwertung der Fasern. Neben der technologischen Machbarkeit sind dabei weitere technische und organisatorische Prozesse entscheidend. An dieser Stelle setzen die aktuellen WIRreFa-Projekte an.

Bisher werden Abbruchabfälle aus Carbonbeton über bisherige Wege für mineralische Abfälle häufig entsorgt, jedoch kaum bis gar nicht verwertet (recycelt). Auf Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnisse und ohne Zuordnung zu gefährlichen Abfällen im Abfallverzeichnis, handelt es sich dabei nicht um so genannten „Sondermüll“, sondern um mineralische Abfälle, die dem Recycling zur Verfügung stehen.

Hierzu werden in den Jahren 2024 bis 2026 praxisnahe Umsetzungskonzepte erarbeitet, die das getrennte Sammeln der CFK-haltigen Abfällen aufgreifen (WIR-V1.1), die Fraktionen Betonmatrix und CFK trennen und das CFK in der Art aufbereitet (WIR-V1.2), dass es zu neuen Carbonbewehrung verarbeitet werden kann (WIR-V1.3). Für die Zielerreichung wird mit dem Projektstart von WIR-V1.2 eine bestehende Recyclinganlage in Dresden und Freiberg in der Art modifiziert, dass die Anforderungen aus dem Baubereich und der RC-Textilverarbeitung erfüllt werden.

Fazit: Der Stoffkreislauf beim Recycling von Carbonbeton ist noch nicht vollständig geschlossen, aber die erforderlichen Prozesse sind bekannt. Die kommenden zwei bis vier Jahre werden hier die entscheidenden Schritte zum Kreislaufschluss bringen.

Dr.-Ing. Jan Kortmann studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Dresden. Mit Abschluss der Promotion zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton übernahm er 2020 die Stelle als Oberassistent am Institut für Baubetriebswesen der TU Dresden. Er verantwortet zudem als Forschungsgruppenleiter die Schwerpunkte Recyclingtechnik, Kreislaufwirtschaft und Arbeitsschutz, insbesondere zum Carbonbeton. Derzeit beschäftigt er sich im Rahmen des Projektes WIRreFA-V1.2 mit dem CFK-Recycling.

Einsatz von recycelten Kohlenstofffasern und rezyklierter Gesteinskörnung für die Carbonbetonbauweise

Lebenszyklusphasen beim Einsatz recycelter Materialien (© HTWK Leipzig)

Die stoffliche Verwertung produktionsbedingter faserhaltiger Abfälle stellt eine wirtschaftlich und ökologisch unerlässliche Voraussetzung zur Erhöhung der Ressourceneffizienz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen dar. Der Werterhalt der recycelten Carbonfasern (rCF) spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Derzeit erfolgt die Verarbeitung von rCF hauptsächlich zu Füllstoffen z. B. für Spritzgussanwendungen oder Vliesstoffen. Aufgrund der dabei relativ schlechten erzielbaren mechanischen Eigenschaften sind diese Ansätze nur bedingt für den erneuten Einsatz im Strukturleichtbau geeignet.

Ähnlich zu den faserhaltigen Abfällen verhält es sich mit den Materialien, die beim Abbruch von Gebäuden und Infrastruktur anfallen. Gerade einmal 1% der mineralischen Abfälle finden eine Wiederverwendung im Betonhochbau. Der Rest wird im Tiefbau als z. B. Tragschicht verbaut. Dieses Downcycling der wertvollen Gesteinskörner entspricht jedoch nicht den Zielen der Bundesregierung zur ressourceneffizienten Verwendung von Materialien und zum Schutz der Umwelt.

Vor den genannten Hintergründen wurde das Bündnis WIR! Wir recyceln Fasern initiiert mit dem Ziel insbesondere faserhaltige Abfälle, aber auch mineralische Abfälle zu hochwertigen Sekundärbaustoffen aufzuarbeiten und somit den Stoffkreislauf von Faserverbundbauteilen zu ergänzen.

Im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeiten des IfB und seinen Kooperationspartnern werden die Voraussetzungen für den Einsatz von rCF und recycelten Gesteinskörnungen im Carbonbetonbau geschaffen. Dabei stehen die Nutzung der bisherigen Abfallströme und die Reduzierung, im besten Fall die Vermeidung, der Entnahme natürlicher Ressourcen im Vordergrund. Die übergeordneten Ziele sind: 1. die Entwicklung und Herstellung verschnittfreier Bewehrungsstrukturen aus rCF-Garnen, 2. einer Betonmatrix mit erhöhtem Anteil an recycelten Gesteinskörnungen (R-Beton) mit dem Schwerpunkt die bisher ungenutzten Feinanteile (≤ 2 mm) zu verwenden und 3. die Fertigung von Carbonbetonbauteilen.

Für die Verarbeitung von rCF-Garnen mit der robotergestützten Garnablagetechnik bedarf es der konstruktiv-technologischen Anpassung der Anlagenkomponenten, um damit im Carbonbetonbau einsetzbare Bewehrungsstrukturen fertigen zu können. Diese ist insbesondere durch die Materialcharakteristik der rCF-Garne begründet. Die besonders schonende Verarbeitung der rCF-Garne steht bei den Entwicklungsarbeiten im Vordergrund. Bezüglich der Verwendung der feinen Gesteinskörnungen im angestrebten R-Beton sind die Aufbereitungsmethoden, die Betonmischung an sich und die Prüfmethoden Forschungsschwerpunkt.

Die Forschungsergebnisse zeigen, dass weitere umfassende Anpassungen der Technik für die Garnablage zur Realisierung von Bewehrungsstrukturen erforderlich sind. In Bezug auf den Einsatz von R-Beton wurde die gesamte Prozesskette von der Aufbereitung der mineralischen Abfälle hin zu hochwertigen Sekundärbaustoffen analysiert und an die neuen Anforderungen des Carbonbetonbaus angepasst. Dies sorgt für aufeinander abgestimmte Prozessschritte und dem verlustfreien Informationsaustausch entlang der Wertschöpfungskette bei der Wiederverendung von R-Materialien. Zudem wurden mehrere Betonmischungen mit einer schrittweisen Erhöhung des Rezyklatanteils von 0 bis 60 % und einer Referenzmischung für den Anwendungsfall Fassadenelement entwickelt und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Die Annahme, dass der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen kleiner als 2 mm generell mit Qualitäts- und Festigkeitsverlusten verbunden ist, konnte nicht bestätigt werden. Hierzu finden tiefergehende Untersuchungen statt.

Das Verbundvorhaben leistet einen Beitrag zur Entwicklung nachhaltiger Baupraktiken, indem es die Nutzung und Wiederverwertung von Faser- und mineralischen Abfällen aus Industrieprozessen und Abbruch zur Fertigung neuer Carbonbetonbauelemente forciert.

M.Sc. Robert Kraft

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau der HTWK Leipzig mit den Forschungsschwerpunkten Nachhaltiges Bauen, Recycling und Baukonstruktion.

Dr.-Ing. Steffen Rittner

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau der HTWK Leipzig mit den Forschungsschwerpunkten Textilbewehrungen, Fertigungsverfahren und Funktionsintegration.

Prof. Dr.-Ing. Klaus Holschemacher

Professor für Stahlbetonbau und Direktor des Instituts für Betonbau der HTWK Leipzig.

FiberConnect: Sichtbarmachung des perfekten Kunden und Lieferanten im Stoffkreislauf

Web-Plattform FiberConnect (© InfAI e.V.)

Der Stoffkreislauf für Faserverbundwerkstoffe bietet enorme Potenziale für Innovation und Nachhaltigkeit. Um diese Potenziale auszuschöpfen, ist eine stets aktuelle Übersicht aller relevanten Akteure erforderlich. Unser Ziel ist es, das Elbtal in Sachsen als Modellregion zu etablieren. FiberConnect schafft Transparenz und motiviert Unternehmen zur Teilnahme und zur Erschließung neuer Geschäftsfelder durch die Sichtbarmachung des perfekten Kunden und Lieferanten im Stoffkreislauf.

Mit FiberConnect entwickeln wir eine benutzerfreundliche, frei zugängliche Web-Plattform, die kontinuierlich alle relevanten Akteure im Stoffkreislauf für Faserverbundwerkstoffe auflistet. Die Plattform unterstützt Unternehmen dabei, die passenden Kunden und Lieferanten zu finden, um ihre Position im Stoffkreislauf zu stärken. Im Hintergrund arbeiten drei KI-Modelle, die als KI-Radar fungieren. Diese identifizieren ständig neue relevante Akteure, ordnen sie den Phasen des Stoffkreislaufs zu und erstellen Unternehmensbeschreibungen. Nach manueller Freigabe werden diese Informationen automatisch auf die Web-Plattform hochgeladen.

Der Nutzen von FiberConnect liegt in der fortlaufenden Verfügbarkeit der Ergebnisse auf der frei zugänglichen Web-Plattform unter www.wir-recyclen-fasern.de. Hier werden die Akteure aufgelistet und auf einer interaktiven Karte visualisiert, die die Standorte der Unternehmen im Elbtal zeigt. So lässt sich auf einen Blick erkennen, wie viele Unternehmen je Stoffkreislaufphase über die Region verteilt sind. Unternehmen, die sich fragen, ob und wie sie sich am Stoffkreislauf für Faserverbundwerkstoffe beteiligen können, finden hier Antworten. Sie sehen, ob sie gelistet sind und welche anderen Unternehmen aus ihrer Branche ebenfalls dabei sind. Mit einem Klick auf angrenzende Stoffkreislaufphasen lassen sich potenzielle Geschäftspartner und Lieferanten identifizieren.

Der Input für den KI-Radar sind die Webseiten von Unternehmen im Elbtal Sachsen. Die URLs der Webseiten kommen aus einer stets aktuellen Unternehmensbank. Das Institut für Angewandte Informatik (InfAI e.V.) hat einen Webcrawler entwickelt, der auf Basis der URLs die HTML-Seiten der Unternehmenswebsites herunterlädt. Im Durchschnitt werden pro URL 18 HTML-Seiten gecrawlt. Bei rund 80.000 Unternehmenswebseiten in Sachsen ergibt das etwa 1,4 Millionen HTML-Seiten.

Fachspezifische Schlüsselwörter helfen dabei, relevante Inhalte aus den gecrawlten Webseiten zu extrahieren. Diese dienen als Grundlage für die KI-Modelle, die entscheiden, welche Unternehmen relevant sind, sie den Phasen des Stoffkreislaufs zuordnen und kurze, prägnante Beschreibungen erstellen. Wir trainierten die Modelle mit 327 manuell zugeordneten Unternehmen. Nach verschiedenen Optimierungen erreichten wir auf einem Testset, das ein Verhältnis von 1:10 (relevante zu irrelevanten Unternehmen) aufwies, eine Genauigkeit von 96 % und einen F1-Score von 80 %. Nach abgeschlossenem Training wurde der KI-Radar als API bereitgestellt und auf die aktuellen sächsischen Unternehmenswebseiten angewendet. Dabei wurden 1.606 relevante Unternehmen identifiziert, kategorisiert und beschrieben.

FiberConnect bietet eine innovative und benutzerfreundliche Lösung zur Darstellung des Stoffkreislaufs für Faserverbundwerkstoffe im Elbtal, Sachsen. Die Plattform schafft Transparenz und fördert die regionale wirtschaftliche Entwicklung durch Kooperation und Vernetzung der Unternehmen. Durch die kontinuierliche Aktualisierung der Datenbasis bleibt FiberConnect stets auf dem neuesten Stand und bietet einen wertvollen Service für alle Beteiligten.

Anne Kreuter ist seit Oktober 2023 wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Gruppe »Data Science für Innovation« am Fraunhofer IMW. Sie erwarb ihren Master of Science im Fach Computational Linguistics an der Universität Stuttgart. Im Rahmen ihres gewählten Schwerpunkts »Deep Learning für Natural Language Processing« verfasste sie ihre Masterarbeit zum Thema »Author Profiling in Social Media in Bezug auf mentale Gesundheit und Persönlichkeitsmerkmale«, die später als Publikation bei einem Workshop der Association for Computational Linguistics veröffentlicht wurde.

