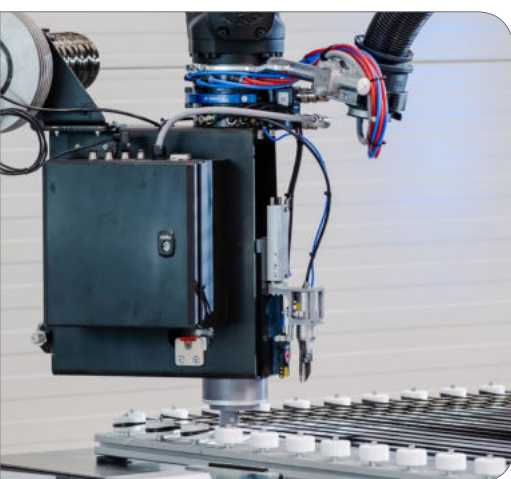


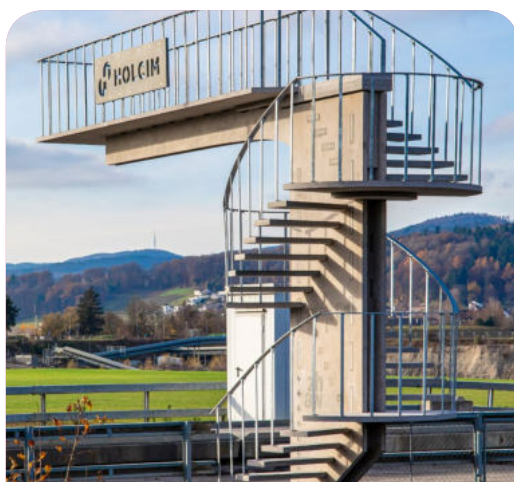


15. CARBON- UND TEXTILBETONTAGE



TAGUNGSBAND

19. UND 20.
SEPTEMBER 2023
DRESDEN





15. CARBON- UND TEXTILBETONTAGE

»Nachhaltiges Bauen ist nicht nur eine Verpflichtung gegenüber der Umwelt, sondern auch eine Investition in die Zukunft unserer Gesellschaft.«

- Unbekannt

Die Veranstaltung wird gesponsert von:



solidian



HOLCIM



ZEISBERG



Vorwort Frank Schladitz	6
Grußwort Sabrina Beverungen	8
VORTRÄGE	9
50k Heavy Tow Fasern für die Bauindustrie - ökonomisch und ökologisch?	12
Aerogel-Dämmstoffe für Carbonbeton-Sandwichplatten	14
Carbonfasern für energieeffiziente Heizsysteme in Betonfertigteilen	16
Carbonformbewehrung - mit Versuchsergebnissen und Ingenieurmodell zur Bemessung	18
CPC-Elemente im praktischen Einsatz	20
DAfStb-Richtlinie Nichtmetallische Bewehrungen: Erfahrungen aus dem Zulassungsverfahren solidian GRID	22
Die Zukunft des Bauens – neue biegbare Verbundstäbe	24
Einordnung der EU-Taxonomie und ESG für die Baubranche	26
Entwicklung einer Hochgeschwindigkeits-Garnablage zur Fertigung von Textilbewehrungen	32
Neue Möglichkeiten bei der Bemessung von Carbonbeton-Verstärkungen	34
Probeinstandsetzung des Umlaufkanals der Schleuse Anderten mittels textilbewehrter Spritzbetonschichten	36
rCF-Rebar: Carbonbeton-Bewehrungsstab	38
Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung	40
Surfwelle in Augsburg - 100 % Recyclingbeton mit Carbonbewehrung	42
Untersuchung der Spannkrafteinleitung von CFK-Bewehrungen in Beton	44
Untersuchung von Carbonstäben aus rezyklierten Carbonfasern	46
Variables Brückenmodul aus Carbonbeton in Fertigteilbauweise	48
Werkstoffgerechtigkeit und Nachhaltigkeit von Brücken aus (vorgespanntem) Carbonbeton	50
PARTNER & IMPRESSUM	54
Übersicht der C³Partner	54
Impressum	57

INITIIERT DURCH



GEFÖRDERT VOM



Vorwort >



Liebe Teilnehmerinnen,
liebe Teilnehmer,

die Zeit ist reif für Carbonbeton. Es gibt keinen besseren Augenblick als jetzt, die Carbonbetonbauweise im eigenen Unternehmen zu etablieren. Das gestiegene Bewusstsein für Fachkräftemangel, Klimaschutz, Erhalt von Bausubstanz, dauerhaftere Bauweisen, machen den Weg frei für das Bauen mit Carbonbeton.

Der Fachkräftemangel ist ein Problem, mit dem viele Unternehmen zu kämpfen haben. Doch Carbonbeton und seine unschlagbaren Vorteile machen das Material zum coolen Mitspieler auf dem Markt und helfen dabei, Fachkräfte zu gewinnen und langfristig an das Unternehmen zu binden. Die innovative und zukunftsweisende Bauweise zieht talentierte Mitarbeiter:innen an und verleiht dem Unternehmen einen Wettbewerbsvorteil.

Der Klimaschutz ist ein zentrales Thema unserer Zeit. Die Reduzierung von CO₂-Emissionen und Ressourcenverbrauch ist ein wichtiger Beitrag zur Bewältigung der Klimakrise. Die Carbonbetonbauweise ermöglicht genau das und liegt damit voll im Trend. Unternehmen, die auf Nachhaltigkeit setzen, werden von Kund:innen und der Gesellschaft positiv wahrgenommen.

Dabei kann Carbonbeton sowohl im Neubau als auch beim Bauen im Bestand gewinnbringend sein: für die Umwelt und für Unternehmen.

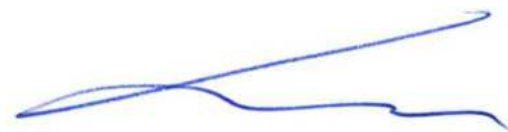
Der Erhalt von Bauwerken ist nicht nur aus sozialer, sondern auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll. Sanieren und Verstärken mit Carbonbeton sind deutlich nachhaltiger als ein Ersatzneubau. Durch den Erhalt der Bausubstanz werden Ressourcen geschont und die Umweltbelastung reduziert. Gleichzeitig können Kosten eingespart werden, da ein Neubau oft teurer ist als die Sanierung. Die Anforderungen an Neubauten, wie beispielsweise Brücken, werden immer höher. Sie müssen langlebiger sein und deutlich länger halten als bisher. Die Fachwelt, Politik und Gesellschaft sind sich dessen bewusst. Die Carbonbetonbauweise bietet hier innovative Lösungen und ermöglicht die Konstruktion von Bauwerken, die den zukünftigen Anforderungen gerecht werden.

Nicht zuletzt spielt auch die Rendite eine entscheidende Rolle. Durch dünnere Außenwandkonstruktionen aus Carbonbeton kann mehr Fläche im Gebäude realisiert werden. Dies steigert die Rentabilität des Projekts und ermöglicht höhere Gewinne für das Unternehmen.

Es ist an der Zeit, die Chancen der Carbonbetonbauweise zu erkennen und zu nutzen. Die Vorteile liegen auf der Hand. Unternehmen, die jetzt handeln und auf nachhaltiges Bauen setzen, werden langfristig erfolgreich sein und einen positiven Beitrag zur Gesellschaft und Umwelt leisten.

Nutzen Sie die Konferenz, um Ihr Wissen über Carbonbeton zu vertiefen, um Kontakte zu knüpfen und sich mit Forschenden und Praktikern auszutauschen. Erfahren Sie mehr über die Anwendungsmöglichkeiten, Bautechniken und Herausforderungen bei der Umsetzung von Carbonbetonprojekten. Ganz besonders würde es mich freuen, wenn Sie Ihre eigenen Erfahrungen, Erkenntnisse und Ihre Best Practices in die Diskussionen einbringen – denn nur so werden Sie Teil der wachsenden Carbonbetoncommunity.

Carbonbeton, die Zeit ist JETZT!



Dr.-Ing. Frank Schladitz

Geschäftsführer
C³ - Carbon Concrete Composite

Grußwort >

Liebe Teilnehmerinnen,
liebe Teilnehmer,

das Thema "Nachhaltigkeit" beschäftigt uns heute im Baubereich mehr denn je. Als IN-Wort ist es nahezu in aller Munde, doch wie ist es um die konkrete Umsetzung tatsächlich bestellt? Wir, im C³Verband, haben uns der wegweisenden Technologie Carbonbeton verschrieben. Damit arbeiten wir alle tatkräftig daran, die Zeitenwende im Bauwesen Wirklichkeit werden zu lassen: Wir wollen bestehende Gebäude und Strukturen retten, anstatt abzureißen. Und dort, wo ein Neubau nötig ist, wollen wir schlanker und ressourceneffizienter bauen.

Dass wir als Teijin Carbon Europe GmbH ein Teil dieser Zeitenwende sind, macht mich stolz: Als Vorreiter im Bereich Carbonbeton werden unsere Carbonfasern in nahezu allen Projekten eingesetzt. Auch als Carbonfaserhersteller haben wir unsere Rolle erkannt – und die Anforderungen, die zu Recht an uns gerichtet werden. So stellen wir als erster Hersteller weltweit unsere LCA-Daten für konkrete EPD-Berechnungen zur Verfügung. Damit können wir zweifelsfrei nachweisen, welche erheblichen Ressourceneinsparungen mit Carbonbeton möglich sind. Im Jahr 2024 werden wir außerdem die erste "grüne" Carbonfaser präsentieren, die gegenüber herkömmlichen Fasern einen reduzierten CO₂-Footprint aufweist.

Verstehen Sie mich nicht falsch: Der Weg hin zu einer globalen nachhaltigen Bauweise ist lang, und wir alle stehen hier noch am Anfang. Umso wichtiger ist die Zusammenarbeit im C³Verband, denn wir müssen den Carbon- und Textilbeton weiter in die Köpfe der Entscheider bringen und technische sowie emotionale Hürden abbauen.

Die technischen Hürden gehen wir gemeinsam an, indem wir Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassungen auf den Weg bringen. Hierfür bildet die C³Verbandsstruktur den geeigneten Rahmen, um kompetente Partner zu finden und die Zulassungsarbeit voran zu treiben. Die „emotionalen“ Hürden benötigen fokussierte Marketing- und PR-Strategien. Auch hierfür bietet C³ den geeigneten Weg,

indem Fact Sheets z. B. zum Thema Recycling erarbeitet und zur Verfügung gestellt werden.

Die diesjährigen Carbon- und Textilbetontage bilden wieder einen großartigen Rahmen, in dem die neuesten Entwicklungen und Projekte zum Thema vorgestellt werden. Ich freue mich sehr auf die zahlreichen Vorträge und auf den unterschiedlichen Fokus, den diese mitbringen: Die C³Partner aus dem Bereich Forschung- und Entwicklung zeigen auf, dass das berühmte "Ende der Fahnenstange" noch lange nicht erreicht ist und dass wir durch verbesserte Prozesse und Materialien noch weitere "Highscores" im Sinne von Ressourceneffizienz und Wirtschaftlichkeit knacken können – denn ja, auch die Wirtschaftlichkeit spielt natürlich eine Rolle. In mehreren Vorträgen wird außerdem das Thema Zulassung behandelt: Dass dies ein langer und teils doch sehr steiniger Weg ist, wissen etliche Partner zu berichten. Sie lassen uns an ihren Erfahrungen teilhaben und helfen so, diese Prozesse weiter zu vereinfachen. Last but not least verdienen die Vorträge aus der Wirtschaft besondere Aufmerksamkeit – denn letztendlich sind es die Unternehmen, die für die tatsächliche Umsetzung im Bau-Alltag verantwortlich sind.

Kürzlich habe ich das Wort "Trailblazer" gelernt: Ein Trailblazer ist eine Person, die sich durch schwieriges Terrain einen Weg erarbeitet – aber nicht zum Selbstzweck, sondern im wahrsten Sinne des Wortes, um anderen "den Weg zu bereiten", auf dem noch viele auf diesem Pfad folgen mögen. Lassen Sie uns alle Trailblazer sein – für die Technologie Carbonbeton und füreinander. So wird aus dem steinigen Pfad bald eine gut ausgebaute Autobahn, auf der wir die nachhaltige Wende im Baubereich schaffen können!

S. Beverungen

Sabrina Beverungen

Sales & Marketing Manager – Sales Development
Civil Engineering, Beirätin im C³ – Carbon Concrete
Composite

TenaxTM CARBONFASERN DARAUF BAUT DIE ZUKUNFT

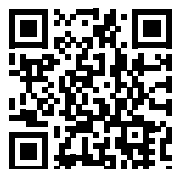


LEICHT, STABIL, DÜNN – EBEN EIN ECHTER HIGHTECH-WERKSTOFF.

Carbonfasern von Teijin werden in innovativen Bauprojekten eingesetzt, sowohl bei Sanierungen im Bestand als auch für zukunftsweisende Neubauprojekte.

Teijin Carbon Europe ist weltweiter Marktführer für Carbonfaser-Produkte im Bauwesen und produziert als einziger Hersteller seit 35 Jahren in Deutschland.

Wirtschaftlich und nachhaltig entwickelt Teijin gemeinsam mit seinen Kunden Projekte für eine lebenswerte Zukunft!



VORTRÄGE ✓

C3 Carbon
Concrete
Composite

50k Heavy Tow Fasern für die Bauindustrie - ökonomisch und ökologisch?



Heavy Tow Fasern bieten aufgrund ihres hohen Metergewichts (Feinheit > 3000 tex) enorme Potentiale hinsichtlich einer wirtschaftlichen Herstellung von Faserverbundwerkstoffen gegenüber anderen Faserprodukten mit geringerer Tex-Zahl. Dabei sind vor allem ein hoher Produktionsdurchsatz in der Verarbeitung sowie kürzere Rüstzeiten durch eine geringere erforderliche Anzahl von Faserspulen zu nennen.

Bei der Ermittlung und Bewertung der mechanischen Eigenschaften von Heavy Tows sind aufgrund der hohen Anzahl an Einzelfilamenten in einem Roving und der damit verbundenen hohen Zugkräfte zahlreiche Aspekte zu beachten. Im Produktportfolio der SGL existiert eine große Bandbreite an Heavy Tow Fasertypen mit einem breit gefassten Eigenschaftsprofil. Eine geeignete Methodik, um Rovings mit 50.000 Einzelfilamenten (50k) materialgerecht mechanisch charakterisieren zu können, wird in der Prüfnorm DIN EN ISO 10618 - Carbon fibre – Determination of tensile properties of resin impregnated yarn beschrieben.

Die Kohlenstofffaser-Rovings werden zunächst vollständig mit einer Epoxidharz-Matrix imprägniert (Massenanteil $40 \pm 5\%$) und zu einem Strang ausgehärtet. Die daraus resultierende Probe hat eine Länge von 450 mm und mittels mechanischer Wegaufnehmer wird während der Prüfung die Dehnung des Werkstoffes bestimmt. Zur Sicherstellung der lotgerechten Positionierung des Stabes ist ein Laser zu nutzen. Beim gültigen Versagen der Probe innerhalb der freien Einspannlänge kann das Ausnutzen der Festigkeit der zahlreichen Einzelfilamente angenommen werden.

Die maximale Rovingfestigkeit auch im finalen Faserverbundprodukt auszunutzen, ist das wesentliche Ziel des Verarbeitungsprozesses. Auf Basis des 50k-Kohlenstofffaserrovings in Kombination mit matrixoptimierten Oberflächenbeschichtungen (Sizings) können beispielsweise thermoplastische Bewehrungselemente mittels des kontinuierlichen, hochwirtschaftlichen Pultrusionsprozesses hergestellt werden. Hier können Prozessgeschwindigkeiten >2 m/min und damit hohe Durchsatzraten erzielt werden. Die Oberflächenstruktur auf den Stäben kann inline mittels einer Profilierungseinheit eingeprägt werden. Aufgrund des thermoplastischen Matrixmaterials ist eine ortsunabhängige, thermisch-induzierte Umformung in einem weiteren Schritt möglich. Darüber hinaus ist durch die Schmelzbarkeit des Kunststoffes eine gute Rezyklierbarkeit gegeben. Diese kann die Wie-

derverwendung des Stabes durch Rückformung in den Ausgangszustand umfassen und/oder die Weiterverarbeitung zu einem Kunststoffgranulat als Grundlage für Spritzgießanwendungen.

Das Thema Nachhaltigkeit stellt für die SGL im Allgemeinen ein großes Anliegen dar. Deshalb wird unternehmensweit angestrebt bis zum Jahr 2025 den Ausstoß von CO_2 um 50 % zu reduzieren. Darüber hinaus ist vorgesehen u. a. durch den Einsatz von Wasserstoff und Biogas als Energieträger die CO_2 -Bilanz der Produktion zu verbessern und bis zum Jahr 2038 in Summe klimaneutral zu sein. Der Herstellungsprozess von Heavy Tow Fasern mit 50k Einzelfilamenten ist aufgrund der hohen Durchsatzraten bereits sehr effizient. Zudem wird geplant durch die Verbesserung der Energieausnutzung in der Faserproduktion und den Bezug von grünem Strom den ökologischen Fußabdruck weiter zu verbessern und die CO_2 Emissionen signifikant zu reduzieren. Ferner könnte in Zukunft auf Biomasse basierendes Acrylnitril als Rohstoff für Kohlenstofffasern in Betracht gezogen werden.

