





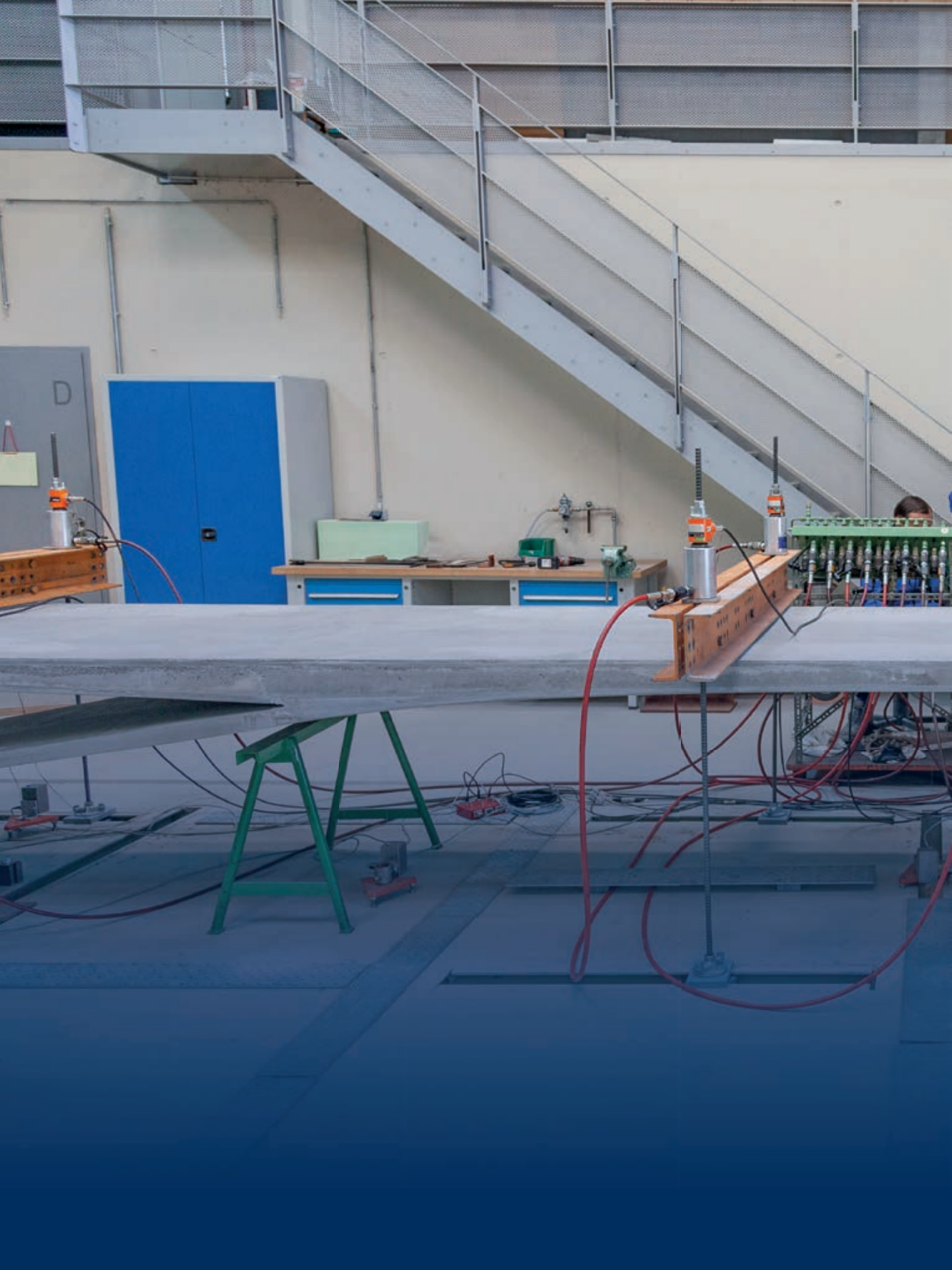


**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Institut für Massivbau | *Institute of Concrete Structures*

# **JAHRESBERICHT 2020**

# **ANNUAL REPORT 2020**





**„DAS MEISTE HA  
IN DER ZEIT GETA**

**ÖHNLICH  
MEINEN,  
NICHTS GETAN ZU HABEN.“**

Marie von Ebner-Eschenbach

<b>VORWORT</b> <i>FOREWORD</i>	11
<b>FORSCHUNG</b> <i>RESEARCH</i>	12
Forschung am IMB <i>Research at IMB</i>	14
Digitale Brückeninstandhaltung <i>Digital bridge maintenance</i>	16
Fahrbahnwannen auf Gewölbebrücken <i>Trough constructions on arched bridges</i>	18
Zulässige Schienenzugspannungen <i>Permissible rail tensile stresses</i>	20
Vermeidung von Schienenauszügen <i>Avoidance of rail expansion joints</i>	22
Endspurt Lahntalbrücke <i>Lahntal viaduct – last steps</i>	24
Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz <i>Railway bridges – monuments in the network</i>	26
Belastungsprobe für Carbonbeton im Brückenbau <i>Load test for carbon reinforced concrete in bridge construction</i>	28
Textilbewehrter Ort beton für Betonfahrbahnen <i>Textile reinforced concrete as a basis for a jointless surface of concrete roadways</i>	30
Bereit für die Kür <i>Ready for the show</i>	32
Die schlanke Doppelwand aus Carbonbeton <i>Double walls out of carbon reinforced concrete</i>	34
Filigrane Carbonbetonverbindungen für Bauelemente aus Holz <i>Carbon concrete ceiling slabs</i>	36
Origami mit Carbon <i>Origami with carbon reinforcement</i>	38
Mechanische Verankerung von CRC <i>Mechanical anchorages for CRC</i>	40
Gut verankert <i>Well anchored</i>	42
Entwicklung neuer Carbonstäbe <i>Development of carbon rebars</i>	44
Unermüdliche Carbonstäbe <i>Indefatigable carbon rebars</i>	46
Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung <i>Carbon reinforced concrete under high temperature</i>	48

Besonders feine Risse mit N-TRC <i>Cracking the code of fine cracks</i>	50
Carbonbeton unter Druck – Phase 2 <i>Carbon reinforced concrete under compression</i>	52
Lückenschluss im Regelwerk <i>Closing gaps in the regulatory framework</i>	54
Carbonbeton und hybride Verstärkung gegen Impact <i>Carbon reinforced concrete and hybrid reinforcement vs. impact</i>	56
Neue Maßstäbe in der Impactforschung <i>New scales at the impact research</i>	58
Immer schön sachte... <i>Soft, softer, damping</i>	60
Fas(er)zinierende dynamische Eigenschaften <i>Fibre fabulous dynamic properties</i>	62
Schneller, fester, Wasser? <i>Faster, stronger, water?</i>	64
Stark verbunden <i>Tightly bonded</i>	66
Sesam öffne dich <i>Unbox the black box</i>	68
Immer wach bleiben <i>Always stay awake</i>	70
Zustandsanalyse von Windenergieanlagen <i>Damage state analysis of wind turbines</i>	72
Automatisierte Dauerüberwachung von Windenergieanlagen <i>Automatic structural health monitoring system of wind turbines</i>	74
Versuche mit Resonanz <i>Testing by resonance</i>	76
Große Betonbalken in Resonanz <i>Large concrete beams in resonance</i>	78
Den Druck erhöhen <i>Increase the pressure</i>	80
Messbare Anisotropie nach Belastung <i>Measurable anisotropy after loading</i>	82
Beton in der Tiefsee <i>Concrete for deep ocean</i>	84
Blinde Verbindung <i>Blind connection</i>	86
Ganzheitliches serielles Bauen <i>Holistic serial construction</i>	88
Einsatz von Carbonbeton in Syrien <i>Carbon reinforced concrete in Syria</i>	90

<b>SONDERFORSCHUNGBEREICH/TRANSREGIO 280</b> <i>COLLABORATIVE RESEARCH CENTER/TRANSREGIO 280</i>	92
Carbonbetonstrukturen – Grundlagenforschung im SFB/TRR 280 <i>Carbon reinforced concrete structures – basic research in CRC/TRR 280</i>	94
Neuartig konstruieren mit Carbonbeton <i>Innovative design with carbon reinforced concrete</i>	96
Stabilität von dünnwandigen Carbonbetonbauteilen <i>Stability of carbon reinforced concrete components</i>	98
<b>DAS C<sup>3</sup>-PROJEKT</b> <i>THE C<sup>3</sup> PROJECT</i>	100
Aktuelles zum C <sup>3</sup> -Projekt <i>Update on the C<sup>3</sup> project</i>	102
Quo vadis, CUBE? Das weltweit erste Haus aus Carbonbeton <i>Quo vadis, CUBE? The world's first house made of carbon reinforced concrete</i>	105
Digitale Bühne für die 12. Carbon- und Textilbetontage <i>Digital stage for the 12th Carbon and Textile Reinforced Concrete Days</i>	109
<b>LEHRE</b> <i>TEACHING</i>	112
Lehrveranstaltungen des Instituts für Massivbau <i>Lectures at the Institute of Concrete Structures</i>	114
Projektarbeiten <i>Project Works</i>	120
Diplomarbeiten <i>Master's Theses</i>	124
Fahrradexkursion zu den Elbbrücken	132
<b>OTTO-MOHR-LABORATORIUM</b> <i>OTTO MOHR LABORYTORY</i>	134
Testen auf höchstem Niveau <i>Testing at the highest level</i>	136
Leistungen <i>Services</i>	138
Ausstattung <i>Equipment</i>	140
Im Fokus: Biaxial-Prüfmaschine <i>In the focus: biaxial testing machine</i>	144
Härtetest: DDR-Balkenreihentragwerke <i>Heavy load test for GDR bridges</i>	146
DDR-Fertigteildecken im Test <i>Test loading of GDR prefabricated ceilings</i>	148



Materialuntersuchung an historischem Binder <i>Material examination of a historic roof truss</i>	150
Abscherversuche an Verbunddübelleisten <i>Push-out tests on composite dowel-strips</i>	152
<b>DAS INSTITUT THE INSTITUTE</b>	154
Einleitung	156
Ein Förster? Ein Architekt? Ein Brückenbauer!	157
Passt es gerade? Homeoffice in Coronazeiten	160
Preise und Ehrungen	162
Weitsicht	163
Wege aus dem Sanierungsstau   Die Welt schaut auf Dresden	164
150. Todestag von Johann Andreas Schubert	165
Impressionen aus dem Lockdown	166
Promotionen	168
Meso- und makroskopische Modellierung von Beton <i>Meso and macroscopic modeling of concrete</i>	168
Impaktverstärkung mit mineralischen Verstärkungsschichten <i>Impact strenghtening with mineral strengthening layers</i>	170
Modellierung von zementgebundenen Kompositmaterialien mit Verfestigung (SHCC) <i>Modeling of strain-hardening cement-based composites (SHCC)</i>	172
Experimentelle Untersuchungen und Modellvergleiche von Carbon- betontragwerken <i>Experimental investigations and comparisons of simulation models of carbon reinforced concrete structures</i>	174
Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices <i>Experimental investigations of the composite behaviour of carbon rods in concrete matrices</i>	176
Das Institut in Zahlen und Fakten	178
Austausch und Zusammenarbeit	191
Publikationen	192
Das Team 2020	198
Impressum	201



**IMB** Institut für  
Massivbau



# DREI. ZWEI. EINS.

Im Vorwort des Jahres 2019 wollten wir noch weit springen. Doch kaum hatte das neue Jahr angefangen, stand alles Kopf: So könnte man den Beginn des Jahres 2020 zusammenfassen. Niemand hat im Geringsten geahnt, dass das Jahr so stark durch die Corona-Pandemie geprägt sein würde. Niemand dachte ansatzweise daran, dass wir die meiste Zeit Zuhause verbringen und alle unsere sozialen und beruflichen Kontakte digital pflegen werden. Es war und ist eine herausfordernde Zeit für uns alle und dennoch blicken wir auf ein erfolgreiches Jahr zurück, denn passiert ist viel. Wenngleich manches anders kam, als 2019 noch gedacht.

**Drei.** „Ich sei, gewährt mir die Bitte, in eurem Bunde der Dritte“ – um es mit Friedrich Schillers Worten aus seinem Werk „Die Bürgschaft“ zusammenfassen. Seit Februar 2020 bereichert Steffen Marx als Inhaber der DB Netz AG – Stiftungsprofessur für Ingenieurbau das Institut für Massivbau und verstärkt mit seinem Know-how unser Team. Manch einer denkt vielleicht an Erich Kästners Verwechslungskomödie „Drei Männer im Schnee“ oder der eine oder die andere womöglich an Gotthold Ephraim Lessings drei Ringe in „Nathan der Weise“. Doch allzu literarisch wird es am Ende nicht werden, dafür wissenschaftlich, empirisch, interdisziplinär, methodisch und lehrreich.

**Zwei.** Um einen reibungslosen Übergang gewährleisten zu können und die Kontinuität der erfolgreichen Forschungsarbeit zu bewahren, war die Klärung der Nachfolge für die Professur für Massivbau ein wichtiger Aspekt. Die Geschichte lehrt uns, dass das Thema „Nachfolge“ seit jeher ein schwieriges Thema ist: Da wären z. B. die britische Monarchie und das ewige Warten von Prinz Charles auf den Thron. Oder der überraschende und bis dato noch nie da gewesene Rücktritt des Papstes Benedikt XVI und die Neubesetzung durch Papst Franziskus. Nachfolgeregelungen sind aber auch in Unternehmen und an Universitäten alles andere als einfach und keine Selbstläufer. Da die umfangreichen Arbeiten in Lehre und Forschung weder leiden noch in ihrer Leistung nachlassen

sollten, ist die Entscheidung zu Gunsten einer längeren Übergangszeit des Inhabers der Professur Massivbau gefallen. Dank der Stiftungsprofessur gibt es nun diese Übergangsphase von rund viereinhalb Jahren.

**Eins.** Nun können wir viele Themen nennen, an denen wir schwerpunktmäßig und vielleicht auch erfolgreich arbeiten. Der Carbonbeton ist dabei sicher als größtes Thema zu nennen. Aber auch die Forschungen zu Impact und Mehraxialität gehören zu denen, die schon lange am Institut bearbeitet werden. Nun kommen gerade Ingenieurbauwerke und Windenergieanlagen hinzu. Was nach vielen Themen klingt, ist in Wirklichkeit „Eins“. Mit Entschlossenheit, aber auch mit einem gewissen Mut verfolgen wir – trotz der aktuellen Hindernisse – das Ziel, die Welt vor allem ein großes Stück nachhaltiger zu machen, aber auch besser, leichter, einfacher und vielleicht auch schöner.

Für die geleistete und noch zu leistende Arbeit danken wir unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, denn ohne jeden einzelnen von ihnen wären wir nicht dort, wo wir jetzt sind und würden dort nicht hinkommen, wo wir hinkommen wollen.

Manfred Curbach, Ulrich Häußler-Combe und Steffen Marx



# FORSCHUNG

## RESEARCH

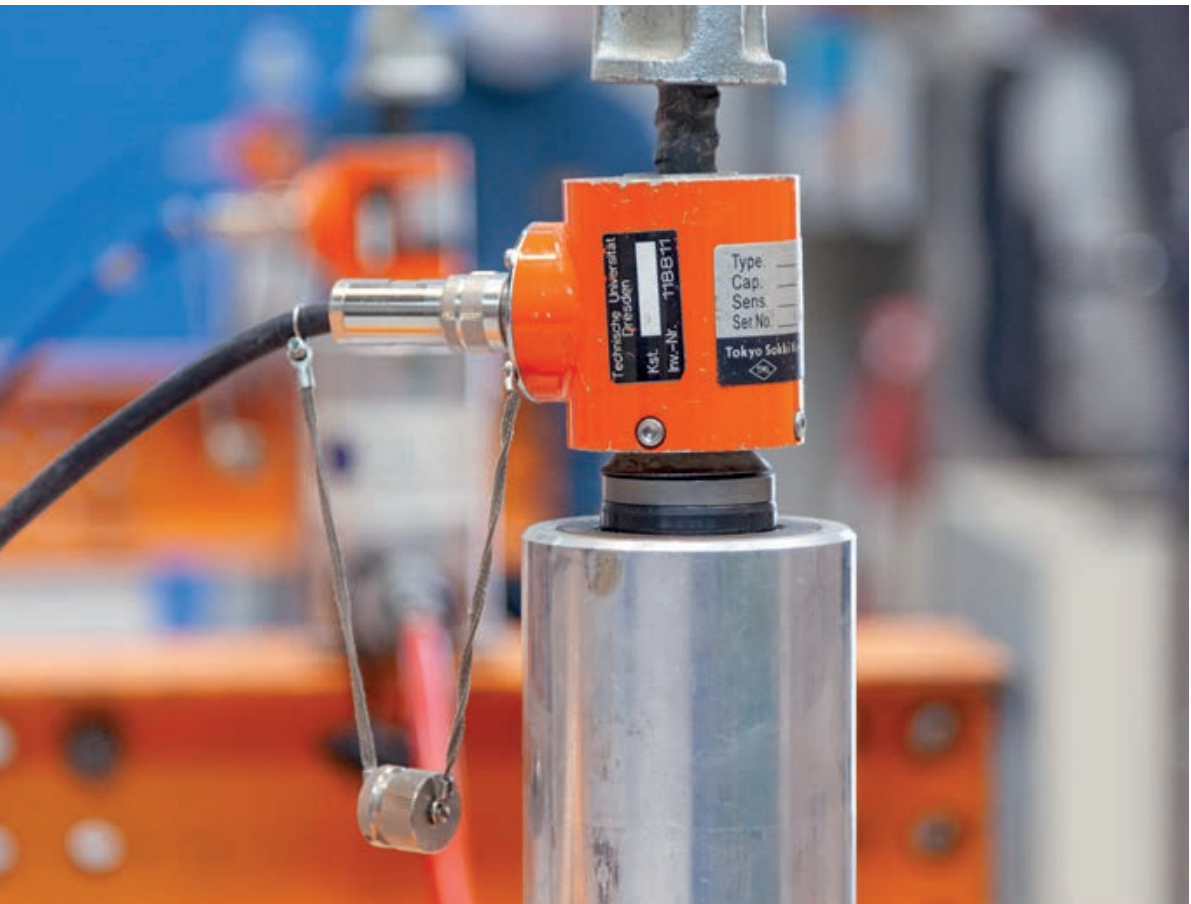


# FORSCHUNG AM IMB

## RESEARCH AT IMB

Das Institut für Massivbau (IMB) ist eines von elf Instituten an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden. Am IMB wird in acht Forschergruppen zu verschiedensten Themen rund um das Bauen mit Beton geforscht. Die Bandbreite reicht von der Modellierung des Zusammenwirkens einzelner Teilchen, über die experimentelle Untersuchung von ganzen Bauteilen bis zum prädiktiven Instandhaltungsmanagement von Ingenieurbauwerken. Wir beschäftigen uns mit speziellen Materialeigenschaften verschiedenster Betone, dessen

*The Institute of Concrete Structures (in short: IMB) is one of eleven institutes at the Faculty of Civil Engineering at the Technische Universität Dresden. At the IMB, research is being carried out in eight research groups on various topics relating to building with concrete. The spectrum ranges from modelling the interaction of individual particles, to the experimental investigation of whole components, to predictive maintenance management of engineering structures. We deal with special material properties of various concretes from light-weight to ultra-high performance,*



Belastungseinrichtung am Prototyp der Brücke für das Deutsche Museum in München | *Loading device on the prototype of the bridge for the Deutsches Museum in Munich* | Photo: Stefan Gröschel

Verbund zum Bewehrungsstahl und zu faserbasierten Bewehrungen, mit dem Einfluss unterschiedlichster Lastszenarien vom statischen Standard-Kurzzeitversuch über zyklische Dauerversuche bis zum Impakt, mit optimierten Bauweisen für den Neubau und alternativen Methoden zum Messen und zum Erhalt des Bestehenden.

**Unsere aktuellen Projekte können verschiedenen Forschungsschwerpunkten zugeordnet werden:**

- Eigenschaften von Betonen verschiedenster Zusammensetzung,
- Verbund zwischen Bewehrung und Matrix,
- Spezielle Belastungsszenarien wie Impakt-, zyklische und mehraxiale Beanspruchungen bei Material- und Bauteilversuchen,
- Simulation mit FEM, Erarbeitung von Stoffgesetzen und Bemessungsverfahren,
- Bauen mit Carbonbeton – von der Materialforschung über Bemessungskonzepte und Normung bis zur praktischen Umsetzung,
- Alternative Konstruktionsmethoden für Brückenbauwerke,
- In-situ-Belastungsversuche und -Langzeitüberwachung sowie Methoden des prädiktiven Monitorings von Bauwerken,
- Sonstige Forschungsthemen.

Neben der reinen Grundlagenforschung nehmen gemeinsame Projekte mit Praxispartnern einen hohen Stellenwert ein, denn dies ist die beste Methode, Forschungsergebnisse in die Baupraxis zu überführen. Auch der gegenseitige wissenschaftliche Austausch mit Forschern anderer Universitäten und Forschungseinrichtungen hat große Bedeutung. Gemeinsame Veranstaltungen und Gespräche bspw. im Rahmen der Treffen der Schwerpunktprogramme SPP 1542, 2020 und 2255, im DFG-Graduiertenkolleg GRK 2250, in den verschiedenen Verbundvorhaben im Zwanzig20-Projekt C<sup>3</sup>, im Rahmen des SFB/TRR 280 und des SFB 1463 oder bei der Gremienarbeit bspw. zur Neuauflage der DAfStb-Hefte 220/240, im Unterausschuss Ultrahochfester Beton, im Unterausschuss Nichtmetallische Bewehrungen oder in der fib task group „History of Concrete Structures“ sind für alle Teilnehmer\*innen gewinnbringend und Ideenpool für neue, gemeinsame Vorhaben gleichermaßen.

*the combination of concrete with different reinforcements, with the influence of different load scenarios – from static standardized short-term test to long term and cyclic tests to impact – on the load bearing capacity, with optimized construction methods for new buildings and alternative methods for measurement and for maintaining the existing.*

***Our current projects can be grouped into the following research areas:***

- *Properties of concretes of various composition,*
- *Bond between reinforcement and matrix,*
- *Special stress scenarios such as impact, cyclic and multi-axial stresses in material and component tests,*
- *Simulation with FEM, development of constitutive laws and design procedures,*
- *Building with carbon reinforced concrete – from materials research to design concepts and standardisation to practical implementation,*
- *Alternative construction methods for bridge structures,*
- *Reinforcements – on the basis of endless filaments – mainly made of carbon fibres – for strengthening of existing structures and for new constructions,*
- *In-situ load bearing tests and in-situ long-term monitoring of structures as well as and new methods for predictive monitoring,*
- *Other research topics.*

*In addition to pure basic research, joint projects with industrial partners are of great importance as this is the best method to transfer research results into the building practice. Furthermore, mutual scientific exchange with researchers from other universities and research institutes is also of great importance. Joint meetings and discussions, for example, within the framework of the Priority Programmes SPP 1542, 2020 or 2255, of the Research Training Group GRK 2250, in the various collaborative research projects within the Twenty20 project C<sup>3</sup>, within the frameworks of the SFB/TRR 280 and the SFB 1463, or, e. g., the committees work on the new edition of the DAfStb booklets 220/240, the subcommittees on UHPC an on Non-metallic reinforcements or in the frame of the fib TG ‘History of Concrete Structures’ are profitable for all participants and a pool of ideas for new joint projects.*



Visualisierung der shBIM-Plattform | Visualization of the shBIM-platform | Visualisation: Project partners of the DiMaRB project

# DIGITALE BRÜCKENINSTANDHALTUNG

## DIGITAL BRIDGE MAINTENANCE

Die Instandhaltung von Eisenbahnbrücken ist derzeit von einem reaktiven, problemorientierten Vorgehen gekennzeichnet. Erst wenn der Bauwerksbetreiber im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Inspektionen eine Unzulänglichkeit am Bauwerk feststellt, erfolgt die Planung einer Instandsetzungsmaßnahme. Wegen des dann meist fortgeschrittenen Schädigungszustands sind diese Maßnahmen i. d. R. teuer. In einigen Fällen ist sogar ein kompletter Ersatzneubau erforderlich. Eine prädiktive, langzeitliche Überwachung, wie sie in vielen anderen industriellen Bereichen etabliert ist, würde zu einer Senkung der Instandhaltungskosten und zu einer Reduzierung des Ausfallrisikos führen.

In dem Projekt DiMaRB wird daher ein digitales, prädiktives Instandhaltungskonzept für Eisenbahnbrücken entwickelt, welches auf der Nutzung von *Structural Health Monitoring (SHM)* und der Methode des *Building Information Modeling (BIM)* basiert. Mit der permanenten Erfassung und Auswertung von Messdaten zum aktuellen Bauwerkszustand werden frühzeitig Zustandsänderungen, und damit mögliche Schäden, entdeckt. Ferner ermöglicht BIM die

*The maintenance of railway bridges is currently characterized by a reactive, problem-oriented approach. Only when the operator of the structure detects a deficiency in the structure during the legally required inspections, the planning of a maintenance action is carried out. Then, due to the advanced state of damage, these actions are usually expensive. In some cases, completely new construction is even necessary. Predictive, long-term monitoring, as established in many other industrial sectors, would lead to a reduction in maintenance costs and a reduction in the risk of failure.*

*The DiMaRB project, therefore, develops a digital, predictive maintenance concept for railway bridges based on the use of Structural Health Monitoring (SHM) and the Building Information Modeling (BIM) method. With the permanent acquisition and evaluation of measurement data on the current structural condition, changes in condition, and thus possible damage, are detected early on. BIM also enables data integration in a digital building model. The digital maintenance platform*



Datenintegration in einem digitalen Bauwerksmodell. Es wird die digitale Instandhaltungsplattform shBIM (Structural Health BIM) geschaffen. Auf ihr liegt das digitale 3D-Modell des realen Bauwerks, welches alle instandhaltungsrelevanten Informationen enthält. Dort findet auch die komplette Kommunikation aller am Prozess der Instandhaltung Beteiligten statt.

Zusammen mit den Projektpartnern erforscht das Institut für Massivbau der TU Dresden in enger Kooperation mit der Leibniz Universität Hannover die notwendigen Methoden für ein Grundkonzept einer digital unterstützten Instandhaltung der Eisenbahninfrastruktur in Deutschland. Über die Erfassung des Ist-Zustands hinaus werden Prognosemodelle erforscht, die eine Aussage über den Wird-Zustand der Brücke ermöglichen.

Die Umsetzung der shBIM-Plattform hat erfolgreich stattgefunden. Es ist bereits möglich, ausgewertete Messdatenreihen in Echtzeit im shBIM-Modell darzustellen. Außerdem wurden große Teile des Datenbestands der Deutschen Bahn (DB) analysiert, wodurch bestandsdatenbasierte Prognosemodelle entwickelt werden konnten.

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wird ein Konzept für ein lebensdauerübergreifendes Brückenmonitoring erarbeitet. Dies hilft bei der Erforschung messdatenbasierter Prognosemodelle und damit der Nutzbarmachung der Sensordaten. Die entwickelten Instandhaltungskonzepte und -methoden werden an bestehenden Brückenbauwerke verifiziert.



Sensorapplizierung an der Eisenbahnüberführung Veltener Str. (Hennigsdorf) | Sensor application on the Railway Bridge Veltener Str. (Hennigsdorf) | Photo: Stefan Gröschel

*shBIM (Structural Health BIM) is created. The digital 3D model of the real structure, which contains all information relevant to maintenance, is stored on this platform. This is also where the complete communication between all participants in the maintenance process takes place.*

*Along with the project partners, the Institute of Concrete Structures at the TU Dresden is researching the necessary methods for a basic concept of digitally supported maintenance of the railroad infrastructure in Germany in close cooperation with Leibniz University Hannover. In addition to the recording of the actual condition, prognosis models are being researched that allow the prediction of the future condition of the bridge.*

*The implementation of the shBIM platform has been successful. It is already possible to display the evaluated measurement data series in real-time in the shBIM model. Besides, large parts of the Deutsche Bahn (DB) database have been evaluated, allowing the development of inventory-based forecast models.*

*In the further course of the research project, a concept for bridge monitoring over the entire service life of the bridge will be developed. This will help in the research of measurement data based forecast models and thus the utilization of the sensor data. The developed maintenance concepts and methods will be verified on existing bridge structures.*

► **Titel | Title**

Digitale Instandhaltung von Eisenbahnbrücken – DiMaRB

Digital Maintenance of Railway Bridges – DiMaRB

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mFUND und WIK-Begleitforschung

► **Zeitraum | Period**

09.2018 – 08.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributors**

Jan-Hauke Bartels, M.Sc.  
Max Herbers, M.Sc.

► **Projektpartner | Project partners**

6 Partner, davon 2 aus der Forschung, 2 KMU und 2 assoziierte Partner



Viadukt Dunetal | *Dunetal arch viaduct* | Photo: DB Netz AG

## FAHRBAHNWANNEN AUF GEWÖLBEBRÜCKEN

### TROUGH CONSTRUCTIONS ON ARCHED BRIDGES

Die Gewölbebrücken der Bahn sind sowohl wichtige Infrastrukturobjekte als auch prägende Kulturgüter.

Viele dieser Brücken befinden sich alterungsbedingt in einem schlechten Zustand und die DBAG plant, diese Brücken in den nächsten Jahren zu erneuern. Als Alternative zu Abbruch und Neubau soll im Rahmen eines Forschungsprojekts die Ertüchtigung der bestehenden Brücken mit einer Fahrbahnwanne weiterentwickelt werden. Die grundlegende Technologie dazu ist bereits seit vielen Jahren bekannt, jedoch existiert derzeit eine Vielzahl von unterschiedlichsten Lösungen. Innerhalb der realisierten Projekte sind die aufgetretenen Fehler weder analysiert noch beseitigt worden.

Eine vereinheitlichte Sanierungsrichtlinie ist auf den Weg zu bringen. Hierbei sind die signifikanten Fehler in Form von undichten Fugen bzw. Abdichtungen und die Alterung von Baustoffen eine häufige Ursache für eine Tragfähigkeitsreduzierung sowie Einschränkungen in der Gebrauchstauglichkeit. Dabei sollen effektive bautechnische Konzepte entwickelt werden, die unter Berücksichtigung von denkmalpflegerischen Aspekten Anwendung finden. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts sollen in ein Modul zur RIL 804 einfließen und somit unmittelbar in der Praxis umgesetzt werden.

*The arched bridges of the railroad are both important infrastructure objects and also formative cultural assets.*

*Many of these bridges are in poor condition because of their age and DBAG plans to replace these bridges in the coming years. As an alternative to demolition and new construction, the retrofitting of the existing bridges with a roadway trough is to be further developed as part of a research project. The basic technology for this has been known for many years, but a wide variety of different solutions currently exist. Within the realized projects the occurred errors have neither been analyzed nor eliminated.*

*A standardized renovation guideline is to be launched. Significant defects in the form of leaking joints or seals and the aging of building materials are a frequent cause of a reduction in load-bearing capacity and restrictions in serviceability. Effective structural engineering concepts are to be developed, which are to be applied taking into account aspects of monument preservation. The results of the research project are to be incorporated into a module for RIL 804 and thus implemented directly in practice.*

*In the project, arch bridges with or without trough constructions are recorded as completely and systematically as possible in cooperation with DB Netz AG. The above-mentioned supple-*

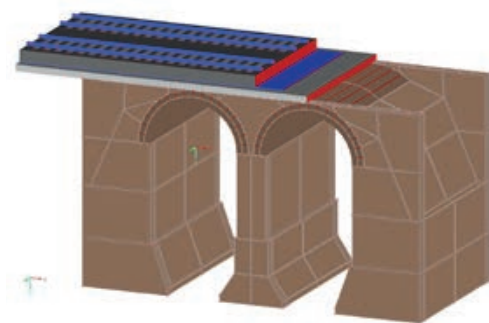
Im Projekt werden in Zusammenarbeit mit der DB Netz AG Gewölbebrücken mit oder ohne Fahrbahnwanne möglichst vollständig und systematisch erfasst. In das o. g. Ergänzungsmodul sollen auch Hinweise der im Vorfeld durchzuführenden Betrachtungen, wie z. B. Schadenserfassung, Baugrundaufschlüsse und Baustoffuntersuchungen etc., aufgenommen werden. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz, der Denkmalschutz sowie das sich stets aktualisierende Planungsrecht rücken immer stärker in den Fokus unserer Bauwerksgestaltung und fordern nachdrücklich die Nutzung von vorhandenen Ressourcen respektive das Erhalten alter Bauwerke oder Bauwerksteile.

Neben den vorgenannten Anforderungen gilt es, gemeinsam mit der DB Netz AG Bedingungen für die bilanzseitige Aktivierung und Finanzierung der Baumaßnahmen explizit herauszustellen, um ebenfalls eine möglichst vereinheitlichte Bewertungsgrundlage gegenüber Abriss und Neubau von alten Gewölbebrücken zu erhalten. Die gutachterliche Projektbegleitung von ausgewählten Gewölbebrückeninstandsetzungsmaßnahmen hat das Ziel, die hieraus gezogenen Erkenntnisse in das o. g. Modul ergänzend einfließen zu lassen.

*mentary module will also include information on the considerations to be carried out in advance, such as damage assessment, subsoil excavations and building material investigations, etc.*

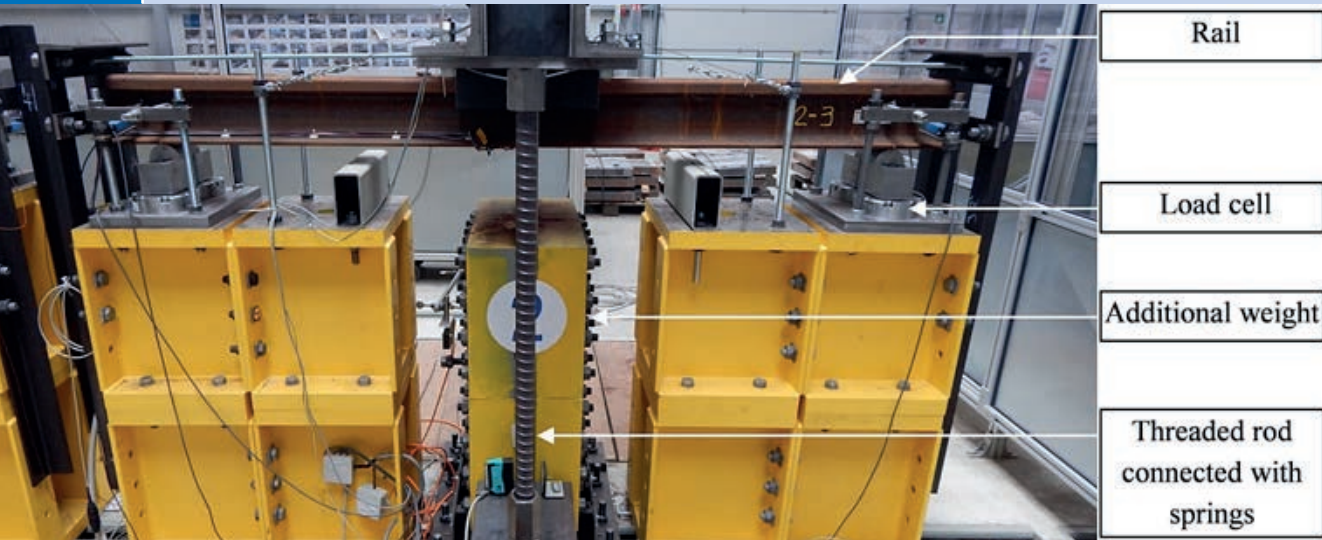
*The CO<sub>2</sub> balance, the protection of historical monuments as well as the constantly updating planning law are increasingly moving into the focus of our building design and emphatically demand the use of existing resources or the preservation of old buildings or parts of buildings.*

*In addition to the aforementioned requirements, the conditions for the capitalization and financing of the construction measures on the balance sheet must be explicitly defined together with DB Netz AG in order to obtain as standardized an assessment basis as possible for the demolition and construction of old arch bridges. The objective of the expert project monitoring of selected arch bridge rehabilitation measures is to incorporate the knowledge gained from this into the above-mentioned module.*



3D-Visualisierung den prinzipiellen Oberbauaufbau einer mittels Fahrbahnwanne sanierten Gewölbebrücke | *3D visualization of the basic superstructure of an arch bridge rehabilitated by means of a roadway trough* | Graphic: Conrad Pelka

- ▶ **Titel | Title**  
Fahrbahnwannen auf Gewölbebrücken  
*Roadway on arch bridges*
- ▶ **Förderer | Funding**  
DB Netz AG, Frankfurt am Main
- ▶ **Zeitraum | Period**  
01.2020 – 12.2022
- ▶ **Leiter | Project manager**  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
- ▶ **Bearbeiter | Contributor**  
Conrad Pelka, M.Sc.
- ▶ **Projektpartner | Project partner**  
DB Netz AG, Frankfurt am Main



Resonanzprüfstand für Schienenermüdungsversuch | Resonance test stand for rail fatigue test | Photo: Chongjie Kang

## ZULÄSSIGE SCHIENENZUGSPANNUNGEN

### PERMISSIBLE RAIL TENSILE STRESSES

Im modernen Eisenbahnoberbau werden die Schienen durchgehend verschweißt. Bei der Führung des lückenlosen Gleises über eine Brücke entstehen infolge der Kopplung zwischen Gleis und Tragwerk Interaktionseffekte. Aus den Längenänderungen des Überbaus infolge Verkehrsbelastungen, Kriechen, Schwinden und Temperatur resultieren zusätzliche Schienenspannungen, relative Gleisverschiebungen zum Überbau bzw. zum Planum sowie zusätzliche Längskräfte in den Brückenlagern.