CPC-Bauweise erobert den Hochbau - Nachhaltigkeit zeigen und diskutieren

Eröffnung Innovationslabor Grüze mit über 120 Gästen in Winterthur (© Dorian Bürgi ZHAW)

Am 30. Mai wurde in Winterthur-Grüze, Schweiz das «Innovationslabor» eröffnet. Es dient der Stadt Winterthur als Plattform für verschiedenste Zukunftsthemen. In einer ersten Phase ist es ein Besucherzentrum für den Bau der Querung Grüze, einem knapp 400 Meter langen Brückenbauwerk mitten in der Stadt.

Daneben ermöglicht es der Winterthurer Stadtverwaltung aufgrund der thematischen Aus- und Umgebungsgestaltung mit der Lokalbevölkerung in den Dialog zu treten; das Labor soll zum Treffpunkt werden, um mit einer Tasse lokal geröstetem Kaffee in der Hand über Zielkonflikte, Konsequenzen des Klimawandels und die Neuentwicklung des Quartiers Grüze nachzudenken und gemeinsam Lösungen zu diskutieren. Hierbei rücken insbesondere die Umgebungsgestaltung sowie das begehbare und bepflanzte Dach als Experimentierfeld für Themen wie Schwammstadt, Biodiversität oder Solarenergie in den Vordergrund. Später kann es sich zum Quartierzentrum weiterentwickeln.

Obschon es vermessen wäre, das «Innovationslabor» in Winterthur-Grüze als überdimensionales Baukasten-Werk zu bezeichnen, zeigen sich doch gewisse Parallelen zu einem 3-D-Puzzle.

Seit mittlerweile über einem Jahrzehnt forscht die Fachgruppe Faserverbundkonstruktionen der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften ZHAW an der neuen CPC-Bauweise. Auf dieser Grundlage hat der Industriepartner CPC AG in den letzten neun Jahren über 200 Projekte aus Carbon Prestressed Concrete (CPC) umgesetzt. Bereits seit langem ist der Wunsch da, mit der sehr nachhaltigen Technologie in den tragenden Hochbau vorzustoßen. Dank den Verbindungstechniken, welche in den letzten Jahren entwickelt wurden, ist dies nun möglich und mit dem «Innovationslabor» ist diese Vision ein erstes Mal Wirklichkeit geworden.

Die CPC-Bauweise ist ein Aushängeschild der Forschung des Departements Architektur, Gestaltung und Bauingenieurwesen der ZHAW und auch den Verantwortlichen des federführenden Tiefbauamts wohlbekannt. Folglich brauchte es nur wenig Überzeugungskraft um die Partnerschaft zwischen dem Tiefbauamt, der ZHAW sowie Holcim und CPC als Industriepartner zu besiegeln. Während das Tiefbauamt Bauherrschaft und Nutzer des «Innovationslabor» ist, zeichnete die ZHAW für die Entwicklung und Planung des Bauwerks verantwortlich, CPC liefert das Ausgangsmaterial und Holcim bleibt Eigentümerin des CPC-Tragwerks und vermietet es ans Tiefbauamt. So ist sichergestellt, dass die Bauelemente wieder zurückgebaut werden und später zu einem neuen Einsatz kommen.

Fachspezifische Schlüsselwörter helfen dabei, relevante Inhalte aus den gecrawlten Webseiten zu extrahieren. Diese dienen als Grundlage für die KI-Modelle, die entscheiden, welche Unternehmen relevant sind, sie den Phasen des Stoffkreislaufs zuordnen und kurze, prägnante Beschreibungen erstellen. Wir trainierten die Modelle mit 327 manuell zugeordneten Unternehmen. Nach verschiedenen Optimierungen erreichten wir auf einem Testset, das ein Verhältnis von 1:10 (relevante zu irrelevanten Unternehmen) aufwies, eine Genauigkeit von 96 % und einen F1-Score von 80 %. Nach abgeschlossenem Training wurde der KI-Radar als API bereitgestellt und auf die aktuellen sächsischen Unternehmenswebseiten angewendet. Dabei wurden 1.606 relevante Unternehmen identifiziert, kategorisiert und beschrieben.

FiberConnect bietet eine innovative und benutzerfreundliche Lösung zur Darstellung des Stoffkreislaufs für Faserverbundwerkstoffe im Elbtal, Sachsen. Die Plattform schafft Transparenz und fördert die regionale wirtschaftliche Entwicklung durch Kooperation und Vernetzung der Unternehmen. Durch die kontinuierliche Aktualisierung der Datenbasisbleibt FiberConnect stets auf dem neuesten Stand und bietet einen wertvollen Service für alle Beteiligten.

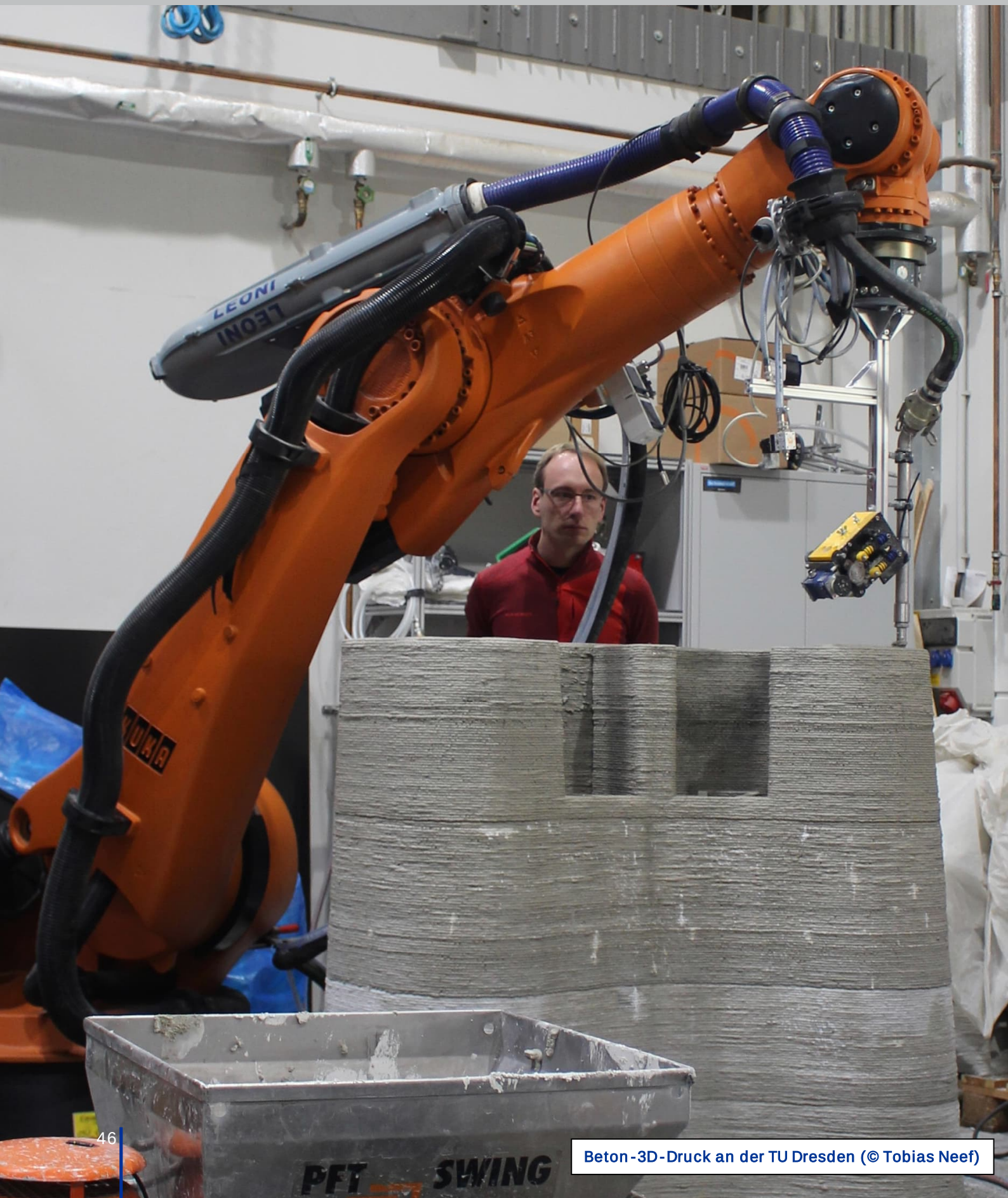
Prof. Josef Kurath ist diplomierter Bauingenieur der ETH Zürich, Mitgründer des Ingenieurbüros Staubli, Kurath & Partner AG (1991) und des Startups CPC AG.

Seit 1998 lehrt und forscht er an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW.

Lehre im Bereich Baustatik, Konstruktives Entwerfen und Faserverbundkonstruktionen bei den Architekten und Bauingenieuren.

Forschung im Bereich Faserverbundkonstruktionen am Institut für Bautechnologie und Prozesse.

Herstellverfahren der nächsten Generation



Beton-3D-Druck an der TU Dresden (© Tobias Neef)

Niedrige Produktivität und zunehmender Arbeitskräftemangel stellen große Herausforderungen bei der traditionellen Herstellung von dünnwandigen Strukturen dar. Im Rahmen des SFB-Transregio 280 werden daher neue Konstruktionsprinzipien für Carbonbeton entwickelt, die auf robotergestützte, digitalisierte Fertigungstechnologien setzen und durch maßgeschneiderte Materiallösungen ergänzt werden.

Ein Beispiel dafür ist die Herstellung von vielseitigen, bionisch inspirierten 3D-Textilbewehrungen mittels eines kooperativen Robotersystems. Hierbei wird die robotergestützte Garnplatzierung auf die Aushärtungsphase der Imprägnierung synchronisiert. Durch KI-gestütztes Design wird die Tragfähigkeit des Textils maximiert und der anschließende robotergestützte Betonierprozess rationalisiert. Die 3D-Bewehrungsstruktur liefert in schalungsfreien Bauweisen die allgemeine Form und den Halt für den frischen Beton. Ein innovativer Druckkopf ermöglicht die bedarfsgerechte Zugabe von Fließmitteln oder Beschleunigern zur Realisierung einer zeitabhängigen Rheologiesteuerung. Zudem wird eine umfassende Kontrolle des Materialflusses, der räumlichen Positionierung der textilen Verstärkungsstruktur und der aufgebrachten Betonschichten durch Echtzeitanpassungen auf Basis von Computer Vision eingeführt.

Ein anderer Ansatz zur Herstellung geometrisch komplexer carbonbewehrter Strukturen ist die Erforschung anpassungsfähiger Prepreg-Bewehrungen. Durch eine verzögerte Konsolidierung der Imprägnierung wird die gewünschte Form während des Betoniervorgangs erreicht. Die Aushärtung der Bewehrung kann durch ohmsches Heizen beschleunigt, werden und es werden Zugfestigkeiten erzielt, die mit herkömmlicher Carbonbewehrung vergleichbar sind. Hierfür wird ein originelles Multi-Aktuator-System mit modellbasierter Positionssteuerung entwickelt und die Wechselwirkungen zwischen Werkzeugkinematik, Matrix und Prepreg in Faltexperimenten untersucht.

Ein weiterer Höhepunkt der Forschung ist das innovative Extrusionsverfahren, das die Serienherstellung von dünnwandigen, verstärkten CRC-Platten mit variablen Querschnitten revolutioniert. Diese materialminimierten Platten können noch im frischen Zustand zu komplexen Geometrien für Strukturbauteile umgeformt werden. Ein Beispiel dafür ist die Herstellung von gebogenen Einlagestreifen, die den Kern eines Deckenelements bilden.

Für alle Herstellungsverfahren soll ein neues robustes, kohlenstoffarmes Bindemittelkonzept entwickelt werden, das auf allgemein verfügbaren Rohstoffen basiert. Dabei werden kalzinierter Ton und Kalkstein als Ergänzung zu zementhaltigen Materialien verwendet, um Mischzemente mit einem Klinkeranteil von weniger als 40 % zu erreichen.

Die Reduzierung des Klinkeranteils führt zu einer geringeren Frühfestigkeit, die durch eine milde alkalische Aktivierung mit einer geeigneten Kombination von Beschleunigern und Verzögerern ausgeglichen wird. Zusätzlich werden die Auswirkungen der CO2-Härtung auf die Frühfestigkeit untersucht, um die CO2-Bilanz weiter zu verbessern.