Ein weiterer Beitrag zur Nachhaltigkeit wird durch die von Kohlenstofffasern ermöglichten Endprodukte und Märkte geleistet. Neben der Bauindustrie werden Rotorblätter von Windkraftanlagen mit Kohlestofffasern verstärkt sowie Drucktanks aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen z. B. zur Wasserstoffspeicherung hergestellt. Diese Anwendungen wiederum leisten ebenfalls einen enormen Beitrag zur Reduktion der weltweiten Treibhausgasemissionen.

Nach seinem Maschinenbaustudium war Dr. **Michael Kropka** bis Ende 2018 als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Projektleiter bei der Neue Materialien Bayreuth GmbH im Bereich thermoplastische Faserverbundwerkstoffe tätig. Begleitend dazu absolvierte er ein Promotionsverfahren am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth zum Thema Verarbeitung und Eigenschaften von hybriden Faserverbunden aus Glas- und Kohlenstofffaser basierten UD-Tapes. Seit 2019 arbeitet Michael Kropka für die SGL Technologies GmbH in Meitingen und leitet das Team Material Engineering.



Aerogel-Dämmstoffe für den Einsatz in Carbonbeton-Sandwichplatten



Aerogele haben in den letzten Jahren aufgrund ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften erhebliches Interesse als Dämmmaterialien geweckt. Diese ultraleichten porösen Materialien weisen im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen wie EPS, XPS, Mineralwolle usw. eine bemerkenswert geringe Wärmeleitfähigkeit auf (0,004-0,022 W/mK gegenüber 0,035-0,05 W/mK). Diese geringe Wärmeleitfähigkeit ermöglicht eine Reduzierung der Dicke des Dämmstoffs und somit einen schlankeren Wandaufbau. Dadurch kann der Bedarf an versiegelten Flächen reduziert werden, während der Ressourcenverbrauch durch geringere Dämmstoffmengen verringert wird.

In diesem Zusammenhang werden die aktuellen Entwicklungen und Forschungsvorhaben in Bezug auf Aerogel-Dämmstoffe und ihren Einsatz im Bauwesen vorgestellt. Es gibt verschiedene Arten von Aerogelen, die für die Dämmung verwendet werden können. Neben herkömmlichen Aerogelen auf Silica- und PUR-Basis werden auch neu entwickelte Aerogele auf Ligninbasis präsentiert. Diese biobasierten Materialien werden aus erneuerbaren Ressourcen gewonnen und dienen als CO₂-Senken. Darüber hinaus sind sie nach der Verarbeitung zu Aerogelen vollständig wiederverwendbar oder kompostierbar, was ihre Nachhaltigkeit weiter verbessert.

Die Verwendung von Aerogelen als Dämmstoff ermöglicht innovative Baukonstruktionen und Anwendungen. Insbesondere in Carbonbeton-Sandwichbauteilen können Aerogele Anwendung finden. Diese Sandwichbauteile bestehen aus zwei äußeren Carbonbetonschichten, zwischen denen sich eine Schicht aus Aerogel-Dämmstoff befindet. Durch diese Kombination wird eine hohe Steifigkeit und Festigkeit der Bauteile erreicht, während gleichzeitig eine Wärmedämmung gewährleistet wird. Auf diese Weise können energieeffiziente Gebäudekonzepte realisiert werden, die den Anforderungen moderner Nachhaltigkeitsstandards gerecht werden.

Die Herstellung von Aerogelen erfolgt durch die Gelbildung und anschließende Trocknung des Gelnetzwerks, wodurch das Lösungsmittel entfernt wird. Das resultierende Material ist äußerst porös und weist die charakteristischen Eigenschaften von Aerogelen auf. Um Aerogele als Dämmstoffplatten zu integrieren, werden sie weiterverarbeitet und in geeignete Formen gebracht. Dabei kommen verschiedene Techniken wie Pres-

sen, Schütten und Einblasen zum Einsatz, um die gewünschten Abmessungen und Eigenschaften der Dämmstoffplatten zu erreichen.

Des Weiteren werden aktuelle Forschungsergebnisse und Entwicklungen im Bereich der „biologischen“ Aerogele präsentiert, die an unserem Institut durchgeführt wurden. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellung der Aerogele aus Lignin sowie deren Weiterverarbeitung zu Dämmstoffplatten. Durch die Untersuchung der Materialzusammensetzung, der Struktur und der thermischen Eigenschaften dieser Aerogele werden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die zur Optimierung der Dämmleistung und der Verarbeitungstechniken beitragen.

Die Verwendung von Aerogelen als Dämmstoff in Carbonbeton-Sandwichbauteilen bietet erhebliche Vorteile in Bezug auf Wärmedämmung und Nachhaltigkeit. Die geringe Wärmeleitfähigkeit der Aerogele ermöglicht eine Dickenreduzierung des Dämmmaterials und führt zu schlankeren Wandaufbauten. Zudem bieten die biobasierten Aerogele aus Lignin eine umweltfreundliche Alternative zu herkömmlichen Dämmstoffen, da sie aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden und vollständig wiederverwendbar oder kompostierbar sind. Die vorgestellten Forschungsergebnisse und Entwicklungen tragen dazu bei, das Potenzial der Aerogel-Dämmstoffe weiter zu erforschen und ihre Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen zu erweitern.

M.Sc. **Lukas Steffen** ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau, Forschungsgruppe Nachhaltiges Bauen, der HTWK Leipzig mit Forschungsschwerpunkt Bauphysik, Leichtbau und Simulation. Master und Bachelor Abschluss an der HTWK Leipzig Fakultät Bauwesen mit Hochbauvertiefung.



Prof. Dr.-Ing. **Klaus Holschemacher** ist Professor für Stahlbetonbau und Direktor des Instituts für Betonbau der HTWK Leipzig.



Carbonfasern für energieeffiziente Heizsysteme in Betonfertigteilen



Innerhalb von industriellen Forschungsprojekten wurde ein Carbonfaserheizsystem materialtechnologisch entwickelt und für verschiedene ebene und gekrümmte Betonfertigteile ausgelegt und getestet. Im Ergebnis können mit der Carbonfaserheizung innerhalb von kurzer Zeit hohe Bauteiloberflächentemperaturen erreicht werden, wobei die Energieeffizienz über 50 % höher gegenüber metallischen Heizsystemen ist. Die Gewährleistung einer dauerhaften Funktionalität ist sowohl durch das Materialverhalten, als auch der Betriebsscharakteristik des Systems in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen und des Heizregimes umfassend untersucht wurden.

Einleitung

Derzeit erfolgt die Raumwärmebereitstellung für private Haushalte zu etwa 70 % aus fossilen Energiequellen. Demgegenüber steht das Verbot für neue Öl- und Gasheizungen ab 2024. Stattdessen sollen neue Heizungen zu 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden. Demzufolge ist die Entwicklung innovativer Technologien zur Wärmeerzeugung aus elektrischer Energie zwingend erforderlich. Eine vielversprechende Möglichkeit dazu bieten elektrische Heizsysteme, wie bspw. elektrische Wand- und Fußbodenheizungen sowie Natursteinheizungen. Nachteile sind hierbei jedoch die aufwändige Herstellung und die stark begrenzten Möglichkeiten der Gestaltung der Form und Oberfläche.

Im Gegensatz dazu sind die Gestaltungsvarianten von Carbonbeton nahezu unbegrenzt. Zudem zeichnen sich Carbonfasern durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit und den negativen Temperaturkoeffizienten (Heißleiter) aus. Daher kann ein schnelles Hochheizen ermöglicht werden, da der Widerstand – im Gegensatz zur konventionellen metallischen Heizlitze – mit steigender Temperatur sinkt und die Leistungsaufnahme zunimmt.

Materialien und Methoden

Die energieeffizienten bewehrungsintegrierten Betonheizsysteme bestehen aus einer textilen alkaliresistenten Glasfaserbewehrung (ARB) zur Erhöhung der Festigkeiten, einem Carbonfaserroving mit 800 tex der Firma Teijin zur Erzeugung der thermischen Leistung mittels elektrischer Widerstandsheizung und einer mineralischen Matrix. Der Herstellungsprozess der Carbonheizelemente unterteilt sich in folgende

Arbeitsschritte: Konfektionierung der Heizsysteme, Schalungsvorbereitung, Betonage, Ausschalen und Trockenheizen. Die Integration der Carbonfaserheizung erfolgte in Platten, Rohren und Betonmöbeln. Einen Tag nach der Herstellung wurde ausgeschalt und die Lagerung nach DIN EN 12390-2 für 14 Tage durchgeführt. Nach der Inbetriebnahme wurde die Temperatur der Carbonfaserheizung täglich um 3 bis 5 K erhöht, um eine homogene Trocknung der Betonmatrix zu erreichen. Erfolgt das Aufheizen zu früh oder zu schnell, entstehen im Inneren Wasserdampfbblasen, die zu Rissen oder anderen Beschädigungen der Bauteile führen können.

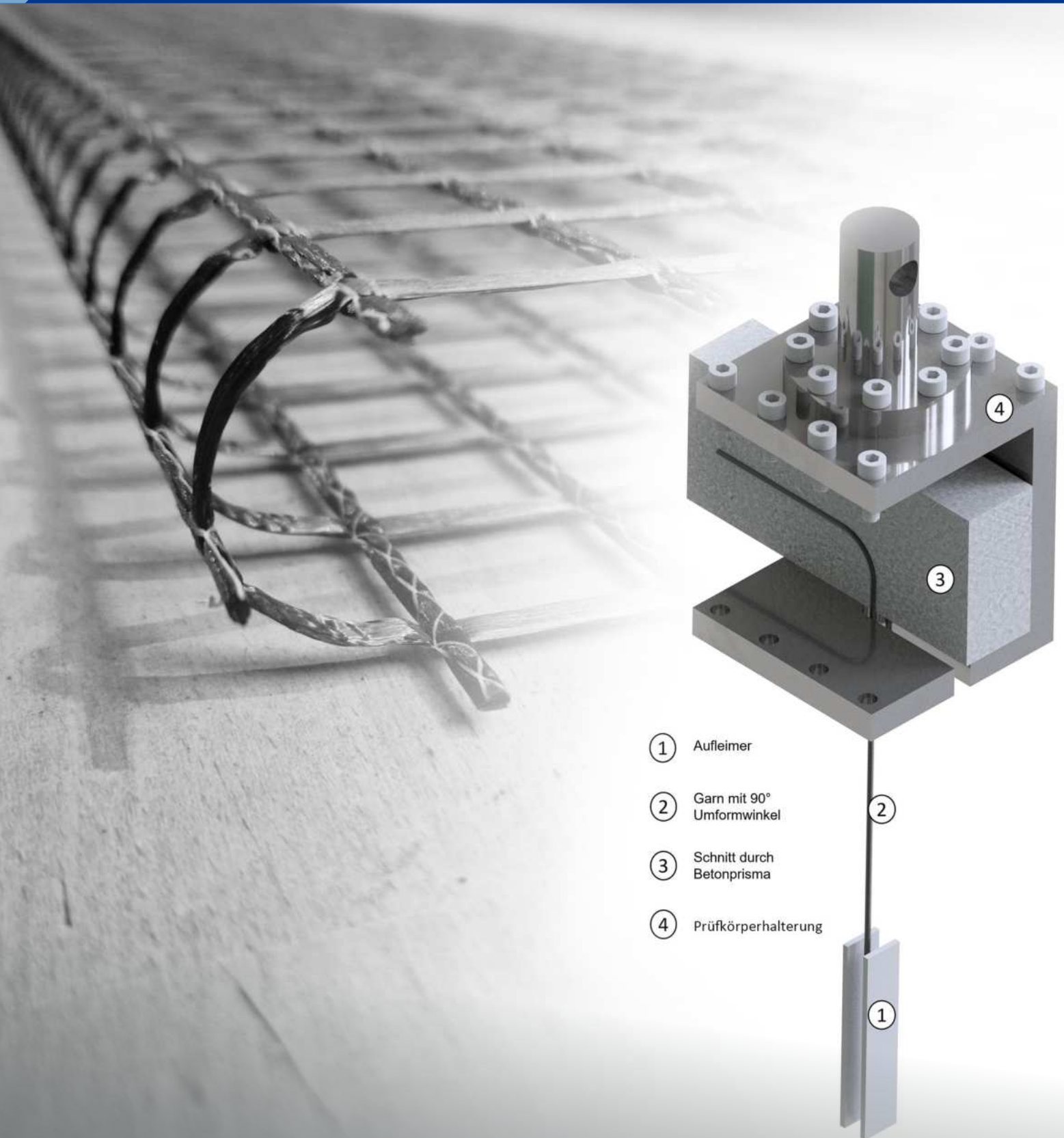
Ergebnisse

Die Flächenleistung des Carbonfasertextils ist anwendungs- und bauteilspezifisch angepasst worden. Dabei wurden die zwei Wirkungsweisen der Wärmeübertragung – Wärmeleitung und -strahlung – über die gezielte Einstellung der Oberflächentemperatur genutzt. Aufgrund des geringen elektrischen Widerstands der Carbonfasern und des homogenen Wärmeübergangs im Bauteilinneren konnten mit einer Leistungsdichte 1000 W/m² innerhalb einer Stunde Oberflächentemperaturen von über 100 °C erzielt werden. Im Vergleich zur konventionellen Natursteinheizung mit 2000 W/m² können bei halber Flächenleistung fast 20 % höhere Temperaturen in 83 % der Zeit erreicht werden, was das große Potential der Carbonheizung in Bezug auf Energieeffizienz und Heizleistung aufzeigt. Gleichzeitig wirkt das ARB-Carbon-Textil als Bewehrung und damit zur Verstärkung des Tragverhaltens, was anhand von Festigkeitsuntersuchungen validiert worden ist.

Henrik Funke hat zwischen 2004 und 2009 an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg Keramik-, Glas- und Baustofftechnik studiert und ist seit 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz. Seit 2013 arbeitet Henrik Funke zudem als Leiter für Forschung und Entwicklung bei dem Steinbeis-Innovationszentrum FiberCrete. Er befasst sich mit faserverstärkten mineralischen Baustoffen. Dabei stehen sowohl zementhaltige als auch zementfreie Baustoffe (alkalisch aktivierte Bindemittel) im Fokus der laufenden Forschungen.



Carbonformbewehrung - mit Versuchsergebnissen und Ingenieurmodell zur Bemessung



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 Querkraftbewehrungskörben benötigt werden, stellen Sonderanfertigungen dar. Die Johne & Groß GmbH als Betonstahlbiegerei ist von der Verwendung der nichtmetallischen Bewehrung im konstruktiven Betonbau überzeugt. Die neuartige Bewehrung wird den Betonbau verändern und neue Produkte werden entstehen. Die dafür notwendige nichtmetallische Formbewehrung hat die Johne & Groß GmbH seit Anfang 2021 im Angebot und entwickelt diese stetig weiter. Ergänzend zur Fertigung der Formbewehrung bietet die Johne & Groß GmbH ein Komplettpaket aus Beratung, Bauteilbemessung und Bewehrungsplanung, -fertigung und -lieferung an.

In Anlehnung an die konventionelle Stahlbewehrung sollen in einem standardisierten Umformverfahren schnell und kosteneffizient aus ebenen Bewehrungsprodukten dreidimensionale Elemente und Konstruktionen gefertigt werden. In aktuellen Wirtschaftsprojekten konnte die Herstellung von Standardbewehrungsformen wie L-Winkeln sowie U- und Z-Profilen aus thermoplastisch gebundenen, nichtmetallischen Bewehrungsgittern für zahlreiche Betonbauteile umgesetzt werden. Im Vortrag wird der aktuelle Stand der Technik und Forschung für Formbewehrungsgitter präsentiert. Zusammen mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden werden im Rahmen des ISC-Projekts zwei Punkte für umgeformte Gitter näher beleuchtet: das Formgebungsverfahren und die experimentell quantifizierte Tragfähigkeit der hergestellten Formbewehrung.

Die Festigkeit der Formgitterbewehrung im Umlenkbereich ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Die Carbonbewehrung ist allgemein aufgrund ihrer strukturellen Anisotropie querdruckempfindlich. Im Umlenkbereich wird die Bauteilbewehrung quer zur Faser beansprucht, was daher mit einer Reduktion der Bewehrungsfestigkeit einhergeht. Experimentelle Untersuchungen zu geformter CFK-Stab- sowie -Gitterbewehrung belegen ebenjene Festigkeitsreduktion. Zudem gibt es noch Faktoren, welche einen direkten Einfluss auf die Zugfestigkeit der Bewehrung im Umlenkbereich besitzen. Neben dem Umlenkradius hat die Bewehrungseinheit, die Bewehrungsgeometrie, der Tränkungsgrad sowie die Art der Tränkungsmatrix einen signifikanten Festigkeitseinfluss. Um das Ziel einer standardisierten Formbewehrung innerhalb des

ISC-Projekts zu erreichen, sind umfassende experimentelle Untersuchungen an der Formbewehrung der Johne & Groß GmbH in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden angedacht.