Der aktuelle Nachweis der zusätzlichen Schienenzugspannungen (92 MPa) infolge der Gleis-Tragwerks-Interaktion in Richtlinie 804 bzw. DIN EN 1991-2 basiert auf Untersuchungen aus dem Jahr 1978. Das Nachweiskriterium der zulässigen Schienenspannung muss für die heutigen Oberbauformen überprüft werden.

In diesem Projekt werden die zusätzlichen Schienenzugspannungen auf Basis von umfangreichen experimentellen Versuchen überprüft. Zu diesem Zweck werden Gestaltfestigkeits- bzw. Eigenspannungsuntersuchungen für aktuelle, korrodierte unbefahrene Schienen des Profils 60E2 und der Stahlgüte R260 durchgeführt.

*In modern railway track systems, the rails are continuously welded. The coupling effects between bridges and rails introduce track/bridge interactions when continuously welded rails are installed on bridges. The longitudinal deformations due to vertical traffic loads, temperature effects, creep and shrinkage result in additional rail stresses, relative displacements between rails and superstructure as well as additional forces in bridge supports.*

*The current verification value of additional rail tensile stress (92 MPa) due to track/bridge interaction in Guidelines 804 and DIN EN 1991-2 is based on investigations in 1978. This permissible stress criterion has to be re-checked for today's track systems.*

*With this purpose, investigations of rail structural fatigue resistance and rail residual stress are carried out on un-operated rails of 60E2 profiles, which were purposely corroded; the steel grade is R260.*

*The rail fatigue resistance is determined by flexural fatigue tests on whole rail specimens, whereby the influences of the rail shape, surface properties, and the manufacturing process (especially for residual stresses) can be directly*

Die Dauerfestigkeit wird durch Biegeschwellsversuche an ganzen Schienenstücken ermittelt, wodurch die Einflüsse aus der Form, den Oberflächeneigenschaften und der Bearbeitung (insbesondere die Eigenspannungen) direkt erfasst werden können. Die Versuche wurden als Vierpunktbiegeversuche mit einer Stützweite von  $L = 1,90\text{ m}$  und einem Laststempelabstand von  $150\text{ mm}$  durchgeführt. Um die technische Dauerfestigkeit bei einer Lastwechselzahl von  $N = 5 \cdot 10^6$  und  $N = 5 \cdot 10^7$  zu bestimmen, wurden die Prüfungen nach dem Treppenstufenverfahren gemäß DIN EN 14730-1 durchgeführt.

Eigenspannungen werden algebraisch mit den weiteren, zusätzlich in der Schiene hervorgerufenen, Spannungen überlagert. Gemäß der heutigen Oberbauberechnung wird der Nachweis der Schiene als Dauerfestigkeitsnachweis an der Schienenfußunterkante geführt. Die Eigenspannungen werden im Smith-Diagramm in der anzusetzenden Unterspannung berücksichtigt und können über zwei Verfahren ermittelt werden: Zerlegeverfahren bzw. Schnittmethode und zerstörungsfrei durch die Röntgen-Diffraktometrie.

Durch den Vergleich der aktuellen Erkenntnisse mit den historischen Untersuchungsergebnissen kann festgestellt werden, dass die zulässige Schienenzugspannungen der Richtlinie entsprechend als konservativ eingeschätzt werden können.



Eigenspannungsmessungen mit Schnittmethode | *Residual stress measurement with sectioning method* | Photo: Chongjie Kang

*included. The tests are carried out as four-point-bending tests with a span width of  $L = 1.90\text{ m}$  and a load distance of  $150\text{ mm}$ . The tests are carried out based on the staircase method to determine the technical fatigue resistance up to  $N = 5 \cdot 10^6$  and  $N = 5 \cdot 10^7$  load cycles according to DIN EN 14730-1.*

*Residual stresses are additionally algebraically superimposed with other stresses in the rail. The verification of additional tensile rail stress is based on the rail fatigue resistance in the rail foot according to the current 'Oberbauberechnung'. The residual stress is taken into account in the Smith-diagram as part of the minimum stress level; it can be determined using the following two methods: 1. the sectioning method and 2. the X-ray diffraction method*

*Based on the comparisons of historical results and new test results, it can be concluded that the permissible additional rail tensile stress in the guideline and codes can be assessed as conservative.*

► **Titel | Title**

Experimentelle Ermüdungsuntersuchungen an Schienen als Grundlage zur Ermittlung erhöhter zulässiger Schienenspannungen

*Experimental fatigue tests on rails as a basis for determining increased permissible rail stresses*

► **Förderer | Funding**

DB Netz AG

► **Zeitraum | Period**

01.2019 – 06.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributor**

Chongjie Kang, M. Sc.



Fuldatalbrücke Kragenhof | Fuldatal bridge Kragenhof | Photo: MKP GmbH

## VERMEIDUNG VON SCHIENENAUSZÜGEN

### AVOIDANCE OF RAIL EXPANSION JOINTS

Bei der Schnellfahrstrecke Hannover–Würzburg, die 1991 vollständig in Betrieb genommen wurde, ist der Streckenverlauf durch die besondere Topographie und 44 Talbrücken mit Gesamtstützweiten von 71 m bis 1.628 m geprägt. Der Oberbau wird nach ca. 30 Jahren in verschiedenen Realisierungsabschnitten (kurz: RA; gestaffelt von 2019: RA1 bis 2023: RA4) erneuert.

Beispielsweise wurde die 250 m lange Kragenhofer Brücke in den Jahren 1986 bis 1988 gebaut. Die zweigleisigen Überbauten dieser Stahlverbundfachwerkbrücke wurden als Einfeldträgerkette konzipiert. Wegen der sehr komplexen Gleis-Tragwerks-Interaktion wurden auf dem Bauwerk insgesamt sechs Schienenauszüge vorgesehen. Schienenauszüge sind wartungsaufwendig und müssen während des Lebenszyklus des Bauwerks regelmäßig erneuert werden. Unter laufendem Betrieb ist diese Erneuerung mit großen Folgekosten und Störungen des Betriebsablaufs verbunden. Um Schienenauszüge zukünftig möglichst zu vermeiden, werden umfangreiche Forschungsarbeiten zur Gleis-Tragwerks-Interaktion durchgeführt.

*The Hanover–Würzburg high-speed railway line, which went into full operation in 1991, is characterized by its special topography and 44 viaducts. The length of the structures ranges from 71 m to 1.628 m. After approximately 30 years of operation, the track systems will be renovated, in various stages (RA for short; staggered from 2019: RA1 to 2023: RA4).*

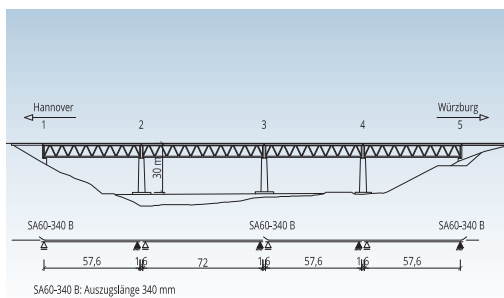
*For example, the 250 meter long Kragenhofer Bridge was built from 1986 to 1988. This steel composite truss bridge, carrying two railway tracks, was designed as a simply supported girder chain. Due to the very complex track/bridge interactions, six rail expansion joints were planned and constructed for this bridge. These rail expansion joints need to be maintained very intensively and regularly exchanged during the service life of the bridge. This is associated with high follow-up costs, and it disrupts the on-going traffic operation. To reduce the number of rail expansion joints as much as possible in the future, extensive investigations are to be carried out on the track/bridge interaction of the rails and the superstructures.*

Durch das Ingenieurbüro Marx Krontal Partner (MKP) wurden die Schienenspannungen der Kragenhofer Brücke unter der Annahme eines lückenlosen Gleises berechnet. Auf Grundlage dieser Berechnungen wird vom Institut für Massivbau ein Optimierungskonzept erarbeitet. Um die gewonnenen Erfahrungen an der Kragenhofer Talbrücke weitergehend für die zukünftige Normierung nutzbar zu machen, ist eine projektübergreifende Aufbereitung, Verallgemeinerung und Dokumentation der Ergebnisse erforderlich. Für weitere Bauwerke desselben Streckenabschnitts werden die vorhandenen Schienenauszüge hinsichtlich ihrer Notwendigkeit überprüft. Um gezielt geeignete Maßnahmen vorschlagen zu können, wurden alle Brücken mit Schienenauszügen auf der Strecke 1733 untersucht. Hierbei wurden Erfahrungen aus der Instandhaltung zusammengetragen und systematisch aufbereitet. In diesem Projekt wird ein Screening der Schienenauszüge auf dem Streckenabschnitt km 113.800 bis km 264.930 (PD Kassel) durchgeführt. Die Informationen zum Oberbau, Überbau und zu speziellen Bauteilen der Brücken werden gesammelt und analysiert.

Am Ende dieses Projekts wird eine grobe Schätzung abgegeben, ob eine Entfernung oder zumindest Optimierung der vorhandenen Schienenauszüge möglich ist.

*The engineering office Marx Krontal Partner (MKP) has carried out calculations to investigate the rail stresses due to track/bridge interaction by assuming that the rails on this bridge are continuously welded. Based on these calculations, the Institute of Concrete Structures will develop an optimization concept. To make the experience gained from the Kragenhofer Bridge beneficial for future standardization, a cross-project preparation, generalization, and documentation of the results are necessary. The requirements of rail expansion joints for the bridges, which are on the same railway section of the Kragenhofer Bridge, will be checked. To establish the feasibility of making an adequate proposal for different situations, the bridges with rail expansion joints on line 1733 would be examined. The corresponding experience gained from the maintenance work would be collected and systematically processed. In this project, a screening of the rail expansion joints on this section from kilometre position km 113.800 to km 264.930 will be carried out. Besides, information on the track system, special devices and superstructure of the bridges are to be collected and analyzed.*

*At the end of this project, an estimation of whether removal or at least optimization of the existing rail extensions will be provided for each bridge.*



Ansicht und statisches System der Fuldataalbrücke Kragenhof | Side view and static system of the Fulda bridge Kragenhof | Graphic: Chongjie Kang

► **Titel | Title**

Wissenschaftliche Begleitung und Beratung zur Minimierung der Anzahl erforderlicher Schienenauszüge

*Scientific support and advice to minimize the number of rail expansion joints*

► **Förderer | Funding**

DB Netz AG

► **Zeitraum | Period**

07.2020 – 12.2022

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributor**

Chongjie Kang, M. Sc.

► **Projektpartner | Project partner**

Marx Krontal Partner GmbH, Hannover



Rückbau der Lahntalbrücke | Deconstruction of the Lahntal Viaduct | Photo: Ludolf Krontal

# ENDSPURT LAHTALBRÜCKE

## LAHTAL VIADUCT – LAST STEPS

Im Rahmen der Stiftungsprofessur für Ingenieurbau (DB Netz AG) wurde das Forschungsprojekt „Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke“ 2020 von Hannover nach Dresden verlagert. Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit der spannenden und für die Praxis relevanten Thematik der Bewertung von Brückentragwerken im Bestand. Welche Diskrepanz besteht zwischen Annahmen auf Grundlage von Bestandsunterlagen und tatsächlichen Materialuntersuchungen? Wie sieht ein geeignetes Beprobungskonzept aus? Die Ermittlung welcher Kennwerte ist sinnvoll?

Als Untersuchungsbauwerk diente die Lahntalbrücke bei Limburg (1962–2017), die in den Jahren 2016/17 zurückgebaut wurde, da die Tragfähigkeit infolge starker Verkehrszunahme nicht mehr zu gewährleisten war. Der Rückbau bot hierbei die Möglichkeit das Bauwerk intensiv zu beproben und insgesamt mehr als 260 Bohrkern und mehrere Versuchsbalken zu entnehmen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden an diesen Proben die Materialkennwerte des Bestandsbauwerks ermittelt. Hierzu zählen u. a. die Druck- und Spaltzugfestigkeit, das Kriech- und Ermüdungsverhalten des Betons, die Chloridbeanspruchung und das Veran-

*Within the framework of the endowed professorship for civil engineering (DB Netz AG), the research project “Laboratory Investigations on the Deconstruction of the Lahntal Viaduct” was relocated from Hanover to Dresden this year. The research project deals with the exciting topic of the evaluation of existing bridge structures, which has high relevance for infrastructure maintenance. What is the discrepancy between assumptions based on the original documents and actual material investigations? What does a suitable sampling concept look like? Which characteristic values should be determined?*

*The Lahntal Viaduct near Limburg (1962–2017), which was dismantled in 2016/17 because the load-bearing capacity could no longer be guaranteed due to a strong increase in traffic, served as the case-study structure. The deconstruction provided the opportunity to intensively sample the structure and to take a total of more than 260 cores and several test beams. Within the scope of the research project, the material parameters of the existing structure are determined on these samples. These include the compressive strength, the splitting tensile strength, the creep and fatigue behaviour of the concrete, the chloride penetration test, and the anchorage behaviour of the tendons*



kerungsverhalten der Spannglieder sowie der Zustand von Spanngliedern und Hüllrohren. Begleitend wurden zerstörungsfreie Prüfmethoden, wie Rückprallhammerprüfung und Ultraschalllaufzeitmessungen, angewendet und mit den zerstörenden Prüfungen in Zusammenhang gesetzt. Das Ziel ist die Untersuchung und die Bewertung der Bausubstanz, um daraus resultierend Empfehlungen für zukünftige Beprobungen von Brückenbauwerken im Bestand abzuleiten. Die ermittelten Parameter werden statistisch ausgewertet und den normativen Erwartungswerten gegenübergestellt.

Während die Untersuchungen zur Druckfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit und der Chloridbeanspruchung bereits am Institut für Massivbau (IfMa) der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wurden, werden die Positionen Verankerung, Ermüdung und Kriechen in Kooperation mit dem IfMa am Institut für Massivbau (IMB) der TU Dresden bearbeitet. Die ersten Ergebnisse zeigen gegenüber den normativen Erwartungswerten deutlich höhere Festigkeiten und das enorme Potential der experimentellen Ermittlung von Materialparametern von Bestandsbrücken. Diese Erkenntnisse können helfen bestehende Bauwerke vor dem Abbruch zu retten und die Lebensdauer zu verlängern. Zudem ergeben sich zahlreiche neue Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen. Angestrebt wird u. a. ein Ringversuch zur zerstörungsfreien Prüfung.

*as well as the condition of tendons and ducts. Accompanying non-destructive testing methods, such as rebound hammer testing and ultrasonic transit time measurements, were used and related to the destructive tests. The aim is to investigate and evaluate the existing structure to derive recommendations for the sampling of existing bridge structures in the future. The determined parameters are statistically evaluated and compared to the normative expected values.*

*While the investigations on compressive strength, split tensile strength and chloride stress have already been carried out at the Institute of Concrete Construction (IfMa) of Leibniz Universität Hannover, the anchorage, fatigue and creep behaviour are being worked on in cooperation with IfMa at the Institute of Concrete Structures (IMB) of the Technische Universität Dresden. The first results show significantly higher strengths compared to the normative expected values and the enormous potential of the experimental determination of material parameters of concrete bridges. These findings can help to save existing structures from demolition and to extend their service life. Besides, there are numerous new starting points for further investigations. Among other things, a round-robin test for non-destructive testing methods is planned.*



Prüfkörper im Drei-Punkt-Biegeversuch | *Specimen before three-point bending test* | Photo: Dominik Mielke

► **Titel | Title**

Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke

*Laboratory investigations on the deconstruction of the Lahntal Viaduct*

► **Förderer | Funding**

DEGES (Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH)

► **Zeitraum | Period**

02.2018 – 12.2020

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributors**

Daniel Gebauer, M. Sc.  
Raúl Enrique Beltrán Gutierrez, M. Sc.  
Max Herbers, M. Sc.

► **Projektpartner | Project partner**

Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover



Die Marienbrücke in Dresden, Beispiel einer Eisenbahngewölbebrücke | *The Marienbrücke in Dresden, example of an arched railway bridge* |  
Photo: Tobias Gestrich

## EISENBAHNBRÜCKEN – DENKMALE IM NETZ

### *RAILWAY BRIDGES – MONUMENTS IN THE NETWORK*

Ziel des Projektes ist die interdisziplinäre Erforschung der Entwicklung des Eisenbahnbrückenbaus in der Phase der Hochmoderne (1880–1940) als Gegenstand der Bautechnikgeschichte und der Denkmalpflege. Dadurch wird die Grundlage für die systematische Bewertung von Eisenbahnbrücken als denkmalwerte Kulturdenkmale verbessert und deren Entwicklung zu „Denkmälern im Netz“ dargestellt. Diese Untersuchung wurde nach dem bisherigen Stand der Forschung und in der denkmalpflegerischen Praxis noch nicht umfassend durchgeführt.

Das übergreifende infrastrukturelle Eisenbahnnetz hat weitgehende Auswirkungen auf die Stadt-, Siedlungs- und Landschaftsplanung und greift dadurch tief in die kulturhistorischen Entwicklungen der Moderne ein. Da Eisenbahnbrücken wichtige Teile dieses Netzes sind, sollen repräsentative Beispiele aus den heutigen Bundesländern Niedersachsen und Sachsen untersucht werden. Dabei wird das einzelne Bauwerk als Element der dynamischen Entwicklung des komplexen Netzwerks „Eisenbahn“ verstanden. Durch die Netzbeachtung wird eine grundlegend neue Heran-

*The aim of the project is the interdisciplinary research of the development of railroad bridge construction in the period of High Modernism (1880–1940) as a subject of the history of construction technology and monument preservation. This will improve the basis for the systematic evaluation of railroad bridges as cultural monuments worth preserving and demonstrate their development into “monuments in the railway network”. This investigation has not yet been carried out comprehensively according to the current state of research and in practice of monument preservation.*

*The overarching infrastructural railway network has far-reaching effects on urban, settlement and landscape planning. It is deeply affecting the cultural-historical developments of the modern age. Because railway bridges are important parts of this network, representative examples from the present-day states of Lower Saxony and Saxony will be examined. The individual structure is understood as an element of the dynamic development of the complex “railway” network. The network perspective allows a fundamentally new approach to monumental objects and an expansion of the term “monument”. This results in the*

gehensweise an die Denkmalobjekte und eine Erweiterung des Denkmalbegriffs erforderlich und möglich. Daraus ergibt sich das übergeordnete Ziel, weitere Bewertungskriterien für die Denkmalwürdigkeit und -fähigkeit von Infrastrukturbauten zu entwickeln.

Zudem sind Eisenbahnbrücken sich stetig verändernde Bauwerke, da ihre Funktionalität und ihr Erhaltungswert durch Instandhaltung, Reparatur und Erneuerung aufgrund erhöhter Anforderungen gesichert werden müssen. Diese Veränderungsgeschichte der Eisenbahnbrücken ist rückblickend Teil des Denkmals und vorausblickend Randbedingung für jedes denkmalpflegerische Konzept. Ein weiterer Schwerpunkt des Forschungsprojektes liegt auf der Erarbeitung eines bautechnikgeschichtlichen Koordinatensystems. Dabei werden insbesondere die bautechnischen, konstruktionsgeschichtlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen in der Zeit der Hochmoderne analysiert, sodass eine Einordnung der Beispielbauwerke in den übergeordneten Gesamtkontext möglich ist.

In diesem Forschungsprojekt werden die bestehenden Kriterien für die denkmalfachliche Beurteilung von Eisenbahnbrücken der Hochmoderne anhand der Forschungsergebnisse geprüft, weiterentwickelt und eine wissenschaftliche Methodik für deren Einordnung entworfen. Als Pilotprojekt konzipiert, zielt es auf eine bundesweite Übertragbarkeit der Ergebnisse für das gesamte Eisenbahn-Netz.

*aim of developing further evaluation criteria for the monument preservation value and capability of infrastructure buildings.*

*Railway bridges are constantly changing structures, as their functionality and preservation value must be secured through maintenance, repair and replacement due to increased requirements. This history of change is, in retrospect, part of the monument and, looking forward, a boundary condition for any monument preservation concept. Another focus of the research project is the development of a coordinate system for the history of construction. The developments in building technology, construction history and society during the period of High Modernism are analysed so that the exemplary buildings can be placed in the overall context.*

*In this research project, the existing criteria for the heritage assessment of high-modern railway bridges will be examined and further developed based on the research results. A scientific methodology for their classification will be developed. As a pilot project, it aims at a nationwide transferability of the results for the entire railway network.*



Geländer auf der Marienbrücke | *Railing on the Marienbrücke* |  
Photo: Tobias Gestrich

- ▶ **Titel | Title**  
Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz  
*Railway bridges – Monuments in the network*
- ▶ **Förderer | Funding**  
Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2255
- ▶ **Zeitraum | Period**  
10.2020 – 09.2023
- ▶ **Leiter | Project manager**  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
- ▶ **Bearbeiterin | Contributor**  
Johanna Monka, M.Sc.
- ▶ **Projektpartner | Project partner**  
Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege,  
Hannover



Belastungsfahrzeuge auf der Brücke im Rahmen der Probebelastung | Loading vehicles on the bridge within the load test | Photo: Oliver Steinbock

## BELASTUNGSPROBE FÜR CARBONBETON IM BRÜCKENBAU

### LOAD TEST FOR CARBON REINFORCED CONCRETE IN BRIDGE CONSTRUCTION

Das Vorhaben C3-V1.2 „Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen“ war eines der zentralen Projekte im Rahmen des Bauforschungsprojektes C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite und hatte zum Ziel, einen ersten Vorschlag für ein Regelwerk zu Carbonbeton zu liefern. Unabhängig davon bestand ebenfalls von Anfang an das Bestreben, die erarbeiteten Empfehlungen auch in der Praxis umzusetzen.

So war es vorgesehen, ein Brückenbauwerk mit Carbonbeton zu verstärken. Dies wurde nach einer langen Vorlaufzeit in Abstimmung mit den Baubehörden im Sommer 2020 erreicht und erfolgreich umgesetzt. Im Konkreten wurde dafür eine Plattenbrücke mit Carbonbeton ertüchtigt. Das Bauwerk liegt im sächsischen Kleinsaubernitz im Landkreis Bautzen. Die in den 1950er Jahren errichtete Brücke mit einer Spannweite von ≈ 9 m überquert die Staatsstraße S109 über das Gewässer „Altes Fließ“. Aufgrund der Nutzung als Ausweichroute der benachbarten BAB A 4 sowie der örtlich ansässigen Firmen, ist das Bauwerk einer starken Verkehrsbelastung ausgesetzt. Um dem erhöhten Verkehrsaufkommen gerecht zu werden und das Bauwerk noch weitere Jahre

*The project C3-V1.2 “Verification and testing concepts for standards and approvals” was one of the vital ones within the construction research project C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite. It aims for the first suggestion of technical regulations for carbon reinforced concrete. Additionally, there was an early ambition to realize these recommendations within a real project.*

*Therefore, the strengthening of a bridge construction with carbon reinforced concrete was intended. In summer 2020, after a long time of coordination with the building authorities, this strengthening was achieved and successfully implemented. The construction, a slab bridge, is located at Kleinsaubernitz, Saxony, in the county Bautzen. The bridge of the street S 109, built in the 1950s, crosses the watercourse “Altes Fließ” with a span of approximately nine meters. The road serves as an alternative route for the nearby federal highway BAB A 4, as well as a connection to local companies; therefore, the traffic load is comparatively high. To be able to use the existing construction for more years under a rising amount of traffic, the awarding authority, the Landesamt für Straßenbau und Verkehr (LASUV), represented by the LIST Gesellschaft für Verkehr-*

im Bestand halten zu können, wurde vom Bauherren und Projektpartner, dem Landesamt für Straßenbau und Verkehr (LASUV) vertreten durch LISt Gesellschaft für Verkehrswesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH, eine Erhöhung der Brückenklasse angestrebt. Die Brückenklasse beschreibt die zulässige Belastung durch den Schwerverkehr und ist nun uneingeschränkt. Dies konnte mit der ausgeführten Carbonbetonverstärkungsmaßnahme mit einer Schichtstärke von lediglich 20 mm und vier Lagen Carbonegelege realisiert werden.

Aufgrund der Erstanwendung im Brückenbau war eine Zustimmung in Einzelfall (ZiE) zu erwirken, in der zu großem Teil auf die Ergebnisse des Vorhabens C3-V1.2 zurückgegriffen werden konnte. Ergänzt wurden Untersuchungen an Großbauteilen, die die Wirksamkeit der Verstärkungsschicht auch unter zyklischer Belastung zeigten. Einerseits im Vorhaben ohnehin vorgesehen und ebenfalls im Rahmen der ZiE gefordert, war die Wirksamkeit der Verstärkung am Bauwerk in situ zu zeigen. Hierzu wurde das Tragwerk in Kooperation mit der MFPA Leipzig einer Probelastung unterzogen, die über das bisherige Lastniveau hinausging. Konkret wurde das Tragwerk mit zwei Mobilkränen (je 36 t) belastet. Das Tragwerk wies hierbei keinerlei Auffälligkeiten auf und verhielt sich wie prognostiziert. Weiterhin zeigte das Beispiel die möglichen Vorteile von Carbonbetonverstärkungen im Bereich des Brückenbaus. So konnte die Verstärkungsmaßnahme, inklusive Untergrundvorbereitung, Ausführung der Verstärkungsmaßnahme und Nachbehandlung innerhalb von drei Wochen durchgeführt werden. Die Ausführungen in der Sommerferienzeit sowie die kurze Sperrzeit während der Baumaßnahme reduzierten die Verkehrseinschränkungen auf ein Minimum.



Verstärkungsarbeiten mit Carbonbeton an der Brückenunterseite | Strengthening with carbon reinforced concrete at the bottom of the superstructure | Photo: Oliver Steinbock

*swesen und ingenieurtechnische Dienstleistungen mbH strived for an upgrade in a higher bridge class. The bridge class defines the permitted capacity for trucks and, after the strengthening, is now unlimited. This was made possible by a strengthening of carbon reinforced concrete with a thickness of 20 mm and four layers of carbon reinforcement.*

*It was the first application in bridge construction, therefore it was necessary to obtain a "Zustimmung in Einzelfall" (ZiE). Based on C3-V1.2 and the research on large structural members, the durability of the strengthening against cyclic load was proved. Additionally, the durability was also demonstrated by a test loading in-situ as postulated in the ZiE, and planned within the project. In cooperation with MFPA Leipzig, the bridge was loaded by two mobile cranes à 36 t, which was more than the previous load level. The superstructure works as predicted. Therefore, this example shows the possible advantages of strengthening structures with carbon reinforced concrete in the field of bridge constructions. In just three weeks, the strengthening measures were completed, including foundation and groundworks, strengthening construction, and post-assessment. The construction work was carried out during the summer holiday period, and the short closure period during the construction work reduced the traffic restrictions to a minimum.*

#### ► Titel | Title

TP C3-V1.2-I-a: Erstellung und Überprüfung von Sicherheits- und Bemessungskonzepten für Carbonbeton zur Erstellung eines normativen Regelwerkes im Verbundvorhaben C3-V1.2: Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen

*TP C3-V1.2-I-a: Development and review of design and safety concepts for carbon concrete to formulation standards as part of the joint research project C3-V1.2: Verification and testing concepts for standards and approvals*

#### ► Förderer | Funding

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

#### ► Zeitraum | Period

01.2016 – 12.2020

#### ► Verbundvorhabenleiter | Joint research project leader

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

#### ► Leiter Teilvorhaben | Subproject manager

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

#### ► Bearbeiter | Contributors

Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Karoline Holz, Dipl.-Ing. Angela Schmidt, Dipl.-Ing. Kristina Farwig

#### ► Projektpartner | Project partners

17 Partner, davon 7 aus der Forschung, 2 Verbände und 8 Firmen



Statischer Versuchsaufbau mit Dehnkörper | Static test set-up with a tension-strain test element | Photo: Enrico Baumgärtel

## TEXTILBEWEHRTER ORTBETON FÜR BETONFAHRBAHNEN

### TEXTILE REINFORCED CONCRETE AS A BASIS FOR A JOINTLESS SURFACE OF CONCRETE ROADWAYS

Das, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), begonnene Projekt untersucht die Überbrückung von Längs- und Querfugen in Betonfahrbahndecken. In diesem Forschungsvorhaben wird eine Methode entwickelt, auf eine Altbetonschicht eine 50–70 mm starke, mit Carbonbeton verstärkte, fugenfreie Instandsetzungsschicht aufzubringen. Hauptgrund für die Verwendung von textiler Bewehrung ist die Rissbreitenbeschränkung sowie auch die Aufteilung von einzelnen Rissen und Fugen im Altbeton auf viele kleinere Risse in der Aufbetonschicht.

Das Vorhaben wird in Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die im Projekt C3-V4.12 gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für das jetzige Forschungsprojekt. Um eine Aussage über die Materialkombinationen treffen zu können, wurden am Institut für Massivbau Dehnkörper mit unterschiedlichen Parametern bis zum Versagen untersucht.

*The project, which was started on behalf of the Federal Highway Research Institute (BAST), investigates the bridging of longitudinal and transverse joints in concrete road pavements. In this research project, a method is being developed to apply a 50–70 mm thick, joint-free repair layer reinforced with carbon concrete to an old concrete layer. The main reason for the use of textile reinforcement is the crack width limitation and the distribution of individual cracks and joints in old concrete to many smaller cracks in the layer of concrete on top.*

*The research project is carried out in cooperation with the Ruhr-University Bochum. The knowledge gained in project C3-V4.12 "Carbon concrete for the jointless repair of damaged concrete road surfaces" formed the basis for the current research project. To be able to make a statement about the material combinations, the Institute of Concrete Structures examined expansion bodies with different parameters up to failure.*

Der Fokus der Versuche lag auf der Sicherstellung der technischen Realisierbarkeit in der Praxis und der Entwicklung eines möglichst feinen Rissbildes. Zur Bestimmung der Rissbreiten sowie der Rissverteilung wurden Probekörper mit zwei unterschiedlichen Längen hergestellt, die dafür anschließend bei der Durchführung von statischen und dynamischen Versuchen verwendet wurden. Weiterhin wurde die Rissbildentwicklung bei Temperaturen zwischen  $-20\text{ °C}$  und  $60\text{ °C}$  untersucht. Im Messbereich der statischen Dehnkörper traten 5–6 Risse auf. Durch die Messung der Dehnung konnte so eine mittlere Rissbreite zwischen 0,56 und 0,72 mm ermittelt werden. Einen signifikanten Einfluss der Temperatur auf die Rissverteilung konnte während der Versuche nicht festgestellt werden. Die Bruchlast war bei Temperaturen von  $-20\text{ °C}$  am größten.

Die dynamischen Versuche sollen Aussagen über das Ermüdungsverhalten und das Rissbild zulassen. Die Tests fanden bei  $20\text{ °C}$  und  $60\text{ °C}$  statt. Eine Untersuchung bei  $-20\text{ °C}$  war nicht möglich, da eine konstante Kühlung der Probekörper nicht sichergestellt werden konnte. Bei den bisher durchgeführten dynamischen Versuchen stellte sich ebenfalls ein gleichmäßig verteiltes, feines Rissbild ein. Eine genauere Auswertung steht noch aus.



Dynamischer Versuchsaufbau mit Dehnkörper | Dynamic test set-up with a tension-strain test element | Photo: Enrico Baumgärtel

*The focus of the tests was to ensure technical feasibility in practice and to develop the finest possible crack pattern. To determine crack widths and crack distribution, test specimens with two different lengths were produced. The static tests carried out served, in particular, to be able to make a statement about the crack distribution and crack widths. Furthermore, the crack development at temperatures between  $-20\text{ °C}$  and  $60\text{ °C}$  was investigated. In the measuring range of the static expansion elements, 5–6 cracks occurred. By measuring the elongation an average crack width between 0.56 and 0.72 mm could be determined. A significant influence of temperature on the crack distribution could not be determined during the tests. The breaking load was highest at temperatures of  $-20\text{ °C}$ .*

*The dynamic tests should allow statements about the fatigue behaviour and the crack pattern. In contrast to the static strain bodies, the dynamic test specimens are only examined at  $20\text{ °C}$  and  $60\text{ °C}$ . The dynamic tests carried out so far also showed an evenly distributed, fine crack pattern. A more precise evaluation of the dynamic expansion bodies is still pending after the tests have been fully carried out and completed.*

► **Titel | Title**

Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen

*Textile reinforced concrete as a basis for a jointless surface of concrete roadways*

► **Förderer | Funding**

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

► **Zeitraum | Period**

05.2019 – 03.2021

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

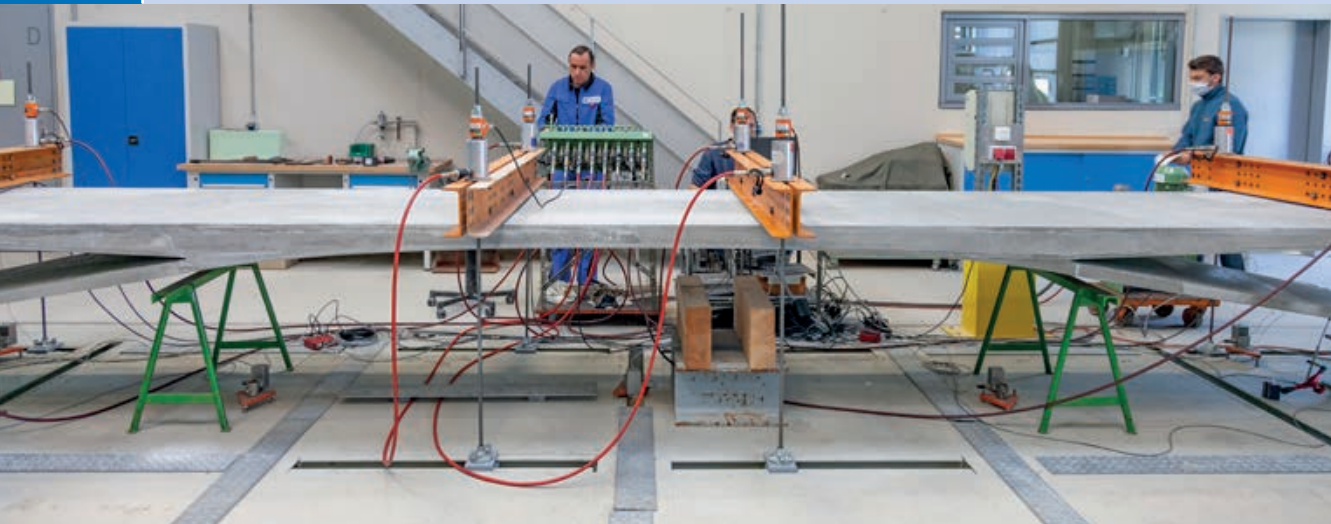
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Enrico Baumgärtel

► **Projektpartner | Project partner**

Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum



Belastungsversuch des Testexemplars der Carbonbetonbrücke | Load test of the test sample of the carbon concrete bridge | Photo: Stefan Gröschel

## BEREIT FÜR DIE KÜR READY FOR THE SHOW

Im Zuge der Modernisierung des Deutschen Museums in München wird zukunfts-fähigen Innovationen mehr Raum geboten. Dazu gehört in der Bauingenieurabteilung bald auch eine Ausstellungsbrücke aus Carbonbeton. Ein erstes Exemplar wurde in diesem Jahr im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden hergestellt und erfolgreich getestet.