Die Forschungsarbeit im SFB TRR 280 strebt danach, all diese innovativen Konzepte synergetisch zu nutzen, um ein vielseitiges und nahtloses technologisches Instrumentarium zu schaffen, das im Bereich des Bauwesens wirklich transformativ ist. Durch die Verbindung von Präzision und Schnelligkeit der Robotik mit dem Einfallsreichtum biologischer Prinzipien und der technologischen Flexibilität fortschrittlicher Materialien wird ein Weg in eine nachhaltigere, ressourceneffiziente Zukunft durch carbonbewehrten Betonbau geebnet.

Neben den Autoren des Aufsatzes sind an der Arbeit die folgenden Forscherinnen und Forscher beteiligt: C. Cherif, L. Hahn, T. Neef (alle TU Dresden) sowie T. Gries, C. Morales Cruz, O. Reinertz, M. Scheurer, K. Schmitz (alle RWTH Aachen)

Viktor Mechtcherine leitet seit 2006 das Institut für Baustoffe an der TU Dresden. Nach seiner Promotion im Jahr 2000 am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) arbeitete er dort als Oberingenieur und stellvertretender Institutsleiter und war von 2003 bis 2006 Professor an der TU Kaiserslautern.

Thomas Matschei leitet seit 2020 das Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen. Nach seiner Promotion im Jahr 2008 an der Universität Aberdeen im Bereich Zementchemie arbeitete er in der Zementindustrie und war von 2017 bis 2020 Professor an der HTW Dresden.

Textilbetonrückenabdichtung auf Eisenbahngewölbebrücken

Instandsetzung des Kevag-Viadukts in Koblenz

Das Kevag-Viadukt vor der Instandsetzung

Ausführung der Pilot-Instandsetzung

Ausbau Oberbau und Reinigung Bestandsuntergrund

Applikation textilbewehrte Rückenabdichtung

(© Dr. Büttner – MK Ingenieure GmbH, A. Dahlhoff – ibac RWTH Aachen)

Im Zuge des aufkommenden Sanierungsbedarfs wird der Gedanke des Instandsetzens von Ingenieurbauwerken unter Beachtung der Nachhaltigkeitsziele immer bedeutungsvoller. Insbesondere Eisenbahngewölbebrücken haben aufgrund einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 111 Jahren und der damit einhergehenden Dauerhaftigkeit ein großes Potential für vorhandene Resttragfähigkeit.

Von den 5926 Gewölbebrücken der Deutschen Bahn benötigen eine Vielzahl von Brücken in den nächsten 6 Jahren dringend Maßnahmen zur Instandsetzung. Dabei führt eindringende und rückstauende Nässe, die sich im Gewölberücken sammelt, häufig in Kombination mit dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr zu dem Verlust des Verbundverhaltens im Mauerwerk, Rissbildungen, Steinverluste sowie Verformungen, Verschiebungen und Verkippungen.

Um diesen Schadensmechanismen entgegenzuwirken, wurde in Kooperation mit der RWTH Aachen, dem Institut für Baustoffforschung (ibac) und der TU Dresden, dem Institut für Massivbau sowie zwei Partnern aus der Industrie, der Firma Massenberg und der Firma BAWAX eine konstruktive Rückenabdichtung weiterentwickelt. Diese Rückenabdichtung besteht aus einer Textilbetonschicht aus nicht-metallischer Carbonbewehrung getränkt mit Acrylat und einem Dichtmörtelsystem zur Betoninstandsetzung.

Im Zuge der Instandsetzung auf dem Gewölberücken des Kewag-Viadukts bei Koblenz, auf der Bahnstrecke von Koblenz nach Wetzlar im Bahnkilometer 102,244 km, wurde das Instandsetzungskonzept erstmals als Pilotprojekt umgesetzt. Das Viadukt, aus dem Jahr 1878, besteht aus 5 Bögen und weist in einigen Abschnitten eine sehr verminderte Überdeckungshöhe von ca. 10 cm zwischen dem Gewölberücken und der Schwellenunterkante auf. Aufgrund der erforderlichen Einhaltung der Gradienten können hier keine klassischen Fahrbahnplatten aus Stahlbeton eingesetzt werden, da die maximal zulässigen Bauteilhöhen überschritten würden. Des Weiteren würden Instandsetzungsmaßnahmen auf der Innenseite des Gewölbes das Regelprofil verringern und zum anderen die Feuchtigkeit im Bauwerk einsperren. Aufgrund einer querenden Straße sowie Bahnlinie ist eine Reduktion der lichten Durchfahrtshöhen bei zwei der 5 Bögen keine Instandsetzungsmöglichkeit.

Zur Erfolgskontrolle der Instandsetzungsmaßnahme, insbesondere um die Dauerhaftigkeit der Rückenabdichtung, infolge eines Trocknungsprozesses zu überprüfen, wurden bereits ein Jahr vor der Applikation Feuchtesensoren, in Form von Multi-Ring-Elektroden, auf der Gewölbeinnenseite in das Bestandsgewölbe und in dem aufgehenden Pfeilerbereich tiefengestaffelt eingebracht [6]. Über die Sensorik wurde der Feuchtegehalt im Bestandstragwerk vor und nach der Instandsetzung erfasst und miteinander verglichen. Die Ausführung der Instandsetzungsmaßnahme am Kewag-Viadukt erfolgte im Oktober 2023 durch die Firmen Bahnbau Gruppe, Massenberg sowie BAWAX. Im Zuge der Arbeiten erfolgte zunächst der Rückbau des Oberbaus bis zu der Schutzlage der bituminösen Abdichtung. Diese konnte nur in Teilbereichen aufgrund der Unebenheiten im Bestand erhalten werden. Nach dem Rückbau des Oberbaus erfolgte die Reinigung des Bestandes mittels Hochdruckwasserstrahlen, um minderfeste Schichten in ausreichendem Maß zu entfernen.

Vor der Applikation der Abdichtungslage erfolgte eine Egalisierung des Untergrundes mittels polymermodifizierten Mörtels sowie bei freiliegender Altabdichtung die Applikation eines Haftvermittlers. Nach Abschluss der vorbereitenden Arbeiten erfolgte die lagenweise Applikation des Textilbetons inklusive der erforderlichen Nachbehandlung. Um die entsprechende Einbauleistung realisieren zu können, wurde das Material maschinell gemischt, zur Einbaustelle mittels Pumpen gefördert und dort mittels Patsche händisch verteilt und verdichtet. Alle Randanschlüsse an aufgehende Bauteile oder Einbauteile (wie Entwässerungsöffnungen) erfolgten mit einer auf den Mörtel abgestimmten Polymerzementschlämme. Die gesamte Abdichtungslage wurde vor dem Einbau des Oberbaus mit einem Geotextil geschützt und so auch während des Oberbaueinbaus nachbehandelt. Die Umsetzung des Pilotprojektes führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Die textilbewehrte Mörtelschicht als Rückenabdichtung konnte nach den technischen Anforderungen als Pilotanwendung in den Zeitintervallen umgesetzt werden.
- Die Applikation von zementbasierten Produkten bietet die Möglichkeit erforderliche Wartezeiten infolge von nassen Untergründen auf ein Minimum zu reduzieren und so flexibel auf Anforderungen aus Witterung oder dem Bauablauf zu reagieren.
- Die Verknüpfung von innovativen Materialien mit der Instandsetzung von Infrastrukturbauwerken ermöglichen nach aktuellem Wissenstand und den bisher vorliegenden Erkenntnissen aus dem Pilotprojekt neuartige ressourceneffiziente, dauerhafte Lösungskonzepte.

Conrad Pelka: Mitarbeiter der DB Netz AG und wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMB der TU Dresden, seit 2023 Mitarbeiter DB Netz AG Zentrale Berlin als Experte Gewölbebrücken

Annette Dahlhoff: Bauingenieurstudium an der RWTH Aachen, seit 2021 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffforschung in der Arbeitsgruppe Bauwerkserhaltung und Instandsetzung

Weitere Autoren: Till Büttner, Michael Raupach und Steffen Marx.

70 m langen Seeblickwegbrücke aus Holz-Carbonbeton

(© T. Krämer)

Die 70 m lange Seeblickweg-Brücke Fuß- und Radwegverbindung in Stuttgart setzt neue Maßstäbe durch ihren innovativen Einsatz von Holz und Carbonbeton. Diese Kombination aus Materialien ist nicht nur wegweisend, sondern auch ästhetisch ansprechend. Als Zweifeldträger konzipiert, muss die Brücke kontinuierlich wechselnde Biegekräfte bewältigen. Um diese Herausforderung optimal zu meistern, besteht der Querschnitt am zentralen Auflager vollständig aus Carbonbeton. Im Feld hingegen kommt ein Holz-Beton-Verbund (HBV) Querschnitt zum Einsatz, der die positiven Eigenschaften beider Materialien vereint und so die optimale Symbiose in Bezug auf die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit im vollen Einklang mit der Nachhaltigkeit darstellt.

Die Verbindung zwischen dem CNC-gefrästen Holzquerschnitt und der darüberliegenden Betonplatte wird durch eingeklebte Schubbleche realisiert. Hierbei wurde die üblicherweise erforderliche Mindestbewehrung Q188 gemäß der Zulassung durch eine fortschrittliche Carbonbewehrung ersetzt. Die Holzelemente werden an den Auflagern mittels Glasfaserstäben in der Betonplatte verankert, die im Holzquerschnitt verklebt sind. Auf der Betonseite sorgen die Kopfbolzen der Stäbe für eine sichere Verankerung.

Diese Glasfaserstäbe spielen eine doppelte Rolle: Sie dienen nicht nur der Aufhängung des Holzquerschnitts, sondern auch dem Abtragen der Querkräfte in der Betonplatte. Angesichts der hohen Querkraftlast wurden zusätzlich Carbonbügel verbaut, um die erforderliche Tragfähigkeit zu gewährleisten. Die Dimensionierung der notwendigen Bewehrungsquerschnittsfläche erfolgte gemäß der Richtlinie für die Bemessung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung, wobei die Materialkennwerte von den Herstellern bereitgestellt wurden.

Durch die große Spannweite und die daraus resultierende hohe Biegebeanspruchung am Mittelauflager war ein Betonquerschnitt mit einer maximalen Stärke von 59 cm erforderlich. Der Beton, mit einer Druckfestigkeit von C50/60, übernimmt den Druckkraftabtrag, während die Zugkräfte von einer achtlagigen Carbonbewehrung mit einer beeindruckenden Querschnittsfläche von fast ~2 cm²/m aufgenommen werden.