Die Versuche im Rahmen des Beitrags fokussieren sich auf zwei wesentliche Parameter der Formbewehrung. Den Umformradius und den Umformwinkel. Im ersten Schritt wird die Verankerungslänge des geraden Bewehrungselements experimentell bestimmt und für die Versuche an der Formbewehrung über alle Parametervariationen konstant gehalten. Somit kann gewährleistet werden, dass diese den Versuch nicht beeinflusst. Um die Abminderung der Festigkeit im Umlenkbereich zu untersuchen, werden im zweiten Schritt einzelne Garne entsprechend eines festgelegten Versuchsplans umgeformt und im Umlenkbereich einbetoniert. Dabei wird der Umformwinkel auf 90° festgelegt und der Umformradius zwischen 0,5 mm und 50 mm variiert. Der Prüfaufbau ist an den YPO-Versuch angelehnt, wobei die Lasteinleitung am freien Garnende über Aluminiumaufkleimer erfolgt. Neben der Auszugskraft wird auch der Auszugsweg gemessen. Als Kontrollgröße werden anhand einer zusätzlichen Charge Garne ohne Umformung mit der experimentell bestimmten Verankerungslänge geprüft. Für die Auswertung werden die erreichten Zugkräfte der jeweiligen Chargen ermittelt und miteinander verglichen.

Dr.-Ing. **Tilo Senckpiel-Peters** studierte von 2009 bis 2014 Bauingenieurwesen an der TU Dresden. In seiner Dissertation setzte er sich mit der Berechnung von Carbonbetontragwerken auseinander und ist seit 2019 bei der Johne & Groß GmbH verantwortlich für nichtmetallische Bewehrungssysteme.



Von 2010 bis 2020 studierte Herr Dipl.-Ing. **Berk Guendogdu** an der TU Dresden Maschinenbau. Seit Abschluss seiner Diplomarbeit bei der Thyssenkrupp AG arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Dresden und promoviert zur Formbewehrung.



CPC-Elemente im praktischen Einsatz



CPC steht nicht nur für Carbon Prestressed Concrete (Beton mit vorgespannter Carbonbewehrung), sondern auch für eine neue ressourcenschonende und klimafreundliche Betonbauweise.

Die langlebigen CPC-Betonelemente gingen aus einem Forschungsprojekt der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Winterthur (ZHAW) und der Silidur AG, Andelfingen hervor. Die werksseitig hergestellten Betonelemente bestehen aus einem klinkerreduzierten Beton, regionalen Rohstoffen, sowie einer weltweit einzigartigen Bewehrungstechnologie. Die nur 1 mm dünnen Carbon-Rovings werden vollständig gestreckt und orthogonal über die gesamte Platte mit einem konstanten Bewehrungsgehalt je Richtung angeordnet. Der Achsabstand der Carbon-Rovings in einer Lage beträgt im Mittel 15 mm. Pro Richtung ist die Vorspannung der Carbon-Rovings konstant. Die Vorspannung vor dem Ablassen beträgt 2.000 N/mm² (+/- 5 %), die planmäßige elastische Vordehnung der Rovings zum Zeitpunkt der Vorspannung entspricht 8,7 % (Toleranzbereich 8,3 - 9,1 %). Die Mindestbetondeckung zur Verbundsicherung c_{min} beträgt gerade einmal 5 mm.

Seit November 2021 verfügen die CPC-Betonelemente über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)/allgemeine Bauartengenehmigung (aBG) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) mit der Nummer Nr. Z-71.3-42. In der abZ/aBG ist die komplette statische Bemessung der CPC-Betonplatten enthalten.

Die rechnerischen Nachweise werden unter der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte (Bernoulli-Hypothese) geführt. Generell sind statische Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG) zu führen.

Die leistungsfähigen dünnen Betonelemente ermöglichen je nach Konstruktion Materialeinsparungen von bis zu 80 % und reduzieren den CO₂-Fußabdruck des Bauteils um bis zu 75 %. Eine CO₂-Reduktion ergibt sich auch aus der Verwendung von deutlich weniger Material (Carbon statt Stahl) für die Bewehrung. Pro Quadratmeter befinden sich z. B. in den 4 cm dünnen CPC-Elementen nur 200 g Carbonbewehrung, während es bei einer konventionellen Platte aus Stahlbeton ca. 5 kg Stahlbewehrung sind.

Die Produktion der Elemente erfolgte über 10 Jahre in der Schweiz und wurde im Sommer 2022 nach Deutschland verlegt. In einem Betonfertigteilwerk

der Holcim (Deutschland) GmbH wurde eine Produktionshalle umgebaut und mit hochmoderner Produktionstechnik ausgestattet. Diese Anlage ist die weltweit erste Großanlage für diese neue Betonbauweise. Die zwei bis sieben Zentimeter dünnen CPC-Elemente lassen sich industriell großformatig fertigen und anschließend auf Maß zuschneiden. Neben einfachen sind auch frei geformte Zuschnitte und Oberflächenbearbeitungen mittels moderner CNC-Maschinen möglich.

Zurzeit liegt das Einsatzgebiet der CPC-Elemente hauptsächlich bei sekundären Tragelementen. Aktuell werden Bohlenbeläge bei Steganlagen oder Brücken, Balkonplatten und Treppentritte daraus gefertigt. Die hervorragenden technischen Eigenschaften, wie z. B. die hohe Festigkeit, die lange Nutzungsdauer von über 100 Jahren, keine Bewehrungskorrosion und die serielle millimetergenaue Produktion bieten zahlreiche Ansätze einer neuen Betonbauweise.

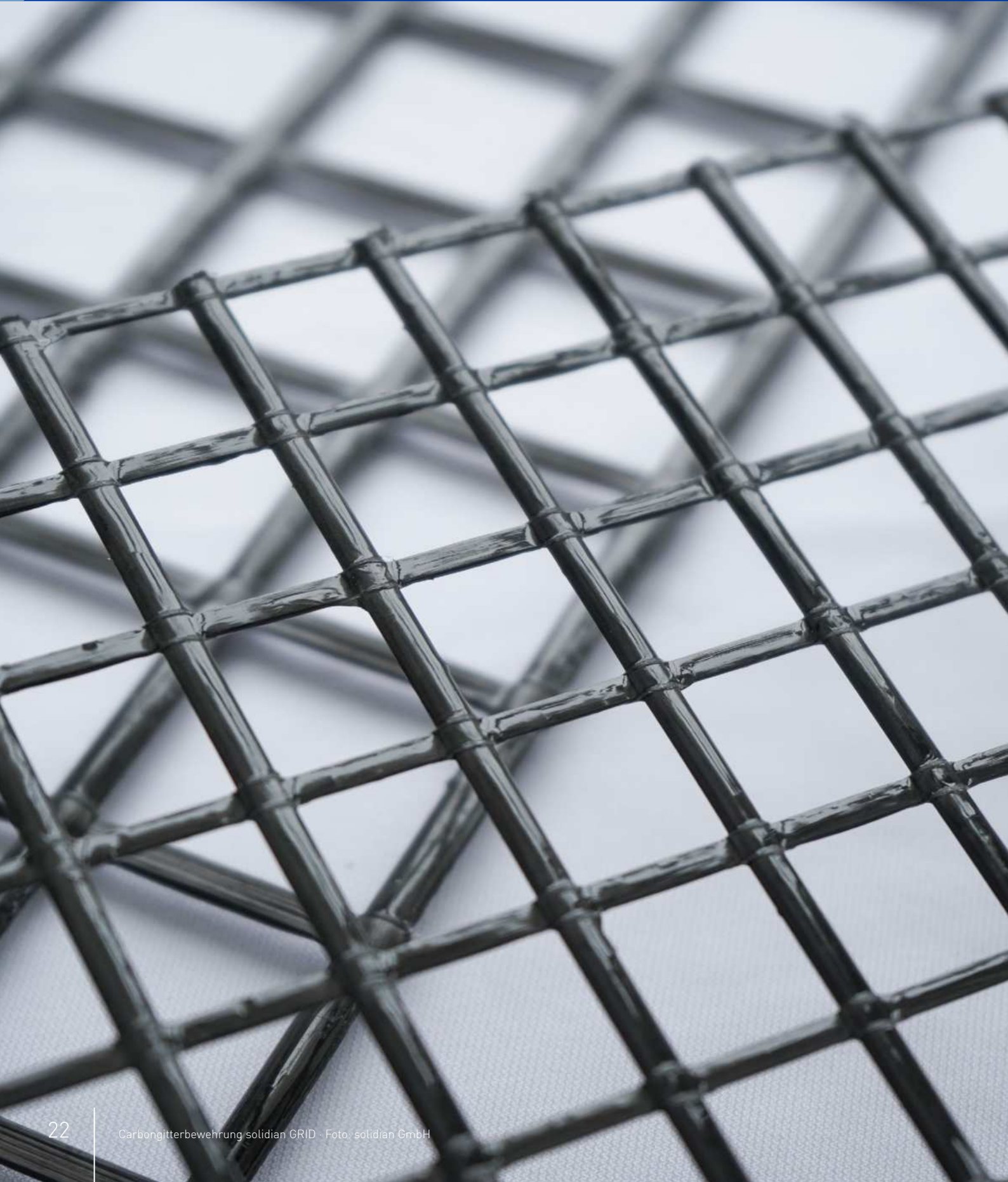
Die vielfältigen Referenzen, wie die Balkon- und Brückenbeläge, Modulbrücken und Treppen haben die Praxistauglichkeit bewiesen und es gibt bereits jetzt schon Pilotprojekte von anderen Bauteilen. Zusammengesteckte Kassettendecken im Hochbau sind nur ein Beispiel. So können zukünftig ganze Häuser aus CPC-Elemente gebaut werden.

Andreas Borgstädt ist seit November 2020 im Team der Architekten- und Planerberater bei Holcim Deutschland. Davor war er 14 Jahre für den Schweizer

Bauchemiekonzern Sika AG als Abteilungsleiter Verkauf der Sparte Waterproofing tätig. Des weiteren war er vorher viele Jahre im Vertrieb und Produktmanagement von mineralischen Baustoffen von internationalen Firmen tätig. Erste berufliche Erfahrung mit dem Baustoff Beton machte er u.a. als Betontechnologe an einem Prüf- und Forschungsinstitut sowie im Vertrieb der früheren Readymix AG Rhein Ruhr.



DAfStb-Richtlinie Nichtmetallische Bewehrung: Erfahrungen aus dem Zulassungsverfahren solidian GRID



Die Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) wird voraussichtlich in 2023 im Weißdruck veröffentlicht. Deren Anwendung erfordert zugelassene Bewehrungsmaterialien, die die erforderlichen Kennwerte bereitstellen. Der Teil 4 der Richtlinie schlägt Prüf- und Auswerteverfahren sowohl für stab- als auch für gitterförmige FVK-Bewehrungen vor.

Die Firma solidian GmbH hat sich entschlossen, auf Basis des Richtlinienentwurfes und der zugehörigen Prüfverfahren für das solidian GRID eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bereitzustellen. Das Institut für Massivbau der RWTH Aachen (IMB) begleitet das Verfahren als Gutachter und hat wesentliche Teile der erforderlichen Versuche geplant, durchgeführt und ausgewertet. Ergänzt wurden die Untersuchungen durch Materialprüfungen am Matrixharz in Kaiserslautern sowie eigene Untersuchungen des Antragstellers. Hierbei gingen Forschung und Praxis Hand in Hand: Im Zulassungsverfahren wurde beispielsweise ein neues Verbundprüfverfahren für Gitterbewehrungen entwickelt, das kurzfristig noch im Richtlinienentwurf aufgenommen werden konnte. Auch die Auswerteverfahren für die Langzeitzug- und Verbundeigenschaften wurden begleitend entwickelt bzw. erstmals angewendet. Erkenntnisse des Antragstellers zur temporären Verformung der Gitter, beispielsweise während der Lagerung auf einer Rolle, konnten ebenfalls für die Arbeit im DAfStb-Unterausschuss Nichtmetallische Bewehrung genutzt werden. Neu entwickelt wurde auch der Gedanke einer Familienzulassung für die Gitterbewehrung. Ähnlich zur „Familie“ von Stabdurchmessern aus GFK, bei der nicht jeder Durchmesser separat geprüft wird, werden dabei durch Grenzwertbetrachtungen die Anwendungsgrenzen der Zulassung auf andere Gittertypen aus den gleichen Grundmaterialien erweitert. Die Prüfungen inklusive der Nachforderungen seitens der Sachverständigen für das Zulassungsverfahren konnten inzwischen soweit abgeschlossen werden, dass die Voraussetzungen für eine Erteilung der Zulassung ggf. schon zum Jahresende 2023 erbracht sind. Das ursprüngliche Untersuchungsprogramm wurde in Abstimmung mit den Sachverständigenausschuss und Deutschen Institut für Bautechnik erweitert.

Neben der Untersuchung von mehreren Chargen des Bewehrungsmaterials war dies insbesondere

der Tatsache geschuldet, dass es sich hier um das erste allgemeine Zulassungsverfahren für ein Carbonbewehrungsgitter handelt sowie einige Prüfverfahren zu Beginn noch nicht zur Verfügung standen bzw. angepasst werden mussten. Ein struktureller Unterschied zwischen stab- und gitterförmigen FVK-Bewehrungen, der bei allen Prüfungen und den zugehörigen Auswertungen beachtet werden muss, ist die Rolle des Betonspaltes. Bei Betonstahlbewehrung oder bei stabförmiger FVK-Bewehrung wird das Betonspalten in Experimenten in der Regel unterdrückt und in der Bemessung implizit durch Konstruktionsregeln oder die Betondeckungen im Bauteil erfasst. Gitterförmige Bewehrungen werden aber vorrangig für dünne, flächige Bauteile eingesetzt, bei denen keine Verbügelung oder große Betondeckung vorhanden ist. Somit muss explizit gegen Betonspalten bemessen oder die Versuche müssen so durchgeführt werden, dass ein Betonspalten bei der Festlegung der Verbundfestigkeiten so erfasst wird, dass ein ausreichendes Nachbruchverhalten sichergestellt ist. Die Erkenntnisse, die aus diesem Praxisverfahren entstanden sind, werden durch das IMB der RWTH in laufenden Forschungsvorhaben sowie der weiteren Normungsarbeit genutzt.

Mit dem Vorliegen der bauaufsichtlichen Zulassung für das solidian-GRID kann diese Bewehrung im Rahmen des Anwendungsbereiches der DAfStb-Richtlinie im Hochbau für viele Anwendungen ohne Zustimmungen im Einzelfall und vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen eingesetzt werden.

Dr.-Ing. **Jan Bielak** studierte und promovierte an der RWTH Aachen im Bereich Nichtmetallische Bewehrung. Seit Ende 2021 ist er Oberingenieur am IMB der RWTH Aachen und Mitglied im DAfStb-Ausschuss „Nichtmetallische Bewehrungen“.



Dr.-Ing. **Norbert Will** ist langjähriger Oberingenieur am Institut für Massivbau der RWTH Aachen. Seit 2018 ist er Obmann des DAfStb-Ausschusses „Nichtmetallische Bewehrungen“.



Die Zukunft des Bauens – neue biegbare Verbundstäbe



Arkema hat ein flüssiges thermoplastisches Acrylharz Elium® entwickelt, das die Herstellungsverfahren von reaktiven duroplastischen Harzen, einschließlich eines hohen Fasergehalts, mit den Vorteilen von thermoplastischen Harzen in Bezug auf Reparatur, Recyclingfähigkeit und Thermoformen oder Biegen kombiniert.

Bisher basierte die Herstellung von Verbundwerkstoffen aus glasfaserverstärktem Polymer (GFK) auf Duroplastharzen (UPR, vinyl ester, epoxy etc.), aber aufgrund neuer Umweltprobleme und insbesondere eines wachsenden Bedarfs an Recyclingfähigkeit bieten Verbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix einige Vorteile.

Thermoplastbasierte Verbundwerkstoffe werden klassischerweise durch Schmelzen von vorimprägnierten Verstärkungsgarnen verarbeitet, aber thermoplastische Polymere weisen im geschmolzenen Zustand normalerweise eine sehr hohe Viskosität auf, die die Faserimprägnierung beeinträchtigen könnte. Um dieses Problem zu überwinden, gibt es zuverlässigere und kostengünstigere Verarbeitungsstrategien, bei denen die in-situ-Polymerisation eines neuen flüssigen thermoplastischen Acrylharzes während des Prozesses stattfindet. Arkema, ein französisches Chemieunternehmen, hat hierfür das reaktive flüssige Elium® entwickelt, welches auf Acrylchemie basiert. Die Elium®-Harzsysteme wurden an verschiedene klassische Produktionsprozesse wie Vakuumfiltration, resin-transfer-molding (RTM), Wickeltechnik, sheet molding compound (SMC) und auch Pultrusion angepasst. Ein großer Vorteil dieser Verfahren besteht darin, dass die flüssige reaktive Natur des Harzes eine bessere Imprägnierung und Faser-Matrix-Anbindung ergibt, was die Endgebrauchseigenschaften erheblich verbessert, insbesondere das Langzeitverhalten wie Ermüdung und Kriechen, selbst unter alkalischen Bedingungen.