Die Carbonbetonbrücke ist mit einer Länge von 9,50 m als filigrane Konstruktion aus zwei flach geneigten Stielen und einem dreigeteilten Überbau konzipiert. Die gestalterischen und konstruktiven Möglichkeiten des leichten Bauens mit Beton und Carbonbeton werden vor allem durch die schlanken V-förmigen Stiele und dem Konstruktionsgewicht von lediglich 2,1 t aufgezeigt. Maßgeblichen Anteil dafür haben die kraftflussoptimierte Form und der Sandwichaufbau des Überbaus.

Der dreischichtige Aufbau variiert in der Höhe zwischen 60 und 160 mm. Die zweiachsig gekrümmte Unterseite und die ebene Deckschicht werden aus Carbonbeton von 20 mm Dicke hergestellt. Die Schicht dazwischen besteht aus Infralichtbeton mit einer Dichte von ca. 800 kg/m<sup>3</sup>.

*As part of the modernization of the Deutsches Museum in Munich, more space is being offered to future-oriented innovations. This will soon include an exhibition bridge made of carbon concrete in the civil engineering section. A first sample was manufactured and successfully tested this year in the Otto Mohr Laboratory at Dresden Technical University.*

*With a length of 9.50 m, the carbon concrete bridge is designed as a filigree structure consisting of two gently inclined columns and a three-section superstructure. The design and constructional possibilities of lightweight construction with concrete and carbon concrete are demonstrated above all by the slender V-shaped columns and the construction weight of only 2.1 t. The force-flow-optimized shape and the sandwich structure of the superstructure play a major role in this.*

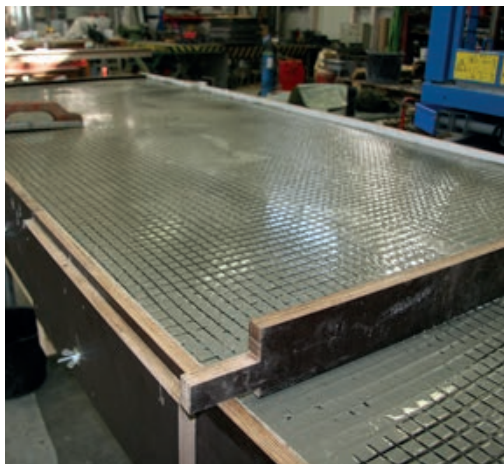
*The three-layer structure varies in height between 60 and 160 mm. The biaxially curved underside and the flat top layer are made of carbon concrete 20 mm thick. The layer in between is made of infralight concrete with a density of approx. 800 kg/m<sup>3</sup>.*



Anhand einer 3D-Modellierung der Brücke wurde die Geometrie hinsichtlich des Lastabtrags und der Konstruktion optimiert. Die Stiele und die unteren Schalen des dreiteiligen Überbaus sind als Fertigteile hergestellt, wohingegen die Aufbetonschichten vor Ort eingebracht werden.

Auf Grundlage des finalen 3D-Modells wurden Schalungen aus gefrästem Sperrholz gefertigt. Um die Montage, das Erscheinungsbild und die Tragfähigkeit der Carbonbetonbrücke sowie einzelner Segmente zu erproben, erfolgte im Laufe des Jahres die Herstellung eines Testexemplars der Brücke im Otto-Mohr-Laboratorium. Dafür wurden die filigranen Elemente auf Holzunterkonstruktionen gelagert, massive Auflager konstruiert und ein höhenverstellbares und horizontal verschiebbares Unterstützungssystem konzipiert. Nach Ausrichtung der fünf Brückensegmente wurde die Randschalung montiert, die Schicht aus Infralichtbeton eingebracht und die Brücke anschließend mit der Deckschicht komplettiert. Nach Absetzen der Unterstützungen, wurde das Verformungsverhalten der Konstruktion unter Gebrauchslast über mehrere Tage dokumentiert und die Brücke schließlich bis zum Bruch geprüft. Die aufgebrachte Last von 4 x 1,5 t übersteigt das 20-fache der geplanten Nutzlast und damit auch alle Erwartungen. Nach der erfolgreichen Generalprobe folgt nun die Kür.

Für Anfang 2021 ist der Aufbau der Ausstellungsbrücke im Deutschen Museum München vorgesehen.



Aufbringen der Deckschicht aus Carbonbeton | Application of the top layer of carbon reinforced concrete | Photo: Marc Koschemann

*Based on the 3D modelling of the bridge, the geometry was optimized in terms of load transfer and design. The columns and the bottom shells of the three-part superstructure are manufactured as precast elements, whereas the top concrete layers are poured on-site.*

*Based on the final 3D model, the formwork was manufactured from milled plywood. To test the assembling, appearance and load-bearing capacity of the carbon concrete bridge and individual segments, a test sample of the bridge was manufactured in the Otto Mohr Laboratory during the year. For this purpose, the filigree elements were supported on wooden substructures, massive supports were constructed and a vertical and horizontal adjustable support system was designed. After alignment of the five bridge segments, the boundary formwork was installed, the layer of infralight concrete was poured and the bridge was then completed with the top layer. After removing the temporary supports, the deformation behaviour of the structure under service load was documented over several days and the bridge was finally tested to failure. The applied load of 4 x 1.5 t exceeded 20 times the planned live load and thus also all expectations. After the successful trial run, the real show is about to begin.*

*The exhibition bridge will be erected at the Deutsches Museum in Munich at the beginning of 2021.*

► **Titel | Title**

Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile

*Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 1542 | Institut für Massivbau, TU Dresden | Deutsches Museum München

► **Zeitraum | Period**

10.2011 – 12.2021

► **Leiter | Project manager**

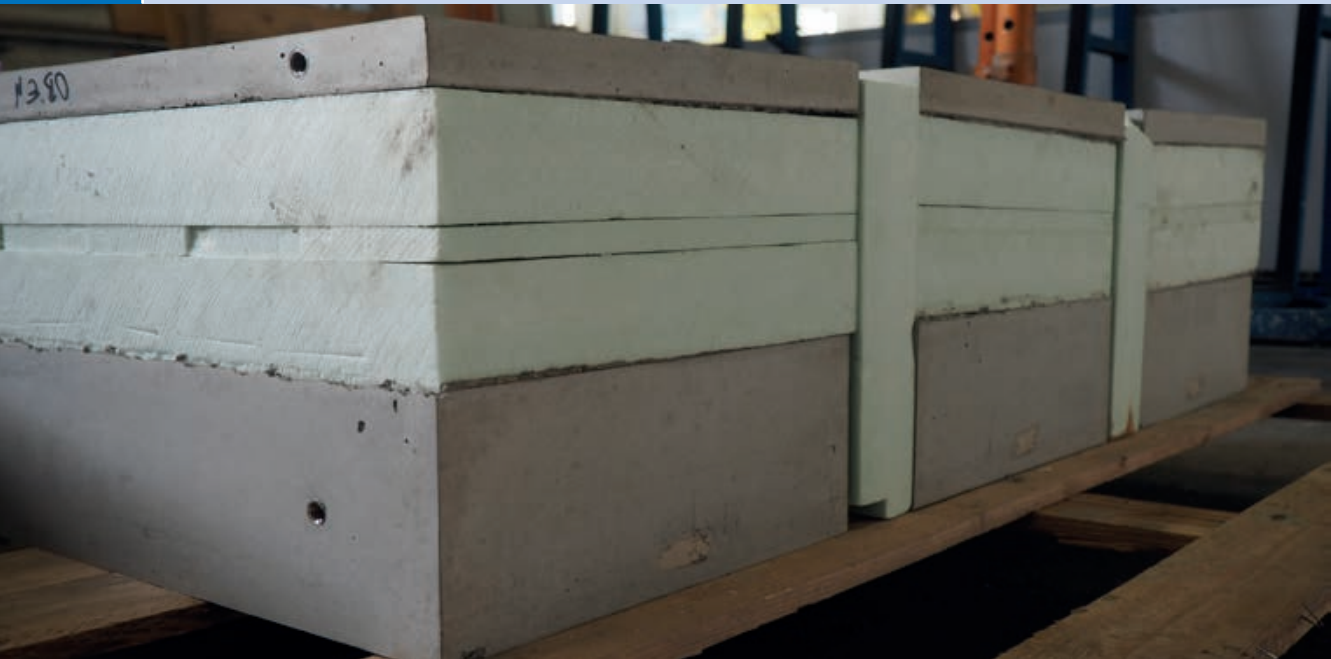
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. Marc Koschemann  
Iurii Vakaliuk M.Sc.

► **Unterstützer | Supporter**

HICONFORM – Freitaler Modellwerkstätten eG | Heidelberger Beton GmbH | Institut für Baustoffe, TU Dresden



Teildemonstratoren einer Doppelwand vor der Prüfung im Labor | Parts of a double wall before their testing in the laboratory | Photo: Juliane Wagner

## DIE SCHLANKE DOPPELWAND AUS CARBONBETON

### DOUBLE WALLS OUT OF CARBON REINFORCED CONCRETE

Der Einsatz von Carbonbewehrung in Neubauteilen nimmt stetig zu. Ein großer Vorteil der Carbonbetonbauweise ist, dass aufgrund der nichtmetallischen Bewehrung die zum Korrosionsschutz notwendige Betondeckung wesentlich minimiert werden kann. Wird Carbonbeton beispielsweise in Wandkonstruktionen eingesetzt, kann somit die Wandstärke wesentlich verringert und Nutzfläche gewonnen werden. Daher hat sich das Vorhaben C3-V4.17 zum Ziel gesetzt, ein Doppelwandsystem aus Carbonbeton zu entwickeln, in dem die Wandschalenstärken auf zwei bis vier Zentimeter verringert werden. Die Herstellung eines solchen Wandsystems soll als Halbfertigteil in einem vollautomatisierten Fertigungsprozess erfolgen.

Eine Doppelwand besteht in der Regel aus mehreren Schichten. Außen befinden sich die im Fertigteilwerk herzustellenden, dünnen Wandschalen. Dazwischen liegt eine Wärmedämmschicht und ein Bereich, welcher später auf der Baustelle mit Ortbeton verfüllt wird. Um die neue Doppel-

*The use of carbon reinforcement in new building components is steadily increasing. A major advantage of carbon reinforced concrete is that the concrete cover required for corrosion protection can be significantly minimized due to the non-metallic reinforcement. If carbon concrete is used in wall structures, for example, the wall thickness can be significantly reduced and usable space gained. Project C3-V4.17 has therefore set itself the goal of developing a double-wall system made of carbon reinforced concrete in which the wall shell thicknesses are reduced to two to four centimetres. Such a wall system is to be manufactured as a semi-finished part in a fully automated production process.*

*A double wall usually consists of several layers. On the outside are the thin wall shells to be produced in the precast plant. Between them are a thermal insulation layer and an area that is later filled with in-situ concrete at the construction site. To be able to prefabricate the new double-wall structure in the precast plant with dimensional accuracy, it*

wandkonstruktion im Fertigteilwerk maßgenau vorfertigen zu können, ist es notwendig, entsprechende Einbauteile, Verbindungsmittel und Prozesse im Vorhaben zu entwickeln, die auf die wesentlich dünneren Wandschalen angepasst sind. Das Hauptaugenmerk lag dabei zunächst auf der Verbindung der beiden Wandschalen. Die Anforderungen an das hier einzusetzende Verbindungsmittel sind vielfältig. So muss dieses zum einen dem Betonierdruck beim Ausbetonieren der Halbfertigteile auf der Baustelle standhalten und einen ausreichenden Verbund in den dünnen Wandschalen sicherstellen. Zum anderen müssen auch Schubkräfte, welche beim Transport der Halbfertigteile zur Baustelle auftreten können, übertragen werden. Im Einbauzustand sollen die Verbindungsmittel zudem nicht mehr sichtbar sein und keine Wärmebrücken hervorrufen.

Um diesen Anforderungen zu genügen, wurden im Vorhaben mehrere Konzepte entworfen. Deren Performance, vor allem bezüglich der Tragfähigkeit, wird nun in Laboruntersuchungen an Teildemonstratoren untersucht. Zunächst war hierfür ein Prüfkonzept und ein geeigneter Versuchsaufbau zu entwickeln. In Schubversuchen wurden schlussendlich die verschiedenen Verbindungsvarianten analysiert. Nach Auswertung der Ergebnisse erfolgte die Konzeptionierung einer originalmaßstäblichen Doppelwand, welche anschließend bezüglich ihrer Herstellbarkeit im Fertigteilwerk und ihrer Tragfähigkeit im Laboratorium auf Herz und Nieren geprüft werden soll.

*is necessary to develop appropriate installation parts, fasteners and processes in the project that are adapted to the much thinner wall shells. The main focus was initially on the connection between the two wall shells. The requirements for the connecting material to be used here are manifold. On the one hand, it must be able to withstand the concreting pressure when the semifinished parts are cast on-site and ensure a sufficient bond in the thin wall shells. On the other hand, shear forces that may occur during transport of the semi-finished parts to the construction site must also be transmitted. When installed, the fasteners should also no longer be visible and should not cause any thermal bridges.*

*To meet these requirements, several concepts were developed in the project. Their performance, especially concerning load-bearing capacity, is now being investigated in laboratory tests on partial demonstrators. First of all, a test concept and a suitable test setup had to be developed. Finally, the various connection variants are to be analyzed in shear tests. After evaluation of the results, a full-scale double wall will be designed, which will then be thoroughly tested in the laboratory concerning its manufacturability in the precast plant and its load-bearing capacity.*



Ein Teildemonstrator im Schubversuch | *A part of a double wall during shear testing* | Photo: Juliane Wagner

► **Titel | Title**

TP C3-V4.17-III – Prüfkonzeptentwicklung für und Kennwertermittlung von Doppelwandsystemen im Verbundvorhaben C3-V4.17: Automatisiertes Doppelwandsystem

*TP C3-V4.17-III: Development of test methods for and determination of characteristic values of double wall systems as part of the joint research project C3-V4.17: Automated double wall system*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

11.2018 – 03.2021

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Juliane Wagner

► **Projektpartner | Project partners**

4 Partner, davon 1 aus der Forschung und 3 Firmen



Herstellungstechnologie bei innenliegender Betonnut zur Verbindung zweier Brettsperrholzwandelemente (zur Beobachtung durch Plexiglas-scheibe) | Production technology with internal concrete groove for connecting two cross laminated timber wall elements (for observation through Plexiglas pane) | Photo: Kristina Farwig

## FILIGRANE CARBONBETONVERBINDUNGEN FÜR BAUELEMENTE AUS HOLZ

### FILIGREE SHEAR CONNECTIONS FOR PRECAST WOOD ELEMENTS MADE OF CARBON REINFORCED CONCRETE

Mit innovativen Verbundbaustoffen wie Carbonbeton werden heutzutage immer schlankere und damit materialeffizientere Konstruktionen ermöglicht. Diese sind sowohl aus ästhetischen als auch aus ökologischen Gründen im Neubau und in der Sanierung gefragt, bedürfen jedoch eines entsprechend hohen Herstellungsaufwands. Alternativ zu Carbonbetonfertigteilen können schlanke, flächige Bauteile mit neuartigen Holzwerkstoffen wie Brettsperrholz als Fertigteile für den Hochbau herstellungs- und materialeffizient erzeugt werden.

Die Verbindungsfuge der Fertigteilelemente stellt jedoch zumeist einen Schwachpunkt hinsichtlich der Tragfähigkeit bei hohen Beanspruchungszuständen dar und kann erst auf der Baustelle über eine Vielzahl von äußerlich sichtbaren, metallischen Verbindungsmitteln generiert werden. Von Architekten und Nutzern gewünschte innenliegende Verbindungen sind bei Wandkonstruktionen aus Brettsperrholz

*Innovative composite building materials such as carbon concrete are nowadays enabling increasingly slender and thus material-efficient structures. These are in demand for both aesthetic and ecological reasons not only in new construction but also in building renovation. Accordingly, a high level of manufacturing effort is required. As an alternative to prefabricated carbon concrete elements, slender flat components can be produced as prefabricated elements for building construction using new types of wood-based materials such as cross-laminated timber in a way that is efficient in terms of both production and materials.*

*However, the connecting joint of the precast elements is usually a weak point in terms of the load-bearing capacity under high stress conditions and can only be generated on the construction site using a large number of externally visible metallic fasteners. In the case of cross-laminated timber wall constructions, the internal connections desired by architects and users can be*

bspw. über Nut-Feder-Systeme realisierbar, die über die gesamte Wandhöhe eingebracht werden müssen. Aufwändig einsetzbare Schwalbenschwanzelemente aus Holz garantieren bei hohen Beanspruchungszuständen keine ausreichende Tragfähigkeit.

Um den Einsatzbereich auf Gebäudeklasse 4 zu erweitern und einen höheren Schubwiderstand zwischen den Wandelementen zu generieren, zeitgleich aber einen hohen Vorfertigungsgrad der Bauelemente im Werk und ein schnelles Zusammenfügen vor Ort zu ermöglichen, wird in diesem Forschungsprojekt eine Verbindungstechnologie entwickelt, bei der Wandkonstruktionen aus Brettsper Holz über eine Betonnut mit zusätzlich innenliegenden Verbindungsmitteln schubsteif verbunden sind. Angelehnt an die klassische Holz-Beton-Verbundbauweise werden bereits bewährte Verbindungsmittel aus Stahl (Verbundschrauben und Lochbleche) in die Holznut im Werk eingebracht und diese mithilfe einer Betonpumpe mit Vergussmörtel verfüllt. Des Weiteren werden textile Gelege in das BSPH unter einem Winkel von 45° eingeklebt und in der Nut mit Beton vergossen. Diese sollen die durch Schubkräfte in der Fuge erzeugten Zugspannungen im Beton aufnehmen. Die Prüfung der Schertragfähigkeit der Verbindung erfolgt in Druck-Scher-Versuchen an 60 cm hohen Probekörpern. Aus den geprüften Verbindungen wird eine leistungsfähige und zugleich baupraktische Variante ausgewählt, die in Versuchen an Großbauteilen zu überprüfen ist und damit als Demonstrator für die neuartige Verbindungstechnologie dienen soll.



Druck-Scher-Versuch am Holz-Beton-Verbundkörper | Compression-shear test on a wood-concrete composite body | Photo: Melchior Deutscher

*realized using tongue-and-groove systems, which have to be installed over the entire height of the wall. Expensive dovetail elements made of wood do not guarantee sufficient load-bearing capacity under high load conditions.*

*In order to extend the range of application to building class 4 and to generate a higher shear resistance between the wall elements, while at the same time enabling a high degree of prefabrication of the building elements in the factory and rapid assembly on-site, a connection technology is being developed in this research project in which wall structures made of cross laminated timber are connected in a shear-resistant manner via a concrete groove with additional internal connecting means. Based on the classic wood-concrete composite construction method, tried-and-tested steel fasteners (composite screws and perforated plates) are inserted into the wood groove in the factory and filled with grout using a concrete pump. Furthermore, textile scrims are glued into the BSPH at an angle of 45° and grouted with concrete in the groove. These are to absorb the tensile stresses in the concrete generated by shear forces in the joint. The shear capacity of the connection is tested in compressive shear tests on 60 cm high specimens. From the tested joints, a high-performance and at the same time construction-practical variant will be selected to be tested in trials on large components and thus serve as a demonstrator for the novel joint technology.*

► **Titel | Title**

Entwicklung einer Verbindungsmitteltechnologie für Brettsper Holz-Wandkonstruktionen mit hohem Schubwiderstand

*Development of a joint technology for cross laminated timber wall constructions with high shear resistance*

► **Förderer | Funding**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR); Forschungsinitiative ZukunftBAU

► **Zeitraum | Period**

12.2018 – 06.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Kristina Farwig

► **Projektpartner | Project Partners**

Auerbach und Hahn GmbH, Wilsdruff | AIB GmbH, Bautzen



Gefaltete Carbonbewehrung zur Verbesserung des Tragverhaltens | *Folded carbon reinforcement to improve load-bearing behaviour* | Photo: Lenne Grundmann

## ORIGAMI MIT CARBON

### ORIGAMI WITH CARBON REINFORCEMENT

Ein wesentlicher Vorteil einer Bewehrung aus Carbon ist deren hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Einflüssen. Insbesondere bei großformatigen Platten führt eine textile Bewehrung im Vergleich zu stabförmigen Bewehrungen zu einer wirtschaftlicheren Fertigung. Parkhausdeckenplatten sind einer hohen Belastung durch Tausalze ausgesetzt, weshalb Carbonbeton hier seine gesamten Vorteile ausspielen kann. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden daher Parkhausdeckenplatten aus Carbonbeton entwickelt. Um die Tragfähigkeit – insbesondere das Verbundtragverhalten sowie die Querkrafttragfähigkeit – im Auflagerbereich der Platten zu verbessern, soll im Endbereich der Platte die Bewehrung umgeformt werden. Doch wie wirksam sind derartige Schlaufen und wie lassen sich diese herstellen?

Mithilfe von experimentellen Untersuchungen am Institut für Massivbau wurden unterschiedliche Konstruktionen zum Verkürzen der Endverankerungslänge und zur Verbesserung

*A major advantage of carbon reinforcement is its high resistance to chemical influences. Particularly in the case of large slabs, textile reinforcement leads to a more economical production compared with bar-shaped reinforcement. Parking garage ceiling slabs are exposed to chemical attack from de-icing salts, which is why carbon concrete can display all its advantages here. As part of the present project, parking garage ceiling slabs made of carbon concrete were therefore developed. To improve the load-bearing capacity – in particular, the composite load-bearing behaviour, as well as the shear load-bearing capacity – the reinforcement, was folded in the form of loops, within the support area of the slabs. But how effective are such loops and how can they be produced?*

*With the help of experimental investigations at the Institute of Concrete Structures, different constructions were designed to shorten the end anchorage length and to improve the shear force bearing capacity in the support area through loops. Four different reinforcement designs were subsequently manufactured in the Otto Mohr*

der Querkrafttragfähigkeit im Auflagerbereich mittels Schlaufen entworfen. Vier verschiedene Bewehrungskonstruktionen wurden im Anschluss im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden für die experimentellen Untersuchungen hergestellt. Die Herstellung der Schlaufen stellte dabei eine besondere Herausforderung dar. So sind die konventionell erhältlichen Bewehrungstextilien im Regelfall getränkt. Diese Tränkung verbessert zwar den inneren sowie äußeren Verbund der Bewehrung, verhindert jedoch das freie Formen des Bewehrungstextils. Aufgrund dessen wurde ein Bewehrungstextil mit einem neuartigen Beschichtungssystem eingesetzt. Bei dessen Erwärmung wird die Steifigkeit des Textils reduziert, wodurch es weich und formbar wird. Nach dem Abkühlen erhärtet das Beschichtungssystem, sodass das Textil in seiner Form verbleibt und die ursprünglichen inneren und äußeren Verbundeigenschaften zurückerhält. Durch diese neue Technologie wurde eine wesentliche Hürde zur Herstellung gekrümmter, beschichteter Bewehrungstextilien überwunden.

Die so geformten Schlaufen wurden beim Projektträger Dressler Bau GmbH in 9 cm starke Platten einbetoniert. Anschließend wurden die Platten mithilfe eines Vier-Punkt-Biegeversuchs getestet. Dabei konnte ein positiver Effekt der Schlaufen auf das Querkrafttragverhalten nachgewiesen werden. Im Projektverlauf sollen noch weitere Herstellmethoden untersucht und validiert werden.



4-Punkt-Biegeversuch einer Platte mit schlaufenförmiger Carbonbewehrung | Bending test of a slab with loop-shaped carbon reinforcement | Photo: Lenne Grundmann

*Laboratory of the TU Dresden for experimental investigations. The manufacture of the loops presented a particular challenge. The conventionally available reinforcement textiles are impregnated and coated to improve the internal and external bond of the reinforcement. However, the impregnation and coating hinder the free forming of the reinforcement textile. For this reason, a reinforcement textile with a novel coating system was used. When heated, the stiffness of the textile is reduced, making it soft and malleable. After cooling, the coating system hardens so that the textile retains its shape and regains its original internal and external composite properties. This new technology overcame a major hurdle to producing curved coated reinforcing textiles.*

*The loops formed in this way replaced the straight anchorage length in the reinforcement used for the fabrication of 9 cm thick concrete slabs. The test elements were produced at the facilities of the project partner Dressler Bau GmbH and later tested at the OML using a four-point bending test. A positive effect of the loops on the shear force bearing behaviour was demonstrated. Further manufacturing methods are to be investigated and validated in the course of the project.*

► **Titel | Title**

TP C3-V4.19-III: Untersuchungen zum Verbundverhalten und der Endverankerung von Carbonbewehrungen im Verbundvorhaben C3-V4.19: Carbonbewehrte Parkhausdeckenplatten

*TP C3-V4.19-III: Investigations of the bond behaviour and the anchoring of carbon reinforcements as part of the joint research project C3-V4.19 Carbon reinforced parking garage ceiling slabs*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

04.2018 – 02.2021

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Dominik Schlüter

► **Projektpartner | Project partners**

Dreßler Bau GmbH, Stockstadt | Institut für Massivbau, TU Darmstadt



Lagerung der Carbonbetonprobekörper am Freibewitterungsstand des Instituts für Korrosionsschutz Dresden | Storage of the carbon concrete specimens at the outdoor weathering stand of the Institute for Corrosion Protection Dresden | Photo: Jürgen Triebert

## MECHANISCHE VERANKERUNG VON CRC

### MECHANICAL ANCHORAGES FOR CRC

Ein Hauptziel des Vorhabens ist die Entwicklung von mechanisch wirkenden Verankerungsstrukturen für Carbonbeton (CRC). Daher wurden Maßnahmen und deren Einfluss auf das Verbundverhalten erforscht, mit denen der Verbund zwischen Bewehrungstextil und Beton gezielt verbessert und die Verankerungslänge verringert werden kann. Eine Variante war, Polymerüberzüge und kleinteilige Verankerungsstrukturen zu applizieren. Des Weiteren wurden gekrümmte und geformte Gelegestrukturen untersucht, um eine mechanische Verankerung der textilen Carbonbewehrung zu erreichen. Experimentell konnte dadurch eine Laststeigerung nach Aktivierung des umgeklappten Gelegebereichs im Endverankerungsbereich nachgewiesen werden. Bei diesen Tests kamen Gelege zum Einsatz, deren Polymertränkung speziell für die Verbundanforderungen und die thermische Formbarkeit des Textils entwickelt wurden. Als Ergebnis der unterschiedlichen Versuche wird das größte Potential zur Verbundoptimierung in der Ausnutzung des mechanischen Formschlusses der Garnform in Verbindung mit einer ausreichend steifen Polymertränkung liegt.

*A main goal of the project is the development of mechanically acting anchorage structures for carbon fibre reinforced concrete (CRC) with high effectiveness to improve the bond between the carbon textile and the concrete and to reduce the anchorage length. One approach were polymer coatings and small anchoring structures applied on the yarn. Furthermore, curved and shaped grid structures were investigated, which were used to mechanically anchor textile carbon reinforcement. In tests with modified ends of grids in the end anchorage area, a load increase was measured after activation of the folded area of the grid. For folding, a polymer impregnation was specifically developed with regard to the bond requirements and the thermal formability of the textile. The tests showed that the greatest potential for optimizing the bond lies in exploiting the mechanical form-fit of the yarn shape and ensuring this through sufficiently stiff polymer impregnation.*

*The 2<sup>nd</sup> research aspect of the project is corrosion in CRC construction. Therefor, specimens were made of the hybrid material combination concrete-metal-carbon and exposed to different environmental stresses. The focus was explicitly*



Der zweite Forschungsaspekt des Vorhabens ist das Korrosion im Carbonbetonbau. Hierfür wurden Proben mit einer anwendungsnahen Werkstoffkombination in hybrider Beton-Metall-Carbon-Bauweise hergestellt und unterschiedlichen Umweltbelastungen ausgesetzt. Das Hauptaugenmerk lag explizit auf der Kontaktkorrosion zwischen den metallischen Elementen und Carbonbewehrung. Mittels Schnellcarbonatisierung wurden bspw. Proben in beschleunigt gealtert und dann sowohl wechselnden Beanspruchung in einer Klimakammer als auch einer realen Freibewitterung ausgesetzt. Unter bestimmten Bedingungen konnte eine Korrosion an den metallischen Elementen beobachtet werden. Stark ausgeprägt war diese v. a. bei Proben mit unlegierten Elementen und hoher Chloridbeanspruchung sowie bei carbonatisiertem Beton. Beschleunigend wirkten Risse und Poren im Beton sowie der direkte Kontakt von Metall mit der deutlich edleren Carbonbewehrung. Vereinzelt kam auch eine Korrosion an Edelstahlelementen vor. Anhand der Ergebnisse lässt sich für die geprüften Werkstoffkombinationen schlussfolgern, dass Kontaktkorrosion der metallischen Elemente durch konstruktive Maßnahmen verhindert werden kann und sollte. Dichte, hochfeste Betone können die Korrosionsprozesse deutlich verlangsamen, da sie das Eindringen von Feuchtigkeit und anderen Substanzen erschweren. Das Verhindern des direkten Kontakts ist aber in jedem Fall sinnvoll und zum Erhalt der Dauerhaftigkeit notwendig.



Umkappen des Geleges im Endbereich zur mechanischen Verankerung mittels Thermoformen | *Folding down the grid in the end area for mechanical anchoring by thermoforming* | Photo: Maximilian May

*on contact corrosion between metallic elements and carbon reinforcement. With various methods, such as rapid carbonation, the specimens were accelerated aged. These specimens were subjected to alternating stresses in a climatic chamber as well as to real conditions of outdoor weathering. After the corrosion tests, the specimens were broken up and the corrosion progress on the metallic elements was documented. Under certain conditions, corrosion could be observed on the metallic elements, particularly on specimens with unalloyed elements and a high chloride exposure as well as carbonated concrete. Cracks and pores in the concrete as well as the direct contact of metal with the much more noble carbon reinforcement had an accelerating effect. Corrosion of stainless steel elements was also observed in some cases. Based on the results, it can be concluded for the tested material combinations that contact corrosion of the metallic elements can and should be prevented by design measures. Dense, high-strength concretes can significantly slow down corrosion processes by making it more difficult for moisture and other substances to penetrate. However, the prevention of direct contact makes sense in any case and is necessary to maintain durability.*

► **Titel | Title**

TP C3-V3.4-I: Untersuchungen zum Verbundverhalten mit mechanisch wirkenden Bewehrungsstrukturen im Verbundvorhaben C3-V3.4: Mechanische Verankerung

*TP C3-V3.4-I: Investigations of the bond behaviour with mechanically acting reinforcement structures as part of the joint research project C3-V3.4: Mechanical anchoring*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

04.2018 – 12.2020

► **Leiter | Project manager**

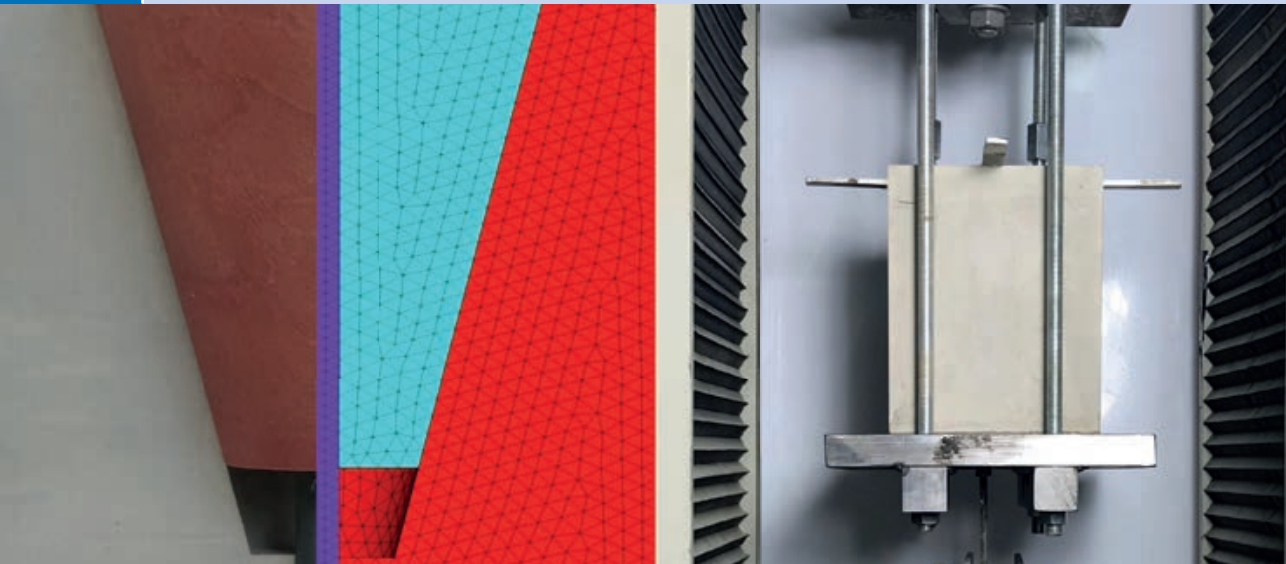
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. Maximilian May  
Dr.-Ing. Tilo Senckpiel-Peters

► **Projektpartner | Project partners**

3 Partner, davon 1 aus der Forschung und 2 Firmen



Numerische (links) und experimentelle (rechts) Untersuchungen an Verankerungen von FVK-Stäben | Numerical (left) und experimental (right) investigations on FRP anchorages | Graphic, Photo: Conrad Pelka

## GUT VERANKERT WELL ANCHORAGED

Faserverbundkunststoffe (FVK) werden in vielen Bereichen der Technik äußerst erfolgreich eingesetzt und ermöglichen auch im Bauwesen besonders effiziente, leichte und wirtschaftliche Bauteile. So zeichnen sich FVK-Bewehrungen durch hohe Zugfestigkeiten, Korrosionsunempfindlichkeit und sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aus. Insbesondere bei schlanken, hoch beanspruchten Betonbauteilen sowie in aggressiver Umgebung können FVK-Bewehrungen sinnvoll eingesetzt werden.

Um das Potential dieser innovativen Werkstoffe nutzen zu können, sind experimentell verifizierte Kenntnisse zum Verbundtragverhalten erforderlich, um Verankerungs- und Übergreifungslängen sicher und wirtschaftlich bemessen zu können. Zur Verankerung von FVK-Spanngliedern wird zudem eine Technologie benötigt, die das schnelle Verankern auf der Baustelle zulässt. Eine sichere und effiziente Verankerung von (vorgespannten) FVK-Bewehrungen ermöglicht es weitere Anwendungsgebiete für diese korrosionsbeständige und äußerst zugfeste Art des Bewehrens zu erschließen.

*Fibre composite plastics (FRP) are used extremely successfully in many areas of technology and also enable particularly efficient, lightweight and economical components in the construction industry. FRP reinforcements are characterised by high tensile strength, corrosion resistance and very low thermal conductivity. Thus, FRP reinforcements can be used especially for slender, highly stressed concrete components and in aggressive environments.*

*To be able to use the potential of these innovative materials, experimentally verified knowledge of the composite load-bearing behaviour is required to design anchorage and overlap lengths safely and economically. For the anchoring of FRP tendons, technology is also required which allows for quick anchoring on the construction site. Safe and efficient anchoring of (pre-stressed) FRP reinforcements opens up further areas of application for this corrosion-resistant and extremely high tensile strength type of reinforcement.*

*In this research project new, applicable anchorage possibilities for FRP reinforcement and pre-stressing bars are therefore being developed.*

In diesem Forschungsvorhaben werden daher neuartige, praxistaugliche Verankerungsmöglichkeiten für Bewehrung und Spannstäbe aus FVK entwickelt. Hierzu werden experimentelle und numerische Untersuchungen an Bewehrung aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) sowie an Spannstäben aus kohlefaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) durchgeführt.