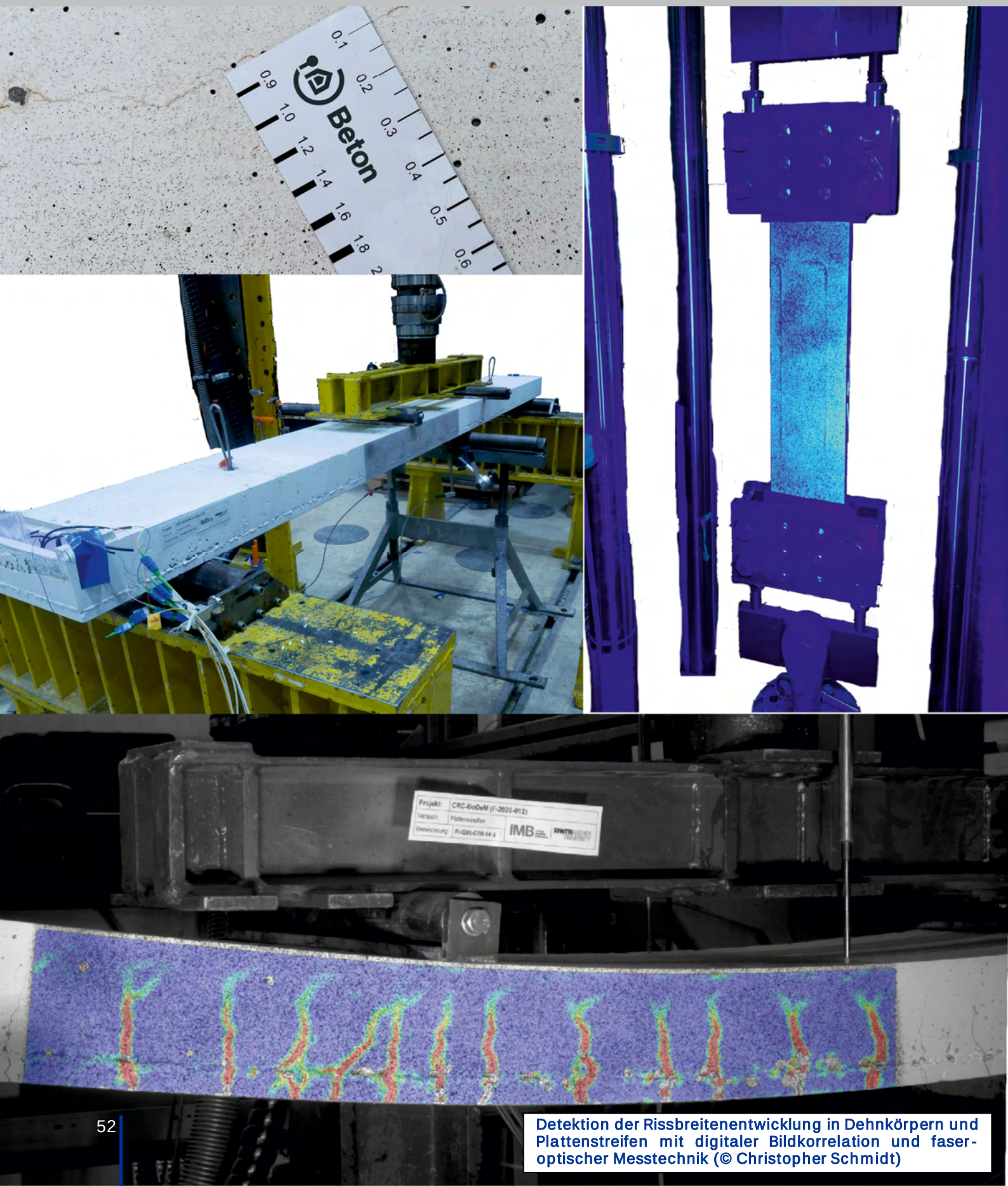
Da am Mittelauflager die Zugzone oben liegt und Risse sowohl die Optik stören als auch einen direkten Wassereindrang ermöglichen könnten, wurde die Rissbreite auf maximal 0,15 mm begrenzt. Um dieses gewünschte Rissverhalten zu erreichen, wurde eine große Bewehrungsoberfläche sowie eine Besandung in dem kritischen Bereich verwendet. Die Anforderungen an die Betonmischung waren herausfordernd: Zu einem musste der Beton frostbeständig und widerstandsfähig gegen Tausalz sein. Darüber hinaus soll der Überbau ohne eine zusätzliche Beschichtung ausgebildet werden, mit Sicherstellung der Rutschsicherung über einen unterhaltungsarmen Besenstrich. In Kombination mit einer inneren Hydrophobierung, der dichten Carbonbewehrung stellen die oben genannten Randbedingungen hohe Anforderungen an den Werkstoff Beton aber auch an das Handling mit diesem. Daher wurde die Baufirmen bereits im Zuge der Angebotsphase eines Bieterverfahrens dahingehend sensibilisiert und aufgeklärt. Die Herstellung von Betonierproben und Versuchskörpern diente zum einen zur Findung der richtige Betonrezeptur und zum anderen den handwerklichen Umgang mit dem innovativen Werkstoff Carbonbeton besser zu verstehen.

Die gesamte Planung und Ausführung des Projekts erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Tiefbauamt der Stadt Stuttgart und dem Ingenieurbüro Harrer. Die statische Berechnung wurde in Übereinstimmung mit den Richtlinien für Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung durchgeführt.
Durch die sorgfältige Kombination und den gezielten Einsatz der ausgewählten Materialien erreicht die Seeblickweg-Brücke eine besonders effiziente und umweltfreundliche Bauweise, die zukunftsweisend ist.

Sergej Rempel studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Ab 2012 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der RWTH Aachen, wo er das Tragverhalten und die Zuverlässigkeit von Textilbetonbauteil untersuchte. 2018 bis 2020 war er als Projektleiter bei solidian GmbH angestellt und unter anderem für die Bemessung von Textilbetonbauteilen sowie Brücken verantwortlich. Anfang 2020 erhielt er den Ruf an die Hochschule Augsburg und ist dort Professor für das Lehrgebiet Massivbau und leitet das Technologiezentrum Aichach.

Timo Krämer studierte Bauingenieurwesen an der TH Karlsruhe und der KTH Stockholm. Anschließend war er ab 2002 bis 2004 im Ingenieurbüro SSF in München als Tragwerksplaner tätig. Seit 2004 arbeitete er in der Brücken-, Grund- Tunnelbauabteilung der Harrer Ingenieure als Prokurist und bearbeitete dabei Bauwerke im Bereich von Rad- und Fußwegen, sowie im Straßen- und Eisenbahnwesen von der Entwurfs-, über die Ausführungs- bis zur Umsetzungsphase, sowohl im Neubau als auch im Bestand.

Rissbreitenbegrenzung: Zielsichere Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Bewehrungsgittern



Detektion der Rissbreitenentwicklung in Dehnkörpern und Plattenstreifen mit digitaler Bildkorrelation und faseroptischer Messtechnik (© Christopher Schmidt)

Der Nachweis zur Begrenzung der Rissbildung für Betonbauteile mit nichtmetallischen Bewehrungsgittern bedarf der Berücksichtigung der individuellen Charakteristika der Bewehrung. Dementsprechend sind geeignete Prüfverfahren zu betrachten, die realistische Kennwerte der tatsächlichen Leistungsfähigkeit liefern, sodass eine zielsichere Bewertung der Gebrauchstauglichkeit möglich ist.

Denn durch ihr günstiges Verhältnis von Mantelfläche zu Querschnitt und den generell auftretenden sehr kleinen Rissabständen in Bauteilen ermöglichen Bewehrungsgitter eine effektive Rissbreitenbegrenzung. Dabei ist zu beachten, dass beide Nachweise im GZG durchaus maßgebend für den erforderliche Längsbewehrungsgrad sein können. Umso wichtiger ist eine progressive Erfassung des tatsächlichen Verbundverhaltens. Von Interesse ist dies gerade für die Anwendung der DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung". Denn zurzeit wird in Teil 4 ein entsprechendes Prüf- und Auswerteverfahren auf Basis von Dehnkörperversuchen empfohlen, das zu teilweisen sehr konservativen Werten führt, die einen praxistauglichen Einsatz der Bewehrung erschweren. Eine Alternative bieten Rissöffnungsversuche, bei denen explizit das Verhalten eines einzelnen Gitterstranges im Beton betrachtet wird, und die ein gesondertes Prüfverfahren bereitstellen.

Die genauere Abbildung des tatsächlichen Bauteilverhaltens hinsichtlich der Rissbreitenentwicklung und auch des Verformungsverhaltens ermöglicht indes die Nutzung von faseroptischer Messtechnik zur Bestimmung der Bewehrungsdehnung und Ableitung des Verbundspannungsverlaufes. Dabei zeigen experimentelle Untersuchungen an Dehnkörpern und Biegebauteilen, dass eine differenzierte Betrachtung der Zustände Einzelrissbildung und abgeschlossenes Rissbild je nach verwendeter Bewehrung Potenziale für eine realistischere Bestimmung für die Nachweise im GZG bietet. Während in Bauteilen unter überwiegend zentrischer Zugbeanspruchung, beispielsweise in Fassadenelementen, die Einzelrissbildung den maßgebenden Zustand darstellt, ist bei Biegebauteilen das abgeschlossene Rissbild zu betrachten. Hier wirken sich z. B. die geringen Rissabstände günstig auf die Rissbreitenentwicklung aus. Auf der anderen Seite sind dem mechanisch basiertem Rissbreitenkonzept der DAfStb-Richtlinie Grenzen in der Prognose der tatsächlich auftretenden Rissbreiten gesetzt, die sich aus dem bisweilen sehr differenzierten Verbundverhalten der Vielzahl an Bewehrungsprodukten zwangsläufig ergibt. Dabei ist auch kritisch zu hinterfragen, ob das bisherige Begrenzungskriterium der Rissbreite bei 0,4 mm progressiver ausgelegt wird, wenn z. B. optische Belange von untergeordneter Bedeutung sind. Die DAfStb-Richtlinie erlaubt hierfür bereits eine Erhöhung der Grenze auf 0,7 mm. Grundsätzlich ist die Nachweisführung im GZG bei bekanntem Material- bzw. Bauteilverhalten unter Nutzung der DAfStb-Richtlinie möglich.

Durch die derzeitig empfohlenen Prüfverfahren ergeben sich jedoch Bewehrungsmengen, die deutlich auf der sicheren Seite liegend ermittelt werden. Unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen, wirtschaftlichen und konkurrenzfähigen Bauweise ist eine genauere Betrachtung des tatsächlichen Verbundverhaltens, wie z. B. durch ein explizites Prüfverfahren in Form von Rissöffnungsversuchen, erforderlich. Zusammen mit einer Betrachtung der maßgebenden Risszustände ist ein progressive und zielsichere Rissbreitenbegrenzung möglich.

Christopher Schmidt: Studium Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen, 2018 Auslandsaufenthalt an der UPC Barcelona, seit 2019 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMB der RWTH Aachen; Forschungsschwerpunkte: Verbundverhalten und Rissbreitenberechnung.

Eduarda Dilkin: Studium Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen, 2019 Auslandsaufenthalt am Imperial College London, seit 2023 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am IMB der RWTH Aachen; Forschungsschwerpunkte: Querkrafttragfähigkeit, Tragmechanismen

Martin Claßen: Promotion 2016 an der RWTH Aachen, anschließend bis 2020 Postdoktorand am IMB der RWTH Aachen, 2019 Verleihung des Rüsch Forschungspreises vergeben vom Deutschen Beton- und Bautechnikverein e.V. 2020 bis 2021 Universitätsprofessor an der KU Leuven, seit 2021 Universitätsprofessor am Lehrstuhl und ab August 2023 Leiter Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen

Josef Hegger: Promotion 1984 an der TU Braunschweig, seit 1994 Prüfingenieur für Baustatik, Obmann und Mitglied in diversen nationalen und internationalen Normungsausschüssen, 1993 – 2023 Leiter des Lehrstuhls und Instituts für Massivbau. Sprecher des SFB 528 „Textilbewehrter Beton" und des SFB/TRR 280 „Konstruktionsprinzipien von materialminimierten Carbonbetonstrukturen". 2023 Verleihung der Ehrendoktorwürde durch die TU Dresden.

Biegesteife Ecken aus Carbonbeton – Konstruktive Lösungen getestet und nachgerechnet

Biegesteife Ecke aus CFK-Formbewehrungsgittern, welche mit dem Thermoformverfahren der Johne & Groß GmbH hergestellt wurden (© Johne & Groß GmbH, Tilo Senckpiel-Peters)

Derzeit auf dem Markt verfügbare nichtmetallische Bewehrungen sind vor allem in ebener Form erhältlich – also als gerade Stäbe oder Gitter. Nichtmetallische Formbewehrungen, wie sie z.B. zur Ausbildung von Bewehrungskörben für biegesteife Ecken benötigt werden, stellen Sonderanfertigungen dar.

Die Johne & Groß GmbH als Betonstahlbiegerei ist von der Verwendung der nichtmetallischen Bewehrung im konstruktiven Betonbau überzeugt. Die dafür notwendige nichtmetallische Formbewehrung hat die Johne & Groß GmbH seit Anfang 2021 im Angebot und entwickelt diese stetig weiter. Durch ein standardisiertes Umformverfahren werden schnell und kosteneffizient dreidimensionale Elemente und Konstruktionen aus ursprünglich ebenen Bewehrungsprodukten gefertigt. Aktuell werden hierzu Bewehrungsgitter und -stäbe aus Carbon- und Glasfasern verwendet. In diversen Projekten konnte die Herstellung von Standardbewehrungsformen, wie sie aus dem Stahlbewehrungsbau bekannt sind, durch thermoformbare, nichtmetallische Bewehrungsgitter und Bewehrungsstäbe erfolgreich für zahlreiche Betonbauteile umgesetzt werden.