Im Mittelpunkt der aktuellen Präsentation steht die Entwicklung von GFK-Bewehrungsstäben, die im Hoch- und Tiefbau eingesetzt werden können. Es werden die neuesten Ergebnisse verschiedener internationaler Universitäten zu statischer Mechanik, Beständigkeit der Bewehrungsstäbe im alkalischen Beton und verschiedene Anwendungsmöglichkeiten präsentiert. Ein weiteres Augenmerk wird auf die Biegefähigkeit der Stäbe und ihre Industrialisierung gelegt, was der Hauptvorteil eines solchen thermoplastischen Bewehrungsstabs ist: Das einfache Biegen in der Nähe der Baustelle oder in einem Biegezentrum, anstatt die endgültige Form wäh-

rend der Harzverarbeitung in der Pultrusionswerkstatt herzustellen. Des Weiteren wird aufgezeigt, wie die Nachhaltigkeit von Verbundwerkstoffen allgemein und GFK-Stäben im Besonderen verbessert werden kann, indem die Pultrusionsabfälle mit Elium® vollständig recycelt werden können und auch Möglichkeiten entwickelt werden können, wie man die GFK-Stäbe am Ende des Lebenszyklus wiederverwerten kann.

Die Verwendung von Elium® in diesen Anwendungen könnte bahnbrechende Auswirkungen auf die Branche haben, da die Lieferkette von Elium®-GFK-Bewehrungsstäben ähnlich wie bei klassischen Stahlbewehrungsstäben vollständig erneuert werden kann, wobei die Produktionsverzögerung drastisch verkürzt wird.

Dr. **Alexander Zoller** ist Forschungs- und Entwicklungsingenieur bei Arkema S.A. Er erhielt einen M.Sc. in Chemie von der TU Dresden im Jahr 2013, ein Diplôme d'Ingénieur von der Ecole Européenne de Chimie, Polymères et Matériaux der Université de Strasbourg im Jahr 2012 und einen PhD in Polymerchemie von der Aix-Marseille Université im Jahr 2016, wo er die Simulations- und Optimierungsprozesse von ELIUM-Harzen unter der Leitung von Dr. Didier Gigmes untersuchte. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich Acrylpolymeren und thermoplastische Verbundwerkstoffe.



Einordnung der EU-Taxonomie und ESG für die Baubranche



Energieeffizienz und Nachhaltigkeit gewinnen immer mehr an Bedeutung. Gestiegene gesetzliche Anforderungen und gewandelte gesellschaftliche Anforderungen fordern insbesondere bei Neubauten, aber auch bei Bestandsgebäuden und Sanierungen ein klares Konzept zur Einhaltung der Ziele. Klimaschutz gewinnt als zentraler Bestandteil der ökologischen Nachhaltigkeit immer mehr an Bedeutung. Es sollen ambitionierte Ziele umgesetzt und ein Verständnis für Nachhaltigkeit und ESG-Kriterien geschaffen werden. All dies fordert ein Umdenken und Maßnahmen in Bauprojekten.

Die EU-Taxonomie macht hier klare Vorgaben, dass eine Lebenszyklusanalyse entsprechend durchgeführt werden muss, sofern eine Investition als nachhaltig deklariert werden soll. Im Rahmen der aktuell geltenden Förderprogramme und Zertifizierungen sind Ökobilanzierungen und resultierende Grenzwerte einzuhalten, in denen ein bestimmtes CO₂-Budget nicht überschritten werden darf, verpflichtend geworden. Dies bedeutet auch, dass Bauen ohne alternative Baustoffe und ohne erneuerbare Energien im Rahmen einer nachhaltigen Finanzierung für Investoren sowie auch für geförderte Bauvorhaben, kaum mehr umsetzbar ist.

Die energiebedingten CO₂-Emissionen sind dabei eine wesentliche Kenngröße, diese können durch die Wahl des Energieträgers sowie des Heizungssystems beeinflusst werden. Die Baumaterialien haben auf die Nachhaltigkeitsbewertung einer Immobilie ebenfalls entscheidende Auswirkungen. Eine Ökobilanzierung zeigt auf, in welchen Baustoffen wie viel CO₂ im Gebäude gebunden ist und welche Alternativen möglich sind, um die gebundenen CO₂-Emissionen eines Bauwerks zu reduzieren. Die Art des Betons hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Bewertung des gebundenen CO₂ eines Gebäudes, das es langfristig zu reduzieren gilt.

Der Gebäudesektor mit Bau und Betrieb ist für ca. 38 % der Treibhausgas-Emissionen verantwortlich. Bei der Betrachtung der Nachhaltigkeit sind zwei wesentliche Punkte relevant:

Einerseits die Lebenszyklusbetrachtung mittels einer Ökobilanzierung, die die Auswirkungen auf die Umwelt zeigt und zweitens die Schadstoffe in Materialien mit Folgen für die Gebäudenutzer. Beton als einer der wichtigsten Rohstoffe der Bauindustrie besteht überwiegend aus Sand, Kies und Zement in seinen Rohstoffen. Gerade die Herstellung von Zement verbraucht hohe Mengen an Energie und verursacht somit bereits zu Beginn eines Lebenszyklus hohe CO₂-Emissionen. Aber auch Sand und Kies

werden knapp und stehen nicht uneingeschränkt zur Verfügung. Daher werden alternative Baustoffe, weniger Materialeinsatz und als Varianten in den Bauvorhaben geprüft, um möglichst wenig und ausgewählte Materialien zu verwenden.

Folgende Punkte werden in dem Vortrag behandelt:

- Ambitionen zu CO₂-Neutralität und ESG
- Anforderungen an die Dekarbonisierung und kreislauffähiges Bauen
- Umsetzen und Sichtbarmachen von Nachhaltigkeitsstrategien
- Anforderung der EU-Taxonomie an Bauvorhaben

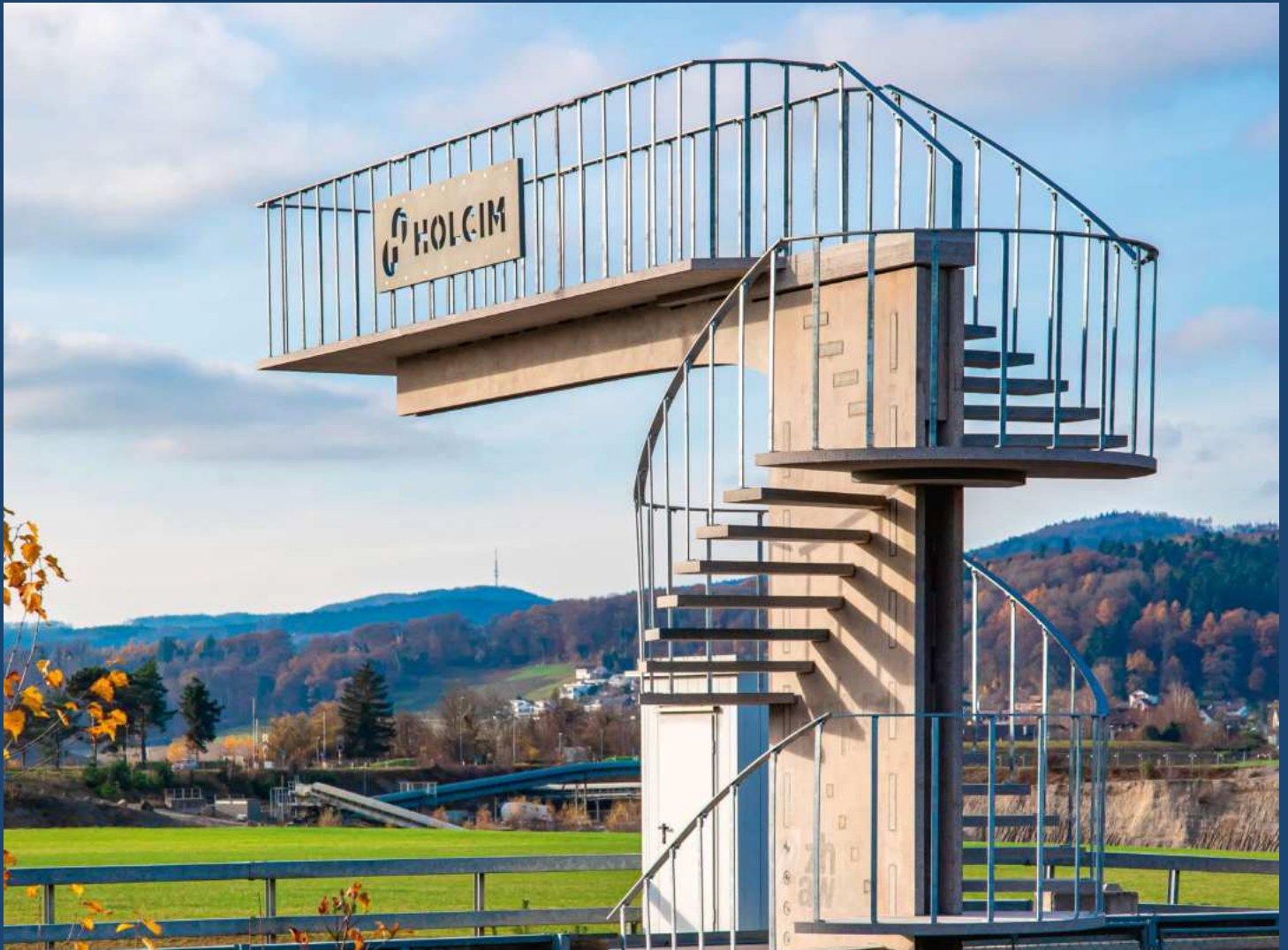
Die Belange der Nachhaltigkeit im Sinne eines nachhaltigen oder CO₂-neutralen Neu- und Umbaus und Betriebs sind von großer Bedeutung und werden im Rahmen der Leistungserbringung von Drees & Sommer besonders beachtet.

Franziska Hasse hat als Master of Engineering (M. Eng.) mehr als 13 Jahre Erfahrung im Fachgebiet Energie- und Umwelttechnik sowie Maschinenbau, in der Energieversorgung, Klimaschutz und Nachhaltigkeit. Am Cambridge Institut for Sustainability Leadership „Business Sustainability Management“ hat sie Management- und Arbeitspraktiken zur Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in Unternehmensstrukturen studiert. Sie entwickelt Unternehmensstrategien im Bereich Nachhaltigkeit, Wasserstoff und erneuerbare Energien.



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.

Mit CPC-Platten können zahlreiche Bauprodukte realisiert werden wie Fuß- und Radwegbrücken, Brückenbeläge, Balkonplatten, Treppen, Bodenplatten, Fassadenelemente oder Betonmöbel. In Kombination mit anderen innovativen Ansätzen wie Lichtbeton sind vielfältige Anwendungen denkbar.



www.holcim.de/de/cpc

 **HOLCIM**



solidian

ANZEIGE

Let's make
Carbon Concrete
the Gamechanger

choose our
non-metallic
reinforcements
to build solid
for the future
generations

build solid.



I am solidian.
Are you ready
for Carbon Concrete?

solidian.com



CARBON 360

BAUEN IN NEUEN DIMENSIONEN



CARBONBETON

LEISTUNGSFÄHIG NACHHALTIG WIRTSCHAFTLICH DAUERHAFT

Unser Leistungsspektrum:

- Beratung
- Aufstellung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen
- Erstellung von Entwicklungskonzepten mit Kosten und Zeitplan
- Sicherung ihrer Ideen durch Patentanmeldungen
- Dimensionierung und Konstruktion
- Anfertigung von Prüfkonzepten und Begleitung der Versuche
- Betreuung von Zustimmungen im Einzelfall und allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen
- Produktion und Produktionsberatung
- Qualitätssicherung
- Unterstützung im Verkaufsprozess der innovativen Technologien

Melden Sie sich heute noch zu unserem Newsletter an! www.carbon360.de



Dr.-Ing.
Oliver Heppes

Dipl.-Wirt.-Ing.
Markus Mühlhaus





BESTENS BEWEHRT!



WILHELM KNEITZ
SOLUTIONS IN TEXTILE

Technische Textilien

Textile Beton-Bewehrungen der Marke SiTgrid® aus ein- oder zweilagigen Carbon- und Glas-Gittergelegen, die zur bautechnischen Sanierung und Verstärkung von marodem Stahlbeton und zur innovativen Herstellung von Beton-Fertigteilen dienen.

Gittergelege

- 2D und 3D Geometrien
- Bewehrungen und Armierungen
- Carbon, Glas und Basalt

CONSTRUCTION

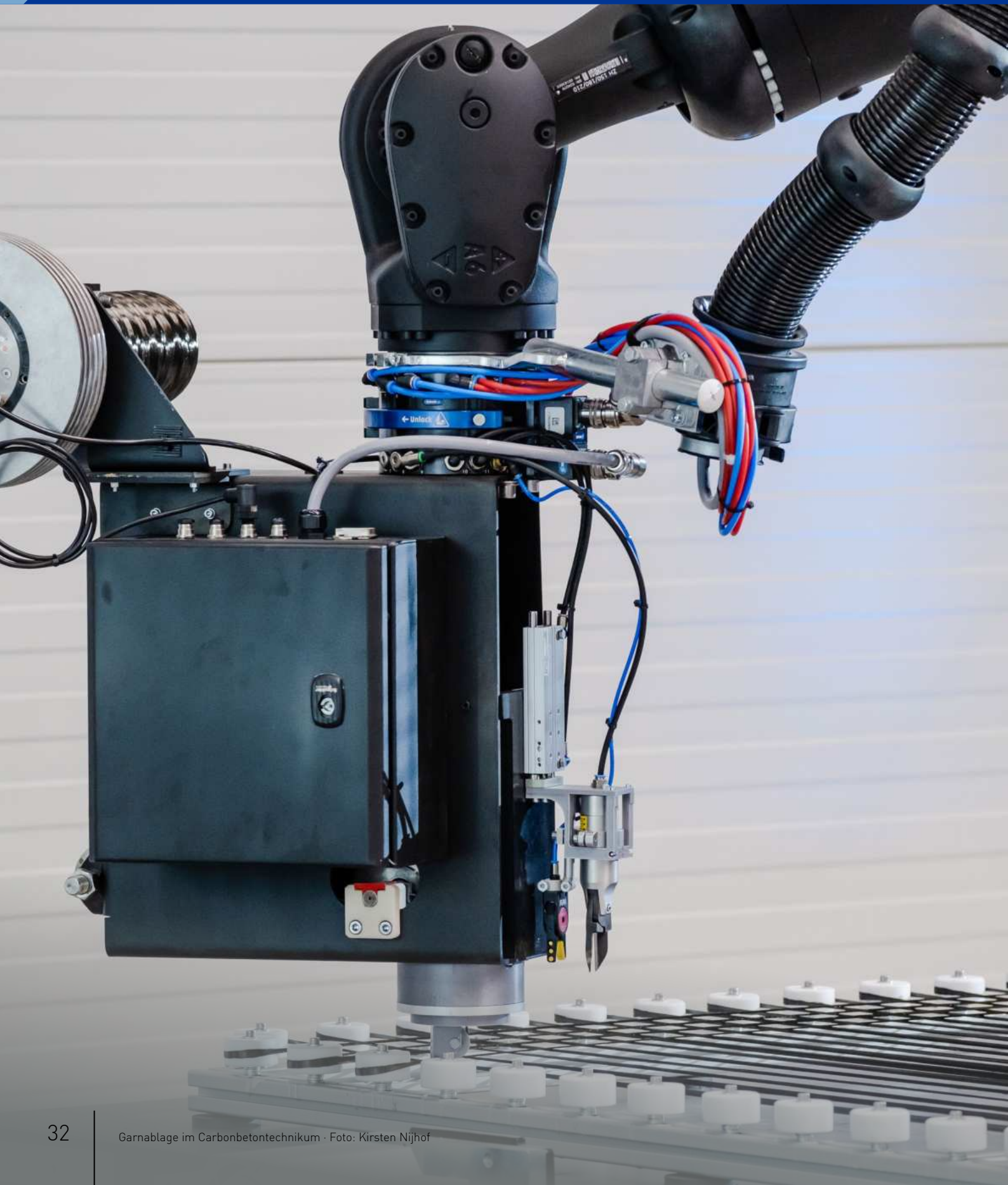


SiTgrid®

Mehr Informationen:

www.solutions-in-textile.com

Entwicklung einer Hochgeschwindigkeits-Garnablage zur Fertigung von Textilbewehrungen



Durch Carbonbeton können wertvolle Ressourcen eingespart und gleichzeitig ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet werden. Die aktuelle Herstellungsweise der für Carbonbeton benötigten Textilbewehrungen führt allerdings zu einem hohen Verschnittabfall. Um dieses Problem zu beheben, wurde die Direktgarnablage entwickelt. Mit diesem Verfahren sind anforderungsgerechte, verschnittfreie Textilbewehrungen realisierbar. Die Markteinführung wird jedoch durch eine begrenzte Fertigungsgeschwindigkeit verhindert. Hierbei bildet die prozessintegrierte Tränkungseinheit eine Schwachstelle. Zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit gilt es daher die Tränkungseinheit zu optimieren.