Bei der schlaffen GFK-Bewehrung liegt der Fokus auf der Untersuchung und Optimierung des Verbundverhaltens, um vergleichsweise kurze Verankerungs- und Übergreifungslängen sicher realisieren zu können. Verglichen mit Verankerungs- und Übergreifungsbe-reichen von Stabstahlbewehrung sind diese häufig überdimensioniert, was einen wirt-schaftlichen Einsatz von FVK-Bewehrung und mitunter die konstruktive Durchbildung erschwert.

Für CFK-Spannglieder wird eine neuartige lokale Verankerung durch einen Polymerwerk-stoff entwickelt und untersucht. Der Einsatz herkömmlicher Stahlkeile, wie sie bei der Ver-ankerung von Stahlspanngliedern eingesetzt werden, ist aufgrund der Querdruckempfind-lichkeit anisotroper CFK-Spannstäbe nicht ef-fizient möglich. Vor diesem Hintergrund wird ein „weicherer“ Polymerwerkstoff zum Ver-keilen der Stäbe eingesetzt und die Quer-pressung an der Verankerungsstelle soweit reduziert, dass ein Versagen der Stäbe aus-geschlossen werden kann. Gleichzeitig kann eine hohe Verankerungswirkung erzielt und eine hohe Praktikabilität der Verankerungs-technologie auf der Baustelle gewährleistet werden.



Experimentelle Untersuchungen an FVK-bewehrten Platten | Experimental investigations on FRP-reinforced panels | Photo: Katarzyna Zdanowicz

*For this purpose, experimental and numerical investigations are carried out on reinforcement made of glass fibre reinforced plastics (GFRP) and on prestressing bars made of carbon fibre reinforced plastics (CFRP).*

*In the case of GFRP reinforcement, the focus is on the investigation and optimisation of the composite behaviour to be able to reliably realise comparatively short anchorage and lap lengths. Compared to anchoring and lapping of steel bar reinforcement, these are often oversized, which makes the economic use of FRP reinforcement and the structural design more difficult.*

*For CFRP tendons, a new type of local anchoring using a polymer material is being developed and investigated. The use of conventional steel wedges, as used for anchoring steel tendons, is not efficiently possible due to the transverse pressure sensitivity of anisotropic CFRP tendons. Against this background, a “softer” polymer material is used to wedge the bars and to reduce the transverse pressure at the anchoring point to such an extent that a failure of the bars can be excluded. At the same time, a high anchoring effect can be achieved and high practicability of the anchoring technology on the construction site can be guaranteed.*

► **Titel | Title**

Entwicklung neuartiger praxistauglicher Verankerungs- und Übergreifungslösungen von Bewehrung aus Faserverbundkunststoff

*Development of new applicable anchorage and lap solutions for fibre composite reinforcement*

► **Förderer | Funding**

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR); Forschungsinitiative Zukunft Bau

► **Zeitraum | Period**

05.2019 – 12.2021

► **Leiter | Project manager**

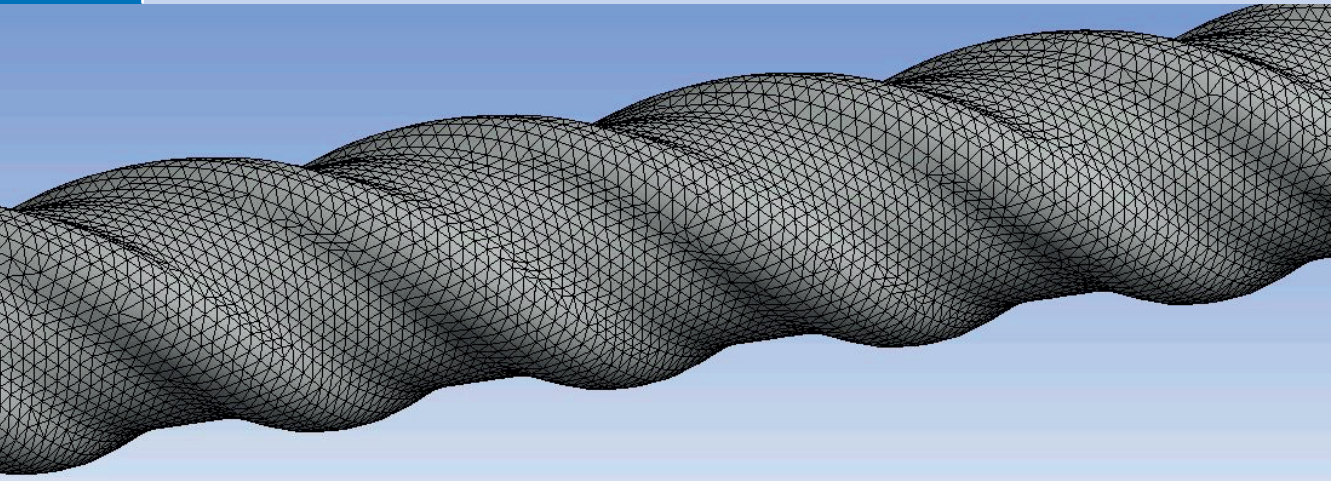
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiterin | Contributor**

Marina Stümpel, M.Sc.

► **Projektpartner | Project partners**

Bauhaus-Universität Weimar, Professur Bauchemie und Polymere Werkstoffe | HALFEN GmbH, Langenfeld



FE-Modell des helixförmigen Carbonstabs | FE-model of the helical carbon rebar | Graphic: Peter Betz

## ENTWICKLUNG NEUER CARBONSTÄBE

### DEVELOPMENT OF CARBON REBARS

Neben den textilen Gelegen aus Carbon haben sich auch nichtmetallische Stäbe mit hohen Tragfähigkeitspotentialen als mögliche Bewehrungsalternative zu den herkömmlichen Stahlstäben hervorgetan. Wie bei den Carbonlegen können die Materialeigenschaften zwischen den verschiedenen Carbonstäben sehr stark schwanken, bedingt durch unterschiedliche Herstellverfahren, Tränkungen oder Geometrien. Besonders bei den möglichen Oberflächenausbildungen, beispielsweise nachträglich aufgebrachte oder eingefräste Profilierungen, variieren die Stäbe deutlich stärker als dies bei den verschiedenen Gelegen der Fall ist. Diese Maßnahmen dienen dazu, den Verbund zwischen dem Carbonstab und der Betonmatrix zu verbessern und damit die Tragfähigkeit der Bewehrung im Bauteil zu steigern. Zu beachten bei der Entwicklung einer solchen verbundverbessernden Maßnahme ist das bei Carbonwerkstoffen vorliegende anisotrope Materialverhalten. Zusätzlich, zu den aus dem Stahlbetonbau bekannten Verbundversagensarten, kann es auch zu einem Abscheren der Carbonprofilierung kommen, welches überwiegend durch die Scherfestigkeit der Tränkung gesteuert wird. Sehr gute Verbundergebnisse wurden mit nachträglich in den Stab eingefrästen Rippen erzielt, die aber ökologisch und ökonomisch durch „verlorenes“ Material nicht zielführend sind.

*In addition to carbon textile reinforcements, non-metallic rebars with high load bearing capacities have also emerged as a possible alternative to the conventional steel bars. As with carbon textiles, the material properties can vary between different carbon rebars due to different manufacturing methods, impregnations or geometries. Especially with different surface structures the bond behaviour of the carbon rebars varies significantly more than that of the carbon textiles, for example, when subsequently applied or milled-in profiling is used. The measures serve to improve the bond between the carbon rebars and the concrete matrices and thus to increase the load-bearing capacity of the reinforcement in the component. When developing such a bond improving measure, the anisotropic material behaviour of the carbon composite must be taken into account. On top of the types of bond failure known from steel reinforced concrete structures, shearing of the carbon surface profiling can occur as well, which is mainly controlled by the shear strength of the impregnation. Good bond results have been achieved with cutouts subsequently milled into the rebars, but these are not ecologically and economically efficient due to "lost" material.*

Aus diesem Grund wurde vom Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden ein Verfahren entwickelt, bei dem pultrudierte Stäbe mit einer Thermoplastmatrix nachträglich durch eine eigens entwickelte Düse gezogen werden, um eine helixförmige Oberflächenprofilierung in den Stab einzuprägen. Der Vorteil bei diesem Verfahren besteht darin, dass die Garne dabei nicht beschädigt werden und außerdem keine geometrische Trennung der Profilierung von dem Stabkern besteht, wodurch ein hoher Ausnutzungsgrad des verwendeten Materials zustande kommen soll.

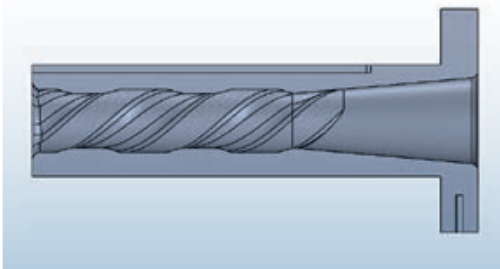
Da es bei ersten Verbundversuchen mit diesem Stab zu einem Ausdrehen aus dem Betonkörper kam, soll im nächsten Schritt seitens des Instituts für Massivbau eine numerische Untersuchung durchgeführt werden, um feststellen zu können, ob sich durch eine erhöhte Rauigkeit der Oberfläche oder geometrische Anpassungen eine Optimierung des Verbunds erzielen lässt. Variiert werden dabei u. a. die Rippenneigung oder auch die Rippenabmessungen.

Als Endprodukt soll ein Stab vorliegen, der durch verschiedene in diesem Projekt definierte Optimierungen ein gutes Verbundverhalten aufweist und durch dessen Herstellung kein Materialverlust entsteht.

*For this reason, the project partner ILK developed a process in which pultruded bars with a thermoplastic matrix are subsequently drawn through a specially developed nozzle to imprint a helical surface profiling into the rebar. The advantage is the non-damaging profiling process to the rebar and, besides, there is no geometric separation between the profiling and the core of the bar, which should allow a high degree of utilization of the carbon material used.*

*Since initial bond tests with the prototype of this bar resulted in a twisting out of the concrete body, the next step is for the IMB to numerically investigate whether optimization of the bond behaviour can be achieved by an increased roughness of the surface or geometric adjustments. Among other things, the rib inclination or the rib dimensions will be varied.*

*The final product should be a carbon rebar that exhibits good bond behaviour and whose production does not result in any material loss.*



Herstellungsdüse vom ILK | Manufacturing nozzle made by the ILK | Graphic: Peter Betz

► **Titel | Title**

TP C3-V2.5A-I-b: Numerische Simulation des Verbundverhaltens zwischen Carbonstrukturen und Beton im Verbundvorhaben C3-V2.5A: Beanspruchungsgerechte Carbonbewehrungsstäbe für einen wirtschaftlichen Einsatz im Bauwesen

*TP C3-V2.5A-I-b: Numerical simulation of the bond behaviour between carbon structures and concrete as part of the joint research project C3-V2.5A: Stress-related carbon reinforcement bars for economical use in civil engineering*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

01.2019 – 02.2021

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Peter Betz

► **Projektpartner | Project partners**

Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, TU Dresden | Institut für Baustoffe, TU Dresden | thyssenkrupp Carbon Components GmbH, Wilsdruff



Detailaufnahme eines Carbonstabes im Zugschwellversuch | Close-up of a carbon rebar under cyclic tensile load | Photo: Juliane Wagner

## UNERMÜDLICHE CARBONSTÄBE

### INDEFATIGABLE CARBON REBARS

Ziel der Carbonbetonbauweise ist es, eine gegenüber Stahlbeton deutlich längere Lebensdauer zu erreichen. Die Grundlagen hierfür wurden im Verbundvorhaben C3-V2.1 „Dauerstandverhalten von Carbonbeton“ im Rahmen des Bauforschungsprojektes C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite gelegt. Hier konnten umfassende Kenntnisse zum Verhalten von Carbonbeton unter statischer und zyklischer Dauerbeanspruchung gewonnen werden. Zunächst wurden geeignete kleinteilige Versuche durchgeführt, mit denen das Materialverhalten von Carbonbeton für unterschiedliche Belastungszeiträume und Schwingspielzahlen unter verschiedenen, definierten Lastniveaus und maßgebenden Expositionen untersucht werden konnten.

Neben verschiedenen Carbontextilien in geeigneter Betonmatrix, wurden in diesem Vorhaben auch handelsübliche Carbonstäbe ohne ummantelnde Betonmatrix in Ermüdungsversuchen untersucht. Ziel dabei war es, eine Aussage über deren Tragverhalten unter Zugschwellbelastung treffen zu können. Dafür wurden bei verschiedenen Unterlasten die zugehörigen Oberlasten je Prüferie variiert, um S-N-Linien als Materialparameter für das Ermüdungsverhalten kreieren zu können. Hierbei wurde die Anzahl der maximal zu erreichenden Schwingspiele auf 2 Millionen begrenzt. Die in den Versuchen erzielten Er-

*Carbon reinforced concrete aims to achieve a significantly longer service life compared to that of steel reinforced concrete. The foundations for this research were laid in the joint research project C3-V2.1 “Long-term behaviour of carbon reinforced concrete” as part of the research project C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite. Here, comprehensive knowledge was gained on the behaviour of carbon reinforced concrete under static and cyclic fatigue loading. Initially, suitable small-scale tests were carried out to investigate the material behaviour of carbon reinforced concrete for different loading periods and numbers of cycles to failure under various defined load levels and governing exposures.*

*In addition to various carbon textiles in a suitable concrete matrix, commercially available carbon rods without an encasing concrete matrix were also investigated in fatigue tests. The aim was to be able to make a statement about their load-bearing behaviour under tensile fatigue. For this purpose, the corresponding maximum loads were varied for each test series at different minimum loads to be able to create S-N lines as material parameters for the fatigue behaviour. The maximum number of load cycles to be achieved was limited to 2 million. The results obtained in the tests are quite positive. As is known from FRP, there was also a clear dependence of the achievable number of load cycles on both the minimum load and the maximum load in the case*

gebnisse sind durchaus positiv zu bewerten. Wie aus dem Kunststoffbau bekannt, lag auch bei den Carbonstäben eine eindeutige Abhängigkeit der erreichbaren Schwingspielzahl sowohl von der Unterlast als auch von der Oberlast vor. Die erzielten Schwingspielzahlen streuten dabei sehr gering, sodass mittels der Versuchsergebnisse S-N-Linien zur Prognose des Materialverhaltens erstellt werden konnten. An Probekörpern, welche nicht während der Ermüdungsbelastung versagten, wurde schließlich noch die Resttragfähigkeit nach der Ermüdungsbeanspruchung getestet. Hier ließ sich ebenfalls kein negativer Einfluss der Ermüdungsbelastung erkennen. Die Resttragfähigkeit lag bei allen Probekörpern nahe der statischen Referenztragfähigkeit und teilweise sogar deutlich darüber.

Anhand von Bauteilversuchen wurde anschließend bei unserem Projektpartner – dem Institut für Massivbau der TU Darmstadt – die Übertragbarkeit des, in den kleinteiligen Versuchen nachgewiesenen, Materialverhaltens auf große Bauteile überprüft und verifiziert. Somit konnte im Vorhaben ein großer Schritt in Richtung der Prognose über die Lebensdauer für Carbonbetonbauteile getan und der Weg für die Zukunft des Carbonbetons geebnet werden.



Für die Ermüdungsversuche musste eine geeignete Lasteinleitung gefunden werden – hier einer der ersten Tastversuche | *One of the first tests on finding an appropriate load introduction for the fatigue tests* | Photo: Juliane Wagner

*of the carbon rods. The number of cycles to failure varied very slightly so that the test results could be used to generate S-N lines for predicting the material behaviour. Finally, the residual load-bearing capacity after fatigue loading was tested on specimens that did not fail during fatigue loading. Here, too, no negative influence of the fatigue loading could be detected. The residual load-bearing capacity of all specimens was close to the static reference load and in some cases even significantly higher.*

*The transferability of the material behaviour demonstrated in the small-scale tests to large components was then checked and verified at our project partner – the Institute of Concrete and Masonry Structures at the Technische Universität Darmstadt. The project thus took a major step towards predicting the service life of carbon reinforced concrete components and paved the way for the future of carbon reinforced concrete.*

► **Titel | Title**

TP C3-V2.1-I-a: Ermüdungsverhalten von Carbonbeton sowie carbonbetonverstärkte Bauteile unter statischer und zyklischer Dauerlast im Verbundvorhaben C3-V2.1: Dauerstandverhalten von Carbonbeton

*TP C3-V2.1-I-a: Fatigue behaviour of carbon reinforced concrete and structural elements strengthened with carbon reinforced concrete under static and cyclic long-term load as part of the joint research project C3-V2.1: Long-term behaviour of carbon reinforced concrete*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

09.2017 – 06.2020

► **Verbundvorhabenleiter | Joint research project leader**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Juliane Wagner

► **Projektpartner | Project partners**

7 Partner, davon 4 aus der Forschung und 3 Firmen



Zugversagen eines Probekörpers | *Tensile failure of a specimen* | Photo: Ronghua Xu

## CARBONBETON UNTER HOCHTEMPERATURBEANSPRUCHUNG

### CARBON REINFORCED CONCRETE UNDER HIGH TEMPERATURE

Die bisher durchgeführten Hochtemperaturversuche an Carbonbetonstrukturen zeigten, dass bei höherer Temperatur oft ein Betonversagen durch Aufspalten in der Gelegeebene auftrat. Beispielsweise ist das Betonversagen bei den Zugversuchen der Materialkombination aus Bewehrungstextil solidian Q95 und hochfestem Beton C3-HF2-145-5 ab einer Temperatur von 400 °C zu beobachten. Die Zugfestigkeit bei 400 °C beträgt ca. 2000 MPa, was nahezu 70 % der Referenzwerte bei 20 °C entspricht und damit sehr zufriedenstellend ist. Zur Optimierung der Betone wurde ein bereits auf dem Markt verfügbarer kunststoffmodifizierter Reparaturmörtel StoCrete TG203 der Feuerwiderstandsklasse F90 gewählt und in Zug- und Verbundversuchen mit Epoxidharz- bzw. Acrylatgetränkten Textilien untersucht. Im Vergleich zu Normalbetonen weist der Mörtel Polypropylenfasern (PP-Fasern) auf, die sich bei Hochtemperatur rückstandslos zersetzen und dadurch ein poröses System erzeugen. Dadurch wird eine zerstörungsfreie Diffusion von Wasserdampf ermöglicht und in Folge können Betonabplatzungen verhindert werden. Allerdings wirkt sich die Zugabe von PP-Fasern negativ auf die Verarbeitbarkeit aus und setzt auch die Druckfestigkeit herab. Die Ergebnisse zeigten, dass

*The high-temperature tests carried out on carbon concrete structures showed that at higher temperatures, concrete failure often occurred due to splitting in the layer of the fabric. For example, the concrete failure can be observed in the tensile tests of the material combination of textile reinforcement solidian Q95 and high-strength concrete C3-HF2-145-5 from a temperature of 400 °C. The tensile strength at 400 °C is approx. 2000 MPa, which corresponds to almost 70% of the reference values at 20 °C and is therefore very satisfactory. To optimize the concrete mixes, a plastic-modified repair mortar StoCrete TG203 of fire resistance class F90, which is already available on the market, was selected and tested in tensile and bond tests with textiles soaked with epoxy resin or acrylate. Compared to normal concrete, the mortar has polypropylene fibres (PP fibres), which decompose without leaving any residue at high temperatures and thus create a porous system. This enables a non-destructive diffusion of water vapour and consequently concrete spalling can be prevented. However, the addition of PP fibres harms processability and also reduces compressive strength. The results showed that concrete spalling can be prevented with the help of the mortar, but not*

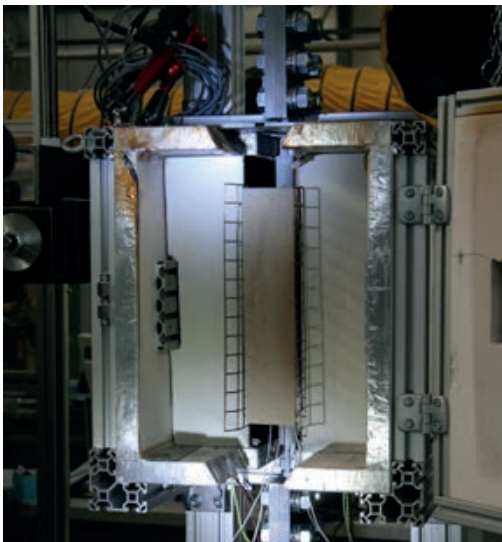


Betonabplatzungen mithilfe des Mörtels zwar verhindert werden können, jedoch nicht das Aufspalten der Prüfkörper in der Gelegebene.

Ein temperaturabhängiges Tragverhalten von textilbewehrtem Carbonbeton ist schon seit langem bekannt. Anhand zahlreicher Dehnkörper- und Verbundversuche mit Carbonbeton zeigt sich eine Abnahme sowohl der Zugfestigkeit als auch des Verbundflusses über die Temperatur. Allerdings sind nur wenige Kenntnisse über den Carbonstab vorhanden. Um mehr Erkenntnisse über die mechanischen Eigenschaften von Carbonstäben zu gewinnen, wurden stationäre Dehnkörperversuche durchgeführt. Die begleitenden Auszugversuche zur Untersuchung der Verbundfestigkeit wurden seitens MFPA Leipzig GmbH vorgenommen. Als Bewehrung kam der Carbonstab Carbon4ReBar mit einem Kerndurchmesser von 8,5 mm der Firma thyssenkrupp zum Einsatz. Der für die Versuche verwendete Beton war ein Hochfestbeton, welcher im Vorhaben C3-V2.3 entwickelt wurde. Die Probekörper wurden in einem Betonalter von mehr als 56 Tagen getestet, um mögliche Betonabplatzungen während des Versuchs zu vermeiden. Aus den Ergebnissen der Versuche wird annähernd ein linearer Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Temperatur gebildet. Bei einer Temperatur von 300 °C werden nur ca. 45 % des Ausgangswertes erreicht.

*the splitting of the test specimens along the plane of the fabric's layer.*

*The temperature-dependent load bearing behaviour of carbon textile-reinforced concrete has been known for a long time. Numerous tensile and bond tests on carbon concrete show a decrease in both tensile and bond strength over temperature. However, there is only a little knowledge about the use of carbon fibre rebar as reinforcement. Stationary tensile tests were carried out to gain more knowledge about the mechanical properties of carbon fibre rebar. The accompanying pull-out tests to investigate the bond strength were carried out by MFPA Leipzig GmbH. The so-called "Carbon4ReBar" carbon fibre rebar with a core diameter of 8.5 mm from ThyssenKrupp was used as reinforcement. The concrete used for the tests was a high-strength concrete, which was developed in the V2.3 project "Fire behaviour of carbon concrete". The specimens were tested with a concrete age of more than 56 days to avoid possible concrete spalling during the test. An approximately linear relationship between tensile strength and temperature is formed from the results of the tests. At a temperature of 300 °C, only approximately 45% of the initial value is reached.*



Versuchsaufbau der Dehnkörperversuche unter Hochtemperaturbeanspruchung | Experimental setup of tensile tests under high temperature | Photo: Ronghua Xu

► **Titel | Title**

TP C3-V2.3-1-a: Materialverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung im Verbundvorhaben C3-V2.3: Brandverhalten von Carbonbeton

*TP C3-V2.3-1-a: Material behaviour of carbon reinforced concrete exposed to high temperatures as part of the joint research project C3-V2.3: Fire behaviour of carbon reinforced concrete*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

05.2017 – 09.2020

► **Leiter Teilvorhaben | Subproject manager**

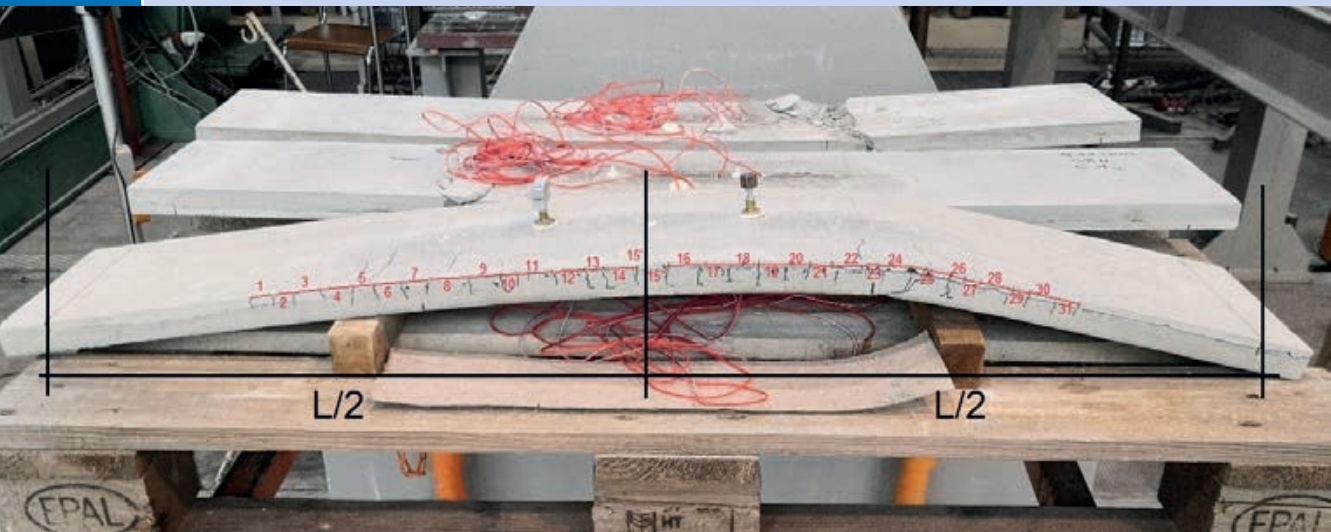
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. Karoline Holz, Dr.-Ing. Daniel Ehlig, Olga Diring M.Sc., Dipl.-Ing. Ronghua Xu

► **Projektpartner | Project partners**

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik, TU Dresden | MFPA Leipzig GmbH, Leipzig | WILHELM KNEITZ Solutions in Textile GmbH, Hof | FTA Albstadt mbH, Albstadt



Probekörper nach dem Versagen | Test specimen after failure | Photo: Stefan Gröschel

## BESONDERS FEINE RISSE MIT N-TRC

### CRACKING THE CODE OF FINE CRACKS

Bekanntlich bildet Beton Risse unter Belastung. Durch den Einsatz von textilbewehrtem Beton (TRC) können die Rissabstände und -breiten gegenüber Stahlbeton erheblich reduziert werden. Diese besondere Eigenschaft macht TRC zu einem idealen Material für den Bau von Silos; nicht nur aus statischen, sondern auch aus hygienischen Gründen, denn große Risse können das Wachstum von Bakterien auf der Oberfläche von großen Behältern begünstigen, welche Lebensmittel oder Flüssigkeiten enthalten. Die Planung und Erprobung von vorgefertigten Modulelementen für Silos steht im Mittelpunkt des TextonSilo-Projekts. Als Material wurde *Nonwoven Textile Reinforced Concrete* (N-TRC) gewählt – bestehend aus betongetränktem Vliesstoff (*Concrete Soaked Nonwoven*, CSN), lagenweise kombiniert mit textilbewehrtem Carbonbeton (CRC). Um daraus Sandwichelemente herstellen zu können, mussten spezielle Betonmischungen entwickelt und optimiert werden.

In der ersten Phase des Projekts wurde das Materialverhalten des N-TRC durch Versuche im Otto-Mohr-Laboratorium charakterisiert. Diese gaben einen ersten Einblick in die Kennwerte der Einzelkomponenten und auch in das

*Cracking under pressure is a common condition, but keeping it together when all has cracked is a challenge. In concrete, we expect to see crack formation under loads. The use of textile reinforced concrete (TRC) considerably reduces the crack spacing and width. This particular property makes TRC an ideal material for the construction of silos, not only for structural reasons but also for hygienic ones. Large cracks can lead to the growth of bacteria on the surface of large reservoirs that hold food or liquids. The planning and testing of prefabricated modular elements for silos are the focus of the TextonSilo project. The chosen material is Nonwoven-Textile Reinforced Concrete (N-TRC) – a combination of Carbon Reinforced Concrete (CRC) and Concrete Soaked Nonwoven (CSN) arranged as layers, which form sandwich elements. Special concrete mixes have been developed and further optimized for this purpose.*

*Therefore, during the first phase of the project, the material behaviour was characterized using small scale tests at the Otto Mohr Laboratory. The tests conducted provided a first glance at the characteristic values of the individual components and also at their composite behaviour. When positioned at the bottom of the sandwich*

Verbundverhalten. Wenn die relativ duktile CSN-Schicht an der Unterseite des auf Biegung beanspruchten Sandwichelementes positioniert war, bewirkte sie eine verbesserte Rissverteilung auf der Zugseite. Dies äußerte sich in einer deutlichen Reduktion der Rissabstände und -breiten selbst über die für TRC-Elemente typische, gute Rissverteilung hinaus. Dieses Verhalten ermöglicht große Verformungen beim Versagen und erhöht die Duktilität des Bauteils insgesamt.

Herstellungstechnisch wird die Geotextilvlies-schicht mit Beton (CSN) imprägniert und anschließend in die gewünschte Form gebracht. So können auch Formstücke oder Hohlkörper hergestellt werden. Ein weiterer Vorteil ist die raue Oberfläche dieses Materials, welche eine tragfähige Verbundfuge zu einer Betonergänzung gewährleistet und so Sandwichelemente begünstigt. Außerdem bieten die Unregelmäßigkeiten in der Materialoberfläche, die durch die zufällige Verteilung der Vliesfasern entstehen, einen natürlichen Abstandhalter für eine textile Bewehrung in der Betonergänzung.

*element that is subjected to flexural loads, the relatively ductile CSN layer provides an improved crack distribute on the tension surface. Accordingly, the test results show that the CSN layer considerable reduces the crack spacing and width, even beyond the typical crack distributions observed in TRC elements. This behaviour allows for large deformations at failure and increases the ductility of the material.*

*From a constructability point of view, the nonwoven geotextile layer is impregnated with concrete (CSN) and formed into the desired shape. Once the concrete has hardened, the CSN element has the advantage that it can act as a stay-in-place formwork. A further benefit is the rough surface of this material, which prevents the formation of cold joints between the layers of the sandwich element. Also, the irregularities in the material surface, due to the random distribution of nonwoven fibres, provide a natural distance holder for the textile reinforcement. This in turns ensures a good bond between the reinforcement and the fresh concrete.*



Probekörper nach dem Versagen | *Test specimen after failure* |  
Photo: Stefan Gröschel

#### ► Titel | *Title*

TP: Materialentwicklung und -prüfung von Fertigteilen aus Textilbeton für den Bau von Großbehältern im Verbundprojekt: Entwicklung der technisch-technologischen Lösung zur Dimensionierung und Herstellung von Textilbetonelementen für modular und formflexibel gestaltbare portable Großbehälter (TextonSilo)

*TP: Material development and testing of prefabricated parts made of textile concrete for the construction of large containers as part of the joint research project: Development of the technical-technological solution for a dimensioning and production of textile reinforced concrete elements for modular and portable containers (TextonSilo)*

#### ► Förderer | *Funding*

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie;  
Projektträger: AIF/ZiM

#### ► Zeitraum | *Period*

06.2019 – 03.2021

#### ► Leiter Teilprojekt | *Subproject manager*

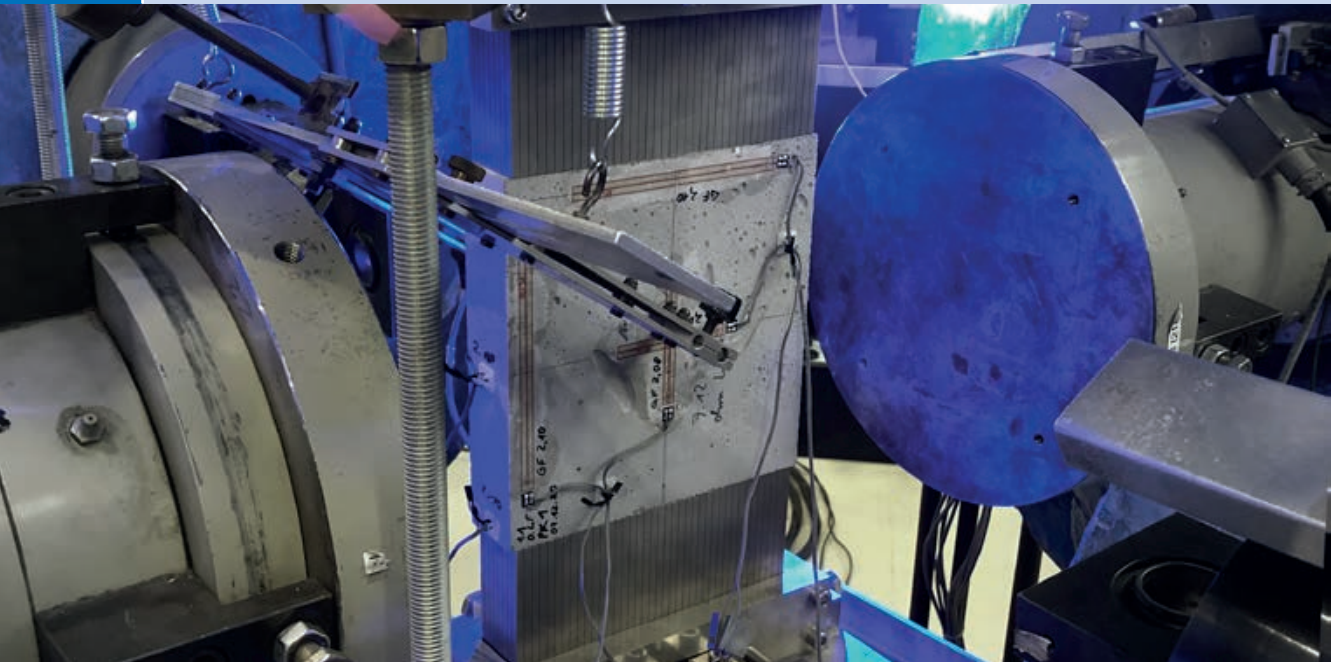
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

#### ► Bearbeiterin | *Contributor*

Dr.-Ing. Patricia Garibaldi

#### ► Projektpartner | *Project partners*

BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH, Dresden |  
Jäger Ingenieure GmbH, Radebeul | Texton e.V., Dresden



Scheibenförmiger Probekörper vor der Prüfung | Disc-shaped test specimen before testing | Photo: Peter Betz

## CARBONBETON UNTER DRUCK – PHASE 2

### CARBON REINFORCED CONCRETE UNDER COMPRESSION

Viele Bereiche des Carbonbetons sind bereits seit Jahren Bestandteil der Forschung und weisen erhebliche Fortschritte bei der Reglementierung des Werkstoffes im Bauwesen auf. Während für die Biegung, Querkraft und Torsion beispielsweise Modelle oder Modellierungsansätze bestehen, gibt es kaum Kenntnisse über das Verhalten von Carbonbetonbauteilen unter Druckbelastungen. Erste Erkenntnisse zum Verhalten von Carbonbeton unter einaxialer Druckbelastung konnten in der ersten Projektphase gewonnen werden. Bereits die Umstellung des Herstellungsprozesses von gegossenen Probekörpern auf handlamierte Einbringung der Textillagen führte zu einer Abminderung der Tragfähigkeit. Untersucht wurde weiterhin der Einfluss verschiedener Parameter auf die Druckfestigkeit von Carbonbetonwürfeln, wie der Lagenabstand, die Garnstärke, die Maschenweite oder eine versetzte Anordnung der Textillagen. Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Projektphase soll untersucht werden, inwieweit sich diese Erkenntnisse auf praxisrelevante Bauteile übertragen las-

*Many scientific areas of carbon concrete have been researched for years and show considerable progress in the regulation of the material. While models or modelling approaches exist e.g. bending, shear forces and torsion there is little knowledge about the behaviour of carbon concrete components under compressive loads. Initial findings under uniaxial compressive loading were obtained in the first phase of the project. The change of the manufacturing process, from cast specimens to hand-laminated insertion of the textile layers, led to a reduction of the load-bearing capacity. Furthermore, the influence of various parameters on the compressive strength of carbon concrete cubes was investigated, such as the spacing between the layers, the yarn thickness, the mesh size or a staggered arrangement of the textile layers. Based on these results, the focus of future research investigates to what extent these findings can be transferred to practically relevant components. A first step is being taken in this second phase of the project using multi-axial loaded carbon concrete disks with dimensions of 200x200x40 mm<sup>3</sup>. In most components, induced multi-axial stress*

sen. Ein erster Schritt in diese Richtung erfolgt in der aktuell laufenden zweiten Projektphase über mehraxial belastete Carbonbetonscheiben mit den Abmessungen 200x200x40 mm<sup>3</sup>. In den meisten Bauteilen liegen (durch beispielsweise Torsions- oder Querkraftbelastungen) induzierte mehraxiale Spannungszustände vor.