Im Rahmen des von Rubin geförderten Vorhabens „Industriestandard Carbonbeton ISC“ beschäftigt sich die Johne & Groß GmbH nun mit Bewehrungslösungen für spezifische Betonstrukturen. Die Thematik schließt inhaltlich an die Arbeit aus dem Vorjahr an, die sich mit der Festigkeitsbestimmung der Bewehrung im Umformbereich beschäftigte.

In zahlreichen Projekten konnte die Herstellung von Standardbewehrungsformen wie L-Winkeln sowie U- und Z-Profilen aus thermoplastisch gebundenen, nichtmetallischen Bewehrungsgittern für zahlreiche Betonbauteile umgesetzt werden. Dasselbe wird derzeit auch für CFK-Stäbe mit kleinem Durchmesser (4 mm) untersucht. Setzt man die nachträglich umgeformten Bewehrungen zu einem Bewehrungskorb zusammen, können hochtragfähige und wirtschaftliche Lösungen für biegesteife Ecken erzeugt werden. Diese spielen eine entscheidende Rolle bei der Konstruktion von Gebäuden und Tragstrukturen. Die sorgfältig geplante Bewehrungsführung gewährleistet dabei eine effektive Lastübertragung.

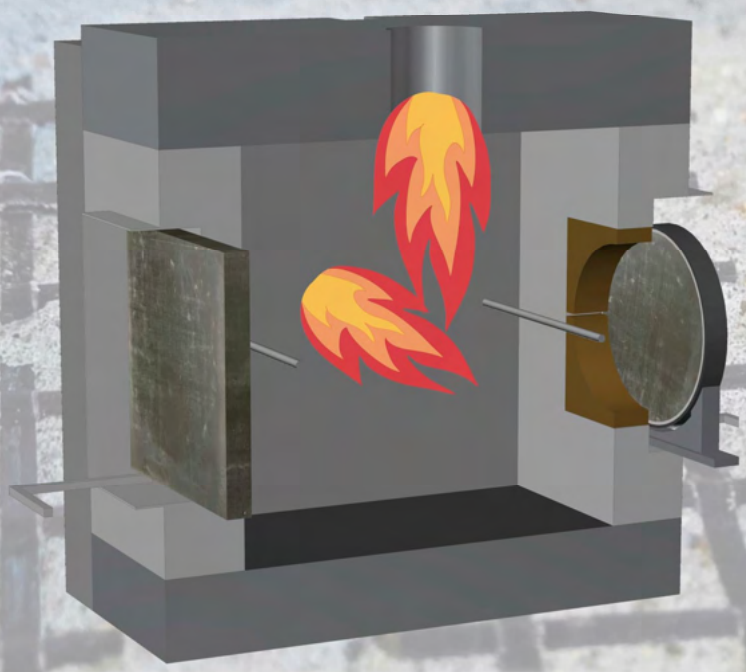
Im Vortrag werden konstruktive Lösungen für verschiedene Anwendungsszenarien für filigrane, biegesteife Ecken im Carbonbetonbau auf Basis von experimentellen Bauteiluntersuchungen und deren Nachrechnungen vorgestellt. Die Versuche wurden zusammen mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden durchgeführt. Im Vordergrund der Untersuchungen stehen mögliche konstruktive Lösungsansätze für die Ausführung der Bewehrungsführung bei biegesteifen Ecken mit thermo-umgeformten CFK-Gittern und -Stäben.

Es wird dabei auf die Fragestellung eingegangen: Welche Konstruktionsformen aus dem Stahlbeton sind für welche Bauteildicken und -belastungen übertragbar und welche nicht? Dazu zählen die Untersuchung des tragfähigkeitssteigernden Einflusses von zusätzlichen diagonalen CFK-Bewehrungsstäben und der tatsächliche Einfluss der Festigkeitsreduktion im Umformbereich der thermoformbaren Bewehrungssysteme auf das Tragverhalten der biegesteifen Ecke. Weiterhin wird betrachtet, welche Tragfähigkeitsgrenze von U-förmigen sich überschneidenden Bügeln maßgebend wird, denn bedingt durch die teilweise kurzen Übergreifungslängen der Bügel kann sowohl Verbundversagen als auch Zugversagen eintreten.

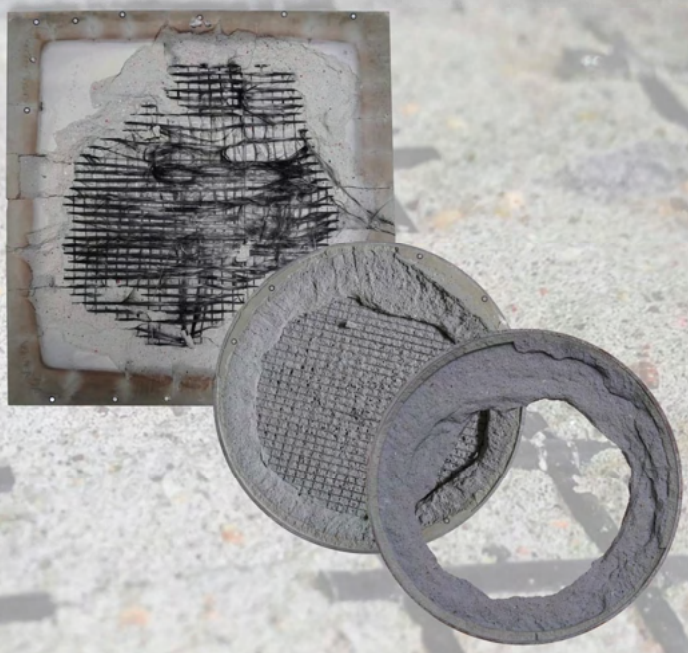
Am Ende der Analysen ist jedoch eine Frage am wichtigsten zu beantworten: Welche konstruktiven Umsetzungen sind nicht nur leistungsstark, sondern auch wirtschaftlich in der Prozesskette der Bewehrungsfertigung – also von der Bewehrungsumformung über den Bewehrungsbau bis hin zum Einbau des Bewehrungskorbes?

Herr Dr.-Ing. Tilo Senckpiel-Peters studierte von 2009 bis 2014 Bauingenieurwesen mit der Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der TU Dresden. Mit dem Baustoff Carbonbeton beschäftigte er sich 2010 zum ersten Mal im Rahmen des studentischen Projekts „Spiel_Ort“. In seiner Dissertation setzte er sich mit der Berechnung von Carbonbetontragwerken auseinander und ist seit 2019 bei der Johne & Groß GmbH Produktmanager für nichtmetallische Bewehrung, führt Bemessungen für nichtmetallisch bewehrte Betonbauteile durch und arbeitet an der Weiterentwicklung nichtmetallischer Bewehrungssysteme.

Zum Feuerwiderstand vorgespannter Carbonbetondecken



Brandversuch unter Einheits-Temperaturzeitkurve



Prüfkörper nach Brandbeanspruchung

4-Punkt-Biegeversuch mit einseitiger Aufheizung

(© BAM)

Der Einsatz von hoch zugbeanspruchbarem und korrosionsbeständigem Carbongelege anstelle von herkömmlichem Spannstahl ermöglicht es Beton vorzuspannen und gleichzeitig die Betondeckung auf ein für den Verbund nötiges Minimum zu reduzieren. Das Carbongelege selbst besteht aus Carbonfasern in einer Kunststoffmatrix.

Mit dieser Bauweise können dünnwandige und damit ressourcenschonende Deckenelemente realisiert werden. Der Wechsel von massiven zu filigranen und vergleichsweise leichten Bauteilen führt aufgrund der geringeren Masse sowie Betondeckung und der damit einhergehenden schnelleren Erwärmung zu einer Abnahme des Feuerwiderstands. Ferner führt das Erweichen der Matrix mit zunehmender Temperatur zum Verlust des Verbunds zwischen Carbongelege und Beton. Die Brennbarkeit der Kunststoffmatrix, die Oxidation des Carbongeleges bei Temperaturen oberhalb 600 °C sowie die Abplatzneigung des verwendeten Feinbetons stellen weitere Herausforderungen für den baulichen Brandschutz dar.

Im Rahmen des laufenden Verbundvorhabens „Vorgespannte Carbonbetondecken mit reduzierten Querschnitten“ (CaPreFloor) wurde das Biegetragverhalten von vorgespanntem Carbonbeton bei instationärer, einseitiger Aufheizung untersucht. Zusätzlich wurde das Abplatz- und Durchwärmungsverhalten von dünnen Carbonbetonplatten mittels Brandversuchen bestimmt. Alle Untersuchungen erfolgten an Feinbeton aus Portlandzement, Flugasche und Sand mit 2 mm Größtkorn und einer Betondeckung von 20 mm. Die mittlere Würfeldruckfestigkeit betrug 72 MPa nach 28 Tagen sowie 94 MPa nach 113 Tagen.

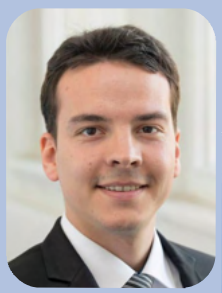
Für die Beurteilung der Tragfähigkeit bei hohen Temperaturen wurden 4-Punkt-Biegeversuche an schlaff bewehrten sowie vorgespannten Prüfkörpern (150 x 30 x 6 cm³) mit einlagiger Carbonbewehrung durchgeführt. Der Vorspanngrad variierte zwischen 30 % und 60 % der charakteristischen Gelegezugfestigkeit. Die aufgebrachte mechanische Last wurde aus zuvor durchgeführten Biegeversuchen bei Raumtemperatur abgeleitet und auf 46 % der erreichten Bruchkraft festgelegt. Die instationäre Temperaturbeanspruchung im Bereich des konstanten Biegemomentes auf der Biegezugseite wurde mittels elektrischen Heizmatten realisiert. Die Aufheizrate der Prüfkörperoberfläche betrug 3 K/min. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Vorspannung der Bruch des Prüfkörpers bei höheren Temperaturen sowie geringerer Verformung auftritt. Neben dem Vorspanngrad des Carbongeleges wurde auch der Gelegetyp variiert. Der Vergleich zwischen Gelege mit Acrylat- und Epoxidmatrix zeigt, dass letztere die Abplatzneigung des Betons verstärkt.
Die Brandversuche wurden mit Einheits-Temperaturzeitkurve an rechteckigen (60x60x6 cm³) und kreisrunden (Ø47x6 cm³), plattenförmigen Prüfkörpern am 1m³-Ofen durchgeführt.

Die kreisrunden Prüfkörper sind zusätzlich mit einem Stahlring zur Behinderung der thermischen Dehnung des Betons versehen. Um den Einfluss des Geleges auf das Abplatzverhalten zu analysieren, wurden sowohl schlaff bewehrte als auch unbewehrte Prüfkörper untersucht. Die Ergebnisse der Brandversuche zeigen, dass der verwendete Feinbeton zu explosionsartigen Abplatzungen in den ersten 30 min der Brandbeanspruchung neigt. Bei Prüfkörpern mit Carbonbewehrung traten die Abplatzungen früher bei Betontemperaturen in der Bewehrungsebene von 160 bis 180 °C auf, sodass das Carbongelege großflächig frei lag.

Die aus den Untersuchungen resultierenden Erkenntnisse fließen in die weitere Entwicklung der vorgespannten Carbonbetondeckenelemente ein. Dies betrifft vor allem die Optimierung der verwendeten Feinbetonrezeptur hinsichtlich der Vermeidung von Abplatzungen. Darüber hinaus soll die Wirksamkeit von Brandschutzmaterialien zur Verbesserung des Verhaltens im Brandfall untersucht werden. Ziel ist es, anhand von realmaßstäblichen Brandversuchen, den Feuerwiderstand dieser Bauteile im weiteren Projektverlauf nachzuweisen.

Dr.-Ing. Ludwig Stelzner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) im Fachbereich Brandingenieurwesen (FB 7.3) und Experte zum Verhalten von Beton im Brandfall.

Ahmad Eiz-Eddin studierte Bauingenieurwesen an der TU Berlin und bearbeitet an der BAM im FB 7.3 das Forschungsprojekt CaPreFloor.



Dr.-Ing. Dustin Häßler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der BAM im FB 7.3 und Experte für Brandschutzmaterialien und Feuerwiderstand.

Dr.-Ing. Sascha Hothan ist Leiter des FB 7.3 der BAM und national sowie international in Gremien tätig.