Bisherige Tränkungseinheiten basieren häufig auf einer Foulardtränkung oder Überdruckinjektion, wobei die Fertigungsgeschwindigkeiten zwischen 0,18 und 0,5 m/s erzielt werden. Im Projekt LoadTex3D erfolgt die Entwicklung einer neuen Tränkungseinheit für Carbonfasergarne bei einer hohen Fertigungsgeschwindigkeit von 1 m/s. Die Analyse und Untersuchung der Tränkungseinheit erfolgt an einem Teststand im Labormaßstab sowie im Werkmaßstab in der Modellfabrik des Carbonbetontechnikums der HTWK Leipzig. Als Carbonfasergarn wird ein 48k-Garn von Teijin und als Tränkungsmittel ein Epoxidharz von Sika verwendet. Die Prozess-Randbedingungen (z. B. Höchstgeschwindigkeit) werden zunächst durch Analyse der bestehenden Roboteranlage erarbeitet. Als Vorauswahl wird eine offene Tränkungskammer mit drei bis fünf fixierten Umlenkrollen festgelegt. Durch die Untersuchung zur Faserreibung (Rollenzahl und -abstand) können geeignete Materialien für die Umlenkrollen und ein anforderungsgerechter Aufbau der Tränkungseinheit erarbeitet werden. Als Bewertungskriterien für die Vorauswahl gelten hierbei die Reibungskraft, die Faserschädigung und die Anzahl der Umlenkrollen. Die Tränkungsqualität der neuen Tränkungseinheit wird in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Umlenkrollenzahl ermittelt und mithilfe von gravimetrischen Messungen sowie Zugprüfungen bestimmt. Die experimentelle Erprobung der neuen Tränkungseinheit im Werksmaßstab erfolgt durch die Herstellung von exemplarischen Bewehrungsmatten.

Die Roboteranlage bzw. der Roboterarm erreicht eine Höchstgeschwindigkeit von 2 m/s. Aufgrund der zu beachtenden mechanischen Belastung auf das Ablagesystem bei häufigen An- und Abbremsvorgängen und der Forderung nach einer

möglichst homogenen Tränkung über die Ablagelänge wird die Geschwindigkeit auf 1 m/s festgelegt. Dadurch kann eine gleichförmigere Ablage erzielt und die Maschinenstandzeit verlängert werden. Die Untersuchung geeigneter Materialien für die Umlenkrollen zeigt, dass aufgrund der geringen Reibung und der hohen Abriebfestigkeit, Keramik für die schonende Verarbeitung von Carbonfasern sehr gut geeignet ist. Es wird eine direkte Proportionalität der Umlenkrollenzahl zur Reibung und Faserschädigung nachgewiesen. Der Umlenkrollenabstand steht dagegen in einer indirekten Proportionalität.

Durch die Weiterentwicklung und Erprobung der Tränkungseinheit konnte die Fertigungsgeschwindigkeit der Direktgarnablage signifikant gesteigert werden. Die Tränkungsqualität und die mechanischen Kennwerte der Textilbewehrung liegen im Zielbereich. Die daraus resultierende halbierte Taktzeit führt zu einer deutlichen Verbesserung der Wirtschaftlichkeit. Eine Optimierung des Verfahrens ist bspw. durch eine Garnvorfächerung oder -vortränkung möglich.

M.Sc. **Erik Knoch** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau der HTWK Leipzig mit Forschungsschwerpunkt Textile Garnablage und -tränkung, Automatisierung und Additive Fertigung.



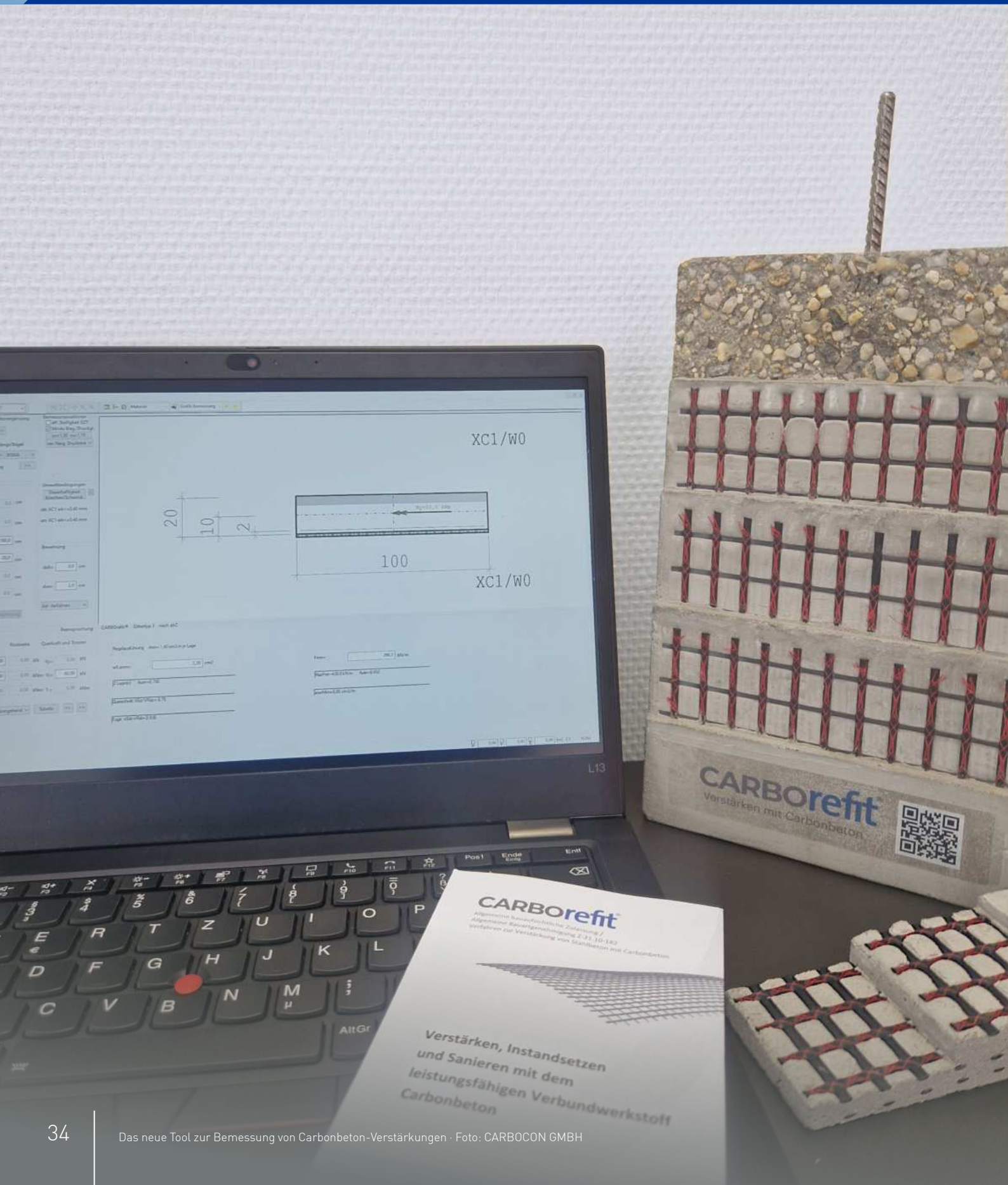
Dr.-Ing. **Steffen Rittner** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betonbau der HTWK Leipzig mit Forschungsschwerpunkt Textilbewehrungen, Fertigungsverfahren und Funktionsintegration.



Prof. Dr.-Ing. **Klaus Holschemacher** ist Professor für Stahlbetonbau und Direktor des Instituts für Betonbau der HTWK Leipzig.



Neue Möglichkeiten bei der Bemessung von Carbonbeton-Verstärkungen



Bei der zeitgemäßen (Neu-)Gestaltung des Bauwesens zählen Digitalisierung und Nachhaltigkeit zu den zentralen Herausforderungen! Das neue Tool zur Bemessung von Carbonbeton-Verstärkungen widmet sich beiden Themenfeldern: Der nachhaltige Bauwerkserhalt mit dem ressourceneffizienten CARBOrefit®-Verfahren lässt sich jetzt auch softwaregestützt planen und bemessen.

In den letzten Jahren hat sich für den Erhalt von Stahlbetonbauwerken das Verstärken bzw. Instandsetzen mit Carbonbeton (CARBOrefit®) als effektive Variante bewiesen. Hierbei werden auf bestehende Betonstrukturen zur Wiederherstellung oder zur Erhöhung der Tragfähigkeit dünne Schichten Carbonbeton (i. d. R. reichen 10-15 mm Gesamtdicke im Hochbau aus) aufgetragen, wodurch bestehende Strukturen vor dem Abriss bewahrt werden können. Die Vielzahl an bereits durchgeführten Projekten – sowohl im Hoch- als auch im Infrastrukturbau – zeigt das Potential eindrucksvoll auf. In Deutschland ist das CARBOrefit®-Verfahren zum Verstärken mit Carbonbeton bauaufsichtlich zugelassen und anerkannt. Durch den Antragsteller (CARBOCON GMBH) wird die Zulassung kontinuierlich erweitert, um stetig weitere Anwendungsgebiete zu erschließen.

Für Planer:innen war die Bemessung des Verstärkungssystems in der Vergangenheit oftmals mit einem hohen Einarbeitungsaufwand verbunden, da Bemessungstabeln oder Software-Programme bis vor Kurzem noch nicht vorlagen. Gemeinsam mit der FRILLO Software GmbH wurde im Jahr 2022 das erste Bemessungsprogramm für Stahlbetonbauteile mit einer Carbonbetonverstärkung entwickelt und Ende 2022 veröffentlicht: Im Modul „B2 – Stahlbetonbemessung“ ist die Berechnung und Bemessung carbonbetonverstärkter Stahlbetonquerschnitte auf Grundlage der aktuellen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung /allgemeinen Bauartgenehmigung Z-31.10-182 möglich.

Bei der Anwendung des Softwaremoduls werden zunächst die für die Bemessung relevanten Eigenschaften des Bestandes abgefragt. Zudem kann zwischen den zugelassenen Gittertypen gewählt und eine Sonderausführung berücksichtigt werden. Auf Basis der hinterlegten Eigenschaften der CARBOrefit®-Verstärkung werden die relevanten Bemessungsergebnisse ermittelt und angezeigt: Die erforderliche Carbonbewehrung, die vorhandene Carbonbewehrung je Lage, die Anzahl der

Gitterlagen sowie der Ausnutzungsgrad. Zudem werden bei einer Schubbeanspruchung die Querkraftauslastung des Bestandsquerschnitts und der Nachweis der Fuge zwischen Alt- und Carbonbeton dargestellt. In der abschließenden Ausgabe ist die gesamte Bemessung von der Eingabe bis hin zu den Ergebnissen zusammengestellt. Zudem prüft das Modul B2, ob die in der Zulassung definierten Rahmenbedingungen eingehalten werden. Sollte dies nicht der Fall sein, kann das Bemessungstool dennoch verwendet werden: Basierend auf dem implementierten Know-How des CARBOrefit®-Konsortiums ist im Programm auch eine Bemessung außerhalb der Zulassung möglich. In diesem Fall ist für die Ausführung der Carbonbetonverstärkung eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE)/eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) erforderlich, welche allerdings in Anlehnung an die Zulassung recht zügig erfolgen kann. Die Ausgabe im Programm macht Abweichungen von der Zulassung deutlich sichtbar und begleitet durch entsprechende Hinweise und Empfehlungen.

Ein weiterer Schritt für den großflächigen Einsatz von Carbonbeton in der Verstärkung ist vollbracht – dank CARBOrefit® und FRILLO. Somit steht den Anwendern ein Tool zur Verfügung, mit welchem Carbonbeton-Verstärkungen sicher, schnell und wirtschaftlich bemessen werden können. Im Zuge des Vortrags wird die Bemessung mit Hilfe des Bemessungsprogramms nachvollziehbar gezeigt und weitere Entwicklungen zum Verstärken von Bauteilen mit Carbonbeton vorgestellt.

Prof. Dr.-Ing. **Alexander Schumann:** Bauingenieurstudium in Weimar und in Dresden. Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Forschungsgruppenleiter für „Carbonbeton Verstärkung“ am Institut für Massivbau der TU Dresden. Promotion im Bereich Carbonbeton. 2018-2019



Projektleiter und seit 2019 Technischer Geschäftsführer der CARBOCON GMBH: verantwortlich für Forschung & Entwicklung innovativer Produkte im Bauwesen sowie für die Planung, gutachterliche Betreuung und Umsetzung von Carbonbetonprojekten. Seit 2022 zusätzlich Professor an der Internationalen Hochschule in Dresden für das Duale Studium Bauingenieurwesen.

Probeinstandsetzung des Umlaufkanals der Schleuse Anderten mittels textilbewehrter Spritzbetonschichten



Im Rahmen der Probeinstandsetzung der Schleuse Anderten (die größte Schleuse am Mittellandkanal bei Hannover) wurde ein Teilbereich eines Umlaufkanals mittels textilbewehrter Spritzbetonschichten in Anlehnung an BAW-Merkblatt „Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX)“ [1] instandgesetzt.

Beim Schadensfall handelt es sich um eine geschädigte horizontale Arbeitsfuge im Gründungsbereich der über 90 Jahre alten Schleuse zwischen der Kammerwand und dem Umlaufkanal. In der Arbeitsfuge mit großer Aufweitung und großflächigen Abplatzungen sind an mehreren Stellen vertikale Betonstahlstäbe infolge einer kombinierten Einwirkung aus auslaugungsinduzierter Betonstahlkorrosion und wiederkehrender mechanischer Belastung durchtrennt. Die Ertüchtigung des Bauteilbereichs und die Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit sowie die Gewährleistung der langfristigen Nutzung des Bauwerks sollte durch die textilbewehrte Instandsetzungsschicht zusammen mit weiteren drei Instandsetzungsmaßnahmen erfolgen. Mit der Erprobung dieser vier Maßnahmen an einem Teilbereich der Schleuse sollte eine technische und fiskalische Planungssicherheit für die spätere Gesamtmaßnahme erlangt werden. [2]

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) hat das Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) mit der Ausarbeitung eines Instandsetzungskonzepts in Anlehnung an BAW-MITEX [1] sowie der Durchführung von entsprechenden Laborversuchen beauftragt.

Die gesamte Probeinstandsetzung am etwa 23 m langen Abschnitt des Umlaufkanals wurde im Zeitraum Oktober 2022 bis Juni 2023 durchgeführt. Die Applikation der 30 mm bis 50 mm dicken Instandsetzungsschicht wurde von der Firma TORKRET GmbH ausschließlich im Bereich des Umlaufkanals (Durchmesser 2,6 m) mit einem Neigungswinkel von mind. 45° zur Bodenfläche ausgeführt, um Spritzschatten bzw. Fehlstellenbildung zu vermeiden. Die Gesamtfläche wurde in 5 Teilbereiche (TB) aufgeteilt. Davon wurden ca. 4 m als Referenzfläche (TB2) unbewehrt und unverankert nach ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, ausgeführt. Die Randbereiche der einzelnen TBs sowie der Blockfuge wurden ausnahmslos verankert. Hierzu wurde ein Anker je m² gesetzt. Bei TB1, TB3, TB4 und TB5 wurde

eine flexible mineralische Dichtungsschlämme beidseitig der Arbeitsfuge in Form eines min. 10 cm breiten Streifens aufgetragen, was zu einer Gesamtbreite von min. 20 cm führt. Um die Wirksamkeit der Instandsetzungsmaßnahmen später bewerten zu können, wurde im Auftrag vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Mittellandkanal/Elbe-Seitenkanal (WSA MLK/ESK) ein Riss- und Korrosionsmonitoringsystem vom ibac konzipiert und installiert.

Dieser Beitrag zeigt die wesentlichen Schritte sowie die Überlegungen zu den Anforderungen an die Materialien des Instandsetzungskonzepts auf. Darüber hinaus werden die wichtigsten Ergebnisse von Laborversuchen an Bohrkernen aus dem Umlaufkanal und an im Labor hergestellten Verbundkörpern aus der Konzeptphase vorgestellt.

Quellen:

- [1] BAW-MITEX (2019): Merkblatt Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- [2] Rahimi, A.; M. Lutz: Begutachtung des Schadensfalls im östlichen Umlaufkanal der Westkammer der Schleuse Anderten, BAW-Nr. B3951.03.12.10470, Karlsruhe, 03.07.2020.

Dr.-Ing. **Cynthia Morales Cruz**, studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen University und promovierte zum Thema Rissverteilende Textilbeton Schutzschichten mit textiler Carbonbewehrung. Seit 2012 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffforschung der RWTH Aachen University (ibac) und leitet derzeit die Arbeitsgruppe Innovative Betontechnologie.