Aus diesem Grund sollen basierend auf den Kenntnissen aus dem Stahlbetonbau sowohl mögliche Tragfähigkeitssteigerungen durch Druck-Druck-Belastungen sowie Abminderungen durch Druck-Zug-Belastungen untersucht werden. Neben der textilen Bewehrung selbst, dazu zählen Tränkung, Lagenabstand, Maschenweite und auch die Textilorientierung, sollen vor allem der Herstellungsprozess und unterschiedliche Spannungsverhältnisse bei den Versuchsdurchführungen variiert werden. Auf Basis der Ergebnisse aus der zweiten Projektphase soll ein numerisches Materialmodell entworfen beziehungsweise das Modell aus der ersten Projektphase erweitert werden. Mit Hilfe dieses Modells können virtuelle Parameterstudien an Großbauteilen durchgeführt werden, um die in einer weiteren Projektphase vorgesehenen Großbauteilversuche zu planen und diese später mit möglichst geringem Aufwand durchführen zu können. Darüber hinaus sollen diese Großbauteilversuche das mit Abschluss dieser Projektphase aufgestellte Materialmodell verifizieren.

*states are present (for example due to torsional or shear loads). For this reason, based on the knowledge from steel reinforced concrete constructions, possible increases in the load-bearing capacity due to compression-compression loads as well as reductions due to compression-tension loads are to be investigated. In addition to the structure of the textile reinforcement itself, which includes impregnation, layer spacing, mesh size and also the textile orientation, the manufacturing process and different stress ratios are to be varied during the tests. Based on the results from the second project phase, a numerical material model will be designed or the model from the first project phase will be extended. With the help of this model, virtual parameter studies can be conducted to plan large component tests in a further project phase and to be able to carry them out with as little effort as possible. Besides, these large-scale component tests are to verify the material model established at the end of this project phase.*



Probekörper nach dem Versuch | Specimen after testing | Photo: Peter Betz

► **Titel | Title**

Experimentelle Untersuchung des Tragverhaltens von Textilbeton unter Druckbeanspruchung – 2. Phase: Einfluss biaxialer Lasteintragung

*Experimental investigation of the load bearing behaviour of textile reinforced concrete under compression load – 2<sup>nd</sup> phase: Influence of biaxial load application*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

► **Zeitraum | Period**

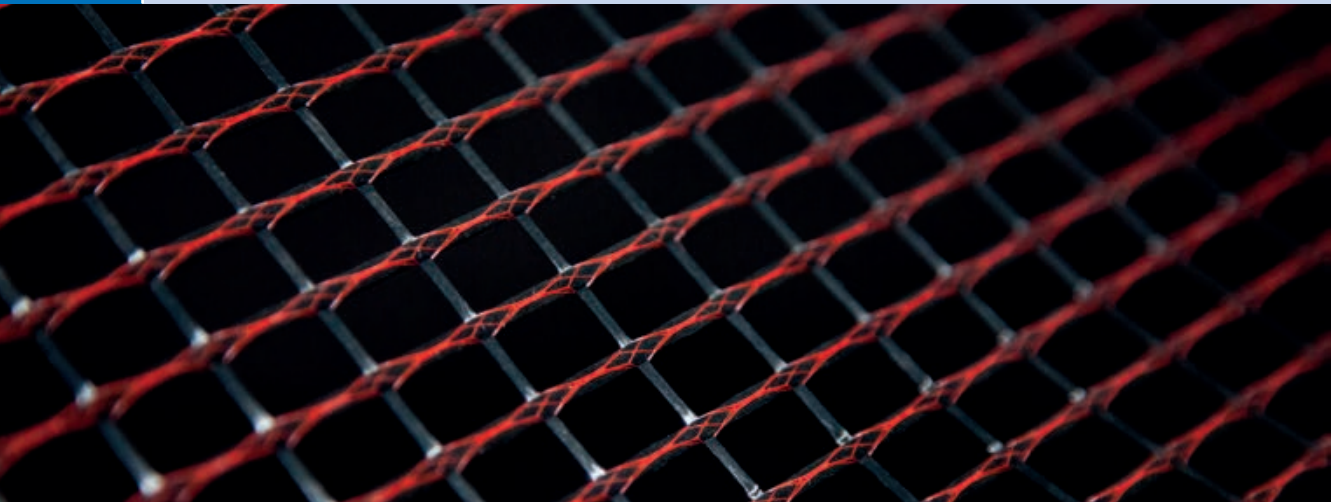
09.2015 – 05.2018 (Phase 1)  
03.2019 – 05.2023 (Phase 2)

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Peter Betz



Textile Carbonbewehrung | Textile carbon reinforcement | Photo: Stefan Gröschel

## LÜCKENSCHLUSS IM REGELWERK

### CLOSING GAPS IN THE REGULATORY FRAMEWORK

Als Folgeprojekt des C3-V1.2-Vorhabens „Normung und Zulassung“ wurde das Projekt C3-L9 ins Leben gerufen, um die begonnen Richtlinienentwürfe fortzuführen. Ziel des Projektes ist es, möglichst praxistaugliche Empfehlungen für die Anwendung von Carbonbeton aussprechen zu können. In Anlehnung an die geltenden europäischen Normen für den Stahlbetonbau werden diese Richtlinienentwürfe als sogenannte Arbeitspapiere entwickelt, in denen die Forschungsergebnisse aller am C<sup>3</sup>-Vorhaben beteiligten Partner zusammengetragen werden. Regelmäßig werden in Projekttreffen neue Erkenntnisse vorgestellt, diskutiert und gegebenenfalls die Arbeitspapiere überarbeitet.

Insgesamt entstehen vier verschiedene Arbeitspapiere in den Bereichen Bemessung, Bewehrung, Prüfverfahren und Ausführung, wobei der Teil Prüfverfahren im Vergleich zu C3-V1.2 ein eigenes Arbeitspapier und kein Anhang zur Bemessung mehr darstellt. Manche Verfahren und Themenfelder sind in ihrer Ausarbeitung schon weit fortgeschritten, so existiert für die Biegung sowohl im Neubau als auch in der Verstärkung bereits ein anwendungsfähiges Nachweischema. Für andere Belastungsfälle, beispielsweise bei der Querkraft und der Torsion, müssen die bereits vorhandenen Modelle überarbeitet werden, da diese

*As a successor project to the project C3-V1.2 “Standardization and Approval” the C3-L9 project “Gap Closure” was launched to continue the draft guidelines that begun during the C3-V1.2 project. The project aims to be able to make practical recommendations for the use of carbon concrete. Based on the applicable European standards for reinforced concrete construction, these draft guidelines are developed to compile the research results of all partners involved in the C<sup>3</sup> project. The new findings are presented and discussed at regular project meetings and, if meaningful results become available, the relevant sections in the draft guidelines are then revised.*

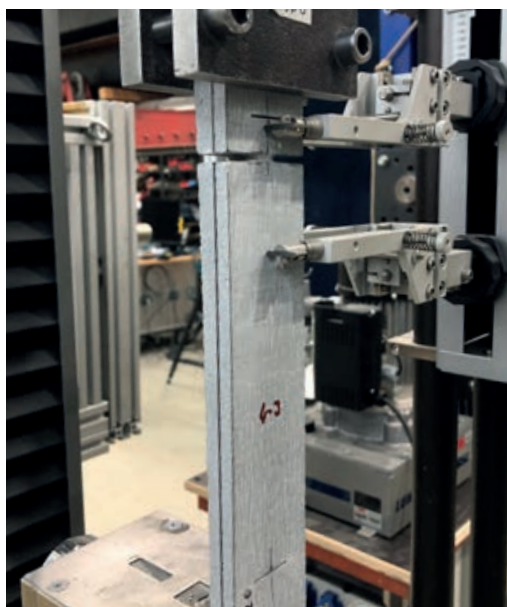
*A total of four different draft guidelines are created in the areas of dimensioning, reinforcement, test methods and execution. Compared to the approach within the project C3-V1.2, the test method part is a separate draft guideline and no longer an appendix to the dimensioning part. Some procedures and methods are already well advanced in their elaboration, so there is already an applicable verification process for bending both in new buildings and in the reinforcement of existing structures. For other stress states, such as shear force and torsion, the existing models have to be revised, as these could no longer*

für die neu entwickelten Carbonbewehrungselemente nicht mehr validiert werden konnten.

Weitere Themenfelder wurden mit Abschluss von C3-V1.2 noch nicht in den Arbeitspapieren berücksichtigt, wie unter anderem die Ermüdung, das Dauerstandverhalten oder die Gebrauchstauglichkeit. Teilweise konnten zu diesen Themen im Rahmen von L9 bereits erste Ansätze eingearbeitet werden, wie beispielsweise zur Vorspannung von Carbonbeton. Außerdem wurden bereits entwickelte und in der Forschung etablierte Prüfverfahren in das Arbeitspapier Prüfverfahren aufgenommen; exemplarisch sind hier der Übergreifungsversuch zur Ermittlung der Übergreifungslängen bei Stößen von Gelegen oder der Verbundversuch für Carbonstäbe in Anlehnung an den RILEM-Versuch zu nennen. Weitere Bausteine werden mit Abschluss der noch laufenden C<sup>3</sup>-Projekte erwartet. In den nächsten Schritten sollen die Ermüdungserkenntnisse aus dem Projekt C3-V2.1 Dauerstandverhalten eingearbeitet und anhand der Ergebnisse aus C3-V2.7, die sich auf die Erstellung von Gesamtkonzepten für die nachträgliche Bauteilverstärkung beziehen, das Vorgehen beim Verstärken von Stahlbetonbauwerken überarbeitet werden.

*be validated for the newly developed carbon reinforcement elements.*

*With the completion of C3-V1.2, further areas were left completely open in the draft guidelines, such as fatigue, endurance behaviour or the ultimate state of usability. In some cases, initial approaches to these topics have already been incorporated within the framework of C3-L9, such as the prestressing of carbon concrete. Also, test methods that have already been developed and established in research have been included in the draft guidelines, examples of which are the overlapping test to determine the overlap lengths for joints between fabrics or the bond test for carbon rebars based on the RILEM test. Further modules are expected when the ongoing C<sup>3</sup> projects are completed. In the next steps, the fatigue knowledge from the project C3-V2.1 is to be incorporated and the procedure for reinforced concrete structures is to be revised based on the results from the C3-V2.7 project.*



Einseitiger Textilauszugversuch | Single-sided pull-out test | Photo: Peter Betz

► **Titel | Title**

TP C3-L9-II – Zusammenführung und Erstellung von Sicherheits- und Bemessungskonzepten für Carbonbeton zur Erstellung eines normativen Regelwerkes im Verbundverhalten C3-V-L9: Regelwerke

*TP C3-L9-II – Combining and development of design and safety concepts for carbon reinforced concrete to create normative regulations as part of the joint research project C3-V-L9: Regulations*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

05.2019 – 12.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. Peter Betz  
Dr.-Ing. Harald Michler

► **Projektpartner | Project partners**

Institut für Massivbau, RWTH Aachen University |  
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V., Berlin |  
Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin



Verstärkungsarbeiten einer Stahlbetonplatte für einen Impaktversuch | Strengthening of a reinforced concrete slab for an impact test | Photo: Stefan Gröschel

## CARBONBETON UND HYBRIDE VERSTÄRKUNG GEGEN IMPAKT

### CARBON CONCRETE AND HYBRID REINFORCEMENT VS. IMPACT

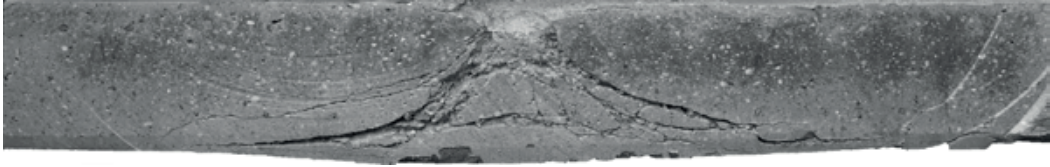
Im Rahmen der ersten Kohorte des Graduiertenkollegs 2250 (GRK2250/1) wurden nachträglich applizierte Verstärkungsschichten aus Carbonbeton sowie Carbongelege in einer hochfesten Polymerfaserbetonmatrix (SHCC – strain hardening cement composite) auf der impaktabgewandten Bauteilseite verwendet. Beide Verstärkungsschichten zeigten eine sehr gute Wirkung, indem sie den Perforationswiderstand der Stahlbetonplatte deutlich erhöhten. Auch die Bauteilsteifigkeit konnte durch die applizierten Verstärkungsschichten gesteigert werden.

Im Rahmen der bisher durchgeführten Untersuchungen wurden zu verstärkende Stahlbetonplatten betrachtet, bei denen ausschließlich Biegebewehrung verbaut wurde. Anhand dieser Probekörper sowie einer Handvoll Referenzplatten aus Stahlbeton wurde mit der Entwicklung einer Schädigungsbeschreibung begonnen, mit der es möglich ist, die durch eine Impakteinwirkung entstandene Bauteilschädigung zu quantifizieren. Darüber hinaus wurde an der Weiterentwicklung eines bestehenden Ingenieurmodells zur Abbildung von Impakt Ereignissen auf Stahlbetonbauteile gearbeitet. Hierbei handelt es sich um ein vereinfach-

*In the first cohort of the Research Training Group 2250 (GRK2250/1), subsequently applied strengthening layers made of carbon concrete, as well as carbon fabrics in a high-strength polymer fibre concrete matrix (SHCC – strain hardening cement composite), were used on the component side facing away from the impact. Both strengthening layers showed a very good effect by significantly increasing the perforation resistance of the reinforced concrete plate. Furthermore, the stiffness of the structural element was improved by the application of the strengthening layers.*

*Within the scope of the investigations carried out so far, a select group of reinforced concrete plates were considered for strengthening, in which only flexural reinforcement was used. Based on these specimens and a couple of reference plates made of reinforced concrete, the development of a damage description started, which allows the quantification of the structural damage caused by an impact event. Furthermore, the continuing development of an existing engineering model for the description of impact events on reinforced concrete structures was worked on. For this purpose, a simplified mechanical substitute model consisting of masses, springs and dampers was used, which was extended by the component of*





Querschnitt einer verstärkten Stahlbetonplatte nach einem Impaktversuch | Cross section of a strengthened steel reinforced concrete slab after impact test | Photo: Marcus Hering

tes mechanisches Ersatzmodell aus Massen, Federn und Dämpfern, welches um die Komponente der Verstärkungsschicht erweitert wurde. Als Basis konnte hierzu auf die experimentellen Ergebnisse sowie eigene numerische Simulationsdaten zurückgegriffen werden.

Die vertiefte Betrachtung und systematische Erweiterung dieser gewonnenen Erkenntnisse stehen im Mittelpunkt der Arbeiten im Rahmen der zweiten Kohorte des Graduiertenkollegs 2250. Ein Untersuchungsschwerpunkt liegt dabei auf der Fragestellung, inwieweit der Perforationswiderstand explizit durch eine nachträglich aufgebrachte Verstärkungsschicht gesteigert werden kann, nachdem bisher lediglich eine qualitative Steigerung festgestellt werden konnte. Neben der Verstärkung biegebewehrter Stahlbetonplatten wird das experimentelle Versuchsprogramm auch systematisch um Grundplatten mit zusätzlicher Bügelbewehrung erweitert. Wie in der vorangegangenen Kohorte wird neben Carbonbeton ebenfalls eine hybride Verstärkungsschicht, bestehend aus einem Carbongelege und einer SHCC-Matrix, eingesetzt. Abschließend erfolgt die Ergänzung und Validierung der vorhandenen Schädigungsbeschreibung sowie des Ingenieurmodells, insbesondere im Hinblick auf die zusätzliche Bügelwirkung.

*the strengthening layer. Experimental results as well as own numerical simulation data could be used as a basis for this.*

*The more detailed examination and systematic expansion of these results are planned within the second cohort of the Research Training Group 2250. One main focus of the investigation focuses on the question, in which way the perforation resistance can be explicitly increased by a subsequently applied strengthening layer? Considering that before only a qualitative increase could be determined. In addition to the strengthening of reinforced concrete plates with bending reinforcement exclusively, the experimental test program is also systematically extended to base plates with additional stirrup reinforcement. As in the previous cohort, a hybrid strengthening layer consisting of carbon fabric and an SHCC matrix is also used in addition to carbon concrete. Finally, the existing damage description and the engineering model are supplemented and validated, especially concerning the additional effect of the shear reinforcement.*

► **Titel | Title**

TP A5/I: Verstärkung von flächigen Massivbauelementen gegen Impakt auf der impaktabgewandten Seite und TP A5/II: Verstärkung von flächigen, bügelbewehrten Massivbauelementen gegen Impakt auf der impaktabgewandten Seite als Teilprojekte des Graduiertenkollegs GRK 2250/1 – Impaktsicherheit von Baukonstruktionen durch mineralisch gebundene Komposite

*TP A5/I: Strengthening of plane RC elements against impact on the rear side and TP A5/II: Strengthening on the rear side of flat, stirrup reinforced solid construction elements against impact as part of the Research Training Group GRK 2250/1 – Mineral-bonded composites for enhanced structural impact safety*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / GRK 2250/1

► **Zeitraum | Period**

05.2017 – 09.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dr.-Ing. Marcus Hering  
Dipl.-Ing. (FH) Franz Bracklow



Zersägte Probekörper verschiedener Größen auf dem Hof des OML | Sawn test specimens with different sizes on the yard of the OML | Photo: Franz Bracklow

## NEUE MASSSTÄBE IN DER IMPAKTFORSCHUNG

### NEW SCALES AT THE IMPACT RESEARCH

Im Rahmen des Projekts Tankaufprall wird am Institut für Massivbau seit nunmehr über neun Jahren das Verhalten von Stahlbeton unter dynamischer Beanspruchung untersucht. Hierbei wurde eine Vielzahl an Impaktversuchen unter Variation diverser Material- bzw. Prüfparameter durchgeführt. Für die Übertragbarkeit der experimentellen Erkenntnisse auf Bauwerksdimensionen sind jedoch zusätzliche Kenntnisse über die Skalierbarkeit und deren Einflussgrößen notwendig, welche projektabschließend Gegenstand der Untersuchungen waren.

Hierfür wurden insgesamt 15 Stahlbetonplatten mit drei unterschiedlichen Maßstäben hergestellt. Alle inneren Parameter, wie beispielsweise die Plattendimensionen, die Bewehrungsdurchmesser und -abstände sowie die Betondeckungen, wurden dabei gleichermaßen verkleinert bzw. vergrößert. Für die Durchführung der Versuche wurde die beschleunigte Konfiguration der Fallanlage des Otto-Mohr-Laboratoriums genutzt. Die Verwendung der ebenfalls geometrisch angepassten Impaktoren stellte dabei eine besondere Schwierigkeit dar. Insbesondere die Änderung des Durchmessers führte in der druckluftgetriebenen Versuchsanlage zwangsläufig zu einer unzureichenden Beschleunigung des Impaktors. Zur Sicherstellung der gewohnten Funktionsweise

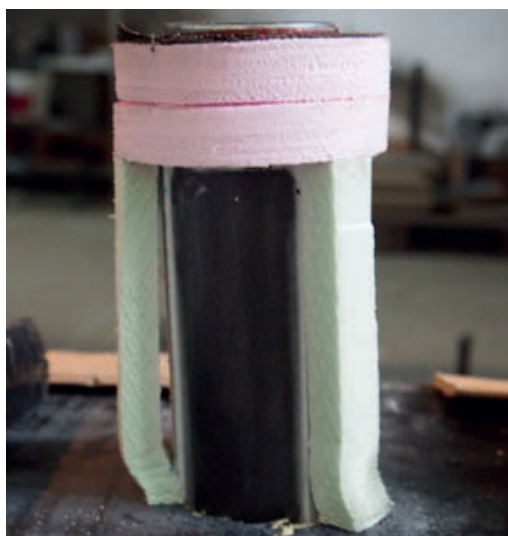
*For many years impact loading is an important research topic at the Institute of Concrete Structures. In the frame of this research, among others, the behaviour of reinforced concrete plates subjected to dynamic loads is investigated and a steadily growing database of impact tests is generated. A large number of experiments with varying material- and testing parameters was carried out. To transfer the knowledge gained from the experimental test to the behaviour expected in real buildings, additional knowledge concerning the scalability and the influencing factors are necessary, which were investigated finally.*

*For this purpose, in total 15 reinforced concrete plates with three different scales were manufactured. All internal parameters, for example, the slab dimensions, the reinforcement diameters and spaces as well as the concrete cover were either reduced or enlarged, according to the selected scale used in the specimen dimensions. For the conduction of the experiments, the accelerated configuration of the drop tower facility of the Otto-Mohr-Laboratory was used. The usage of an adapted impactor, with an equivalent geometry, was particularly challenging. In particular, the changing of the diameter leads to an insufficient acceleration of the impactor when using the compressed air-driven test facility. To ensure the usual functionality, a sabot construction around the impactor was used to seal the gap between the impactor and the inside of the*

wurde dieser mit einer Art Treibspiegel ummantelt, welcher die Abdichtung des Zwischenraums von Impaktor und Innenwandung des Rohrs gewährleistet. Somit konnte eine geradlinige und ausreichend beschleunigte Bewegung des Impaktors ermöglicht werden. Im Rahmen zahlreicher Vorversuche wurde die Robustheit dieses Systems ausgiebig untersucht und die Ladedruck-Geschwindigkeits-Beziehungen für jeden Impaktor aufgestellt.

Im Anschluss konnten die Hauptversuche an den vorab hergestellten, skalierten Stahlbetonplatten durchgeführt werden. Insgesamt wurden fünf Geschwindigkeitsstufen getestet – jeweils drei Probekörper unterschiedlichen Maßstabs pro Stufe. Die Geschwindigkeitsabweichungen der verschiedenen Impaktoren konnten, aufgrund der aufgestellten Ladedruckbeziehungen, minimiert werden. Qualitativ wiesen die Probekörper innerhalb der jeweiligen Geschwindigkeitsstufe maßstabsübergreifend ähnliche Schädigungen auf. Des Weiteren erfolgte eine Auswertung hinsichtlich quantifizierbarer Schädigungsparameter sowie dem globalen und lokalen Bauteil bzw. Materialverhalten.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 1501541 gefördert.



Vorversuch zur Erprobung des Impaktor-Treibspiegels | Preliminary test for testing the impactor sabot | Photo: Franz Bracklow

*acceleration pipe. This enabled a linear and uniformly impactor's movement. The robustness of this system as well as the compression-velocity-relationships of each impactor were investigated by conducting several protests.*

*Afterwards, the main experiments on precast and size scaled reinforced concrete plates took place. In total five velocity levels with three different scales for each level were tested. Deviations of the impactor's velocity could be minimized due to the already known charging pressure relationships. Qualitatively, the specimens within one velocity level exhibited similar damages across all scales. Furthermore, the evaluation regarding the quantifiable damage parameter, as well as the local and global component respectively material behaviour, took place.*

*The presented project was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi, project No. 1501541) on the basis of a decision of the German Bundestag.*

► **Titel | Title**

Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks)

*Structural behaviour under impact loading by the impacting container (aircraft tanks)*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

► **Zeitraum | Period**

07.2012 – 12.2014 (Phase 1A)  
08.2014 – 07.2016 (Phase 1B)  
04.2017 – 09.2020 (Phase 1C)

► **Experimenteller Teil | Experimental part**

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. (FH) Franz Bracklow, Dr.-Ing. Marcus Hering

► **Numerischer Teil | Numerical part**

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

► **Bearbeiter | Contributors**

Dr.-Ing. Tino Kühn, Ammar Siddig Ali Babiker, MSc.

► **Projektpartner | Project partner**

BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin



Schädigung eines Quaders an der Oberseite nach Impakteinwirkung | *Damage of a concrete cuboid at the surface after impact* | Photo: Lena Leicht

## IMMER SCHÖN SACHTE...

### SOFT, SOFTER, DAMPING

Impaktbeanspruchungen sind aus vielen unterschiedlichen Ingenieurbereichen bekannt. Es ist auch nichts Neues, dass Menschen und andere Güter vor Impakteinwirkungen geschützt werden sollen. Diesen Schutz gewährleisten beispielsweise persönliche Rüstungen, aber auch Schutzsysteme für Autos, Steinschlagschutzgalerien oder Schutzsysteme für Brückenpfeiler gegen Schiffsanprall. In diesem Forschungsprojekt stellt sich die Frage, wie Menschen und Güter vor herumfliegenden Trümmerteilen und anderem Schaden geschützt werden können und gleichzeitig Impaktschäden an Stahlbetontragwerken reduziert werden können. Eine Möglichkeit hierfür ist es, die Impaktbeanspruchung zu dämpfen. Hierzu wird eine energieabsorbierende Schicht auf das Tragwerk aufgebracht. Aber wie sieht eine solche Schicht bestenfalls aus? Auch hier schadet eine Inspiration aus der Natur oder der Technik sicherlich nicht. In vielen Fällen kommen sogenannte geschichtete Aufbauten zum Einsatz. Diese bestehen, zum Beispiel im Fall von Rüstungen, aus einer harten äußeren Schicht gefolgt von weiteren Schichten, die sich entweder weich und elastisch verhalten oder in sich zusammenfallen und dadurch

*Impact damage is known in many engineering fields. Therefore, it is a normal task to prevent humans and goods from this type of threat. The protection can be granted by personal armour, but there are also protection systems in cars, stone fall protection systems, and systems to prevent damage of bridge piers due to ship collision. The research question in this project is similar to the aims of other engineers: how to protect humans and goods from the flying debris and other threats? As well as how to reduce the impact damage of reinforced concrete structures? A possibility to reach this goal is the damping of the impact load. For this sake, an energy-absorbing layer needs to be applied to the structure. The question is, how such a layer should be composed. Inspiration from nature and other engineering fields can be helpful to answer this question. In many cases, layered structures are used. They consist, for example in the case of armours, of a hard outer layer backed by other layers that can either behave softly and elastically or crush and thus absorb energy. Ceramics and fibre-reinforced polymers are typically used as outer layers and elastomers or foam structures with a high pore volume and generally applied underneath. Finding cementitious materials with comparable damping properties is the goal of the research project.*

Energie absorbieren. Typische Materialien, die zu diesen Zwecken verwendet werden, sind Keramik oder faserverstärkte Kunststoffe als äußere Schicht, und Elastomere oder schaumartige Strukturen mit einem großen Porenvolumen als untere Lagen. Das Ziel des Projekts ist es, geeignete mineralisch gebundene Werkstoffe zu finden, die ähnlich den Vorbildern den Impakt dämpfen.

Die dynamischen Materialeigenschaften werden in einem Split-Hopkinson-Bar untersucht – einer Versuchseinrichtung bestehend aus zwei Stäben, zwischen denen eine Probe eingebaut wird. In den ersten Stab wird eine Druck- bzw. Zugwelle eingeleitet, die durch die Probe in den zweiten Stab übertragen wird. Mithilfe von Dehnungsmessungen auf den Stäben lassen sich Rückschlüsse über das Spannungs-Dehnungs-Verhalten der Probe ziehen. Neben der Frage, welche zementgebundenen Materialien ein ähnliches Materialverhalten wie die Vorbilder aufweisen, muss auch die Frage gestellt werden, wie die Wirksamkeit der einzelnen Schichten und Schichtenverbünde charakterisiert und miteinander verglichen werden kann. Hierfür sind Schädigungskriterien für den Altbeton, auf dem die Dämpfungsschicht aufgebracht wird, notwendig. Dies wird in großformatigen Versuchen bewertet. Zu diesem Zweck werden die Materialien sowohl einzeln als auch als Schichtaufbauten auf Betonquadern, als mittelgroße Versuche, und auf Stahlbetonplatten, als Großbauteilversuchen, aufgebracht. Diese Versuche werden im Fallversuchstand des OML durchgeführt.



Quader ohne Dämpfungsschicht nach einem Impaktversuch im Fallturm | Cuboid without damping layer after an impact experiment in the drop tower | Photo: Lena Leicht

*The dynamic material properties are examined with the help of a so-called split-Hopkinson bar. This is a facility consisting of two bars that sandwich a specimen. A compressive or tensile wave is generated in the first bar and transferred to the second bar via the specimen. The stress-strain-condition within the specimen can be derived from strain measurements on the bars. Suitable materials for the different layers need to be found in small-scale experiments but the efficiency and the damping properties of the layers and composites also need to be studied on a large scale and compared to one another. Damage criteria are necessary to compare the performance of the different materials by evaluating the damage of the structure beneath. The large-scale tests are carried out on cuboids and plates in the drop tower.*

► **Titel | Title**

TP A6/II: Charakterisierung von mineralisch gebundenen Kompositen als Dämpfungsschichten für die Impaktverstärkung flächiger Massivbauelemente als Teilprojekt des Graduiertenkollegs GRK 2250 – Impaktsicherheit von Baukonstruktionen durch mineralisch gebundene Komposite

*TP A6/II: Characterization of mineral-bonded materials for damping layers for impact strengthening of flat solid construction elements as part of the Research Training Group GRK 2250 – Mineral-bonded composites for enhanced structural impact safety*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) / GRK 2250/1

► **Zeitraum | Period**

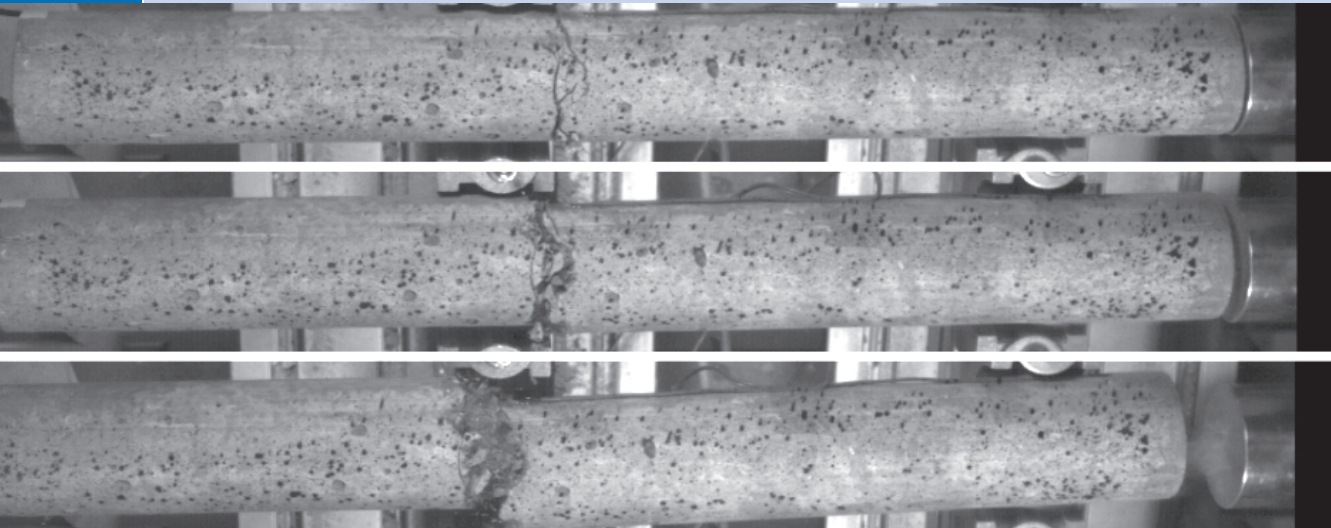
05.2020 – 04.2023

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Lena Leicht



Versagen einer stahlfaserbewehrten Probe | *Failure of a steel fiber-reinforced specimen* | Rendering: Oliver Mosig

## FAS(ER)ZINIERENDE DYNAMISCHE EIGENSCHAFTEN

### FIBRE FABULOUS DYNAMIC PROPERTIES

Faserverstärkter Beton zeichnet sich durch seine hohe Duktilität im Vergleich zu unbewehrten Normalbetonen aus. Die Fasern bilden eine Art diskontinuierliche, dreidimensional orientierte, isotrope Bewehrung im Beton. Die Fasern überbrücken Risse bei sehr geringen Rissbreiten, übertragen Belastungen und entwickeln im Beton eine Nachrissfestigkeit. Dies führt dazu, dass zur Trennung einer Betonprobe unter direkter Zugbelastung große Verschiebungen benötigt werden im Vergleich zu unbewehrtem Normalbeton, da trotz Rissen weiterhin noch Zugkräfte übertragen werden können.

Für die Dimensionierung von Gebäuden gegenüber hochdynamischen Beanspruchungen, wie beispielsweise Explosionen oder Fahrzeuganprall, können diese Eigenschaften entscheidende Vorteile bringen. Zum einen erhöhen sich durch die steigende Duktilität das Verformungsvermögen und somit auch die Energieaufnahme des Bauteils. Zum anderen kann dadurch ein entstehender Trümmerflug unterbunden werden, wodurch im Gebäude befindliche Personen oder Güter geschützt werden.

*Fibre-reinforced concrete is characterized by its high ductility compared to non-reinforced normal concrete. The fibres form a kind of discontinuous, three-dimensionally oriented, isotropic reinforcement in the concrete. The fibres bridge cracks at very small crack widths, transfer loads and develop crack resistance in the concrete. As a result, larger displacements are required to separate a concrete sample under direct tensile load compared to non-reinforced normal concrete, since tensile forces can still be transmitted despite cracks.*

*For the dimensioning of buildings against highly dynamic loads, such as explosions or vehicle impact, these properties can provide decisive advantages. On the one hand, the increasing ductility increases the deformability and thus also the energy absorption of the component. On the other hand, the resulting flying debris can be prevented, thus protecting people or goods inside the building.*

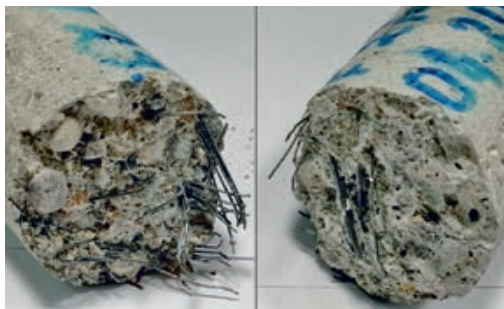
*To understand the load-bearing and damage behaviour of fibre-reinforced concrete under dynamic loading, knowledge of the decisive dynamic mechanical properties such as tensile*

Für das Verständnis des Trag- und Schädigungsverhaltens von faserbewehrten Betonen unter dynamischer Belastung ist dazu die Kenntnis der maßgebenden dynamischen und mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Bruchenergie erforderlich.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr München wurden diese Kennwerte mittels dynamischen Spallations- und Spaltzugversuchen im Split-Hopkinson-Bar ermittelt. Untersucht wurden Betone der Festigkeitsklassen C20/25, C40/50 und C80/95 mit Stahlfasergehalten von 0 bis 2,0 Vol.-% sowie mit alternativen Carbon- und Polypropylen-Fasern.

Es konnte festgestellt werden, dass mit steigendem Faservolumengehalt eine Zunahme des Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit der Faserbetone unter dynamischer Belastung resultiert. Des Weiteren wird durch die Zugabe von Stahlfasern die Bruchenergie enorm erhöht, welche mit steigendem Fasergehalt weiter zunimmt. Diese Erhöhung der Bruchenergie führt dazu, dass die entstehenden Bruchstücke eine deutlich geringere Restgeschwindigkeit im Vergleich zu den Bruchstücken unbewehrter Betone aufweisen. Bei einem Faservolumengehalt von 1,0 % ist eine Verzehnfachung der Bruchenergie gegenüber den unbewehrten Proben möglich. Die alternativ untersuchten Carbon- und Polypropylen-Fasern führen ebenso zu einer Steigerung der Bruchenergie, die jedoch gegenüber den stahlfaserbewehrten Proben geringer ausfallen.