Innovative nichtmetallische Verbindungsmittel für dünne Schalen

Versuchsstand Schöck Bauteile (© Weber)

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
ptj Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

Im Bereich tragender und nichttragender dünner Bauteile wurden in den letzten Jahren innovative Bewehrungssysteme aus nichtmetallischen Werkstoffen entwickelt. Ob nun stabförmige Bewehrung aus Glasfaserkunststoff oder Gitter aus Carbon. Inzwischen sind einige Produkte aus diesem Bereich auch bauaufsichtlich geregelt. Daneben wurde der neue Eurocode 2 mit einem Annex R über nichtmetallische Bewehrung erarbeitet und im Januar die DAfStb Richtlinie nichtmetallische Bewehrung herausgebracht.

Gerade im Bereich Fassade spielt das Gewicht eine entscheidende Rolle. Betondeckungen können bei nichtrostender Bewehrung reduziert werden. Gerade Vorsatzschalen können deutlich in der Dicke reduziert werden. Das erfordert allerdings auch kurze Verankerungslängen. In festeren, ggf. feinkörnigerem Beton stellt dies andere Anforderungen an das Verbindungsmittel als eine Verankerung in dickeren Schalen in Normalbeton.

Hierfür wurde das bereits bekannte Sandwichankersystem Isolink Typ C nach Europäischem Assessment nach allen Kriterien für Dicken ab 40 mm geprüft. Dabei sind die Kriterien sowohl Druck, Zug und Schub. Nach den vorliegenden Prüfrichtlinien (EAD 330387-00-0601 GLASS FIBRE REINFORCED PLASTICS (GFRP) CONNECTORS FOR USE IN SANDWICH AND ELEMENT WALLS MADE OF CONCRETE) wird dabei jeweils der Widerstand der Verankerung ob nun für Betonausbruch aber auch Ankerbruch hinsichtlich statischer Einwirkung, Ermüdung in Anker- und Querrichtung als auch Dauerstand nachgewiesen. Damit kann eine sichere Verankerung auch bei einer Einbindelänge von 40 mm gezeigt werden. Weiterhin konnte auch gezeigt werden, dass bis zu einer gewissen Dämmstoffstärke (140 mm) auf Diagonalanker bzw. Erhöhung der Anzahl der Horizontalankern zur Abtragung von Vertikallasten vollständig verzichtet werden kann. Diese Widerstände sind in der ETA 17 0773 evaluiert.

Zusätzlich liegen die Widerstände auch für dünnere Platten in hochfestem Beton von 25 und 30 mm vor, welche hier erstmalig vorgestellt werden.

Eine weitere Serie von Bauteilversuchen mit sehr großen Dämmstoffstärken von 350 mm zeigt anschaulich in Bild, Video und Auswertung welche konstruktiven Randbedingungen für eine sinnvolle Verankerung im Hinblick auf die Ausbildung eines Fachwerks zur Übertragung von Vertikallasten mit einer Kombination von Diagonalankern und Horizontalankern genutzt werden sollten. Dazu wurden praxisnahe Versuche an 1,5 m langen Elementen mit jeweils 4 Diagonal und Horizontalstäben sowie verschiedenen Knotenausbildungen geprüft. Es hat sich gezeigt, dass es wichtig ist, die Anker in der meist dünneren Vorsatzschale möglichst nah beieinander zu montieren, um einen Fachwerkknoten auszubilden.

Wichtiger als eine Vermeidung einer möglichen Überschneidung von theoretisch auftretenden Ausbruchkegeln ist hierbei die Vermeidung von Biegerissen durch die Eintragung von Momenten in die dünne Schale.

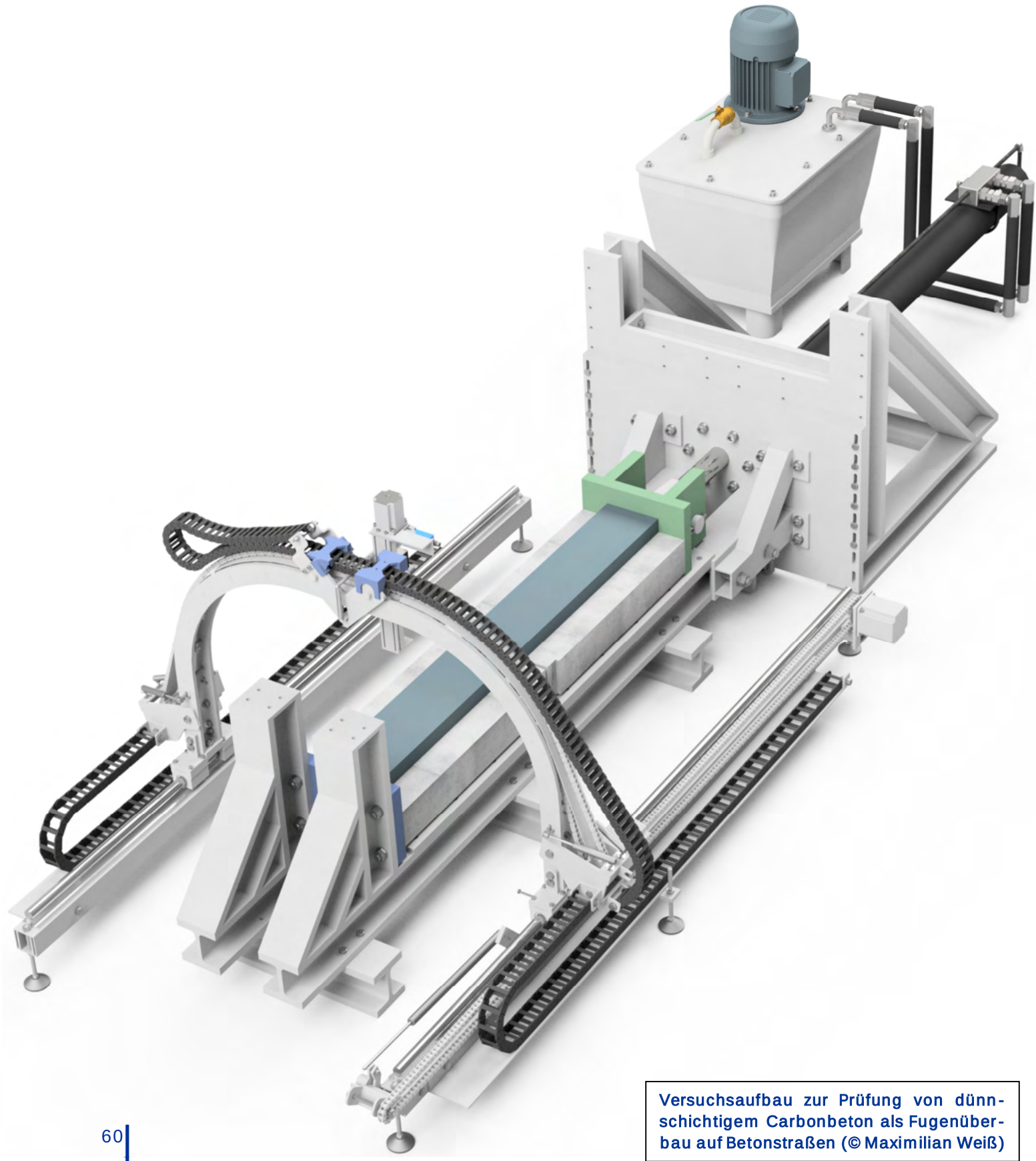
Im Vergleich wird ein neuer Ankertyp in Tests für 40 mm Verankerungstiefe geprüft. Dieser Ankertyp wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens LEXU_PLUS entwickelt. Projektpartner sind neben der IZES gGmbH die RPTU Kaiserlautern, KOMZET BAU BÜHL die Schöck Bauteile GmbH. Das Vorhaben wird unter dem FKZ 03EN1041A-D durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert und von Projektträger Jülich begleitet.

Hierbei handelt es sich um einen Hinterschnittanker als Sandwichanker für eine thermisch aktivierte Fassade. Ergänzende Prüfungen zeigen, dass alle maßgeblichen Prüfungen des vorgenannten EADs mit vergleichbaren Widerständen bestanden werden können.

André Weber ist bei der Firma Schöck Bauteile GmbH zuständig für die Entwicklung von GFK-Bewehrungsstäben und GFK Verbindungsmitteln.

Er ist als internationaler Experte in diesen Fachbereich seit vielen Jahren als Mitglied im DAfStb, fib und CEN tätig.

Effizient testen - durch neuen Versuchsaufbau für Carbonbeton-Fugenüberbau von Betonstraßen



Versuchsaufbau zur Prüfung von dünnschichtigem Carbonbeton als Fugenüberbau auf Betonstraßen (© Maximilian Weiß)

In Deutschland werden flächige Betonbauteile wie Park- und Verkehrsflächen typischerweise mit Fugen ausgeführt, um die Bildung unkontrollierter Risse aufgrund thermischer, hygrischer und lastabhängiger Zwangsspannungen zu vermeiden. Die Abdichtung dieser Fugen weist jedoch oft eine begrenzte Lebensdauer auf. Der hier vorgestellte alternative Ansatz sieht vor, die Fugen mit einer dünnen Schicht aus Carbonbeton (CRC) zu überbauen. Diese CRC-Schicht ermöglicht es, die Fugenbewegungen in zahlreiche kleinere und somit weniger kritische Risse zu überführen. Zur Untersuchung dieses Systems unter großtechnischen Bedingungen wurde ein innovativer Versuchsaufbau entwickelt, der die Simulation von positiven und negativen Fugenverformungen an Probekörpern unter praxisnahen Bedingungen ermöglicht. Mit dieser Vorrichtung können die Proben sowohl statischen als auch zyklischen Druck- und Zugbelastungen ausgesetzt werden.

Betonfahrbahnen unterliegen verschiedenen mechanischen Belastungen durch Verkehr sowie thermischen und hygrischen Belastungen durch klimatische Bedingungen. Wetterfluktuationen führen zu Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen, die Zwangsspannungen und Verformungen verursachen. Diese Spannungen können je nach Belastungsbedingungen als Druck- oder Biegespannungen auftreten. Werden diese Spannungen nicht gemindert, können unkontrollierte Schäden wie Risse oder Abplatzungen entstehen, die die Funktionalität erheblich beeinträchtigen. Eine Möglichkeit zur Minderung dieser Spannungen ist die Ausführung der Fahrbahn mit Längs- und Querfugen, die mit Fugendichtungsmassen oder -profilen abgedichtet werden müssen, um das Eindringen von Schadstoffen zu verhindern. Die begrenzte Dauerhaftigkeit dieser Dichtungsmassen stellt jedoch eine Herausforderung dar und erfordert regelmäßige Wartung oder Erneuerung. Das hier vorgestellte alternative Konzept sieht vor, die Fuge mit einer dünnen Schicht aus Carbonbeton zu überbauen, um die Fugenbewegungen in fein verteilte Risse zu überführen. Eine auf den Altbeton im Fugenbereich applizierte Verbundtrennung ermöglicht dabei die Relativverschiebung der CRC-Schicht und begünstigt so die Rissbildung.

Zur Ermittlung einer praxistauglichen Ausführungsvariante dieses CRC-Überbaus wurde ein Versuchsstand für die Prüfung großformatiger Probekörper entwickelt. Dieser ermöglicht die Testung verschiedener Probekörpervariationen unter praxisnahen Belastungsszenarien. Im Fokus der Variationsversuche stehen die Dicke der Carbonbetonschicht, die Länge und das Material der Verbundtrennung sowie die Anzahl der Bewehrungslagen. Die Prüfkörper bestehen aus zwei balkenförmigen Hälften, die durch eine 10 mm breite Fuge getrennt sind und den Altbeton simulieren. An der Stirnseite der Fuge sind unprofilierte Querkraftdübel mit Gleithülse angeordnet.

Die Oberfläche der Unterbetonprobekörper wurde maschinell aufgeraut, um im Bereich außerhalb der Verbundtrennung den erforderlichen Verbund zur anschließend applizierten Aufbetonschicht aus CRC zu gewährleisten. Die Lasteinleitung erfolgt an den fugenabgewandten Stirnseiten über Transportanker.