Dr.-Ing. **Amir Rahimi**, studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen University und promovierte zum Thema Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauwerken an der TU München. Seit 2011 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Referat Baustoffe der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW).



rCF-Rebar: der weltweit erste Bewehrungsstab aus recycelten Kohlenstofffasern



Angesichts wachsender Ressourcenknappheit, Klimaschutzbestrebungen sowie eines steigenden Innovationsdrucks gewinnen 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 aus Produktionsverschnitt oder End-of-Life-Bauteilen, im Zuge des Recyclings also auch 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. Dessen Vorstellung im Rahmen der 15. Carbon- und Textilbetontage stellt einen Meilenstein in der Entwicklung noch energie- sowie ressourceneffizienterer Baustoffsysteme dar. So ist es Bauunternehmern nunmehr möglich den CO₂-Fußabdruck von Bauwerken durch den Einsatz von Recycling-Carbonbewehrungen für Betonelemente noch weiter zu reduzieren.

Im Zuge der Optimierung von Kosten und Leistungsfähigkeit war es notwendig die komplette Prozesskette vom End-of-Life-Bauteil bis hin zum rCF-Rebar vollständig unternehmens- und projektintern aufzubauen. Neuartige Fertigungsprozesse, -abfolgen sowie auch -maschinen wurden dazu in jahrelanger Arbeit entwickelt, gebaut, erprobt und optimiert. Dazu gehören unter anderem komplexe textiltechnische Anlagen zur gezielten mehrstufigen Parallelisierung und Streckung der, durch den Recyclingprozess eingekürzten, Fasern innerhalb des Carbonrezyklates. Insbesondere der Grad der Faserparallelisierung konnte als wichtiger Einflussfaktor auf die Zugfestigkeit der Bewehrungssysteme identifiziert werden. Aber auch die Qualität der Ausgangsmaterialien, des Wertstoffes Carbon, und deren mechanische Vorbehandlung inklusive Zerkleinerung (Zusammenarbeit mit der TU Bergakademie Freiberg - Institut für Aufbereitungsmaschinen und Recyclingsystemtechnik) haben einen großen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte der Bewehrungsstäbe und bedürfen besonderer Aufmerksamkeit, auch mit

Bezug auf die Sicherstellung einer gleichbleibend hohen Qualität. Die Bewertung der Nachhaltigkeit der Bewehrungssysteme von Zeisberg Carbon erfolgt durch ein Life Cycle Assessment des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Systemleichtbau.

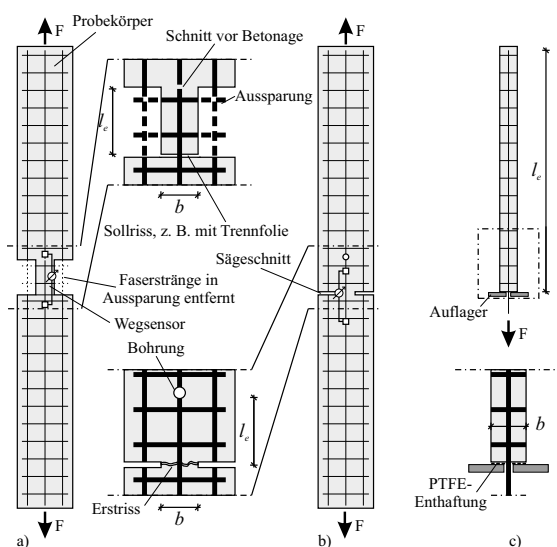
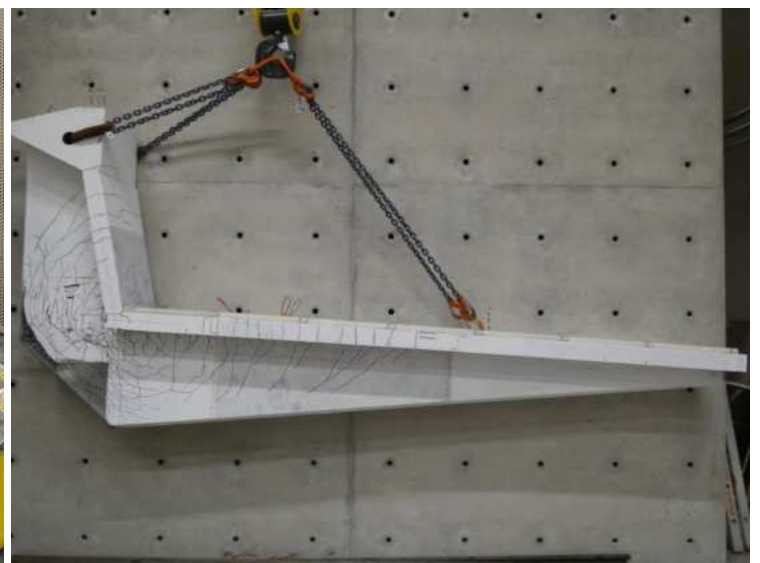
Zur Entwicklung des rCF-Rebar fanden parallel Auszugs-, Zug- und Einlagerungsversuche (Technische Universität Dresden - Institut für Massivbau) statt, um die Herstellungsprozesse und auch die Stabgeometrie zu optimieren. Die so stattfindende stetige Weiterentwicklung des rCF-Rebar soll kurzfristig zu einer kommerziell sinnvollen Einsatzfähigkeit der Bewehrung in Betonbauteilen führen. Dabei werden insbesondere alle solche Einsatzzwecke fokussiert, bei welchen Stäbe (und Matten) als schlaaffe Bewehrung zum Einsatz kommen, wie etwa bei Fassadenplatten, Bodenplatten, Fundamenten und Fertigteilen jeglicher Art, inklusive solcher für die Ortbetonbauweise (Doppelwände usw.).

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 und immer noch anhaltende Optimierung dieser Systeme stellt dabei sicher, dass der Einsatz für immer mehr Anwendungsbereiche ermöglicht wird. Umweltschonende Technologien respektive Produkte können nur dann hinreichend Ressourcen und Energie einsparen, wenn sie flächendeckend im Bauwesen angewandt werden können und dabei wirtschaftlich sind.

Dipl.-Ing. **Marcel Zeisberg** studierte Maschinenbau an der Westsächsischen Hochschule Zwickau, an der Leibniz Universität Hannover (LUH) sowie der TU Bergakademie Freiberg. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter am LUH-Institut für Statik und Dynamik beschäftigte er sich mit Nano-Kompositen und dem Ermüdungsverhalten von Faserverbunden. Anschließend entwickelte er bei der Volkswagen AG Konzernforschung sowie dem Motorsport strukturelle Carbonbauteile, Fahrzeugkonzepte und Sicherheitssysteme für Rennfahrzeuge. Seit 2018 ist er Geschäftsführer der Zeisberg Carbon GmbH.



Richtlinie Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung - auf der Zielgeraden



Anwendungen des Richtliniententwurfes für Brücken in Kreuzau und Stuttgart und neue Prüfverfahren für Gitter · Fotos und Grafik: Jan Bielak und Institut für Massivbau der RWTH Aachen.

Nach Sammlung und Beratung der Einsprüche zum Gelbdruck der Richtlinie "Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung" des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) im ersten Halbjahr 2023 ist der Entwurf nunmehr auf der Zielgeraden. Der Weißdruckentwurf der Richtlinie wurde an die technischen Ausschüsse verteilt und weitere Kommentare beraten und beantwortet. Umfangreiche Erläuterungen und Hintergründe zur Richtlinie sollen im DAfStb-Heft 660 veröffentlicht werden.

In den fünf Teilen der Richtlinie werden die Bemessung, die Bewehrung, Prüfverfahren und Regeln zur Ausführung sowie Nachweise zur Verwendbarkeit der Bewehrungen behandelt. Die dort dokumentierten Regeln sind das Ergebnis von Forschungsarbeiten und Praxiserfahrungen und bilden den Stand des Wissens in Deutschland in diesem Bereich sehr gut ab. Anhand der intensiven Diskussionen im Rahmen des Gelbdruckverfahrens zeigt sich aber, dass an vielen Stellen zukünftig noch Raum für Optimierung besteht und nun als Konsens verabschiedeten Regeln bisweilen – insbesondere mit dem Blick auf eine rasche und vollumfängliche bauaufsichtliche Einführung – konservativ gewählt wurden, da ausreichende experimentelle Untersuchungen zur Validierung progressiverer Regeln für die ganze Bandbreite an Bewehrungsmaterialien noch ausstehen. Als Beispiele seien genannt:

- pauschale Abminderung der Betondruckstrebentragfähigkeit bei Querkraft- und Stabwerknottennachweisen
- Fixierung des Druckstrebenneigungswinkels bei Querkraftnachweisen auf $\cot \theta = 0,8$
- Abminderung der Zugfestigkeit der Bewehrung zur Berücksichtigung des Effekts der Parallelschaltung von mehreren linear-elastisch versagenden Bewehrungselementen
- Begrenzung des Längsabstandes von Querkraftbewehrungselementen unabhängig von der Druckfestigkeit

Mit diesem Regelwerk wird das Bauen mit nichtmetallischen Bewehrungen in Stab- oder Gitterform in Deutschland erheblich erleichtert und der Anschluss an international bereits seit Jahren vorhandenen Normen (z. B. in den USA, Kanada, Japan, Italien) gesucht. Mit einem Umfang von über 200 Seiten geht die Richtlinie dabei hinsichtlich des Detailgrads und der Regelungstiefe bisweilen über international Übliches hinaus. Wenn im Sinne der Richtlinie zugelassene Bewehrungen vorliegen, und die Richtlinie final bauaufsichtlich eingeführt

ist, kann im Hochbau auf Zustimmungen im Einzelfall und vorhabenbezogene Bauartgenehmigungen für viele Anwendungen verzichtet werden. Viele Regelungen und Prüfverfahren sind aber außerhalb des aktuellen Anwendungsbereiches z. B. für den Brückenbau übertragbar, der noch nicht durch die Richtlinie in der aktuellen Fassung abgedeckt wird. Mit Fertigstellung der Richtlinie endet die Arbeit des Unterausschusses Nichtmetallische Bewehrung nicht: Es wurden bereits die Arbeiten an der zweiten Fassung der Richtlinie begonnen, mit der weitergehende Erkenntnisse, z. B. zur zyklischen Belastung, zur Vorspannung, zur Ansetzbarkeit von Gitterbewehrung für die Querkrafttragfähigkeit, und die Nutzung von Querkraftbewehrung für Bauteile kleiner 200 mm Bauteilhöhe berücksichtigt werden sollen. Vor allem aber soll die Anpassung auf die Regelungen und Nachweiskonzepte des neuen Eurocode 2 vorbereitet werden, um passend zur Einführung dieses Regelwerks in Deutschland die entsprechende Erweiterung auf nichtmetallische Bewehrung anbieten zu können.

Dr.-Ing. **Jan Bielak** studierte und promovierte an der RWTH Aachen im Bereich Nichtmetallische Bewehrung. Seit Ende 2021 ist er Oberingenieur am Institut für Massivbau der RWTH und Mitglied im DAfStb-Ausschuss „Nichtmetallische Bewehrungen“.



Dr.-Ing. **Norbert Will** ist langjähriger Oberingenieur am Institut für Massivbau der RWTH Aachen. Seit 2018 ist er Obmann des DAfStb-Ausschuss „Nichtmetallische Bewehrungen“.



Dipl.-Ing. **Anett Ignatidis** studierte Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar und war von 2003 bis 2011 in Planungsbüros im konstruktiven Ingenieurbau tätig. Seit 2012 ist sie in der Geschäftsstelle des DAfStb e. V. tätig.



Surfwelle in Augsburg - 100 % Recyclingbeton mit Carbonbewehrung



Augsburg ist eine Großstadt im südwestlichen Bayern, die 2019 zum UNESCO-Weltkulturerbe ernannt wurde. Ein Grund dafür ist das dortige historische Wassersystem. Die Stadt ist reich an Brunnen, Wasserquellen, Kanälen sowie Gewässern und wird daher oft als „Wasserstadt“ bezeichnet. Diese Randbedingungen bieten viele Wassersportmöglichkeiten und haben in den letzten Jahren olympische Gewinner in der Disziplin Kanufahren hervorgebracht. Seit diesem Jahr hat Augsburg eine weitere Wassersportattraktion, die „Surfwelle“.

Die künstlich angelegte Surfanlage befindet sich im Stadtzentrum von Augsburg am Senkelbach, ein Abschnitt des Wertachkanals. Durch eine Einengung der vorhandenen Sohlschwelle entsteht ein acht Meter breites Wellenparadies, welches nicht nur zum Surfen geeignet ist. Initiiert wurde die Surfwelle von wassersportbegeisterten Augsburgern Surfreunden, die darauf geachtet haben, dass die Welle vollkommen ohne Energieverbrauch funktioniert, also klimaneutral und unabhängig von der Energieversorgung. Des Weiteren war es wichtig, dass das Bauwerk nachhaltig und klimafreundlich hergestellt wurde. Aus diesem Grund wurde ein Forschungsprojekt mit der Technischen Hochschule Augsburg gestartet.

Für das ambitionierte Ziel war es notwendig, von der herkömmlichen Stahlbetonbauweise abzuweichen. Hierfür wurden zwei maßgebende Änderungen verfolgt. Zum einen wurde die Stahlbewehrung durch ein Carbongelege der Augsburger Firma Hitexbau ersetzt, und zum anderen wurde die Gesteinskörnung durch 100 % Recyclingmaterial substituiert.

Ein maßgebender Vorteil neben der hohen Zugfestigkeit der Carbonbewehrung ist die Korrosionsbeständigkeit. Besonders bei Bauteilen, die dauerhaft mit Wasser in Kontakt sind, ist es sinnvoll auf Stahlbewehrungselemente zu verzichten, um die Langlebigkeit zu erhöhen. Durch den Einsatz der Carbonbewehrung konnten die Bauteilstärken um mehr als 50 % reduziert werden, da keine Betondeckung für den Schutz der Bewehrung benötigt wurde. Die neuen Wandstärken liegen zwischen 10 cm und 12 cm. In Kombination mit der recycelten Gesteinskörnung konnten so wertvolle Primärressourcen und herstellungsbedingte CO₂-Emissionen eingespart werden.

Eine weitere Besonderheit war die Planung der Surfwelle. Insgesamt acht Fertigteile, die im ortsnahen Werk der Firma Lauter Beton hergestellt

wurden, konnten von Studierenden der Hochschule auf Grundlage der Richtlinie für die Bemessung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Demuth und Schön bemessen werden. Das belegt, dass die Richtlinie verständlich sowie anwendbar ist und bereits bei Planungen von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung zum Einsatz kommt.

Bei der Herstellung der Fertigteile kam ein weiterer Vorteil der Carbonbewehrung zum Einsatz: die Flexibilität. Aufgrund der gekrümmten Wellenform war es nicht möglich steife Bewehrungsmatten einzusetzen. Das flexible Gelege konnte den Kurven der Schalung angepasst werden. Bei besonders „scharfen“ Umlenkungen wurden die Eigenschaften der thermoplastischen Beschichtung vorteilhaft eingesetzt. So konnte vor Ort die Bewehrung durch die Zugabe von Wärme verformt werden. Dies ermöglichte einen sehr genauen Einbau der Bewehrung, der bei filigranen Bauteilen benötigt wird, um nicht zu stark von der statischen Nutzhöhe abzuweichen.

Die Surfwelle ist in Augsburg ein wegweisendes Anwendungsbeispiel von Carbonbeton mit höchster Klima- und Ressourcenschonung. Die nichtmetallische Bewehrung in Kombination mit Recyclingbeton bietet viel Potential für weitere Bauprojekte und kann dabei helfen, klimaschädliche Emissionen zu reduzieren und wertvolle Ressourcen einzusparen.

Prof. Dr.-Ing. **Sergej Rempel**

studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Anschließend war er ab 2011 im Ingenieurbüro HS&P in Köln als Tragwerksplaner tätig. 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.

Untersuchung der Spannkrafteinleitung von CFK-Bewehrungen in Beton



Oben: Pull-Out-Versuch · Foto: TU Berlin; unten: gerissener Prüfkörper eines Spannkrafteinleitungsversuchs
Foto: Hentschke Bau GmbH

Das Forschungsvorhaben C3 V-4.18 „Mit Carbon im sofortigen Verbund vorgespannte (Halb-) Fertigteile“ befasste sich mit den Grundlagen für die Entwicklung der Vorspannung von Carbonbetonbauteilen im sofortigen Verbund. Durch die Kombination von Fertigteilen und Vorspannung können werkstoffgerechte Tragwerke aus Carbonbeton geschaffen werden, die es ermöglichen, die hohe Zugfestigkeit der Carbonfaser voll auszunutzen und damit die Querschnittshöhen zu reduzieren. Für die Bemessung solcher Tragwerke ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die Vorspannung der CFK-Spannglieder ohne Rissbildung in den Beton eingeleitet werden kann. Um diese Forschungslücke zu schließen, wurden Verbundversuche nach den DIBt-Richtlinien durchgeführt.