Durch die Zunahme des Verformungsvermögens aufgrund der Fasern kann das Ziel der Unterbindung bzw. Verringerung des Trümmerfluges bei stoßartig belasteten Bauteilen ermöglicht werden.



Bruchflächen einer stahlfaserbewehrten Probe | *Fracture surfaces of a steel fiber-reinforced specimen* | Photo: Oliver Mosig

*strength, modulus of elasticity and fracture energy is required. These characteristic values were determined by dynamic spallation and splitting tensile tests in the split-Hopkinson bar in cooperation with the department of structural engineering of the Universität der Bundeswehr München. Concretes of the strength classes C20/25, C40/50 and C80/95 with steel fibre contents of 0 to 2.0% by volume and with alternative carbon and PP fibres were investigated.*

*It was found that with increasing fibre content, an increase in the modulus of elasticity and tensile strength under dynamic loading was obtained. Furthermore, the addition of steel fibres increases the fracture energy enormously, which increases further with increasing fibre content. This increase in the fracture energy leads to the fact that the resulting fragments have a significantly lower residual speed compared to the fragments of non-reinforced concretes. With a fibre volume content of 1.0%, a tenfold increase of the fracture energy compared to the non-reinforced specimens is possible. The alternatively examined carbon and PP fibres also lead to an increase in the fracture energy, but this is lower compared to the steel fibre reinforced samples.*

*By increasing the deformability due to the fibres, the aim of preventing or reducing the flying debris in components subjected to impact loads can be achieved.*

► **Titel | Title**

Dynamische Spallations- und Spaltzugversuche im Split-Hopkinson-Bar

*Dynamic spallation and splitting tensile tests in the split-Hopkinson bar*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

► **Zeitraum | Period**

09.2019 – 09.2020

► **Leiter | Project manager**

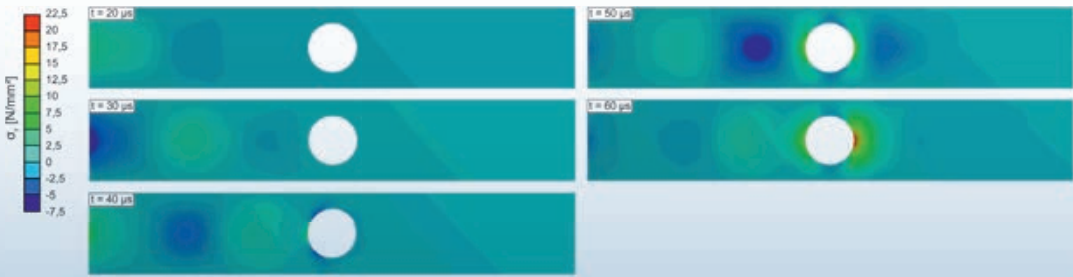
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Oliver Mosig

► **Partner | Partner**

Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität der Bundeswehr, München



Spannungsverlauf an einer Pore infolge einer Kompressionswelle | Stress curve on a pore due to a compression wave | Graphic: Oliver Mosig

# SCHNELLER, FESTER, WASSER?

## FASTER, STRONGER, WATER?

Beton weist unter schneller, dynamischer Beanspruchung eine höhere Festigkeit auf als unter langsamer, statischer. Dies wird als sogenannter Dehnrateneffekt bezeichnet und ist seit vielen Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. Die möglichen Ursachen dieser Festigkeitssteigerung werden in verschiedenen Phänomenen gesehen, die meisten davon konnten jedoch bisher nur qualitativ nachgewiesen werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde untersucht, inwieweit im Beton vorhandene Poren und darin befindliches Porenwasser das Ausbreitungsverhalten von Belastungswellen im Beton beeinflussen und ob darin eine weitere Ursache des Dehnrateneffektes gesehen werden kann.

In heterogenen Medien wie Beton kommt es bei der Ausbreitung von Belastungswellen aufgrund der unterschiedlichen Materialeigenschaften zu teilweisen Reflektionen und Übertragungen der Welle an den Grenzflächen der Einzelbestandteile. Infolge der unzähligen Reflektionen und Transmissionen im Inneren des Betons herrschen transiente, also zeitabhängige, Spannungszustände und kein statisches Gleichgewicht. Im Projekt wurden numerische Simulationen mit unterschiedlich eingebrachten Modellporen und Störstellen durchgeführt. Dabei wurden Parameter, wie beispielsweise das Medium oder der Durchmesser der Poren, in verschiedenen Belastungsszenarien variiert. Speziell wurde der Frage nachgegangen, inwieweit vorhandenes Porenwasser im Vergleich zur luftgefüllten Pore das Reflektions- und Transmissionsverhalten beeinflussen.

*Concrete exhibits higher strength under fast, dynamic loading than under slow, static loading. This behaviour is known as the strain rate effect and has been the subject of the research for many decades. The possible causes of this increase in strength are seen in various phenomena, but most of these have only been demonstrated qualitatively. In the context of this research project, the extent to which pores present in concrete and the pore water contained therein influence the propagation behaviour of stress waves in concrete was investigated, and this can be seen as a further cause of the strain rate effect.*

*In heterogeneous media, such as concrete, the propagation of load waves results in partial reflections and partial transmissions of the wave at the interfaces of the individual constituents due to the different material properties. As a result of the countless reflections and transmissions inside the concrete, transient, i.e. time-dependent, stress states prevail and not the static equilibrium. Within the scope of the project, numerical simulations with differently introduced model pores were carried out. Parameters such as the medium, the diameter or the number of pores were varied in different loading scenarios. In particular, the question was investigated to what extent existing pore water influences the reflection and transmission behaviour compared to the air-filled pore.*

*It was shown that measurable strength increases result, in particular, because the notch stresses*



Es könnte gezeigt werden, dass messbare Festigkeitssteigerungen resultieren, insbesondere weil sich die Kerbspannungen am Porenrand unter dynamischer Belastung im Vergleich zu jenen unter statischer Belastung verringern. Infolge der Kerbspannungen wird die Festigkeit des Betons örtlich überschritten, es bilden sich Mikrorisse, welche als Beginn des Bruchvorganges aufgefasst werden können. Das Medium in der Pore – Luft oder Wasser – spielt dabei eine untergeordnete Rolle, sodass die veränderte Materialimpedanz infolge vorhandenen Porenwassers nicht als weitere Ursache des Dehnrateneffektes herangezogen werden kann.

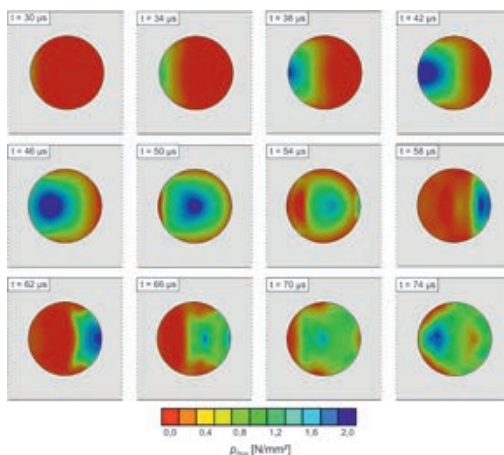
Ergänzend zu den numerischen Untersuchungen wurden experimentelle Druckversuche an definiert wassergesättigten Betonproben durchgeführt, um den globalen Einfluss von Porenwasser auf die statische und dynamische Druckfestigkeit des Betons zu bestimmen. Hier zeigte sich, dass sowohl die statische als auch die dynamische Betondruckfestigkeit betragsmäßig in gleicher Weise mit steigendem Porenwassergehalt abfallen und demzufolge unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit sind.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 1501553 gefördert.

*at the pore edge are reduced under dynamic loading compared to those under static loading. As a result of the notch stresses, the strength of the concrete is locally exceeded and microcracks form, which can be interpreted as the beginning of the fracture process. The medium of the pore – air- or water-filled – plays a subordinate role, so that the changed material impedance due to the presence of pore water cannot be used as a further cause of the strain rate effect.*

*In addition to the numerical investigations, experimental compression tests were carried out on defined water-saturated concrete specimens to determine the global influence of pore water on the static and dynamic compressive strength of the concrete. It is shown that both the static and the dynamic compressive strength of concrete decrease in magnitude with increasing pore water content and are therefore independent of the loading rate.*

*The presented project was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi, project No. 1501553) on the basis of a decision of the German Bundestag.*



Druckverlauf in einer Wasserpore infolge einer Kompressionswelle | Pressure in the water pore due to a compression wave | Graphic: Oliver Mosig

► **Titel | Title**

Untersuchung des Einflusses von Porenwasser auf die Wellenausbreitung in Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten

*Investigation of the influence of pore water on the wave propagation in concrete at high loading rates*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / KEK

► **Zeitraum | Period**

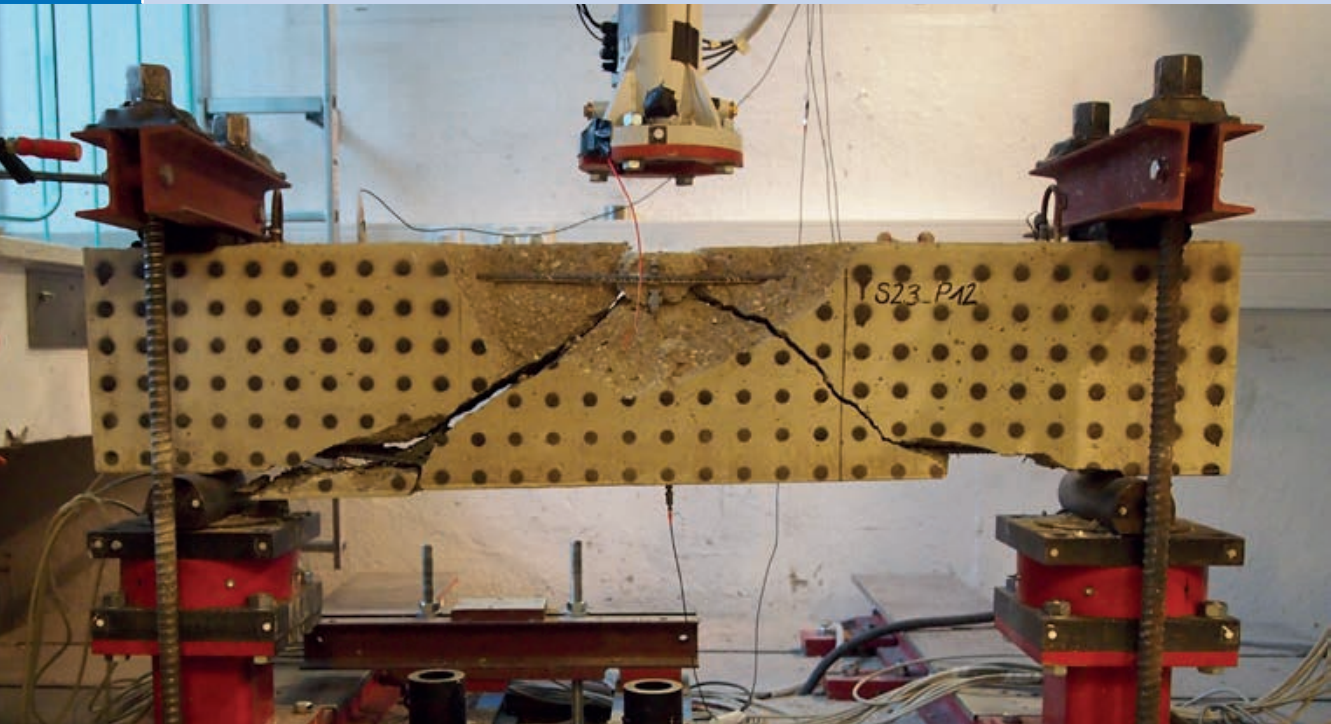
09.2017 – 11.2020

► **Leiter | Project managers**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Oliver Mosig



Balkenversuch ohne Bügelbewehrung, geprüft bei einem Ladedruck von 0,8 bar | Beam test without stirrup reinforcement tested at a pressure of 0.8 bar | Photo: Lena Leicht

## STARK VERBUNDEN TIGHTLY BONDED

Im Fallversuchstand des Otto-Mohr-Laboratoriums, können großformatige Probekörper, wie Balken oder Platten, unter Impaktbeanspruchung geprüft werden. Stahlimpaktoren mit 100 mm Durchmesser werden mit Druckluft beschleunigt und treffen den Probekörper mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Zur weitergehenden Untersuchung der Einflüsse auf den Dehnungsverlauf im Bewehrungsstahl in Balkenversuchen wurde eine zweite Serie an Balken geprüft, um Rückschlüsse auf die Beanspruchung des Verbunds zwischen Beton und Bewehrungsstahl ziehen zu können. Die zweite Serie zeichnet sich durch weniger Variationen der Geometrie aus. Es wurden erneut zwölf Balken getestet, diesmal jedoch mit nur drei Unterserien. Eine Teilserie an Balken wurde mit Bügeln bewehrt, in einer anderen wurden Hüllrohre um die Bewehrung gelegt. Ziel war es, die Hüllrohre an den Stellen zu platzieren, an denen Risse auftreten und mit hoher plastischer Dehnung des Stahls gerechnet wur-

*The second series of impact tests on beams has helped to analyze in-depth the effect on the strain distribution along beams. The tests are carried out in the drop tower of the Otto-Mohr-laboratory with steel impactors with a diameter of 100 mm. The impactors are accelerated to variable velocities by compressed air. Twelve beams were tested in the drop tower, but only with three sub-series tested at four different impactor velocities. In one subseries, the beams were stirrup-reinforced in another subseries bond breakers were used. The goal was to place the bond breakers at the position where high plastic strains are expected. The strains measured in the centre of the beam where the bending cracks occurs were in some cases a lot higher within the bond free zone than the strains measured in the bonded area. The measurements in the bonded and unbonded third points where the inclined punching cone cracks are located hardly differed. The impactor velocity was varied within the different subseries. The maximum loading velocity of the*

de. Tatsächlich wurden im Biege- und im Stanzkegelversuch in der Balkenmitte in einigen Versuchen deutlich größere Dehnungen in den Hüllrohren gemessen als in den Versuchen ohne Hüllrohre. In den Drittelpunkten, wo mit den schrägen Stanzkegelrissen zu rechnen war, wurden keine großen Unterschiede zwischen den Messungen in und außerhalb der Hüllrohre festgestellt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde innerhalb der Untergruppen variiert. Da Balken mit Bügelbewehrung generell unempfindlicher auf Impact reagieren, wurde hier die Maximalgeschwindigkeit des Impaktors, im Vergleich zu den Proben ohne Bügelbewehrung, erhöht. Die Verbundspannungen zwischen den einzelnen Messstellen lassen sich mithilfe der diskreten Dehnungswerte und der Verbundlänge zwischen den Messungen berechnen.

Mit den neuen Erkenntnissen zum Verhalten von Bewehrung in Balkenversuchen können die Verbundversuche im Split-Hopkinson-Bar durchgeführt werden. Die Balkenversuche dienen auch der Definition von Belastungshistorien, wie sie in Großbauteilen auftreten und im Split-Hopkinson-Bar nachgeahmt werden sollen.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 1501566 gefördert.



Stanzkegeldetail eines Balkenversuchs ohne Bügelbewehrung, geprüft bei einem Ladedruck von 0,6 bar | *Punching cone detail of a beam test without stirrup reinforcement tested at a loading pressure of 0.6 bar* | Photo: Lena Leicht

*stirrup-reinforced beams was higher than in the other two series as these beams can withstand impact better. The bond stresses between the measurements were calculated with the help of discrete strain values divided by the bond length between the measurement points.*

*The results from the drop tower beam experiments helped to find new specimen types for small-scale tests in the split Hopkinson bar and especially allow for the definition of realistic bond stresses and maximum strains that need to be tested on small scale.*

*The presented project was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi, project no. 1501566) based on a decision by the German Bundestag.*

► **Titel | Title**

Verbund zwischen Beton und Bewehrungsstahl bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten

*Bond Between Concrete and Steel Under High Loading Rates*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

► **Zeitraum | Period**

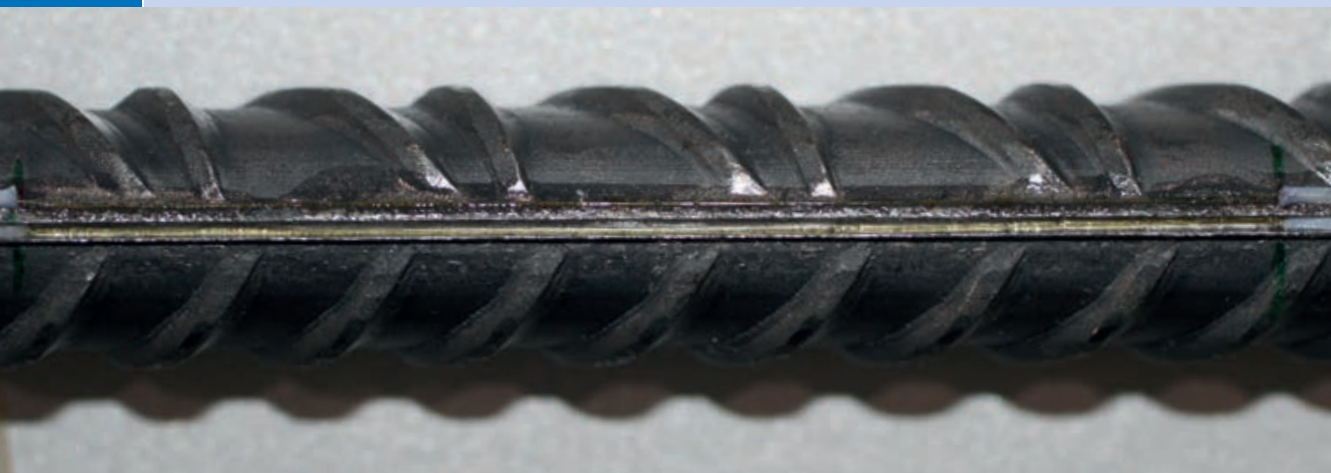
10.2014 – 12.2017 (Phase 1)  
05.2018 – 04.2022 (Phase 2)

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

M.Eng. Petr Máca Ph.D  
Dipl.-Ing. Lena Leicht



Bewehrungsstab mit faseroptischen Sensoren an Längsrippe und in Nut | Reinforcement bar with fibre optic sensors on longitudinal rib and in groove | Photo: Marc Koschemann

## SESAM, ÖFFNE DICH

### UNBOX THE BLACK BOX

Risse gehören zum Baustoff Stahlbeton und sind unerlässlich für dessen Tragwirkung. Jedoch sind diese auch Schwachstellen von Stahlbetonbauteilen und können ursächlich für Undichtigkeiten und Bewehrungskorrosion sein und somit zur Verschlechterung der Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit führen. Wie beispielsweise Zwischenlager für radioaktive Brennelemente, werden Gebäude häufig länger genutzt als planmäßig vorgesehen. Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie sich Langzeitbelastungen auf die Rissbreiten von Stahlbeton auswirken. Maßgeblichen Einfluss auf das Rissverhalten hat die Verbundwirkung zwischen Betonstahl und Beton. Folglich ist eine genaue Kenntnis des Verbundes zwischen Beton und Bewehrungsstab einschließlich der örtlichen und zeitlichen Verteilung für die Bewertung und Bemessung von baulichen Strukturen erforderlich.

Gegenwärtige Untersuchungen am Institut für Massivbau befassen sich mit dem Verbundverhalten und der Verbundspannungsverteilung von Bewehrungsstahl in normalfesten Betonen unter Langzeitbelastung. Für drei verschiedene Probekörpertypen und unterschiedliche Verbundlängen wird dafür zunächst die jeweilige statische Verbundtragfähigkeit experimentell ermittelt. Anschließend werden weitere Proben

*Cracks belong to the material reinforced concrete and are necessary for its load-bearing mechanism. However, cracks are also weak points of reinforced concrete elements and can be the cause of leaks and reinforcement corrosion and thus lead to deterioration. Buildings, such as interim nuclear storage facilities, are often used for longer than planned. This raises the question of how long-term loads affect the crack widths of reinforced concrete. The bond behaviour between reinforcing steel and concrete has a decisive influence on the cracking behaviour. Existing models are based on data determined experimentally at the beginning and end of a bond zone. Fibre-optic measurement technology opens up the possibility of recording local and time-related changes within the bond area.*

*Current investigations at the Institute for Concrete Structures are dealing with the bond behaviour and the bond stress distribution of reinforcing steel in normal-strength concretes under long-term loading. For three different specimen types and different bond lengths, the specific static bond strength is first determined experimentally. Subsequently, further samples are loaded with up to 70% of the static reference load for up to 10.000 hours. The measurement of the bond behaviour is carried out*

mit bis zu 70 % der statischen Referenzlast bis zu 10.000 Stunden belastet. Die messtechnische Erfassung des Verbundverhaltens erfolgt klassisch durch Wegaufnehmer und durch faseroptische Sensoren. Diese haarfeinen Sensoren werden an den Ausziehstäben appliziert und ermöglichen die quasi-kontinuierliche Erfassung von Dehnungen innerhalb der Verbundzone während der Versuche. Dabei hat der Applikationsort auf dem Bewehrungsstab einen wesentlichen Einfluss. In Vorversuchen wurden die Sensoren mithilfe von Nuten an unterschiedliche Positionen am Stab geklebt, um Dehnungsunterschiede innerhalb des Bewehrungsquerschnitts zu identifizieren. Die feine örtliche Auflösung von 0,65 mm je Messwert erlaubt den Einblick in die lokale Kraftübertragung von Bewehrung auf Beton und die Darstellung von Spannungsverläufen für beliebige Belastungszustände. Infolge der Schädigung des Betons bei Laststeigerung sowie durch Kriechen unter Dauerlast verändert sich die Verteilung der Verbundkräfte innerhalb der Verbundzone, was wiederum mit steigenden Verformungen und wachsenden Rissbreiten einhergeht. Mithilfe der lokalen Verbundbeziehungen soll die Berechnung von Rissbreiten für eine beliebige Verbundlänge und Belastungsdauer ermöglicht werden.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 1501601 gefördert.



Verbundzone mit Sensorfaser nach Versagen | Bond zone with sensor fibre after failure | Photo: Marc Koschemann

*by conventional displacement transducers and fibre-optic sensors. These hair-thin sensors are applied to the pull-out bars and enable the quasi-continuous recording of strains within the bond zone during the tests. The application location on the reinforcement bar has a significant influence. In preliminary tests, the sensors were applied at different positions on the bar with the help of grooves to identify strain differences within the reinforcement cross-section. The fine local resolution of 0.65 mm per measured value allows insight into the local force transmission from reinforcement to concrete and the representation of stress curves for any load state. As a result of the deterioration of the concrete during load increase and creep under permanent load, the distribution of bond forces within the bond zone changes, which is accompanied by increasing deformations and growing crack widths.*

*The presented project was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (BMWi, project no. 1501601) based on a decision by the German Bundestag.*

► **Titel | Title**

Untersuchung der Rissbreitenentwicklung von Stahlbeton unter Langzeitbelastung anhand lokaler Verbundbeziehungen

*Investigations of the crack width development of reinforced concrete under long-term loading based on local bond relationships*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / KEK

► **Zeitraum | Period**

03.2020 – 02.2023

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Marc Koschemann



Verbundbereich nach Versagen | Bond zone after failure | Photo: Marc Koschemann

## IMMER WACH BLEIBEN

### ALWAYS STAY AWAKE

Nur ein wacher Geist kann tätig sein und ein Werkstoff ist dann dauerhaft nutzbar, wenn dieser nicht ermüdet. Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens WinConFat wird die Materialermüdung von Stahl- und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung erforscht. Vor allem durch die verstärkte Nutzung der Windenergie geht der Wunsch nach größeren, effizienteren und langlebigen Anlagen einher.

Ergänzend zu Untersuchungen von Beton und Bewehrungsstahl durch Projektpartner, wie der Leibniz Universität Hannover, der RWTH Aachen und weiterer, beschäftigt sich das Institut für Massivbau mit dem Verbundverhalten beider Baustoffe im hochzyklischen Ermüdungsbereich ( $N > 2 \cdot 10^6$ ). Im Zuge der bisherigen Untersuchungen wurden 67 quasi-statische und 45 zyklische Auszieh- und Balkenendversuche durchgeführt. Dafür wurden zwei hochfeste Betone und ein Normalbeton sowie Bewehrungsstäbe mit 16 mm Durchmesser verwendet. Obwohl die Verbundlänge nur das Zweifache des Stabdurchmessers  $d_s$  beträgt, mussten bei der statischen Prüfung Zugkräfte von bis zu 100 kN

*Only an alert mind can be active, and a material can be used permanently – if it does not fatigue. Within the scope of the joint research project WinConFat, the fatigue behaviour of the material reinforced and prestressed concrete under highly cyclic loading is being researched. The increased use of wind energy, in particular, is accompanied by the desire for larger, more efficient and durable plants.*

*In addition to investigations of concrete and reinforcing steel by project partners such as Leibniz Universität Hannover, RWTH Aachen University and others, the Institute of Concrete Structures is investigating the bond behaviour of the composite building material in the high-cycle fatigue range ( $N > 2 \cdot 10^6$ ).*

*In the course of the investigations, 67 quasi-static and 45 cyclic pull-out and beam-end tests were carried out so far. For this purpose, two high-strength concretes and one normal strength concrete, as well as reinforcing bars with 16 mm diameter, were used. Although the bond length is only twice the bar diameter  $d_s$ , tensile forces of up to 100 kN had to be applied in the static tests to achieve bond failure. For*

aufgebracht werden, um ein Verbundversagen zu erreichen. Für beide hochfesten Betone mit den Druckfestigkeitsklassen C80 und C120 wurden bei Ausziehversuchen im Mittel ca. 15 % größere Auszugskräfte erreicht als bei Balkenendversuchen. Entscheidend dabei war die große Betondeckung beim Auszugversuch, welche eine stärkere Umschnürung durch den umliegenden Beton bewirkt hat.

Die Verbundermüdungsversuche wurden mit einer gleichmäßigen sinusförmigen Zugschwellbelastung beansprucht. Die Vielzahl der Versuche wurde mit einer Belastungsfrequenz von 5 Hz durchgeführt. Zudem wurden Proben mit der doppelten und vierfachen Frequenz zyklisch beansprucht. Das Unterlastniveau betrug 40 % der statischen Verbundfestigkeit und die Oberlastniveaus wurden versuchsweise zwischen 75 % und 80 % variiert. Die bisherigen Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass die Oberlast einen wesentlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des Verbundes hat. Bei Versuchen mit einem Oberlastniveau von 78 % und höher trat ein Verbundversagen in der Regel bei 10.000 bis 200.000 Lastwechseln ein. Bei geringeren Oberlastniveaus konnten zumeist Lastwechselzahlen von mehr als 2 Millionen und bis zu 20 Millionen ohne Versagen erreicht werden.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollen zur Entwicklung zutreffender Materialmodelle und zur Bestimmung der Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken in Bezug auf Verbundermüdung im hochzyklischen Bereich beitragen.



Balkenendversuch mit Spaltriss | *Beam-End test with splitting crack* | Photo: Marc Koschemann

*both high-strength concretes with compressive strength classes C80 and C120, pull-out tests achieved on average approx. 15% higher pull-out forces than beam end tests. The decisive factor here was the large concrete cover of the pull-out test, which caused bigger confinement by the surrounding concrete.*

*The bond fatigue tests were loaded with a uniform sinusoidal tensile loading. The majority of the tests were performed with a loading frequency of 5 Hz. Also, specimens were cyclically loaded with twice and four times the frequency. The lower boundary was 40% of the static bond strength and the upper load levels were varied between 75% and 80% on a trial-by-trial basis. The test results so far indicate that the top load has a significant effect on the fatigue strength of the bond. In tests with upper load levels of 78% and higher, bond failure generally occurred at 10,000 to 200,000 load cycles. At lower load levels, load cycles of more than 2 million and up to 20 million could mostly be achieved without failure.*

*The findings from this project will contribute to the development of applicable material models and determination of the service life of reinforced concrete structures, concerning bond fatigue in the high-cycle range.*

► **Titel | Title**

TP Verbund unter Zugschwellbeanspruchung im Verbundvorhaben: WinConFat – Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung

*TP: Bond under tensile cyclic loading within the joint research project WinConFat: Material fatigue of on- and offshore wind powered plants out of reinforced concrete and prestressed concrete under high cyclic loading*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Projektträger: PT Jülich

► **Zeitraum | Period**

11.2016 – 02.2021

► **Verbundvorhabenleiter | Joint research project leader**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Leiter Teilvorhaben | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Marc Koschemann

► **Projektpartner | Project partners**

6 Forschungseinrichtungen und 3 assoziierte Partner



Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton | Wind turbine made of reinforced concrete and prestressed concrete | Photo: JACLOU-DL, Pixabay

## ZUSTANDSANALYSE VON WEA

### *DAMAGE STATE ANALYSIS OF WIND TURBINES*

In vielen Bereichen der Technik ist die Dauerüberwachung von Anlagen ein etabliertes Werkzeug zur Lebensdauerbeurteilung und Risikominimierung. Das Monitoring von Dehnungen und Verformungen wird auch im Bauwesen zunehmend angewendet. Die genannten Messgrößen sind aber wegen der nicht gegebenen Langlebigkeit der Sensoren sowie der teils noch unzureichenden Beschreibung von Degradationsprozessen für ein Lebensdauermonitoring nur teilweise geeignet. Auf der anderen Seite bieten Ultraschallmessverfahren in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen (z. B. Medizin, Physik) bereits heute ein enormes Leistungspotenzial.

Im Betonbau ist die Anwendung deutlich unterentwickelt, aber gerade in Laborversuchen zeigt das Verfahren, dass es zur Zustandsbewertung und Schädigungsbeobachtung von Betontragwerken ideal geeignet ist. Darüber hinaus weist das Verfahren ein überaus hohes Potenzial für langzeitstabile Messungen auf. Jedoch ist die Interpretation der Ergeb-

*In many areas of engineering, the long-term monitoring of structures is an established tool for service life assessment and risk minimization. The monitoring of strains and deformations is applied in civil engineering is increasing. However, the mentioned measurements are only partially suitable for lifetime monitoring due to the lack of longevity of the sensors as well as the partially still insufficient description of degradation processes. On the other hand, ultrasonic measurement methods already offer enormous performance potential in several scientific disciplines (e.g. medicine, physics).*

*In concrete construction, the application is underdeveloped, but especially in laboratory tests, the method shows that it is ideally suited for condition assessment and damage monitoring of concrete structures. Furthermore, the method has an extremely high potential for long-term stable monitoring. However, the interpretation of the results from an ultrasonic measurement is not trivial, since concrete exhibits complex multiple scattering of ultrasonic waves.*



nisse aus einer Ultraschallmessung nicht trivial, da der Beton eine komplexe Mehrfachstreuung der Ultraschallwellen aufweist.

Das Vorhaben gliedert sich als Teilpaket in das Verbundforschungsvorhaben WinConFat „Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen (WEA) aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung“ ein. Als Schwerpunkt des Forschungsvorhabens im Jahr 2020 wurden zu statischen und zyklischen Materialversuchen sowie zu Kriechversuchen Ultraschallmessungen an großformatigen Betonbalken unter Ermüdungsbeanspruchungen weitergeführt. Bei diesen Untersuchungen wird der Zusammenhang zwischen der Veränderung der Materialeigenschaften und dem Ausbreitungsverhalten der Ultraschallwellen in Beton ermittelt.

Zweck der Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens DBV 311 ist im weiteren Sinne die Erforschung von Bauwerksindikatoren für die Erfassung des Schädigungsprozesses zur Anwendungsentwicklung der Ultraschallverfahren auf einem langzeitstabilen Monitoring zur Beurteilung der Lebensdauer von Tragwerken aus Stahl- und Spannbeton.



Ultraschalluntersuchung bei einem großformatigen Balken | *Ultrasonic investigation of a large concrete beam* | Photo: Sebastian Schneider

*The project is part of the joint research project WinConFat - Material fatigue of onshore and offshore wind turbines made of reinforced and prestressed concrete under high cyclic loading. As a focus of the research project in 2020, ultrasonic measurements of large-format concrete beams under fatigue loading were conducted as well as static and cyclic material tests and creep tests. The relationship between the change in material properties and the change in the propagation behaviour of ultrasonic waves in concrete was experimentally determined.*

*The purpose of the investigations of the research project DBV 311 is in a broader sense the research of structural indicators for the detection of the damage process for the development and implementation of the ultrasonic methods to a long-term stable monitoring tool for the assessment of the service life of structures made of reinforced and prestressed concrete.*

► **Titel | Title**

Methoden zur Zustandsanalyse von Windenergieanlagen, eingebunden in das Verbundvorhaben WinConFat: Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung

*Methods for structural health monitoring of wind turbines, integrated in the joint research project WinConFat: Material fatigue of onshore and offshore wind turbines made of reinforced concrete and prestressed concrete under high cyclic loads*

► **Förderer | Funding**

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (DBV)

► **Zeitraum | Period**

09.2018 – 12.2020

► **Verbundvorhabenleiter | Joint research project leader**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Leiter Teilvorhaben | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributor**

Raúl Beltrán M. Sc.

► **Projektpartner | Project partner**

Jordahl GmbH, Berlin | Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover



Versuchsaufbau für Schallemissionsmessungen | *Experimental setup for acoustic emission measurements* | Graphic: Ronghua Xu

# AUTOMATISIERTE DAUERÜBERWACHUNG VON WINDENERGIEANLAGEN

## AUTOMATIC STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEM OF WIND TURBINES

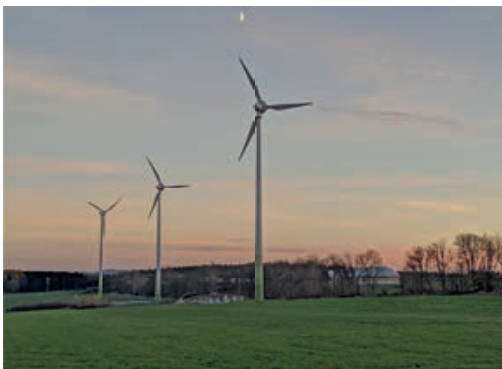
2018 forderte das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im sechsten Monitoring-Bericht der Energiewende, dass bis 2050 mindestens 80 % der Treibhausgasemissionen reduziert und gleichzeitig ein Anteil von 60 % der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch gegenüber 1990 erreicht werden sollen. Mit etwa 16 % Beteiligung an der Gesamtenergieerzeugung in Deutschland zählt die Windenergie zu einem Schwerpunkt der Energiewende. Um das Ziel einhalten zu können, müssen einerseits die Leistung der Windenergieanlagen gesteigert und andererseits ihre Errichtungs- und Instandhaltungskosten reduziert werden. Im Sinne der günstigeren Instandhaltungskosten müssen die Schädigungen in Bauteilen rechtzeitig detektiert werden, bevor sie ein kritisches Versagen auslösen und kostenintensive Reparaturen erfordern. Die Grundlage für diese Art der Instandhaltung sind Daten, die Informationen über Zustandsänderungen und Schädigungen enthalten.

*In 2018, the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) demanded in the sixth monitoring report of the energy transition that by 2050 at least 80% of greenhouse gas emissions should be reduced and at the same time a share of 60% of renewable energies in the gross final consumption of energy should be achieved compared to 1990. With around 16% participation in total energy generation in Germany, wind energy is one of the focal points of the energy transition. To be able to meet the goal, on the one hand, the performance of the wind turbines must be increased and, on the other hand, their construction and maintenance costs must be reduced. For lower maintenance costs, damage to components must be detected on time before they cause a critical failure and require costly repairs. The basis for this type of maintenance is data that contain information about changes in condition and damage.*

*For the wind turbines in operation, most of the data is obtained using conventional measurement methods, e.g. strain gauges or acceleration sen-*

Für die in Betrieb befindlichen Windenergieanlagen werden die Daten zum Großteil durch herkömmliche Messmethoden gewonnen, z. B. Dehnungsmessstreifen oder Beschleunigungssensoren. Bei diesem Verfahren wird aber vorausgesetzt, dass hinreichend große Schädigungen eine globale strukturelle Verformung im Tragwerk oder in Bauteilen hervorrufen, die durch oben genannte Messtechnik aufgenommen werden kann. Entstandene kleine Schädigungen können in diesem Verfahren nicht rechtzeitig identifiziert und lokalisiert werden.