Den Versuchsstand bildet einen biegesteifen Rahmen, der über einen Hydraulikzylinder (100 kN) verfügt. Um die Rissbildung versuchsbegleitend zu erfassen, wird der gesamte Prüfkörper einschließlich aller entstandenen Schadensmuster (z.B. Rissmuster, Abplatzungen) im eingebauten Zustand mit einem maschinell geführten 3D-Scanner erfasst. Der verwendete 3D-Scanner nach dem Prinzip der Streifenprojektion kann mit Hilfe einer CNC-gesteuerten Vorrichtung longitudinal und radial (0-180°) über den Prüfkörper bewegen werden. Der Scanbereich, die Geschwindigkeit und der Abstand sind hierbei einstellbar, um optimale Scanergebnisse zu gewährleisten und somit eine ganzheitliche Auswertung und Interpretation der Daten zu ermöglichen.

Maximilian Weiß, M.Sc. studierte Umweltingenieurwesen und Bauingenieurwesen von 2015 bis 2021 an der Ruhr-Universität Bochum. Seit März 2022 ist Maximilian Weiß als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum angestellt. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt er sich insbesondere im Forschungsbereich Carbonbeton. Der Fokus wird hierbei auf die Anwendung von dünnschichtigem Carbonbeton als fugenlose Instandsetzungsmaßnahme im Betonstraßenbau gelegt.

Effiziente Bauteilüberwachung mit faseroptischen Sensoren

Sensorinstallation (© M. Goldyn)

Hochauflösende verteilte faseroptische Dehnungsmessungen (DFOS, distributed fibre optic sensing) ermöglichen beim Einsatz innovativer Materialien und Baustoffe wichtige Erkenntnisse über das Verhalten von Bauteilen zu gewinnen. Dies gilt vom Zeitpunkt der Herstellung an, über die Bauphase hinweg, bis hin zur gesamten Lebensdauer. Bei neuen Bauweisen oder Verstärkungsmaßnahmen spielt die Zustandsüberwachung eine entscheidende Rolle. In beiden Kontexten bieten verteilte faseroptische Messsysteme zuvor unzugängliche Informationen. Der Mehrwert, den die DFOS-Sensoren bieten, liegt in der Fähigkeit, Dehnungswerte kontinuierlich über die gesamte Länge des Sensors mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung (mehrere hundert Werte pro Meter) zu erfassen. Solche genauen und präzisen Daten verbessern oft die Zuverlässigkeit und Eindeutigkeit der Interpretation von Messergebnissen. Darüber hinaus lassen sich aus den Dehnungsverläufen die Risse lokalisieren und die Veränderungen der Rissbreiten in den Beton- oder Zementmatrixstrukturen ermitteln, was weitere wichtige Erkenntnisse liefert.

Die Einsatzmöglichkeiten faseroptischer Messverfahren in Bezug auf Bauteile aus Carbonbeton, sowohl Neubau und Verstärkung wurden bereits in zahlreichen Laboruntersuchungen sowie an mehreren Pilotprojekten nachgewiesen. Zwei Praxisbeispiele werden detailliert vorgestellt. Das erste der Praxisbeispiele ist der Neubau eines Stegs über den Seeblickweg an der Ecke zur Zuckerbergstraße in Stuttgart. Der Brückenüberbau ist als innovatives Holz-Beton-Verbundkonstruktion mit carbonbewehrter Fahrbahnplatte ausgeführt, mit einer Gesamtlänge von 63 m. Bereits während der Bauphase wurden zwischen Carbonbewehrung, entlang der gesamte Fahrbahnplattenlänge, zwei DFOS-Sensoren installiert. Die Sensoren ermöglichen es, die Dehnungsentwicklung in weiteren Bauphasen nach der Betonage sowie nach der Inbetriebnahme detailliert zu beobachten. Das zweite vorgestellte Praxisbeispiel ist die Eisenbahnüberführung in Reutgraben, bei der die DFOS-Sensoren sowohl auf der Innenseite der bestehenden Gewölbekonstruktion im Beton als auch in der Verstärkungsschicht mit Carbonbewehrung installiert wurden. Auf diese Weise lassen sich das Verhalten des Bauwerks und damit auch die Wirksamkeit der Verstärkungsmaßnahmen im Detail beobachten.

Anhand von mehrehren Praxisbeispielen wurden die Besonderheiten dieser Messtechnologie detailliert erläutert. Besonderes Augenmerk wurde auf die praxisrelevanten Aspekte von DFOS im Vergleich zu herkömmlichen Messmethoden gelegt. Neben den vielfältigen Möglichkeiten der Installation ist auch die Robustheit der Sensoren gegenüber den Bedingungen auf der Baustelle besonders hervorzuheben.

Ein wesentlicher Aspekt der Anwendung von DFOS in Carbonbetonbauteilen ist die Fähigkeit, durch die präzise Messungen frühzeitig unerwartete Schäden zu erkennen und somit präventive Maßnahmen zu ermöglichen. Dies kann erheblich zur Verlängerung der Lebensdauer und zur Erhöhung der Sicherheit von Bauwerken beitragen. In der Praxis kann die Integration von DFOS in die Bauteile nicht nur wichtige Informationen über den Zustand bestimmter Bauwerke liefern, für die es bereits einen Anlass für Überwachungsmaßnahmen gibt, sondern auch, dass die Installation der Sensoren bereits in der Bauphase besonders wichtige Erkenntnisse bei den regelmäßigen Bauwerksprüfungen liefern kann.

Zusammenfassend bietet der Beitrag einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik und die zukünftigen Entwicklungen im Bereich von faseroptischen Dehnungsmessungen in Carbonbetonbauteilen. Die vorgestellten Ergebnisse und Erkenntnisse unterstreichen die Relevanz der innovativen Messtechnik für die Baupraxis und zeigen neue Perspektiven für die Entwicklung nachhaltiger und langlebiger Bauwerke auf, für die integrierte Überwachungssysteme eine wichtige Voraussetzung sind.

Dr. Ing. Katarzyna Zdanowicz promovierte an der Leibniz Universität Hannover und war danach am Institut für Massivbau der TU Dresden tätig, zurzeit ist sie Assistenzprofessorin an der Universität von Ermland und Masuren in Olsztyn. Seit 2019 spezialisiert sie sich auf die Technologie der verteilten faseroptischen Messungen und wendet diese in Forschungsvorhaben und vor allem in Praxisprojekten an. Seit 2023 ist sie Geschäftsführerin der FOLAB GmbH, die Bauunternehmen, Ingenieurbüros, Industrie und Forschung faseroptischen Lösungen für das Bauwesen bietet.

Bauen mit dem rCF-Rebar | Der Bewehrungsstab aus recycelten Kohlenstofffasern

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Der zunehmende Einsatz von Carbonbeton im Bauwesen ist, gegenüber Stahlbeton, durch seine Vorteile in Punkto Korrosionsbeständigkeit begründet. Aber auch durch eine stetig steigende Ressourcenknappheit, Bestrebungen zur Energieeinsparung sowie einem allgegenwärtigen Innovationsdruck gewinnt der Leichtbau im Bauwesen, in Form der Carbon- und Textilbeton-Bauweise, und insbesondere die ganzheitliche Betrachtung von geschlossenen Stoffkreisläufen zunehmend an Bedeutung.

Dabei ist der mehrmalige Einsatz von Carbonfasern (CF) anzustreben, da deren Herstellung einen hohen Material- und Energieeinsatz erfordert. Die zumeist petrochemischen Grundbestandteile der Carbonfasern müssen zudem importiert werden, woraus sich bei der Nutzung dieser Fasern als Sekundärrohstoff, gewonnen bspw. aus End-of-Life-Bauteilen, im Zuge des Recyclings volkswirtschaftliche Vorteile ergeben.

Die Zeisberg Carbon GmbH hat den weltweit ersten Carbonbeton-Bewehrungsstab aus recycelten Kohlenstofffasern (rCF) entwickelt und stellt diesen her - den rCF-Rebar®. Dieser stellt einen Meilenstein in der Entwicklung noch energie- sowie ressourceneffizienterer Baustoffsysteme dar. So ist es nunmehr möglich den CO2-Fußabdruck von Bauwerken durch den Einsatz von Recycling-Carbonbewehrungen weiter zu reduzieren. Eine Kombination mit Recycling-Betonen ist möglich und erhöht dieses Potential zusätzlich.

Im Zuge der Optimierung von Kosten und der Leistungsfähigkeit wurde die komplette Prozesskette vom End-of-Life-Bauteil bis hin zum rCF-Rebar® vollständig unternehmens- und projektintern aufgebaut. Neuartige Fertigungsprozesse, -abfolgen sowie auch -maschinen wurden und werden dazu entwickelt, gebaut, erprobt sowie optimiert. Dazu gehören unter anderem textiltechnische Anlagen zur gezielten Parallelisierung und Streckung der, durch den Recyclingprozess eingekürzten, Fasern innerhalb des Carbonrezyklates. Die Qualität der Ausgangsmaterialien und deren mechanische Vorbehandlung inklusive Zerkleinerung (TU Bergakademie Freiberg - Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik) haben dabei einen großen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte und bedürfen besonderer Aufmerksamkeit. Die Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgte durch ein Life Cycle Assessment des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Systemleichtbau.

Die Entwicklung des rCF-Rebar® ist nunmehr soweit fortgeschritten, dass für einen Einsatz im Bauwesen erste Kennwerte erzielt werden konnten. Diese umfassen bspw. die charakteristische Zugfestigkeit und die Steifigkeit als auch solche für das Verbundverhalten im Beton. Der rCF-Rebar® reiht sich dabei zwischen Glas- und Kohlenstoffneufaserstäben ein. Zur Ermittlung dieser Kennwerte fanden Zug und Auszugsversuche am Institut für Massivbau der TU Dresden statt. Die Produktgeometrie und der Herstellungsprozess wird fortlaufend iterativ optimiert (Zeisberg Carbon GmbH).
Der derzeit im Aufbau befindliche Serienfertigungsprozess für den rCF-Rebar® soll kurzfristig zur kommerziellen Einsatzfähigkeit in Betonbauteilen führen. Dabei werden insbesondere alle solche Einsatzzwecke fokussiert, bei welchen Stäbe (und Matten) als schlaffe Bewehrung zum Einsatz kommen, wie etwa bei Fassadenplatten, Bodenplatten, Fundamenten und Fertigteilen jeglicher Art, inklusive solcher für die Halbfertigteilproduktion (bspw. Doppelwände).

Bewehrungssysteme von Zeisberg Carbon, Stäbe und auch Gelege (rCF-Remat®), bestehen aus hochwertigen recycelten Kohlenstofffasern und sind die erste Wahl bei Bauprojekten mit besonders hohen ökologischen Anforderungen. Die stetige Optimierung dieser Bewehrungen stellt sicher, dass der Einsatz für immer mehr Anwendungsbereiche ermöglicht wird. Umweltschonende Technologien respektive Produkte nützen nur dann Ressourcen und Energie einzusparen, wenn diese auch flächendeckend im Bauwesen angewandt werden können, daher wirtschaftlich sind.

Marcel Zeisberg ist seit 2018 Geschäftsführer der Zeisberg Carbon GmbH und als technischer Leiter für die Industrialisierung hauseigener Produktinnovationen verantwortlich. Er studiert Maschinenbau an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, der Leibniz Universität Hannover (LUH) sowie der TU Bergakademie Freiberg. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter der LUH beschäftigte er sich mit Nano-Kompositen und der Lebensdauererhöhung von Faserverbunden. Tätig bei Volkswagen Motorsport erfand er Fahrzeugkonzepte (ID R Pikes Peak), entwickelte Carbonbauteile sowie Sicherheitssysteme für Rennfahrzeuge.

CPC TECHNOLOGIE.

VORGESPANNTER CARBONBETON

FILIGRAN UND HOCH BELASTBAR.

CPC Betonelemente sind robust und leicht, aber dennoch hoch belastbar. Dadurch eignen sie sich für zahlreiche Anwendungen im Bauwesen und im Landschaftsbau. Sie sind einfach zu montieren, ökologisch und langlebig.