In einem ersten Versuchsprogramm wurden Pull-Out-Versuche zur Ermittlung der Verbundspannungen durchgeführt. Der zweite Teil des Versuchsprogramms bestand aus Spannkrafteinleitungsversuchen, mit denen nachgewiesen wird, dass die Spanngliedkraft ohne Rissbildung eingeleitet werden kann und gleichzeitig die Übertragungslänge aus den Betonstauchungen bestimmt wird. Um den Einfluss verschiedener Parameter auf das Verbundverhalten zu untersuchen, wurden Spannkrafteinleitungsversuche an CFK-Litzen und -Lamellen durchgeführt, bei denen die einzelnen Parameter getrennt variiert wurden. Dabei wurden erstmals verteilte faseroptische Sensoren (Distributed Fiber Optic Sensors, DFOS) bei Spannkrafteinleitungsversuchen eingesetzt, die eine ca. 75-fach kürzere Einzelmesslänge als die üblichen Messtechniken aufweisen und somit durch die Aneinanderreihung von Messpunkten eine nahezu kontinuierliche örtliche und zeitliche Messung ermöglichen.

Es gibt in Deutschland noch keine Richtlinien für vorgespannte Carbonbetonbauteile. Daher wurden die Parameter für die erste Versuchsreihe unter Berücksichtigung von Empfehlungswerten, internationalen Normen und Erfahrungswerten festgelegt. Daraus ergab sich für die Ausgangskombination ein Vordehngrad von 60 % der mittleren Zugfestigkeit der Bewehrung. Aufgrund der Spaltzugrisse in der ersten Versuchsreihe wurden die Parameter für weitere Versuche festgelegt, um den Einfluss einer höheren Betondeckung und einer geringeren Vorspannung auf die Spannkrafteinleitung getrennt zu untersuchen. Für die Lamellen wurden zusätzlich zwei unter-

schiedliche Oberflächen geprüft. Für alle Versuchskombinationen wurde die gleiche Betonrezeptur gewählt. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Für gerissene Prüfkörper konnte aus dem DFOS-Zeitverlauf der Betonstauchungen in den gerissenen Bereichen die maximale Vorspannkraft abgeleitet werden, die eine rissfreie Einleitung der Vorspannkraft gewährleistet.
- Eine Erhöhung der Betondeckung allein konnte die Rissbildung im Spannkrafteinleitungs-bereich nicht verhindern, führte aber zu einer höheren Vorspannkraft, die vor dem Auftreten von Rissen in den Beton eingeleitet werden konnte.
- Eine Reduzierung der Vorspannung ermöglichte bei den CFK-Litzen eine rissfreie Spannkrafteinleitung.
- Bei den rauen Lamellen konnte bei jedem Versuch eine Rissbildung festgestellt werden. Die glatten Lamellen wiesen dagegen keine Risse auf, aber ca. doppelt so große Übertragungslängen wie CFK-Litzen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei normalfesten Betonen die Vorspannung eine entscheidende Rolle für das Verbundverhalten spielt. Die bisherigen Empfehlungen zur rissefreien Spannkrafteinleitung sind für normalfeste Betone nicht anwendbar. Der Einfluss der Betonfestigkeit muss experimentell untersucht werden und es sollten neue Empfehlungswerte zur Gewährleistung einer rissefreien Spannkrafteinleitung für Carbonbetonbauteile definiert werden.

María Serrano Mesa, M. Sc.

studierte Bauingenieurwesen an der Universität von Granada (Spanien) mit einem einjährigen Auslandsaufenthalt an der RWTH Aachen. Ihr Masterstudium absolvierte sie an der TU Berlin. Seit 2019 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet „Entwerfen und Konstruieren - Massivbau“ an der TU Berlin und forscht im Bereich Carbonbeton. Sie beschäftigt sich mit der Bemessung und Vorspannung von textilbewehrten Betonbauteilen und promoviert über das Verbundverhalten von vorgespannten CFK-Bewehrungen im Beton.



Untersuchung von Carbonstäben aus rezyklierten Carbonfasern



Die Wiederverwendung von Carbonfasern erlangt angesichts steigender Ressourcenknappheit und Klimaschutzbestrebungen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die ganzheitliche Betrachtung von geschlossenen Stoffkreisläufen gewinnt im Bauwesen an Stellenwert. Durch das Aufbereiten und In-Form-Bringen von Carbonfasern zu Halbwerkzeugen wird der noch offene Kreislauf geschlossen. Aufgrund von unterschiedlichen technologischen Hürden unterliegt die konstante Herstellung von Stäben aus recycelten Carbonfasern bei gleichbleibender Qualität noch großen Streuungen. Ziel der Forschung ist die Untersuchung, Charakterisierung und Optimierung von Carbonstäben aus rezyklierten Fasern hin zu gleichwertiger Zug- und Verbundfestigkeit im Vergleich zu Halbzeugen aus neuwertigen Carbonfasern.

Für eine erste Aussage zum Verbundverhalten der Carbonstäbe (von Zeisberg Carbon GmbH) aus rezyklierten Carbonfasern (rCF) wurde ein 600 mm langer Carbonstab mit einer Verbundlänge von 50 mm in einem Betonwürfel einbetoniert. Der gesamte Versuchsaufbau bzw. die Versuchsdurchführung erfolgte auf Basis der RILEM RC6 Pull-out test Richtlinie. Mittels Wegaufnehmern und Kraftmessung erfolgte die Aufnahme der Messdaten. Bei allen durchgeführten Versuchen erfolgte ein Versagen des Stabes bevor ein Auszug erkennbar war. Nach dem Aufspalten des Betonwürfels konnten keine Indizien für einen beginnenden Schlupf gefunden werden. Der Verbund des Stabes zum Beton war aufgrund der hohen Festigkeit des Betons und der Stabgeometrie sehr gut. Ein Abscheren des Betons im Bereich des Verbunds konnte jedoch infolge der noch zu geringen Zugfestigkeit des Carbonstabes aus rCF nicht stattfinden. Weitere Versuche mit einem minderfesteren Beton sind in Planung.

Zur Bestimmung der Zugfestigkeiten der Carbonstäbe sind die Stäbe nach der vom DAfStb im Gelbdruck befindlichen Richtlinie für nichtmetallische Bewehrungen untersucht worden. Dazu wurden die 1200 mm langen Probekörper in einem Standardzugversuch bis zum Versagen belastet. Die Zugfestigkeit eines Stabprototyps liegt im Vergleich zu Carbonstäben aus neuen Carbonfasern (vCF) noch bei einem 10 %. Diese geringe Zugfestigkeit bildet die Referenz für alle weiteren Untersuchungen bzw. Entwicklungen der Stäbe aus rCF. Zum Erreichen einer höheren Festigkeit werden die geometrischen Abmessungen der Stäbe als auch der strukturelle Aufbau des Halbwerkzeugs weiterhin angepasst und entwickelt. Das Optimierungspotential für eine

höhere Zugfestigkeit liegt vor allem in der Erhöhung des Faservolumenanteils und in der besseren Ausrichtung der Einzelfasern.

Eine geradlinige Faserorientierung entlang der Stabachse ist der essentielle Kennwert zur Erhöhung der Festigkeiten. Um hierüber eine Aussage treffen zu können, wurde der Stab mittels Computertomographie (CT) und mikroskopisch untersucht. Eine weitere Untersuchung war das Ermitteln von Fehlstellen im Stab. Mittels Mikroskops konnten eventuell auftretende Fehlstellen wie Harznester, Lufteinschlüsse und Fremdkörper optisch ermittelt werden. Um eine erste Aussage über die Dauerhaftigkeit der Stabmatrix treffen zu können, lagerten Abschnitte eines Stabes über mehrere Wochen in einer basischen Lösung. Ziel der Untersuchungen war die regelmäßige Kontrolle der Staboberfläche auf Ablösungen bzw. Vergrößerung bereits vorhandener Schadstellen. Eine chemische Schädigung des Stabes konnte nach 3 Monaten nicht festgestellt werden.

Durch eine kontinuierliche Untersuchung und darauf aufbauender Optimierung der Carbonstäbe aus rCF können die Eigenschaften, vor allem die Zugfestigkeit, erhöht werden. Aufgrund der vielfältigen Versuche kann eine erste Charakterisierung der Carbonstäbe aus rezyklierten Carbonfasern erstellt werden.

Enrico Baumgärtel studierte von 2013 bis 2019 an der Technischen Universität Dresden und von 2017 bis 2018 an der Universität Politècnica de Catalunya in Barcelona Bauingenieurwesen. Seit Dezember 2019 ist Enrico Baumgärtel als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TU Dresden angestellt. Als Wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftigt er sich insbesondere im Forschungsbereich Carbonbeton und weiterer nichtmetallischer Bewehrungen sowie mit dem Recycling von Carbon und die Wiederverwendung von Carbonfasern in Halbwerkzeugen.



Variables Brückenmodul aus Carbonbeton in Fertigteilbauweise



Der Bedarf an dauerhaften Brücken mit kleinen bis mittleren Spannweiten steigt in den letzten Jahren zunehmend an. Beton hat sich als Basiswerkstoff für den Brückenbau seit vielen Jahren etabliert. Dabei zeichnen sich werksmäßig hergestellte Stahlbetonfertigteilterbrücken durch kurze Bauzeiten und variable Gestaltung aus, sind aber aufgrund des hohen Eigengewichts nur bei kleinen Spannweiten üblich. Zur Erzielung einer hohen Dauerhaftigkeit bei gleichzeitig geringem Ressourceneinsatz ist die Substitution der Stahlbewehrung durch korrosionsfreie Bewehrungssysteme auf Basis von Carbonfasern im Beton von Vorteil, womit eine drastische Reduktion des Gewichts durch Minimierung der Betondeckung erzielt werden kann.

In Kooperation mit der Hans Graf Bauunternehmung, dem Ingenieurbüro Schulze&Rank und der TU Chemnitz wurde das stahlfrei bewehrte variable Brückenmodul "VariBridge" für Spannweiten bis 15 m in leichtbaugerechter Carbonbeton-Fertigteilterbauweise entwickelt, technisch-technologisch umgesetzt und aktuell an zwei Referenzbauwerken in Wesseling bei Köln getestet.

Die dünnwandige Plattenbalkenkonstruktion besteht aus gefügedichtem Hochleistungsbeton und stahlfreiem Bewehrungssystem aus Primär- und Sekundärbewehrung. Basierend auf den Ergebnissen der statischen Vorbemessung wurden als Primärbewehrung vorkonfektionierte Carbon(CFK)-Gitter der solidian GmbH mit einer Bewehrungsquerschnittsfläche von 95 mm²/m in Längs- und Querrichtung und einer Gitteröffnung von 38 x 38 mm² in Kombination mit speziell angefertigten Bügeln (Querkraftbewehrung) aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) der thoenes Dichtungstechnik GmbH mit Durchmesser 8 mm sowie GFK-Stäbe der Schöck Bauteile GmbH mit Durchmesser 12 mm verwendet. Als Sekundärbewehrung kamen CFK-Lamellen mit Verzahnung als Zugzonenverstärkung zum Einsatz. Dabei wurde eine zum Patent angemeldete CFK-Winkellamelle zur Kraftübertragung Beton->Lamelle entwickelt und über die gesamte Bauteillänge geometrisch optimiert. Die resultierende doppelte Winkellamelle mit vertikalem Hakenprofil und vollflächig verbundener, horizontaler Zuglamelle wird während der Herstellung formschlüssig in den Beton integriert. Somit entfällt die aufwendige Fixierung klassischer CFK-Lamellenbänder, die mit speziellen Spanneinrichtungen und Verklebungen einhergeht. Neben den Materialuntersuchungen (Beton, Bewehrung, Verbund) wurde das kombinierte Tragverhalten - Verformungen des Trägers in Abhängigkeit der Belastung - am realen Verbundträger charakterisiert, um eine versuchsgestützte Bemessung nach FEM durch-

zuführen. Zur Überführung in die Praxis wurden zwei VariBridge-Brücken in Wesseling errichtet. Die Fertigung der Brückenfertigteile erfolgte bei der Hans Graf Bauunternehmung in Wesseling. Hierzu wurde eine modulare Schalung entwickelt, die eine Herstellung von variablen Spannweiten und -breiten gestattet. Im Rahmen der Fertigung ist zunächst das stahlfreie Bewehrungssystem assembliert und anschließend in die modulare Schalung mit den Abstandshaltern FriPOX der HPF GmbH & Co. KG integriert worden. Darüber hinaus wurde eine flexible Matrice in die Schalung eingelegt, die eine Rutschhemmungsklasse R11 ohne nachträgliche Beschichtungen abbildet. Im Anschluss daran erfolgte die Betonage mit selbstverdichtendem Beton. Die Entschalung erfolgte drei Tage nach der Betonage. Darauf folgend wurden die Geländer am Carbonbetonfertigteilter befestigt. Aufgrund der vollständigen Vorfertigung können die Brückenmodule ohne weitere Baumaßnahmen vor Ort direkt eingesetzt und zur Nutzung freigegeben werden.

Zusammenfassend gestattet "VariBridge" durch Kombination des neuen, carbonbasierten Bewehrungssystems und der speziell entwickelten Betonrezeptur eine wesentliche Reduktion der Bauteildicke bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer auf ca. 100 Jahre. Somit können filigrane Bauweisen bei Brücken ressourceneffizient umgesetzt werden.

Dipl.-Ing. Volker Salentin

absolvierte von 1998-2003 das Studium Bauingenieurwesen an der FH-Aachen. Seit 2003 ist er bei der Hans Graf Bauunternehmung als Bau- und Projektleiter beschäftigt. 2017 erhielt er Procura, seit April 2021 ist er Geschäftsführer.

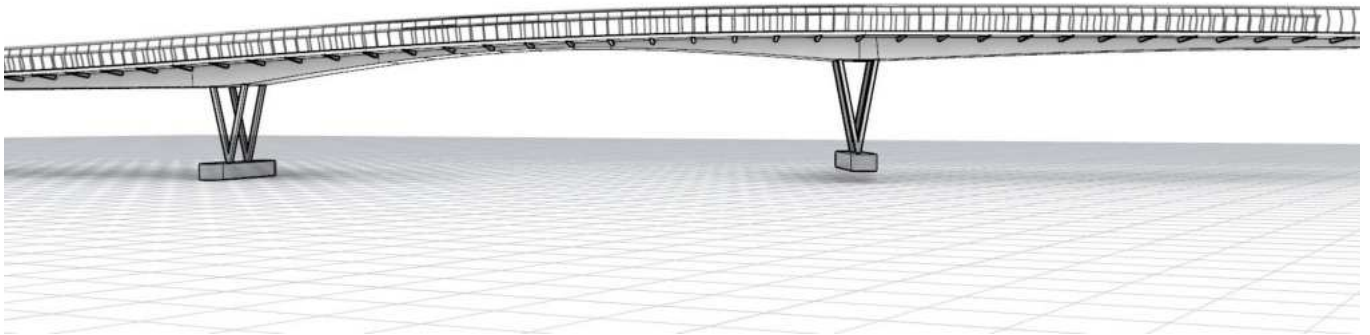


Prof. Dr.-Ing. habil. Sandra Gelbrich

studierte von 1995 bis 2001 an der Bauhaus-Universität Weimar. Von 2002 bis 2007 arbeitete sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der TU Chemnitz, im Jahr 2008 folgte die Promotion. Seit 2009 ist sie Leiterin des Forschungsbereichs Leichtbau im Bauwesen an der TU Chemnitz. 2012 gründete sie das Steinbeis-Innovationszentrum FiberCrete. 2016 folgte die Habilitation und 2020 schließlich die Ernennung zur Professorin.



Werkstoffgerechtigkeit und Nachhaltigkeit von Brücken aus (vorgespanntem) Carbonbeton



Die umweltorientierte Umstrukturierung der Wirtschaft ist in vollem Gange. Nicht mehr der Preis allein, sondern ebenfalls Aspekte der Nachhaltigkeit entscheiden zunehmend über den Wert eines Produktes. Das macht den Weg frei für neue zukunftsweisende Technologien. Carbon(spann)beton könnte daher in naher Zukunft - ähnlich wie die E-Mobilität in der Automobilbranche - zur bestimmenden Bauweise im Brückenbau avancieren. Das wird jedoch nur möglich, wenn der neue Werkstoff seinem Wesen nach gerecht eingesetzt wird und so sein volles Potential entfalten kann.

Aber was genau ist Werkstoffgerechtigkeit? Eine Konstruktion ist dann ganzheitlich werkstoffgerecht, wenn erstens die richtigen Werkstoffe an den richtigen Stellen verwendet werden, sie zweitens konstruktiv richtig durchgebildet ist und drittens für die gesamte Konstruktion ein optimales Kosten-Nutzen-Verhältnis erreicht wird. Ganzheitliche Werkstoffgerechtigkeit führt automatisch zu hoher Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit.

In den letzten beiden Jahrhunderten waren der Stahlbau und der Stahl(spann)betonbau bestimmend im Brückenbau. Sie wurden es, weil entwerfende Ingenieur:innen mit der Zeit Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien entwickelten, die dem Wesen der neuen Werkstoffe entsprachen. Zunächst wurden die herkömmlichen Bauweisen imitiert. So sahen Eisenbetonbrücken anfangs wie Steinbrücken aus. Vom Bau der weltweit ersten Eisenbetonbrücke im Jahr 1875 bis zur ersten ganzheitlich werkstoffgerechten Eisenbetonbrücke, der Vorderrheinbrücke bei Tavanassa (Schweiz, 1905), vergingen 30 Jahre.