In diesem Projekt wird Schallemissionsmessung zur Datengeneration verwendet, die eine unmittelbare Detektion der Schädigungsereignisse ermöglicht. Es wird eine Vielzahl von großmaßstäblichen Versuchen im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden vorgesehen, bei denen Drahtbruchsignale von Spanngliedern erzeugt und durch Schallemissionssensoren aufgenommen werden. Bei den Versuchen werden verschiedene Einflussparameter untersucht, wie z. B. unterschiedliche Sensoranordnungen, Abstände zwischen Bruchstellen und Sensoren. Die ermittelten Daten werden mithilfe der neuartigen Auswertemethoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz verarbeitet. Aufbauend auf den Erkenntnissen sollte ein Konzept für ein effektives *Structural-Health-Monitoring-System* für Windenergieanlagen entwickelt werden, welches die Informationen über den Zustand der Tragkonstruktion liefern kann.



Windenergieanlagen im Osterzgebirge | *Wind turbines in the Eastern Ore Mountains range* | Photo: Kerstin Speck

*sors. With this method, however, it is assumed that sufficiently large damage causes global structural deformation in the structure or in components, which can be recorded by the above-mentioned measurement technology. Small damage that has occurred cannot be identified and localized in time with this method.*

*In this project, acoustic emission measurements are used to generate data that enables the damage events to be detected directly. A large number of large-scale experiments are planned in the Otto Mohr laboratory of the TU Dresden in which the generated wire break signals of tendons are recorded by acoustic emission sensors. Various influencing parameters are investigated during the tests, such as different sensor arrangements, distances between breakpoints and sensors. The determined data is processed with the help of the new evaluation methods from the field of artificial intelligence (AI). Based on the findings, a concept for an effective structural health monitoring system (SHM system) for wind turbines should be developed, which can provide information about the condition of the load-bearing structures.*

► **Titel | Title**

KI-unterstütztes Schallemissionsmonitoring zur automatischen Schadenserkenkung in Tragstrukturen von Windenergieanlagen

*AI-supported acoustic emission monitoring for automatic damage detection in supporting structures of wind turbines*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) / KISWind

► **Zeitraum | Period**

01.07.2020 – 30.06.2023

► **Leiter | Project manager**

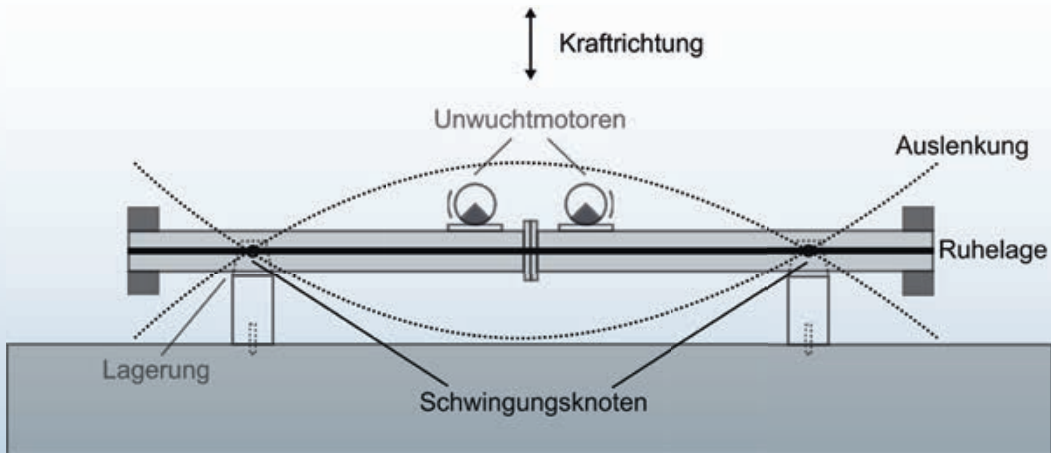
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Ronghua Xu

► **Projektpartner | Project partners**

Leibniz Universität Hannover | Max Bögl Wind AG, Sengenthal | MKP GmbH, Weimar | TÜV Süd Industrie Service GmbH, München



Schematische Darstellung einer Schwingungsknotenlagerung im Resonanzprüfstand | Schematic illustration of a beam support in its oscillation nodes in a resonance-based test facility | Graphic: Sebastian Schneider

## VERSUCHE MIT RESONANZ

### TESTING BY RESONANCE

Windenergieanlagen unterliegen im Laufe ihrer Lebensdauer von 20 Jahren hohen zyklischen Beanspruchungen. Insbesondere bei Offshore-Anlagen, welche zusätzlich zur Wind- auch eine Wellenbeanspruchung erfahren, können Lastwechselzahlen  $> 10^7$  auftreten. Folglich sind Untersuchungen des Ermüdungsverhaltens an Tragstrukturelementen von Offshore-Windenergieanlagen von großer Bedeutung.

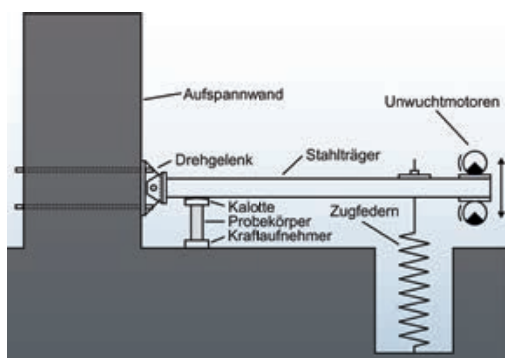
Bisher wurden ausschließlich experimentelle Versuche zur Lebensdauer im High- und Very-High-Cycle-Fatigue-Bereich an kleinmaßstäblichen Probekörpern durchgeführt. Aufgrund von Maßstabeffekten liefern jedoch nur großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen die relevanten Messergebnisse, die auf reale Strukturgrößen übertragbar sind. Da im Bereich hoher Lastwechselzahlen Ermüdungsversuche großer Bauteile mit gängigen servohydraulischen Aktuatoren aufgrund des hohen Energiebedarfs und der begrenzten Belastungsfrequenzen nicht mehr effizient durchgeführt werden können, wurde am Institut für Massivbau an der Leibniz Universität in Hannover ein Resonanzversuchsstand entwickelt.

*During their 20 years-service life, wind turbines are subjected to high dynamic loads. Especially offshore turbines, subjected to both wave and wind loads, are exposed to load cycles as high as  $10^7$ . Therefore the research on the fatigue behaviour of structural elements of offshore wind turbines is of great importance.*

*Until now high and ultra-high cycle fatigue tests for service life studies have been performed solely on small-scale specimens. Due to size effects, only large-scaled testing provides relevant measurement results that can be transferred to real structural scales. Fatigue tests of structural elements with high numbers of load cycles are commonly carried out with servo-hydraulic actuators. Because of the high energy demand and the limited loading frequencies of the actuators, this method is no longer efficient for tests on large structural elements. That's why a resonance test rig was developed at the Institute of Concrete Construction of the Leibniz University Hanover. With this test method, based on synchronized imbalance rotors, it is possible to generate cyclic fatigue loading with minimum energy consumption and a high excitation frequency at the same time. However, the strong oscillations being transmitted to the*

Die mit synchronisierten Unwuchtantrieben realisierte Prüfmethode ermöglicht, mit minimalem Energieaufwand und gleichzeitig hoher Erregerfrequenz zyklische Ermüdungsbeanspruchungen zu erzeugen. Allerdings sind die sich auf die Versuchshalle übertragenden Schwingungen derzeit noch limitierende Faktoren, welche die Versuchsdurchführung an größeren Bauteilen, wie sie im Windenergiebereich Anwendung finden, einzuschränken.

Im Rahmen des Verbundvorhabens ResoWind, welches zusammen mit dem Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme (IWES) und dem Testzentrum Tragstrukturen Hannover (TTH) bearbeitet wird, werden die bewährte Resonanzprüfmethode optimiert und somit großmaßstäbliche Versuche an Strukturen durchführbar. Für ermüdungsbeanspruchte Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen werden Demonstratoren konzipiert, die Untersuchungen sowohl an axial auf Zug und Druck beanspruchte als auch an biegebeanspruchte Tragstrukturelementen ermöglichen. Bei der Konzipierung des Demonstrators für Biegebeanspruchungen liegt der Schwerpunkt in der Entwicklung einer Schwingungsknotenlagerung, wodurch die problematische Schwingungsübertragung auf die Umgebung minimiert wird. Mit den Demonstratoren für axiale Druck- und Zugbeanspruchungen wird der Vorteil des geringen Energiebedarfs gegenüber konventioneller hydraulischer Prüftechnik mit der Möglichkeit kombiniert, nahezu beliebige Prüfkörpergeometrien zu verwenden.



Mögliche Versuchskonfiguration für axial druckbeanspruchte Probekörper | Possible test setup for axially compressive loaded specimens | Graphic: Sebastian Schneider

*test hall are limiting factors for resonance tests on large structural elements such as those used in the wind energy sector.*

*Within the framework of the joint project ResoWind in cooperation with the Fraunhofer Institute for Wind Energy Systems (IWES) and the Test Centre for Support Structures Hanover (TTH), the resonant testing method is being optimized to enable tests on large-scale structures. Demonstrators are being designed for fatigue-stressed support structures of offshore wind turbines. They enable tests at both axially (tensile and compressive) loaded and bending stressed structural elements. The focus of designing the resonant bending fatigue test is on the development of an oscillation node support. Consequently, the critical transmission of oscillations to the environment is being minimized. The demonstrators for axial compressive and tensile loads combine the advantage of low energy costs compared to conventional hydraulic testing technology with the flexibility to use test specimens with almost any geometry.*

► **Titel | Title**

ABT.Reso.TUD: Entwicklung und Optimierung resonanzbasierter Prüfmethode für axial- und biegebeanspruchte Tragstrukturelemente als Teilvorhaben im Verbundvorhaben ResoWind: Resonanzbasierte Prüfmethode für kosten- und zeitoptimierte Lebensdaueruntersuchungen an Tragstrukturelementen von Windenergieanlagen (ResoWind)

*ABT.Reso.TUD: Development and optimization of resonance-based test methods for structural elements under axial and bending loads as a subproject of the joint project: Resonance-based testing methods for cost- and time-optimized lifetime studies on support structure elements of wind turbines (ResoWind)*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

► **Zeitraum | Period**

12.2019 – 05.2022

► **Leiter Teilvorhaben | Subproject manager**

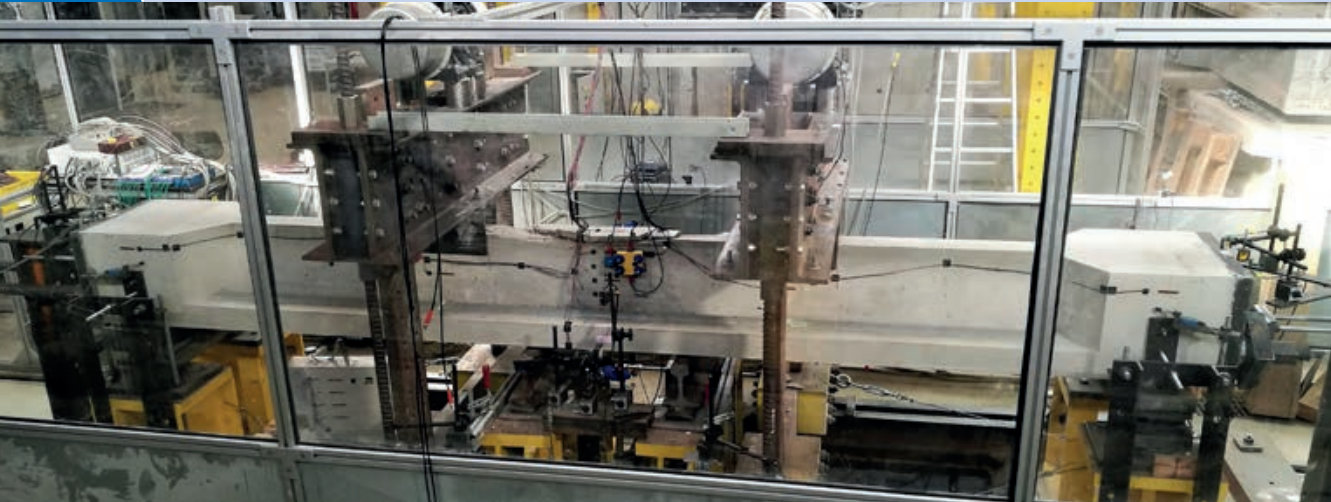
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Clara Schramm

► **Projektpartner | Project partners**

4 Partner, davon 2 aus der Forschung und 2 Firmen als assoziierte Partner



Betonbalken mit Ermüdungsschädigung im Resonanzprüfstand | Concrete beam with fatigue damage in the resonance-based testing facility | Photo: Dennis Birkner

## GROSSE BETONBALKEN IN RESONANZ

### LARGE CONCRETE BEAMS IN RESONANCE

Bauwerke wie Windenergieanlagen und Eisenbahnbrücken sind während ihrer gesamten Lebensdauer zyklischen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu einer sukzessiven Materialzermürbung führen. Diese veränderten Steifigkeitsverhältnisse haben eine Umlagerung der Beanspruchung innerhalb der Bauteilquerschnitte zur Folge. Dieser Effekt wird in der Bauwerksbemessung bislang nur stark vereinfacht betrachtet.

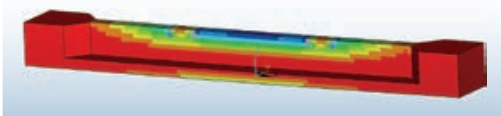
In diesem Projekt sollen gezielt und systematisch die auftretenden Spannungsumlagerungen von ermüdungsbeanspruchten Betonbauteilen untersucht werden. In diesem Rahmen werden sowohl Finite-Elemente-Simulationen als auch experimentelle Versuche durchgeführt. Für die FE-Simulationen wird ein additives Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton weiterentwickelt. Das numerische Modell ist in der Lage sowohl lokale Steifigkeitsänderungen als auch plastische und visko-elastische Verformungen zu simulieren. Die Modellparameter werden mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen kalibriert, sodass eine realitätsnähere Simulation des Materialverhaltens unter Ermüdungsbeanspruchungen möglich wird. Die Versuche werden an großformatigen Prüfkörpern durchgeführt, da die loka-

*Structures such as wind turbines and railway bridges are subjected to cyclic loads throughout their lifetime, which leads to successive material degradation. The reduced stiffness conditions cause a stress redistribution within the cross-section of the structures. So far, this effect has only been considered in a very simplified manner in the structural design.*

*This project aims to specifically and systematically investigate stress redistributions occurring in concrete structures subjected to fatigue loads. Within this framework, both finite element simulations and experimental investigations are carried out. An additive strain model for fatigue loaded concrete is refined for the FE simulations. The numerical model can simulate local stiffness changes as well as plastic and visco-elastic deformations. The model parameters are calibrated using experimental investigations enabling a more accurate simulation of the material behaviour subjected to fatigue loads. The experimental investigations are carried out on large-scale specimens since local stiffness changes and stress redistributions can be better determined this way. For this purpose, a resonance testing facility is used in which the concrete beams are excited in their first natural bending fre-*

len Steifigkeitsänderungen und Spannungsumlagerungen so besser erfasst werden können. Hierfür wird ein Resonanzprüfstand verwendet, in dem die Betonbalken mit Hilfe von gerichteten Unwuchtmotoren in ihrer ersten Biegeeigenfrequenz angeregt und in Resonanz versetzt werden. So können die erforderlichen, großen Beanspruchungen mit einer vergleichsweise geringen Erregerkraft erreicht werden. Der Versuchsstand wird so ausgelegt, dass die Beanspruchungsfrequenz bei etwa 18 Hz liegt, sodass der Very-High-Cycle-Fatigue Bereich mit über 107 Lastwechseln in unter einer Woche Versuchsdauer erreicht wird. Dies ist für die Versuchsdurchführung von wesentlicher Bedeutung, da die Spannungsumlagerungen zu sehr hohen ertragbaren Lastwechselzahlen bei den Betonbalken führen. In vorhergehenden Untersuchungen an ähnlichen Prüfkörpern konnte die Funktion des Prüfstands bereits nachgewiesen werden. Begleitend zu den großformatigen Untersuchungen werden zur Bestimmung der Materialparameter für das numerische Modell Versuche an zylindrischen Prüfkörpern durchgeführt.

Die Erkenntnisse des Forschungsvorhabens ermöglichen den Schritt in Richtung einer realitätsnäheren Bemessung und damit zu schlankeren, wirtschaftlicheren und kostengünstigeren Ausführungen ermüdungsbeanspruchter Betonbauwerke.



Geschädigte Betondruckzone (oben) und qualitative Schädigungsdarstellung im numerischen Modell (unten) | *Damaged concrete compression zone (top) and qualitative damage illustration in the numerical model (bottom)* | Photo/Graphic: Dennis Birkner

*quency using oriented imbalance motors. This makes it possible to reach the required large stresses with a comparatively low excitation force. The test setup is designed to have an excitation frequency of approximately 18 Hz to reach the Very-High-Cycle-Fatigue range with over 107 load cycles in less than one week of test duration. This is essential for the test execution since the stress redistributions lead to a very large number of cycles to failure of the concrete beams. The functionality of the test setup has already been confirmed in previous tests on similar specimens. To determine the material parameters for the numerical model, experiments on cylindrical specimens are carried out additionally to the large-scale investigations.*

*The results of the project allow a step towards a more accurate design and thus towards more slender, economical and cost-effective designs of fatigue loaded concrete structures.*

► **Titel | Title**

Numerische und experimentelle Untersuchungen zu den Spannungsumlagerungen von ermüdungsbeanspruchten Betonbauteilen im Very-High-Cycle-Fatigue-Bereich

*Numerical and experimental investigations on stress redistribution in concrete structures subjected to fatigue loading in the very high cycle fatigue range*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

► **Zeitraum | Period**

09.2019 – 02.2022

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

► **Bearbeiter | Contributor**

Dennis Birkner, M. Sc.



Untersuchung unterschiedlicher Festigkeitsklassen; links: UHPC, Mitte: HPC und rechts: Normalbeton | Investigation of different concrete strength; left: UHPC, center: HPC and right: NC | Photo: Melchior Deutscher

## DEN DRUCK ERHÖHEN

### INCREASE THE PRESSURE

Die Materialforschung versucht dem Streben nach schlankeren, größeren und materialeffizienteren Bauwerken und Strukturen nachzukommen. Im Massivbau wird dies durch eine Erhöhung der Druckfestigkeit realisiert. Die Schlankheit von Strukturen bedingt immer häufiger eine starke dynamische und zyklische Beanspruchung. Umfangreiche Kenntnisse zum Ermüdungsverhalten sind deswegen von hoher Bedeutung für die Verwendung von ultrahochfesten Betonen (UHPC) und Hochleistungsbetonen (HPC) in der Baupraxis. Um bisherige Wissenslücken weitreichend auszufüllen, befasst sich das Projekt SPP 2020 „Einfluss lastinduzierter Temperaturfelder auf das Ermüdungsverhalten von UHPC bei Druckschwellbelastung“ seit 2017 mit diesen Aspekten. Erkenntnisse über das Ermüdungsverhalten sowie die Generierung von Wöhler-Kurven zur Normung des Betons werden im Allgemeinen anhand von Druckschwellversuchen an Zylindern gewonnen. Hohe Frequenzen und hohe Festigkeiten führen dabei zu einer Betonerwärmung, welche einen Einfluss auf die erreichbaren Lastwechselzahlen haben. In dem SPP-Projekt erfolgt eine systematische Untersuchung dieses Phänomens. Dabei ist das Ziel, die Ursachen und Auswirkungen der Erwärmung zu identifizieren und zu quantifizieren.

Mit Beendigung des experimentellen Hauptteils des Projektes wurden die Parameter Oberspan-

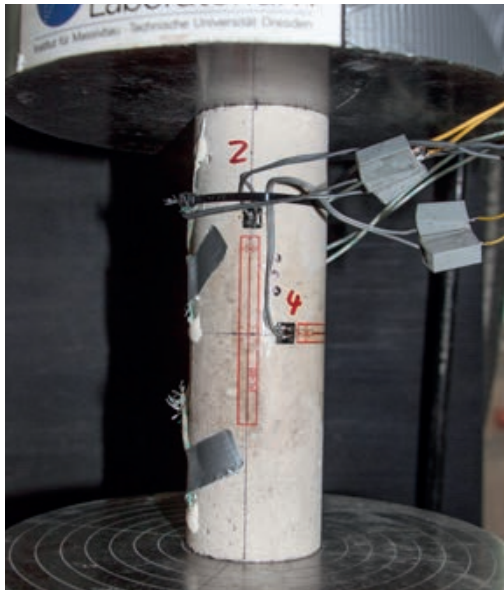
*Materials research is trying to respond to the quest for slimmer, larger and more material-efficient buildings and structures. In concrete construction, this is implemented by increasing the compressive strength. The slenderness of structures increasingly implies strong dynamic and cyclic loading. Comprehensive knowledge of fatigue behaviour is therefore of great importance for the use of ultra-high performance concretes (UHPC) and high-performance concretes (HPC) in construction praxis. To fulfill previous knowledge gaps, the SPP 2020 project "Influence of load-induced temperature fields on the fatigue behaviour of UHPC subjected to high-frequency compression loading" has been dealing with these aspects since 2017. Knowledge about the fatigue behaviour as well as the generation of Wöhler lines for the standardisation of concrete is generally gained by using pressure swell tests on cylinders. High frequencies and high strengths lead to concrete heating, which influences the achievable number of load cycles. In the SPP project, a systematic investigation of this phenomenon is being carried out. The aim is to identify and quantify the causes and effects of heating.*

*With the finishing of the experimental main part of the project, the parameters upper stress, lower stress, frequency, maximum grain size as well as concrete strength were considered. The heating per load cycle was influenced by all*



nung, Unterspannung, Frequenz, Größtkorn sowie die Betonfestigkeit betrachtet. Die Erwärmung pro Lastwechsel wurde dabei von allen Parametern außer der Frequenz deutlich beeinflusst. Steigende Spannungsspiele erhöhen die eingebrachte Energie, ein geringerer Größtkorn führt ebenfalls zur Erhöhung durch höhere innere Reibungspotenziale sowie die Erhöhung der Betonfestigkeit, die mit einer dichteren Lagerung der Bestandteile des Betons einhergeht. Die Frequenz beeinflusst den Erwärmungsprozess über die Wiederholung der Energieeinbringung. Je höher die Frequenz, desto mehr Wärme wird pro Zeiteinheit eingebracht während die Abkühlung über die Oberfläche nicht gleichmäßig ansteigt. Dies führt zur Erhöhung der Erwärmungsgeschwindigkeit.

Die Druckfestigkeit von hochfestem und ultrahochfestem Beton wird von der Temperatur degradierend beeinflusst. Durch die steigende Temperatur wird eine ungewollte Erhöhung der bezogenen Lastspiele erzeugt, was eine Hauptursache für das vermeintlich frühzeitige Versagen darstellt. Über die experimentelle Untersuchung der temperaturabhängigen Festigkeit soll mit dem Wissen über die Erwärmungsverläufe das Herausrechnen des Temperatureinflusses ermöglicht werden.



Zylinder aus Normalbeton während der zyklischen Prüfung mit Dehnungs- und Temperaturmessung | Cylinder of normal concrete during cyclic testing with strain and temperature measurement | Photo: Melchior Deutscher

*parameters except frequency. Increasing stress cycles increase the energy introduced, a lower maximum grain size also leads to an increase due to higher internal friction potentials as well as an increase in the concrete strength, which is associated with denser storage of the components of the concrete. The frequency influences the heating process via the repetition of the energy input. The higher the frequency, the more heat is introduced per unit of time while the cooling does not increase evenly over the surface. This leads to an increase in the heating rate.*

*The compressive strength of high performance and ultra-high performance concrete is degradative affected by temperature. Due to the increasing temperature, an unwanted increase of the related load cycles is generated, which is a main cause for the supposed early failure. The experimental investigation of the temperature-dependent strength should enable the temperature influence to be calculated out with the knowledge of the heating processes.*

► **Titel | Title**

Einfluss lastinduzierter Temperaturfelder auf das Ermüdungsverhalten von UHPC bei Druckschwellbelastung

*Influence of load-induced temperature fields on the fatigue behaviour of UHPC subjected to high frequency compression loading*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SPP 2020

► **Zeitraum | Period**

09.2017 – 08.2020

► **Leiterin | Project manager**

Dr.-Ing. Silke Scheerer

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Melchior Deutscher

► **Projektpartner | Project partner**

Institut für Massivbau, TU Darmstadt



Ermittlung der Zugfestigkeit zur Charakterisierung der Gefügeschädigung | Determination of the tensile strength to characterise the structural deterioration | Photo: Kerstin Speck

## MESSBARE ANISOTROPIE NACH BELASTUNG

### MEASURABLE ANISOTROPY AFTER LOADING

Beton weist unter Belastung Schädigungen auf, die sich entsprechend der aufgebrachtten Last orientieren. Diese lastinduzierte Anisotropie erfasst ein von Professor Petryna (TU Berlin) aufgestelltes verzerrungs- und energiebasiertes Werkstoffgesetz. Die Werte zur Validierung werden in der Triaxialprüfmaschine am Institut für Masivbau ermittelt. Die Dehnungen werden mit faseroptischen Sensoren (FOS) gemessen, die auf einem Trägergerüst aus Messing-U-Profilen im Beton positioniert werden.

Die Zugfestigkeit ist eine geeignete Größe zur Charakterisierung der Schädigung. Allerdings kann versuchstechnisch – im Gegensatz zu einer Be- und Entlastung unter Druck – die Zugfestigkeit an einem Probekörper nur einmal bestimmt werden. Der Fokus lag deshalb auf der Raumrichtung, in die sich der Beton bei der mehraxialen Vorschädigung ausgedehnt hat. Ausgewählt wurden Spannungsverhältnisse mit gleicher Ausdehnung in zwei Richtungen (Druckmeridian) sowie mit einer Ausdehnung in einer Richtung (Zugmeridian). Die gedehnten Richtungen waren

*Under load, concrete shows signs of damage that are oriented according to the applied load. This load-induced anisotropy is captured by a strain- and energy-based material law established by Prof. Petryna (TU Berlin). The values for validation are determined in the triaxial testing machine at the IMB. The strains are measured with fibre-optic sensors (FOS), which are positioned in the concrete on a support frame made of brass U-profiles.*

*The tensile strength is a suitable parameter for characterising the damage. However, from an experimental point of view – in contrast to loading and unloading under compression – the tensile strength can only be determined once on a test specimen. The focus was therefore on the direction in which the concrete elongated during the multi-axial pre-damage. Stress ratios with equal elongation in two directions (compression meridian), as well as elongation in one direction (tensile meridian), were selected. The elongated directions were unloaded or loaded with 5% of the compressive force in the compressed directions. The pre-damage was carried out with 80% of the failure load under the respective stress ratio.*

unbelastet oder mit 5 % der Druckkraft in den gestauchten Richtungen belastet. Die Vorschädigung erfolgte mit 80 % der Bruchlast unter dem jeweiligen Spannungsverhältnis.

Zuerst erfolgte die Vorschädigung aller Probekörper, bevor die Triaxialprüfmaschine auf die Zugkonfiguration umgebaut wurde. Die Probekörper waren bei der Zugprüfung rund 70 Tage alt. Es musste festgestellt werden, dass sich die Messqualität der FOS seit der Vorbelastung bei einigen Proben stark verschlechtert hatte. Dies ist auf die geringe Alkalibeständigkeit der Messfasern zurückzuführen. Bei den einaxialen Versuchen war es aber möglich, zusätzliche Messfasern auf den freien Oberflächen zu applizieren.

Obwohl relativ spröder, hochfester Beton untersucht wurde, zeichnete sich die Lokalisierung der Risse oft deutlich vor dem Zugbruch in den Messwerten ab. Die erzielten Zugfestigkeiten wurden mit denen ungeschädigter Referenzproben verglichen. Eine Vorschädigung mit Ausdehnungen in zwei Richtungen führte dabei zu einer Reduktion um rund 10 %. Konzentrierte sich die Ausdehnung bei der Vorbelastung dagegen in eine Richtung, so reduzierte sich die Zugfestigkeit in dieser Richtung auf rund die Hälfte. Mit einem stützenden Querdruck in den gedehnten Richtungen steigt nicht nur die mehraxiale Festigkeit, sondern auch die damit verbundenen Dehnungen und Schädigungen, weshalb die verbleibende Zugfestigkeit tendenziell etwas stärker abfällt als bei Proben ohne Querdruck.



Dehnungsmessung mit faseroptischen Sensoren auf der Betonoberfläche | *Strain measurement with fibre optic sensors on the concrete surface* | Photo: Kerstin Speck

*Pre-damage of all specimens was done first before the triaxial testing machine was converted to the tensile configuration. The test specimens were about 70 days old at the time of the tensile test. It had to be noted that the measurement quality of the FOS had deteriorated considerably in some specimens since the preloading. This is due to the low alkali resistance of the measuring fibres. On the other hand, the uniaxial tests allowed additional measuring fibres to be applied to the free surfaces.*

*Although relatively brittle high-strength concrete was tested, the localisation of the cracks was often clearly visible in the measured values before the tensile fracture. The tensile strengths obtained were compared with those of undamaged reference specimens. Pre-damage with elongation in two directions led to a reduction of about 10%. If, on the other hand, the elongation during preloading was concentrated in one direction, the tensile strength in this direction was reduced to about half. With a supporting lateral compression in the elongated directions, not only the multi-axial strength increases but also the associated elongations and damages, which is why the remaining tensile strength tends to decrease somewhat more than in specimens without lateral compression.*

► **Titel | Title**

Experimentell gestützte Modellierung von Versagensmechanismen hochfester Betone unter multiaxialer Beanspruchung – MABET

*Experimentally based modelling of failure mechanisms of high strength concretes under multi-axial loading – MABET*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

► **Zeitraum | Period**

04.2017 – 05.2021

► **Leiter | Project manager**

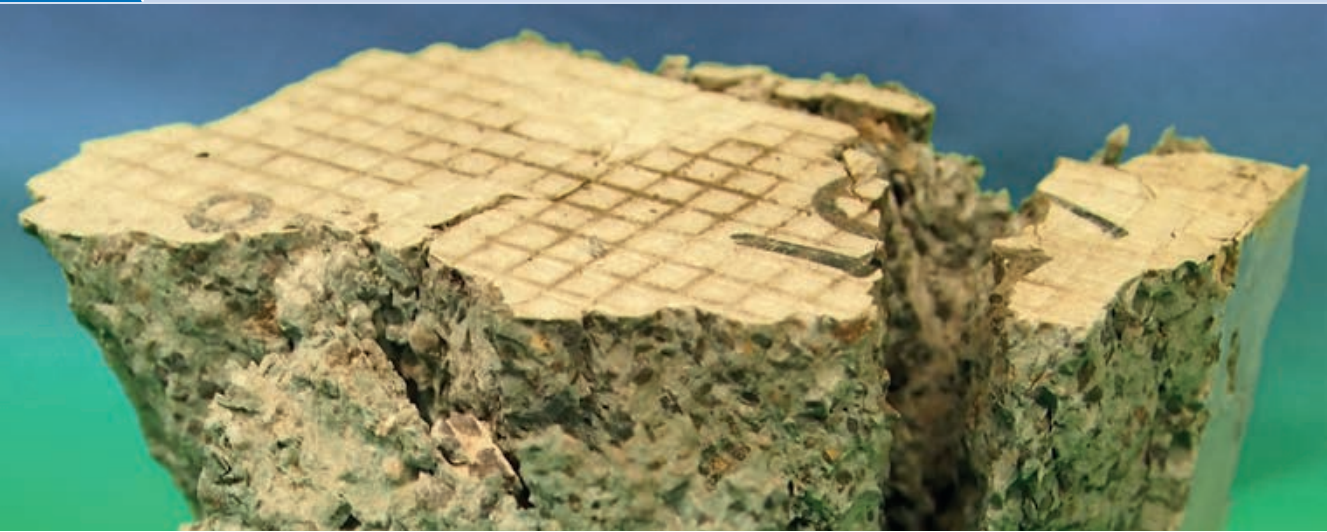
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dr.-Ing. Kerstin Speck

► **Projektpartner | Project partner**

FG Statik und Dynamik, TU Berlin



Reste eines Betonwürfels nach der Druckfestigkeitsprüfung mit Belastungsbürsten | Remains of a concrete cube after the compression strength test with load brushes | Photomontage: Marcus Hering

## BETON IN DER TIEFSEE CONCRETE FOR DEEP OCEAN

Egal wo wir hinsehen, Beton ist an vielen Stellen unseres Alltags nicht mehr wegzudenken. Das Hauptanwendungsgebiet von Beton ist hierbei vor allem bei baulichen Strukturen zu sehen, da er ein preisgünstiges Material darstellt, das nahezu in jede beliebige Form gebracht werden kann. Je nach Rezeptur weist er eine sehr hohe Druckfestigkeit auf. Ab einer Zylinderdruckfestigkeit von 100 MPa wird sogar von UHPC (ultrahochfestem Beton) gesprochen. Beton hat jedoch einen essentiellen Nachteil: Ganz gleich wie hoch die Druckfestigkeit des Betons ist, die Zugfestigkeit erreicht nur einen Bruchteil dieses Wertes.

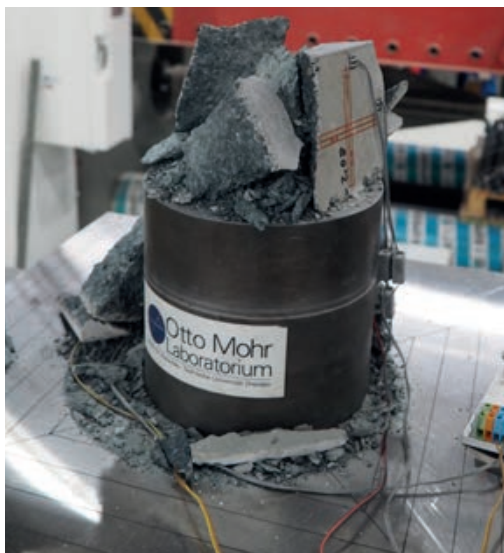
Diese Heterogenität, zwischen Druck- und Zugfestigkeit, stellt eine Herausforderung dar, um Beton außerhalb des Bauwesens anzuwenden. Wird bei der Entwicklung von Betonstrukturen jedoch von Anfang an darauf geachtet, dass nahezu nur Druckspannungen im Material durch eine äußere Belastung entstehen, so ist es möglich, Beton auch außerhalb des Bauwesens effizient einzusetzen. Die ersten Schritte in diese Richtung wurden mit dem bereits abgeschlossenen Projekt ROBEX getan. Hier wurde ein kleinmaßstäbliches Druckgehäuse aus UHPC für die Tiefsee entwickelt, das ex-

*Wherever we look, concrete has become an integral part of our everyday lives. The main area of application for concrete is in building structures, as it is an inexpensive material that can be shaped into almost any form. Depending on the mix, it has a very high compressive strength. Concrete with a compressive strength higher than 100 MPa (measured in a cylinder test), is referred to as UHPC (ultra-high performance concrete). However, concrete has an essential disadvantage: no matter how high the compressive strength of the concrete is, the tensile strength only reaches a percentage of this value.*

*This heterogeneity between compressive and tensile strength poses a challenge for the use of concrete outside the building industry. However, if care is taken from the outset in the development of concrete structures to ensure that almost only compressive stresses arise in the material due to an external load, it is possible to use concrete effectively outside the building industry. The first steps in this direction were taken with the already completed ROBEX project. Here, a small-scale pressure vessel made of UHPC was developed for the deep sea, which can withstand extreme pressure at great depths. By optimising the shape of the housing, tensile stresses were nearly eliminated, allowing the potential of concrete to be fully utilised.*

tremen Druckbeanspruchungen in hoher Tiefe standhalten kann. Durch die Optimierung der Gehäuseform wurden Zugspannungen nahezu ausgeschlossen, womit das Potenzial von Beton vollumfänglich zum Tragen kommen kann. Im aktuellen Projekt geht es darum, in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, das Konzept des Betondruckgehäuses erneut aufzugreifen, weiterzuentwickeln und in einem deutlich größeren Maßstab umzusetzen. Das Ziel des Projektes ist hierbei, ein Druckgehäuse aus UHPC zu entwickeln, das bis auf eine Tauchtiefe von 3000 m verwendet werden kann. Die primäre Funktion dieses Druckgehäuses wird in der angestrebten Demo-Mission darin bestehen, eine Energiequelle in der Form einer Batterie am Meeresgrund zu platzieren, um Messtechnik zur Tiefseerforschung zur Verfügung zu stellen.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es erforderlich, die Materialeigenschaften des vorgesehenen UHPC in einer Vielzahl möglicher Belastungsszenarien zu untersuchen. So gilt es zum einen die ein- und mehraxialen Materialeigenschaften des UHPC für die grundlegende Bemessung des Gehäuses zu ermitteln. Des Weiteren ist das mehraxiale Kriechverhalten des Betons von Interesse, da dieses maßgeblich für die Ausbildung des Dichtungssystems zu berücksichtigen ist.