Unser Modulbrückensystem CPC-OPTIMA ist ein Fuß- und Fahrradbrückensystem. DieTrogbrücke besteht aus einer Fahrbahnplatte und zwei seitlichen Stegen. Stege und Brückenplatte wirken im Verbund und sind beide aus CPC-Elementen gefertigt. Zusätzliche Geländer, wie in dem Beispiel aus Oldenburg, sind möglich.

www.holcim.de/de/cpc

HOLCIM

ZEISBERG

NACHHALTIGE HIGHTECH-WERKSTOFFE
FÜR DIE BAUINDUSTRIE

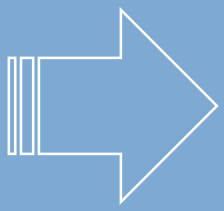
RCF-REBAR

The Original.
World‘s first concrete rebar
from recycled carbon fibres.

www.zeisberg-carbon.com
www.rcf-rebar.com

Foto: Stefan Gröschel, TU Dresden

Übersicht der C³-Partner



¡ aerogel-it GmbH
Albert-Einstein-Straße 1, 49076 Osnabrück

¡ AIB GmbH
Liselotte-Herrmann-Straße 4, 02625 Bautzen

¡ ALHO Systembau GmbH
Hammer 1, 51598 Friesenhagen

¡ ASPC Structures
8, Place Patrick DEVEDJIAN, F-92160 Antony

¡ Augel GmbH
Windkaulweg 1, 56745 Weibern

¡ BARG Betontechnik u. -instandsetzungs GmbH & Co. KG
Walther-Huth-Straße 2, 12487 Berlin

¡ basis d GmbH
Wehlener Str. 31, 01279 Dresden

¡ Bauschutz GmbH & Co. KG
Neckarstraße 2, 71679 Asperg

¡ Bautenschutz Müller GmbH
An der Jägerbäk 2, 18069 Rostock

¡ BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH
Hammerweg 25, 01127 Dresden

¡ Betonwerk Oschatz GmbH
Mühlberger Straße 17–19, 04758 Oschatz

¡ Brückenköpfe GmbH
Zum Bahnhof 14, 19053 Schwerin

¡ Bundesanstalt für Wasserbau – Referat Baustoffe
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe

¡ CARBOCON GmbH
Mohorner Straße 13, 01067 Dresden

¡ CARBON 360 GmbH
Karl-Heine-Straße 99, 04229 Leipzig

¡ cbing – Curbach Bösche Ingenieurpartner
Bergstraße 21a, 01069 Dresden

¡ CHT Germany GmbH
Postfach 1280, 72002 Tübingen

¡ Clement Germany GmbH
Grubenstraße 48, 18055 Rostock

¡ Cotesa GmbH
Bahnhofstraße 67, 09648 Mittweida

¡ DBF Deutsche Basalt Faser GmbH
Carl-Rabe-Straße 11, 06526 Sangerhausen

¡ Dennert Massivhaus GmbH
Veit-Dennert-Straße 7, 96132 Schlüsselfeld

¡ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb)
Budapester Straße 31, 10787 Berlin

¡ Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.
Kurfürstenstraße 129, 10785 Berlin

¡ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Pfaffenwaldring 38–40, 70569 Stuttgart

¡ Dipl. Ing. H. Bendl Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG
Sebnitz
Schulgasse 6, 01848 Hohnstein/OT Ulbersdorf

¡ Dreßler Bau GmbH
Gabriel-Dreßler-Straße 7, 63741 Aschaffenburg

¡ ESKA Maschinentechnik e.K.
Friedrich-Adolf-Richter-Straße 7-9, 07407 Rudolstadt

¡ Eurovia Infrastructure GmbH | NL Bauwerkinstandsetzung
Hessenstraße 23, 65719 Hofheim

¡ F+S Förster + Sennewald Ingenieurgesellschaft mbH
Paul-Gerhardt-Allee 52, 81245 München

¡ Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. (FDB)
Postfach 21 02 67, 53157 Bonn

¡ filmaton
Lampestraße 6, 04107 Leipzig

¡ FloorBridge International GmbH
Gewerbepark 21, 4101 Feldkirchen an der Donau (A)

¡ Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie | Gruppe Geschäftsmodelle: Engineering und Innovation
Städtisches Kaufhaus, Neumarkt 9-19, 04109 Leipzig

¡ GINKGO Projektentwicklung GmbH
An der Pikardie 6, 01277 Dresden

¡ Goldbeck Ost GmbH
Zum Bahndamm 18, 08233 Treuen

¡ HABAU Deutschland GmbH
Nordhäuser Straße 2, 99765 Heringen

¡ HA-CO Carbon GmbH
Albert-Einstein-Straße 1, 86757 Wallerstein

¡ Handelshof Bitterfeld GmbH
An den Rohrwerken 8, 06749 Bitterfeld-Wolfen

¡ Heidelberg Materials AG
Oberklamweg 6, 69181 Leimen

¡ Hentschke Bau GmbH
Zeppelinstraße 15, 02625 Bautzen

¡ Hering Bau GmbH & Co. KG
Neuländer 1, 57299 Burbach

¡ HFB Engineering GmbH
Zschortauer Straße 42, 04129 Leipzig

¡ HIB Huber Integral Bau GmbH
Arienheller 5, 56598 Rheinbrohl

¡ Hitexbau GmbH
Steinerne Furt 44, 86167 Augsburg

¡ Hochschule Biberach
Karlstraße 6-11, 88400 Biberach

¡ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen | Architektur
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden

¡ Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig | Institut für Architektur und Institut für Betonbau
Karl-Liebknecht-Straße 132, 04277 Leipzig

¡ Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig | Fakultät Wirtschaftswissenschaften
Postfach 301166, 04251 Leipzig

¡ Holcim (Deutschland) GmbH
Troplowitzstraße 5, 22529 Hamburg

¡ Hörnig Bauwerkssanierung GmbH
Magnolienweg 5, 63741 Aschaffenburg

¡ HUESKER Synthetic GmbH
Fabrikstraße 13-15, 48712 Gescher

¡ ICL Ingenieur Consult GmbH
Diezmannstraße 5, 04207 Leipzig

¡ Implenia Civil Engineering GmbH, Baustofftechnik
Martin-Luther-Ring 13, 04109 Leipzig

¡ InformationsZentrum Beton GmbH
Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde

¡ Ingenieurbüro Roland Fink
Blumenstraße 16, 01445 Radebeul

¡ Ingenieurbüro Säbisch
Spinnereistraße 7, 04179 Leipzig

¡ Johne & Groß GmbH
Kamenzer Staße 18, 01936 Schwepnitz

¡ kahnt und tietze GmbH
Anna-Kuhnow-Straße 39, 04317 Leipzig

¡ KARL MAYER Technische Textilien GmbH
Mauersbergerstraße 2, 09117 Chemnitz

¡ Karrié Bauwerkserhaltung GmbH
Am Roten Berg 13, 99086 Erfurt

¡ KCMT Co. Ltd.
31 Energy Industry 1-ro Seosaeng-myoen Ulju-gun, Ulsan 45014

¡ Koch GmbH
Hagener Str. 87, 57223 Kreuztal

¡ Laumer Bautechnik GmbH
Bahnhofstraße 8, 84323 Massing

¡ Lefatex Chemie GmbH
Stiegstraße 64, 41379 Brüggen

¡ Leibnitz-Institut für ökologische Raumentwicklung e.V.
Weberplatz 1, 01217 Dresden

¡ Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.
Hohe Straße 6, 01069 Dresden

¡ Leviat GmbH
Liebigstraße 14, 40764 Langenfeld

¡ LiCoMo GmbH
Gärtitzer Straße 1, 04720 Großweitzschen

¡ LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen GmbH
Ernst-Thälmann-Str. 5, 09661 Hainichen

¡ Lithonplus GmbH & Co. KG
Karl-Lösch-Straße 3, 67360 Lingenfeld

¡ Materialforschungs und -prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar
Postfach 2310, 99404 Weimar

¡ Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG
Max-Bögl-Str. 2, 07546 Gera

¡ MC-Bauchemie Müller GmbH & Co.
Am Kruppwald 1-8, 46238 Bottrop

¡ Meißner Hoch-, Tief- und Straßenbau GmbH
Ölbergstraße 4-6, 53840 Troisdorf

¡ Otto Scheuerer Bautenschutz GmbH
Hafenstraße 67, 34125 Kassel

¡ PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG
Wolfsbankring 9, 45355 Essen

¡ Planning GmbH
Ringener Straße 7-9, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler

¡ pmp Projekt GmbH, Gesellschaft für Projektentwicklung und Generalplanung mbH
Domlinden 21, 14776 Brandenburg

¡ Portneo GmbH
Auf der Böcke 17, 58239 Schwerte

¡ RECKLI GmbH
Industriestraße 36, 44628 Herne

¡ Reisch Ingenieure GmbH
Pröllstraße 14, 86157 Augsburg

¡ Rekers Betonwerk GmbH & Co. KG
Portlandstraße 15, 48480 Spelle

¡ Röchling Industrial SE & Co. KG
Röchlingstr. 1, 49733 Haren

¡ RWTH Aachen, Institut für Massivbau
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen

¡ Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. (STFI)
Annaberger Straße 240, 09125 Chemnitz

¡ Schill + Seilacher „Struktol“ GmbH
Moorfleeter Straße 28, 22113 Hamburg

¡ schlaich bergermann und partner.sbp gmbh
Schwabstraße 43, 70197 Stuttgart

¡ Schöck Bauteile GmbH
Schöckstraße 1, 76534 Baden-Baden

¡ SGL Technologies GmbH
Werner-von-Siemens-Straße 18, 86405 Meitingen

¡ Sika Deutschland GmbH
Kornwestheimer Straße 103-107, 70439 Stuttgart

¡ solidian GmbH
Sigmaringer Straße 150, 72458 Albstadt

¡ STESAD GmbH
Königsbrücker Straße 17, 01099 Dresden

¡ STL Heizsysteme GmbH
An der Försterei 1a, 01458 Ottendorf-Okrilla

¡ Syspro-Gruppe Betonbauteile e. V.
Matthias-Grünewald-Straße 1-3, 53175 Bonn

¡ T A R K U S IngenieurSanierung GmbH
Gottlieb-Dunkel-Straße 43-44, 12099 Berlin

¡ Technische Universität Chemnitz, Professur für Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeit
09107 Chemnitz

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Baubetriebswesen
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur Hochfrequenztechnik
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Mechatronischen Maschinenbau
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik
01062 Dresden

¡ Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft
Pratzschwitzer Straße 15, 01796 Pirna

¡ Teijin Carbon Europe GmbH
Kasinostraße 19-21, 42103 Wuppertal

¡ texton e. V.
Alte Dresdner Straße 99, 01108 Dresden

¡ TORKRET GmbH
Langemarckstraße 39, 45141 Essen

¡ TUDAG
Freiberger Straße 37, 01067 Dresden

¡ VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

¡ Weber Betonwerk GmbH
Industriestraße 3-5, 97258 Ippesheim

¡ WiE GmbH - Werk für industrielle Elektronik
Am Mühlgraben 3, 01731 Kreischa

¡ WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH
Holzwiesenweg 17, 95028 Hof/Saale

¡ Wilhelm Wallbrecht GmbH & Co. KG
Adelheidstraße 24, 30171 Hannover

¡ WOLFF & Müller Holding GmbH & Co. KG
Schwieberdinger Str. 107, 70435 Stuttgart

¡ WTM Engineers GmbH
Johannisbollwerk 6-8, 20459 Hamburg

¡ Zeisberg Carbon GmbH
Voltmerstraße 65, 30165 Hannover

Stand: September 2024

Impressum

Herausgeber

C³ – Carbon Concrete Composite e. V.
Ammonstraße 72
01067 Dresden
Tel. +49 351 48 45 67-00
Fax +49 351 48 45 67-10
info@carbon-concrete.org
www.carbon-concrete.org

Redaktion
C³ – Carbon Concrete Composite e. V. übernimmt keinerlei Gewähr für die Aktualität, Korrektheit, Vollständigkeit und/oder Qualität der bereitgestellten Informationen.

Design, Layout, digitale Bildbearbeitung, Druckvorstufe
Felix Hahn | C³ – Carbon Concrete Composite e. V.

Stand
September 2024

Fotos/Bildnachweis Titelseiten
Ansgar Pudenz, Fabian Bejarano

Herzlichen Dank an unsere Unterstützer:

Fördermitglieder:

www.carbon-concrete.org

www.carbonbetontage.de