Die weltweit erste Brücke aus Carbon(spann)beton wurde im Jahr 1988 in Japan erbaut. Die Shinmiya Bridge besteht aus mit Carbon vorgespannten Fertigteilen, wie man sie aus dem Spannbetonbau kennt. Nach bekanntem Prinzip wurde also erst einmal ein herkömmliches Konstruktionsprinzip übernommen. Bis heute sind nunmehr 35 Jahre vergangen und die Carbon(spann)betonbauweise sollte sich im Sinne der Werkstoffgerechtigkeit weiterentwickelt haben. Oder etwa nicht?

Um das zu beantworten, muss zunächst definiert werden, was ganzheitliche Werkstoffgerechtigkeit bei Brücken aus Carbon(spann)beton bedeutet. Carbonbeton, ob vorgespannt oder nicht, befähigt zu dünnwandigem und leichtem Bauen wie der Stahlbau und er ist so frei formbar und organisch wie der Stahlbeton als gegossener Stein. Er vereint somit die Vorzüge der beiden herkömmlichen Bauweisen.

Carbon ist zugfester als Stahl, jedoch auch dehnweicher. Folglich ist die Festigkeit der Carbonbewehrung in schlaff bewehrten Carbonbetonbrücken meist nicht ausgelastet, weil Gebrauchstauglichkeitskriterien (Risse, Verformungen) maßgebend werden. Die Lösung ist die Vorspannung, mit der sich die Festigkeit des Carbons besser nutzen lässt.

Carbon ist (immer noch) teuer. Daher sollte es nur dort eingesetzt werden, wo es aufgrund seiner besonderen Eigenschaften den größten Mehrwert bringt. Andere Tragwerksteile können aus herkömmlichen Werkstoffen konzipiert werden. So entstehen effiziente und wirtschaftliche Mischbauweisen.

Es lassen sich demnach vier Prinzipien der Werkstoffgerechtigkeit ableiten: Dünnwandigkeit, freie Formbarkeit, Vorspannung und Werkstoffkombination. Werden diese Prinzipien genutzt, entstehen energie- und ressourcenarme Carbon(spann)betonbrücken, die zudem noch überaus wartungsarm und dauerhaft sind.

Die weltweit erste dem Autor bekannte Brücke mit eigenständiger Konstruktions- und Formsprache ist die Textilbetonbrücke in Oschatz aus dem Jahr 2006 - allerdings noch mit AR-Glasbewehrung und Stahlvorspannung. Trotzdem zeigte die Brücke in Oschatz bereits die Richtung an, in die es gehen muss. Seitdem gibt es allerdings keine wirkliche Innovation im Sinne der Werkstoffgerechtigkeit. Die Entwicklung ist also noch lange nicht am Ende. Entwerfende Ingenieur:innen sollten weiterhin den Mut haben, ihre Ideen umzusetzen.

Dr.-Ing. **Andreas Apitz** studierte von 2006 bis 2012 an der Technischen Universität Dresden Bauingenieurwesen. Anschließend forschte er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an dem Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau der Technischen Universität Berlin zu dem Thema werkstoffgerechtes Entwerfen und Bemessen von Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton. Er wurde 2020 promoviert. Seit 2019 arbeitet er in Schwerin als Projektingenieur bei der Brückenköpfe GmbH, Ingenieurbüro für Brücken- und Ingenieurbau, Tragwerksplanung und Straßenbau.





ZEISBERG

NACHHALTIGE HIGHTECH-WERKSTOFFE
FÜR DIE BAUINDUSTRIE



RCF-REBAR

The Original.

**World's first concrete rebar
from recycled carbon fibres.**

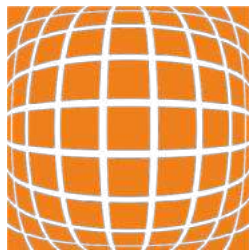
www.zeisberg-carbon.com

www.rcf-rebar.com

Wir danken den Sponsoren der
15. Carbon- und Textilbetontage
für die Unterstützung



HOLCIM



solidian



ZEISBERG

Übersicht der > C³Partner

- i [aerogel-it GmbH](#)
Albert-Einstein-Straße 1, 49076 Osnabrück
- i [AIB GmbH](#)
Liselotte-Herrmann-Straße 4, 02625 Bautzen
- i [ALHO Systembau GmbH](#)
Hammer 1, 51598 Friesenhagen
- i [Assmann Beraten + Planen AG](#)
Reichenbachstraße 55, 01069 Dresden
- i [Augel GmbH](#)
Windkaulweg 1, 56745 Weibern
- i [BARG Betontechnik u. -instandsetzungs GmbH & Co. KG](#)
Walther-Huth-Straße 2, 12487 Berlin
- i [basis d GmbH](#)
Wehlener Str. 31, 01279 Dresden
- i [Bauschutz GmbH & Co. KG](#)
Neckarstraße 2, 71679 Asperg
- i [Bautenschutz Müller GmbH](#)
An der Jägerbäk 2, 18069 Rostock
- i [BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH](#)
Hammerweg 25, 01127 Dresden
- i [Betonwerk Oschatz GmbH](#)
Mühlberger Straße 17–19, 04758 Oschatz
- i [BoB Planung und Management GmbH](#)
Flohrstraße 21, 13507 Berlin
- i [Bundesanstalt für Wasserbau – Referat Baustoffe](#)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
- i [CARBOCON GmbH](#)
Mohorner Straße 13, 01067 Dresden
- i [CARBON 360 GmbH](#)
Karl-Heine-Straße 99, 04229 Leipzig
- i [cbing – Curbach Bösche Ingenieurpartner](#)
Bergstraße 21a, 01069 Dresden
- i [CHT Germany GmbH](#)
Postfach 1280, 72002 Tübingen
- i [Clement Germany GmbH](#)
Grubenstraße 48, 18055 Rostock
- i [DBF Deutsche Basalt Faser GmbH](#)
Carl-Rabe-Straße 11, 06526 Sangerhausen
- i [Dennert Massivhaus GmbH](#)
Veit-Dennert-Straße 7, 96132 Schlüsselfeld
- i [Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. \(DAfStb\)](#)
Budapester Straße 31, 10787 Berlin
- i [Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.](#)
Kurfürstenstraße 129, 10785 Berlin
- i [Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie](#)
Pfaffenwaldring 38–40, 70569 Stuttgart
- i [Dipl. Ing. H. Bendl Hoch- und Tiefbau GmbH & Co. KG Sebnitz](#)
Schulgasse 6, 01848 Hohnstein/OT Ulbersdorf
- i [Dlubal Software GmbH](#)
Am Zellweg 2, 93464 Tiefenbach
- i [Dreßler Bau GmbH](#)
Gabriel-Dreßler-Straße 7, 63741 Aschaffenburg
- i [ESKA Maschinentechnik](#)
Friedrich-Adolf-Richter-Straße 7-9, 07407 Rudolstadt

- i Eurovia Infrastructure GmbH | NL
Bauwerkstandsetzung
Hessenstraße 23, 65719 Hofheim
- i F+S Förster + Sennewald Ingenieurgesellschaft
mbH
Paul-Gerhardt-Allee 52, 81245 München
- i Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e. V.
(FDB)
Postfach 21 02 67, 53157 Bonn
- i filmaton
Lampestraße 6, 04107 Leipzig
- i FloorBridge International GmbH
Gewerbepark 21, 4101 Feldkirchen an der Donau (A)
- i Fraunhofer-Zentrum für Internationales
Management und Wissensökonomie | Gruppe
Geschäftsmodelle: Engineering und Innovation
Städtisches Kaufhaus, Neumarkt 9-19, 04109 Leipzig
- i GINKGO Projektentwicklung GmbH
An der Pikardie 6, 01277 Dresden
- i Goldbeck Ost GmbH
Zum Bahndamm 18, 08233 Treuen
- i HABAU Deutschland GmbH
Nordhäuser Straße 2, 99765 Heringen
- i HA-CO Carbon GmbH
Albert-Einstein-Straße 1, 86757 Wallerstein
- i Handelshof Bitterfeld GmbH
An den Rohrwerken 8, 06749 Bitterfeld-Wolfen
- i Heidelberg Materials AG
Oberklamweg 6, 69181 Leimen
- i Hentschke Bau GmbH
Zeppelinstraße 15, 02625 Bautzen
- i Hering Bau GmbH & Co. KG
Neuländer 1, 57299 Burbach
- i HFB Engineering GmbH
Zschortauer Straße 42, 04129 Leipzig
- i HIB Huber Integral Bau GmbH
Arienheller 5, 56598 Rheinbrohl
- i Hitexbau GmbH
Steinerne Furt 44, 86167 Augsburg
- i Hochschule Biberach
Karlstraße 6-11, 88400 Biberach
- i Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden,
Fakultät Bauingenieurwesen | Architektur
Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
- i Hochschule für Technik, Wirtschaft und
Kultur Leipzig | Institut für Architektur und Institut
für Betonbau
Karl Liebknecht Straße 132, 04277 Leipzig
- i Holcim (Deutschland) GmbH
Tropfowitzstraße 5, 22529 Hamburg
- i Hörnig Bauwerkssanierung GmbH
Magnolienweg 5, 63741 Aschaffenburg
- i HUESKER Synthetic GmbH
Fabrikstraße 13-15, 48712 Gescher
- i ICL Ingenieur Consult GmbH
Diezmannstraße 5, 04207 Leipzig
- i Implenia Construction GmbH, Baustofftechnik
Martin-Luther-Ring 13, 04109 Leipzig
- i InformationsZentrum Beton GmbH
Hannoversche Straße 21, 31319 Sehnde
- i Ingenieurbüro Roland Fink
Blumenstraße 16, 01445 Radebeul
- i Ingenieurbüro Säbisch
Spinnereistraße 7, 04179 Leipzig
- i Johne & Groß GmbH
Kamenzer Straße 18, 01936 Schwepnitz
- i kahnt und tietze GmbH
Anna-Kuhnnow-Straße 39, 04317 Leipzig
- i KARL MAYER Technische Textilien GmbH
Mauersbergerstraße 2, 09117 Chemnitz
- i Karrié Bauwerkserhaltung GmbH
Am Roten Berg 13, 99086 Erfurt
- i KCMT Co. Ltd.
31 Energy Industry 1-ro Seosaeng-myoen Ulju-gun,
Ulsan 45014
- i Kingspan Insulation GmbH & Co. KG
Fuggerstraße 15, 49479 Ibbenbüren
- i Koch GmbH
Hagener Str. 87, 57223 Kreuztal
- i Laumer Bautechnik GmbH
Bahnhofstraße 8, 84323 Massing
- i Lefatex Chemie GmbH
Stiegstraße 64, 41379 Brüggen
- i Leibnitz-Institut für ökologische
Raumentwicklung e.V.
Weberplatz 1, 01217 Dresden
- i Leibniz-Institut für Polymerforschung
Dresden e. V.
Hohe Straße 6, 01069 Dresden
- i Leviat GmbH
Liebigstraße 14, 40764 Langenfeld
- i LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und
ingenieurtechnische Dienstleistungen GmbH
Ernst-Thälmann-Str. 5, 09661 Hainichen
- i Lithonplus GmbH & Co. KG
Karl-Lösch-Straße 3, 67360 Lingenfeld
- i Materialforschungs und -prüfanstalt an der
Bauhaus-Universität Weimar
Postfach 2310, 99404 Weimar
- i Max Bögl Bauservice GmbH & Co. KG
Max-Bögl-Str. 2, 07546 Gera
- i MC-Bauchemie Müller GmbH & Co.
Am Kruppwald 1-8, 46238 Bottrop
- i Meißner Hoch-, Tief- und Straßenbau GmbH
Ölbergstraße 4-6, 53840 Troisdorf
- i Müller Fugensysteme GmbH
Niederdorfstraße 57, 01877 Rammenau
- i Otto Scheuerer Bautenschutz GmbH
Hafenstraße 67, 34125 Kassel
- i PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG
Wolfsbankring 9, 45355 Essen
- i Planning GmbH
Ringener Straße 7-9, 53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler
- i pmp Projekt GmbH, Gesellschaft für
Projektentwicklung und Generalplanung mbH
Domlinden 21, 14776 Brandenburg

- i [Portneo GmbH](#)
Auf der Böcke 17, 58239 Schwerte
- i [RECKLI GmbH](#)
Industriestraße 36, 44628 Herne
- i [Reisch Ingenieure GmbH](#)
Pröllstraße 14, 86157 Augsburg
- i [Rekers Betonwerk GmbH & Co. KG](#)
Portlandstraße 15, 48480 Spelle
- i [Röchling Industrial SE & Co. KG](#)
Röchlingstr. 1, 49733 Haren
- i [RWTH Aachen, Institut für Massivbau](#)
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
- i [Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V. \(STFI\)](#)
Annaberger Straße 240, 09125 Chemnitz
- i [SC Tiefbau GmbH](#)
Austraße 6, 73230 Kirchheim unter Teck
- i [Schill + Seilacher „Struktol“ GmbH](#)
Moorfleeter Straße 28, 22113 Hamburg
- i [schlaich bergermann und partner.sbp gmbh](#)
Schwabstraße 43, 70197 Stuttgart
- i [Schöck Bauteile GmbH](#)
Schöckstraße 1, 76534 Baden-Baden
- i [SGL Technologies GmbH](#)
Werner-von-Siemens-Straße 18, 86405 Meitingen
- i [Sika Deutschland GmbH](#)
Kornwestheimer Straße 103-107, 70439 Stuttgart
- i [solidian GmbH](#)
Sigmaringer Straße 150, 72458 Albstadt
- i [STESAD GmbH](#)
Königsbrücker Straße 17, 01099 Dresden
- i [STL Heizsysteme GmbH](#)
An der Försterei 1a, 01458 Ottendorf-Okrilla
- i [Syspro-Gruppe Betonbauteile e. V.](#)
Matthias-Grünwald-Straße 1-3, 53175 Bonn
- i [T A R K U S IngenieurSanierung GmbH](#)
Hochbergweg 2, 12207 Berlin
- i [Technische Universität Berlin, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau](#)
Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin
- i [Technische Universität Chemnitz, Professur für Betriebliche Umweltökonomie und Nachhaltigkeit](#)
09107 Chemnitz
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Massivbau](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Baubetriebswesen](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Professur Hochfrequenztechnik](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Wirtschaftswissenschaften](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik – ITM](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik – ILK](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät für Maschinenwesen, Institut für Mechatronischen Maschinenbau](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Maschinenwesen, Institut für Verfahrenstechnik und Umwelttechnik, Arbeitsgruppe Mechanische Verfahrenstechnik](#)
01062 Dresden
- i [Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften, Institut für Abfall- und Kreislaufwirtschaft](#)
Pratzschwitzer Straße 15, 01796 Pirna
- i [Teijin Carbon Europe GmbH](#)
Kasinostraße 19-21, 42103 Wuppertal
- i [texton e. V.](#)
Alte Dresdner Straße 99, 01108 Dresden
- i [TORKRET GmbH](#)
Langemarckstraße 39, 45141 Essen
- i [TUDAG](#)
Freiberger Straße 37, 01067 Dresden
- i [TUDATEX GmbH](#)
Freiberger Straße 37, 01067 Dresden
- i [VDZ Technology gGmbH](#)
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf
- i [Weber Betonwerk GmbH](#)
Industriestraße 3-5, 97258 Ippesheim
- i [WiE GmbH - Werk für industrielle Elektronik](#)
Am Mühlgraben 3, 01731 Kreischa
- i [WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH](#)
Holzwiesenweg 17, 95028 Hof/Saale
- i [Wilhelm Wallbrecht GmbH & Co. KG](#)
Adelheidstraße 24, 30171 Hannover
- i [Wintershall Dea GmbH](#)
Friedrich-Ebert-Straße 160, 34119 Kassel
- i [WOLFF & Müller Holding GmbH & Co. KG](#)
Schwieberdinger Str. 107, 70435 Stuttgart
- i [WTM Engineers GmbH](#)
Johannisbollwerk 6-8, 20459 Hamburg
- i [Zeisberg Carbon GmbH](#)
Vollmerstraße 65, 30165 Hannover

Stand: September 2023

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.

Korrekturen

Chris Gärtner, Sandra Kranich, Felix Hahn | C³ – Carbon Concrete Composite e. V.

Design, Layout, digitale Bildbearbeitung, Druckvorstufe

Stefan Gröschel | TU Dresden, Institut für Massivbau und Sandra Kranich | C³ – Carbon Concrete Composite e. V.

Stand

August 2023

Fotos/Bildnachweis Titelseite

Holcim (Schweiz) AG, Matthias Leo, Kirsten Nijhof

Herzlichen Dank an unsere Unterstützer:

GEFÖRDERT VOM



Fördermitglieder:



solidian

TEIJIN

TEIJIN CARBON EUROPE GMBH



www.carbon-concrete.org

www.carbon-textilbetontage.de