Reste eines Betonwürfels nach der Standard-Druckfestigkeitsprüfung | Remains of a concrete cube after the standard compressive strength test | Photo: Michael Liebe

*In the current project, the aim is to work together with the project partners to revisit the concept of the concrete pressure vessel, develop it further and implement it on a much larger scale. The project aims to develop a pressure vessel made of UHPC that can be used up to a diving depth of 3000 m. The primary function of this pressure vessel will be to provide a pressure chamber that can be used as a pressure vessel. The primary function of this pressure vessel in the intended test mission will be to provide an energy source in the form of a battery on the seabed to operate measurement technology for deep-sea research.*

*To achieve this goal, the material properties of the planned UHPC must be investigated in a variety of possible loading scenarios. On the one hand, the uniaxial and multiaxial material properties of the UHPC must be determined for the basic design of the housing. Furthermore, the multi-axial creep behaviour of the concrete is of interest, as this has to be taken into account for the design of the sealing system.*

► **Titel | Title**

TP Untersuchung von UHPC und UHPC-Druckgehäusen unter stoßartiger Belastung, Langzeitbelastung und mehraxialer Beanspruchung im Verbundvorhaben Druckgehäuse aus ultrahochfestem Beton für die Meerestechnik (DeepCsolution)

*TP Investigation of UHPC and UHPC pressure vessels under impact loads, long-term loads and multi-axial stresses as part of the joint research project as part of the joint research project Ultra-high strength concrete pressure vessels for marine engineering (DeepCsolution)*

► **Förderer | Funding**

BMW i / Maritimes Forschungsprogramm

► **Zeitraum | Period**

12.2019 – 11.2022

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dr.-Ing. Marcus Hering

► **Projektpartner | Project partners**

IBB Ingenieurbüro Baustatik Bautechnik, Dresden | Sudholt-Wasemann GmbH, Herzebrock-Clarholz | CarboCon GmbH, Dresden | Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar und Meeresforschung, Bremerhaven



Bestimmung der Auszugskraft einer neuartigen Montageschiene | Determination of the pull-out force of a novel joint technology | Photo: Dominik Schlüter

## BLINDE VERBINDUNG

### BLIND CONNECTION

Das Material Carbonbeton ermöglicht die Herstellung dünnwandiger Platten. Weiterhin eignet sich Carbonbeton für eine modulare Bauweise. Um die dünnen, vorgefertigten Bauteile auf der Baustelle zu verbinden, bedarf es neuer Befestigungssysteme. Drei wesentliche Entwicklungsziele stehen dabei im Vordergrund. Erstens die sichere Kraftübertragung vom Verbindungselement in die dünnwandige Platte, zweitens eine einfache Montage und drittens eine möglichst geringe Beeinflussung der Ästhetik durch das Befestigungssystem.

Im Rahmen des Projektes „TAVIMBA“ werden neue Befestigungssysteme entwickelt, die auf Basis von Formgedächtnislegierungen (FGL) funktionieren. Die FGL wird dabei als aktives Verbindungselement genutzt. Durch thermische oder elektrische Aktivierung dehnt sich diese aus und klemmt sich dabei in eine Montageschiene, wodurch eine kraftschlüssige Verbindung hergestellt wird. Mit dieser Form der Aktivierung kann auf eine mechanische Zugänglichkeit verzichtet werden. Die Verbindung kann somit blind hergestellt werden, die Montagestelle ist von außen nicht sichtbar.

*The material carbon concrete enables the production of thin-walled slabs. Furthermore, carbon concrete is suitable for modular construction processes. New fastening systems are needed to connect the thin, prefabricated components on the construction site. Three main development goals are in the foreground. First, the safe transmission of forces from the fastener to the thin-walled slab; second, simple assembly; and third, the fastening system should have as little impact as possible on the aesthetics.*

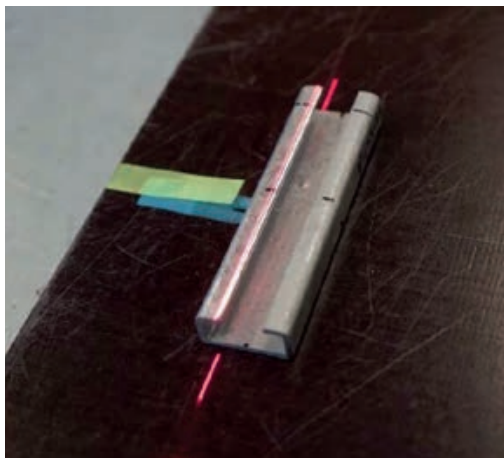
*As part of the "TAVIMBA" project, new fastening systems are being developed that function based on shape memory alloys (FGL). The FGL is used as an active fastening element. Thermal or electrical activation causes it to expand and thereby clamp into a mounting rail, creating a force-fit connection. With this form of activation, mechanical accessibility within the joint area is not needed. The connection can thus be made blindly, and the mounting point is not visible from the outside.*

*Within the project, different concepts for the implementation of such a fastening system were developed and investigated. Two points were of particular interest: On the one hand, the connec-*

Innerhalb des Projektes wurden unterschiedliche Konzepte zur Umsetzung eines derartigen Befestigungssystems entwickelt und untersucht. Dabei waren zwei Stellen von besonderem Interesse: einerseits die Verbindungsstelle zwischen FGL und Montageschiene und andererseits die Verbindungsstelle zwischen Montageschiene und dünnwandiger Platte aus Carbonbeton.

Für die Verbindung zwischen FGL und Schiene wurden durch die Projektpartner numerische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um den Verbindungsprozess besser zu verstehen, die beeinflussenden Parameter zu bestimmen und diese zu verbessern. Auf diese Weise gelang es, eine ausreichende Auszugskraft der FGL aus der Montageschiene zu erzeugen. Für die Verbindung der Montageschiene mit der dünnwandigen Platte wurden unterschiedliche Ansätze umgesetzt und experimentell getestet. Dabei zeigte sich, dass eine vollständige Einbettung der Schiene in die Platte prinzipiell möglich ist.

Für den Anwendungsfall „vorgehängte, hinterlüftete Fassade“ sollen im weiteren Verlauf bauteilartige Versuche durchgeführt und ein Demonstrator umgesetzt werden. Zukünftig soll dieser Ansatz auf lösbare Verbindungen übertragen werden, um die Umsetzung einer nachhaltigen modularen Bauweise zu unterstützen. Dies bedarf jedoch weiterer umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsschritte.



Verformungsmessung an einer Jordahl-Montageschiene mittels Laser | Deformation measurements on a Jordahl-joint by laser | Photo: Nicolaj Kahnt

*tion point between FGL and mounting rail and, on the other hand, the connection point between mounting rail and thin-walled slab made of carbon concrete.*

*For the joint between FGL and rail, numerical and experimental investigations were carried out by the project partners to understand and improve both the joining process and the influencing parameters. In this way, it was possible to generate a sufficient pull-out force of the FGL from the mounting rail. Different approaches were implemented and experimentally tested for the connection of the mounting rail to the thin-walled slab. It was shown that complete embedding of the rail in the slab is possible.*

*For the application of a “curtain-type, rear-ventilated facade”, the component-type tests are yet to be carried out. Further, a demonstrator will be implemented. Future research goals are to transfer this concept to detachable connections. In turn, this will enable the implementation of a sustainable modular, detachable construction method. Extensive research and development steps are required in this area.*

► **Titel | Title**

TP 4: Auslegung der Verbindungen gemäß bautechnischer Anforderungen im Verbundprojekt: Thermisch aktivierte Verbindungen im Modularen Bauen (TAVIMBA)

*TP 4: Design of the connections according to structural requirements as part of the joint research project: Thermally activated connections in modular construction (TAVIMBA)*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / Zwanzig20 – smart<sup>3</sup>

► **Zeitraum | Period**

09.2018 – 08.2021

► **Leiter Teilprojekt | Subproject manager**

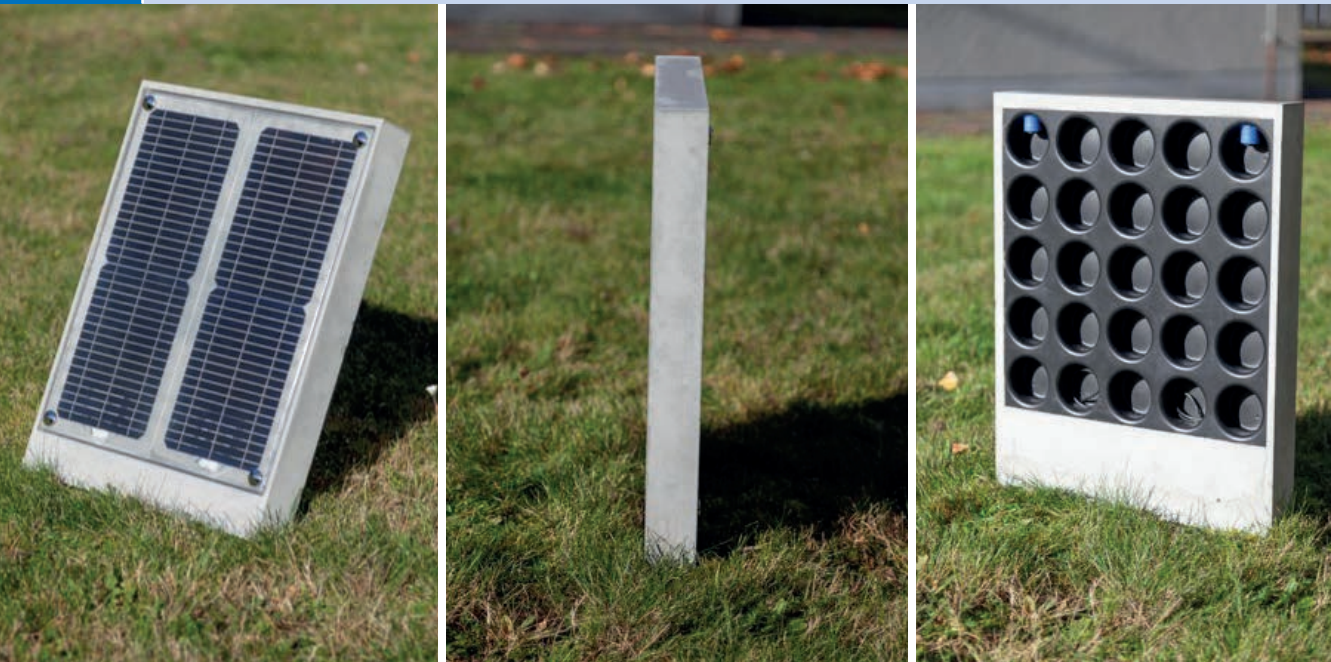
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Dominik Schlüter

► **Projektpartner | Project partners**

Jordahl GmbH, Berlin | CARBOCON GmbH, Dresden | Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Dresden



Ausschnitt eines Fassadenelements: Ein 5 cm dickes Bauteil vereint tragende Struktur, Photovoltaik, Kapillarsystem sowie Hohlräume zur Integration von elektrischen Speichern. | Section of a facade element: A 5cm thick component combines load-bearing structure, photovoltaics, capillary system as well as cavities for the integration of electrical storage systems. | Photos: Stefan Gröschel

## GANZHEITLICHES SERIELLES BAUEN

### HOLISTIC SERIAL CONSTRUCTION

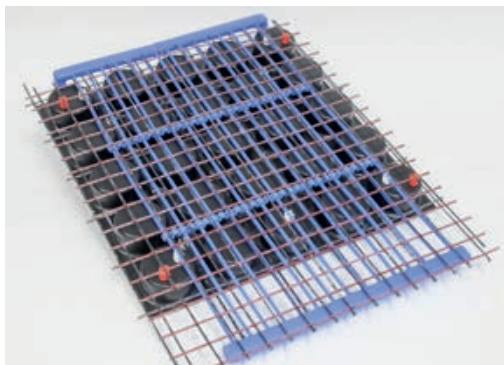
Damit technologischer Fortschritt nicht richtungsblind verläuft, ist es zumeist ratsam Neuentwicklungen aus einer erstrebenswerten oder zumindest sich abzeichnenden Zukunft her zu denken. Auch wenn Ansätze individuell und verschieden sind, wird ein Großteil der Entwickler durch das Streben nach nachhaltigen Lösungen für unsere derzeitigen ökologischen und sozialen Herausforderungen geeint. Für das Bauwesen kann daraus das Entwicklungsziel abgeleitet werden, die Aufgaben eines Gebäudes – vom Schutz vor äußeren Einwirkungen bis hin zum Versorgen mit (Wärme-)Energie – mit einem möglichst geringen ökonomischen und ökologischen Aufwand während des gesamten Lebenszyklus zu erreichen. Im Rahmen des vorliegenden Projektes C3-V4.6 Enerton wird der Versuch unternommen, die momentanen Forschungs- und Entwicklungstrends hin zu hohen Automatisierungs- bzw. Vorfertigungsgraden, zu einer steigenden Adaptionsrate von Erneuerbare-Energie-Technologien und zu einer möglichst ressourcenschonenden Bauweise mit-

*To ensure that technological progress is not direction-blind, it is mostly advisable to think of new developments from a desirable or at least emerging future. Even if approaches are individual and diverse, a large proportion of developers are united by the pursuit of sustainable solutions to our current ecological and social challenges. For the building industry, this means achieving a buildings task – from protection against external influences to (thermal) energy supply – with the lowest possible economic and ecological expenditure throughout the entire life cycle. Within the framework of the present project C3-V4.6 Enerton, an attempt is being made to combine the current research and development trends towards high levels of automation and prefabrication, an increasing adaptation rate of renewable energy technologies and a construction method that reduces resource consumption as much as possible with the aid of carbon concrete. The aim is to minimize the resource consumption of buildings both during construction and in their service life.*



hilfe von Carbonbeton zu vereinen. Dabei ist das Ziel, den Ressourcenbedarf von Gebäuden sowohl zur Errichtung als auch in deren Nutzungsphase zu minimieren.

Mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen wurden am IMB Herstell- und Konstruktionskonzepte entwickelt und optimiert, welche das einfache Einbetten von Erneuerbare-Energie-Technologien in den Prozess der Fertigteilherstellung ermöglichen. Ein besonderer Fokus galt der Speicherung von elektrischer Energie sowie der Kabelführung. Der Projektpartner Technische Chemie 1 der TU Darmstadt entwickelte in diesem Kontext temperaturunempfindliche und kostengünstige Stromspeicher mit hoher Zyklenstabilität auf Basis nicht kritischer Materialien. Die Konzepte wurden auf ihr Biege- und Querkrafttragverhalten untersucht. Wesentliche ökonomische und ökologische Einflussfaktoren wurden definiert und quantifiziert. Für den konkreten Anwendungsfall „vorgehängte hinterlüftete Fassade“ wurden Verbindungselemente auf deren Eignung untersucht. Bezüglich Tragverhalten, Austauschbarkeit und dem zur Verfügung gestellten Volumen zur Funktionsintegration stellten sich dünne Textilbetonplatten mit eingebauten Kassetten als besonders vorteilhaft heraus. Mithilfe von Großbauteil- sowie Brandversuchen soll die Umsetzbarkeit der entwickelten und patentierten Konstruktions- und Herstellungsmethode vertiefend untersucht werden.



Eine Kunststoffmatrize garantiert die Lagesicherheit der textilen Bewehrung sowie der Funktionskomponenten. Sie wird auf die Schalung gelegt und ausbetoniert. | A plastic matrix guarantees the positional stability of the textile reinforcement and the functional components during concreting in the precast plant. | Photo: Stefan Gröschel

*With the help of experimental and numerical investigations, manufacturing and construction concepts were developed and optimized at the Institute of Concrete Structures, which enable the simple embedding of renewable energy technologies in the process of precast element production. Particular focus was placed on the storage of electrical energy and cable routing. In this context, the project partner TU Darmstadt developed temperature-insensitive and cost-effective electricity storage systems with high cycle stability based on non-critical materials. The concepts were investigated with regard to their bending and shear force bearing behavior. Significant economic and ecological influencing factors were defined and quantified. The suitability of connecting elements was investigated for the specific application “ventilated curtain facade”. Thin textile-reinforced concrete panels with integrated cassettes proved to be particularly advantageous in terms of load-bearing behavior, interchangeability and the volume available for functional integration. With the help of large-scale component and fire tests, the feasibility of the developed and patented design and manufacturing method will be investigated in more detail.*

► **Titel | Title**

TP C3-V4.6-II: Konstruktionskonzept eines funktionsintegrierten Bauelements im Verbundvorhaben C3-V4.6: Energiespeichernder Carbonbeton

*TP C3-V4.6-II: Design concept of a functionally integrated structural element as part of the joint research project C3-V4.6: Energy storing carbon concrete*

► **Förderer | Funding**

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF); Projektträger: FZ Jülich GmbH / C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite

► **Zeitraum | Period**

04.2018 – 02.2021

► **Teilprojektleiter | Subproject manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dipl.-Ing. Dominik Schlüter

► **Projektpartner | Project partners**

Technische Chemie 1, TU Darmstadt | Betonwerk Oschatz GmbH, Oschatz | Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH, Hof



Dehnkörperversuche (links) und Kurzzeitauszugsversuche zur Qualitätssicherung (rechts) | Tensile tests (left) and short-term pull-out tests for quality control (right) | Photos: Zuhair Amer

## EINSATZ VON CARBONBETON IN SYRIEN

### CARBON REINFORCED CONCRETE IN SYRIA

Carbonbeton ist eine vielversprechende Methode, um beschädigte oder nicht ausreichend tragfähige Bauwerke zu verstärken und somit zu erhalten. Im Projekt werden das Potential für den Einsatz von Carbonbeton in Syrien analysiert und Handlungsempfehlungen sowie Berechnungsalgorithmen, angepasst an regionale Besonderheiten, erarbeitet.

Die Bauwerke in Syrien unterliegen, verglichen z. B. mit denen in Deutschland, zum Teil abweichenden, besonderen Beanspruchungen, die sowohl spezielle Konstruktionsweisen als auch einen besonderen Umgang mit dem Bestand erfordern. Konkret handelt es sich einerseits um die natürliche Einwirkung Erdbeben. Andererseits ist ein Großteil der vorhandenen Bauwerke von extremen Lasten infolge des Krieges beansprucht.

Maßgeblich in Deutschland wird seit etwa 20 Jahren ein neuer Baustoff erforscht. Textil- oder Carbonbeton weist viele Eigenschaften auf, die ihm gegenüber der herkömmlichen Massivbauweise Vorteile verschaffen. Bereits dünne, materialeffiziente Schichten sind geeignet, um die Tragfähig-

*Carbon reinforced concrete is a promising method of strengthening and thus maintaining damaged or insufficiently load-bearing structures. In the project, the potential for the use of carbon concrete in Syria is analyzed and recommendations for action as well as calculation algorithms, adapted to regional characteristics, are developed.*

*The structures in Syria are subject to, compared for example with those in Germany, partly deviating, special stresses that require both special construction methods and special handling of the existing building. Specifically, on the one hand, it is the natural action of earthquakes. On the other hand, a large part of the existing structures is stressed by extreme loads as a result of the war.*

*Mainly in Germany a new building material has been researched for around 20 years. Textile or carbon reinforced concrete has many properties that give it advantages over conventional solid construction. Even thin, material-efficient layers are suitable for significantly increasing the load-bearing capacity or improving usability. This applies both to the static load case, but also to repeated*

keit deutlich anzuheben oder die Gebrauchstauglichkeit zu verbessern. Dies gilt sowohl für den statischen Belastungsfall, aber auch für wiederholte Anregungen. Dies alles macht Textil- oder Carbonbeton prädestiniert für den Einsatz in meinem Heimatland.

An der TU Dresden bietet sich mir die Möglichkeit, eng mit hervorragenden Fachleuten auf diesem Gebiet zusammenzuarbeiten, ein umfassendes Wissen zu erwerben, Kontakte zu Herstellern und ausführenden Baufirmen zu knüpfen und gleichzeitig ein Konzept für die Anwendung von Textilbeton bei kriegs- und erdbebengeschädigten Bauwerken in Syrien zu erarbeiten.

Der Fokus der Forschung lag bisher auf:

- Analyse des Bauwerksbestands in Syrien und Zusammenstellung der wahrscheinlich häufigsten Schadensbilder bzw. Defizite im Bestand,
- Erarbeitung von Instandsetzungs- und Ertüchtigungskonzepten für ausgewählte Bauwerks- und Schadenstypen, basiert auf den gewonnen Versuchsergebnissen der laufenden Versuche am OML der TU Dresden.

Zukünftig sollen verschiedene Parameter hinsichtlich Unterlegung dieser Konzepte durch Berechnungen/Simulationen und ggf. Versuche im Labor weiter bearbeitet werden.



Versuche mit verstärkten Stützen | Tests with columns, strengthened with CRC | Photo: Zuhair Amer

*suggestions. All of this makes textile or carbon concrete predestined for use in my home country.*

*At the TU Dresden, I would have the opportunity to work closely with outstanding experts in this field, to acquire extensive knowledge and at the same time to develop a concept for the use of textile concrete in structures damaged by war and earthquakes in Syria.*

*The following topics were in the focus of research until now:*

- *Analysis of the building stock in Syria and compilation of the likely most frequent damage patterns or deficits in the existing building,*
- *Development of repair and upgrading concepts for selected types of structures and damage, based on the test results obtained from ongoing tests at the OML of the TU Dresden.*

*In the future, various parameters concerning the underlay of these concepts are to be further processed through calculations/simulations and, if necessary, experiments in the laboratory.*

► **Titel | Title**

Einsatz von Carbonbeton in Syrien

*Carbon reinforced concrete in Syria*

► **Förderer | Funding**

Alexander von Humboldt Stiftung

► **Zeitraum | Period**

07.2019 – 09.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributor**

Dr.-Ing. Zuhair Amer



# Sonderforschungsbereich/Transregio 280

*Collaborative Research Center/  
Transregio 280*



**SFB**  **TRR** 280



Inspiration für zukünftige, im Inneren aufgelöste Carbonbetonstrukturen | *Ideas for future CRC structures with pervading internal shell-like or folded substructures* | Photo: Stefan Gröschel

## CARBONBETONSTRUKTUREN – STANDORT-ÜBERGREIFENDE GRUNDLAGENFORSCHUNG IM SFB/TRR 280

### *CARBON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES – INTER-SITE BASIC RESEARCH IN CRC/TRR 280*

Die Freude war riesig, als der Sonderforschungsbereich/Transregio 280 durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Sommer 2020 bewilligt wurde. Im SFB/TRR 280 „Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen“ erforschen Wissenschaftler der TU Dresden, der RWTH Aachen University und des Leibniz-Instituts für Polymerforschung (IPF) Dresden gemeinsam die Grundlagen für eine neue Art zu bauen. Das Forschungskonzept baut auf langjährigen Vorarbeiten auf. So wurde in den SFB 528 und SFB 532 von 1999–2011 Grundlagenforschung zu Textilbeton durchgeführt, aus der schließlich der Carbonbeton hervorging. Darauf aufbauend begann 2014 Anwendungsforschung zu Carbonbeton im Forschungsverbund Carbon Concrete Composite – C<sup>3</sup>. Im aktuellen SFB/TRR 280 folgt darauf aufbauend Grundlagenforschung zu Konstruktionsstrategien mit und für Carbonbeton.

*The joy was enormous when the Collaborative Research Centre/Transregio 280 was approved by the German Research Foundation (DFG) in summer 2020. In the CRC/TRR 280 “Design Strategies for Material-Minimised Carbon Reinforced Concrete Structures”, scientists from TU Dresden, RWTH Aachen University and the Leibniz Institute of Polymer Research (IPF) Dresden are jointly researching principles of a new construction approach. The research concept bases on many years of preliminary work. Basic research on the new material composite textile reinforced concrete (TRC) was carried out in the Collaborative Research Centres CRC 528 in Dresden and CRC 532 in Aachen from 1999–2011, from which carbon concrete finally emerged. Building on this, application research on the material composite carbon concrete began in 2014 in the research network project “Carbon Concrete Composite – C<sup>3</sup>”. In the current SFB/TRR 280, this is followed by basic research on construction strategies with and for carbon reinforced concrete.*

Einige der beteiligten Wissenschaftler arbeiten schon seit über zwanzig Jahren eng zusammen,

andere – auch und gerade aus völlig anderen Fachrichtungen wie Botanik, Algebra, Wissensarchitektur – sind hinzugekommen. Die Interaktion unterschiedlicher Fachrichtungen soll neue Impulse und neue Ideen für neue Arten des Konstruierens und Bauens mit Carbonbeton erschließen.

Während bisher häufig das Material(-komposit) im Vordergrund stand, liegt nun das Konstruieren im Fokus – und zwar nicht eine einzelne, singuläre oder spezielle Konstruktion, sondern vielmehr die grundlegende Art und Weise. Denn Carbonbeton ermöglicht es mit seinen hervorragenden Materialeigenschaften, hoch tragfähige und gleichzeitig filigrane Strukturen zu bauen. Dennoch wurde bisher nach klassischen Mustern entworfen, konstruktiv durchgebildet und gebaut. Zwar kann hierbei durch die bei Carbonbeton im Vergleich zu Stahlbeton geringere erforderliche Betondeckung Beton eingespart werden, dies ist ein wichtiger Anfang und großer Erfolg. Um jedoch das volle Potential von Carbonbeton zu erschließen und last- und werkstoffgerecht konstruierte Strukturen zu ermöglichen, müssen bestehende Denkmuster aufgebrochen, neue Inspirationsquellen erschlossen, völlig neue Wege des Konstruierens gefunden und neue Prinzipien der Konstruktionsdurchbildung ergründet werden. Dies ist das erklärte Ziel des SFB/TRR 280. Und dass die Arbeit an diesem hohen Ziel nun beginnen konnte, ist in der Tat ein Grund zur Freude.



Vorbereitung der Poster-Session für die Begutachtung des SFB/TRR 280 | *Preparation for the poster session for review of the CRC/TRR 280* | Photo: Stefan Gröschel

*Some of the scientists involved have been working together intensively for over twenty years. Other scientists – also and especially from completely different disciplines such as botany, algebra, knowledge architecture – have joined. In the interaction of different disciplines, new impulses and new ideas are to be developed to enable new types of construction and building with carbon reinforced concrete. While previous research focused on the material or material composite, the current research focuses on the construction. And not a single, singular or special construction, but rather the way of constructing. The new material composite, with its excellent material properties, makes it possible to build highly load-bearing and at the same time filigree structures. Nevertheless, up to now the way of constructing and the constructive realisation of components have been carried out according to classical patterns. Indeed, the lower concrete cover required for carbon concrete compared to reinforced concrete means that concrete can be saved. However, to reveal the full potential of the material composite carbon concrete and to enable highly load-bearing structures designed following the load and the material, existing thought patterns must be broken up, new sources of inspiration must be tapped, completely new ways of constructing must be found and new principles of construction must be explored. This is the declared aim of the CRC/TRR 280. And the fact that work on this ambitious aim has now begun is a cause for joy, indeed.*

► **Titel | Title**

SFB/Transregio 280: Konstruktionsstrategien für materialminimierte Carbonbetonstrukturen – Grundlagen für eine neue Art zu bauen

CRC/Transregio 280: *Design Strategies for Material-Minimised Carbon Reinforced Concrete Structures—Principles of a New Approach to Construction*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280

► **Zeitraum | Period**

07.2020 – 06.2024

► **Sprecher | Spokesperson**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Koordination | Coordination**

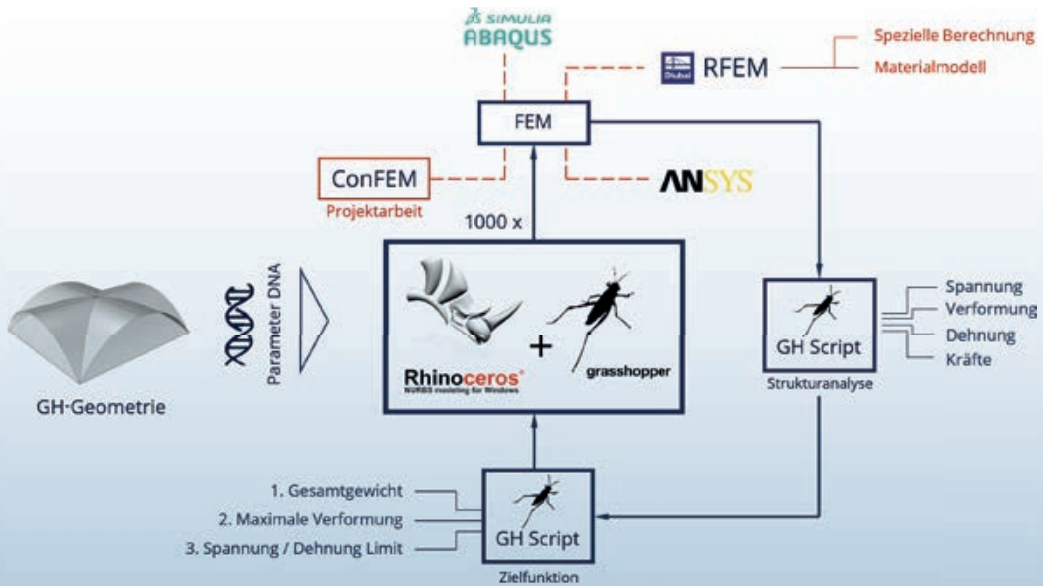
Dr.-Ing. Birgit Beckmann

► **Controlling | Controlling**

Ines Niemetz

► **Partner | Project partners**

18 Forschungsinstitute der TU Dresden und der RWTH Aachen University sowie dem Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V.



Überblick über den geplanten evolutionären Optimierungsprozess | Overview of the envisioned evolutionary-based optimization process | Graphic: Iurii Vakaliuk

# NEUARTIG KONSTRUIEREN MIT CARBONBETON

## INNOVATIVE DESIGN WITH CARBON REINFORCED CONCRETE

Übergeordnetes Ziel des Teilprojektes C01 im SFB/TRR 280 ist es, Bauteile im Inneren durch lastabtragende Strukturen so aufzulösen, dass das volle Potenzial des Baustoffs Carbonbeton ausgenutzt werden kann.

Ein erster Ansatz sind sich selbst durchdringende Schalen- oder Faltwerkstrukturen. Um möglichst viele Lösungen dieser geometrischen Grundformen zu untersuchen, wurde entschieden, eine parametrische Umgebung der Software Rhino 3D + Grasshopper (GH) zu verwenden. Auf diese Weise dienen die als parametrisches Modell mit einer Vielzahl von Parametern entworfenen Formen, die alle geometrischen Merkmale der Struktur steuern und nach dem biomimetischen Prinzip – als DNA der ausgewählten Betonstruktur – funktionieren.

Eine wichtige Frage ist, nach welchen Kriterien die Leistungsfähigkeit der neuen Strukturen bewertet werden soll? Eine Möglichkeit ist das Mindestgewicht. Kernelement des iterativen Optimierungsverfahrens ist die parametrische Umgebung. Die Berechnung startet mit ausgewählten

*The overall objective of subproject C01 in the CRC/Transregio 280 is to use the full potential of the material carbon reinforced concrete in the construction of structural elements. A range of ideas has been developed since the beginning of the project in July 2020.*

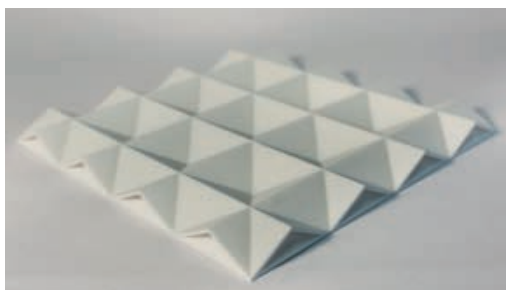
*The original idea is self-intersected structures based on inner shells or foldings. To enable exploration as much as possible, within the range of visible solutions of the geometrical shapes, it was decided to use a parametric environment of Rhino 3D + Grasshopper (GH) software. Thus, the shapes designed as a parametric model with a wide range of parameters that control all the geometrical features of the structure and following the biomimetic principle serve as DNA of the selected concrete structure.*

*The important question is which criteria can be used to assess the performance of the new structures. For example, to reach a minimum weight, a special set of software solutions envisioned within the project. The core element is the parametric environment. To start the calculation procedure,*



Geometrielösungen, die über die DNA-Datenstruktur in die GH-Software eingefügt wurden. Anschließend können mehrere verbundene FEM-Lösungen verwendet werden, um eine qualitativ hochwertige Strukturanalyse durchzuführen. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse der Strukturanalyse überprüft, um potenzielle Fehler nach ausgewählten Fehlerkriterien unter Verwendung der  $\varepsilon$ -Constraint-Methode aus der Theorie der multiobjektiven Optimierungstechniken auszuschließen. Nur geometrische Lösungen, die der Anforderung genügen, werden weiter innerhalb des iterativen evolutionären Optimierungsprozesses verwendet. Wichtig ist, dass innerhalb des Projekts mehrere Zielfunktionen für die Optimierungsaufgabe untersucht werden – z. B. Zielfunktionen wie Mindestgewicht, auftretende Verformungen und Spannungen oder das effizienteste finanzielle Äquivalent der Betonstrukturen.

Bestandteil des Arbeitsplanes ist es außerdem, die theoretische Forschung durch Experimente zu verifizieren. Es sind Tests an kleinmaßstäblichen Proben, bspw. zur Herstellung und an Detailpunkten, aber auch an Deckenplatten im Metermaßstab geplant. Mit Hilfe der Tomographie soll zudem der innere Verformungsprozess unter Last beobachtet werden.



Erste Formideen für die Carbonbetonkonstruktionen | Initial shape ideas for the concrete structures | Photos: Sylke Scholz

*the selected geometry range of solutions is inserted into the GH software, as the DNA data structure. Afterwards, multiple connected FEM solutions may be used to perform high-quality structural analysis. In the next step, the structural analysis results will be verified to exclude potential failure according to a range of selected failure criterion using the  $\varepsilon$ -constraint method from the theory of multiobjective optimization techniques. Only geometrical solutions that match the requirement finally can be used for further processing within the iterational evolutionary-based optimization process. Additionally, it is important to say that within the project it is assumed to explore multiple objective functions used for the optimization task. Such objective functions can be the minimum weight, occurring deformations and stresses or the most efficient financial equivalent of the concrete structures.*

*The theoretical research will be verified by experiments. Tests are planned on small-scale samples, e.g. for production and detail points, but also large scale ceiling tiles. Tomography will also be used to observe the internal deformation process under load.*

► **Titel | Title**

TP C01: Auflösung kompakter Bauteile mittels sich durchdringender, lastabtragender schalenförmiger Strukturen

*TP C01: Use of pervading internal shell-type substructures to dissolve compact components*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280

► **Zeitraum | Period**

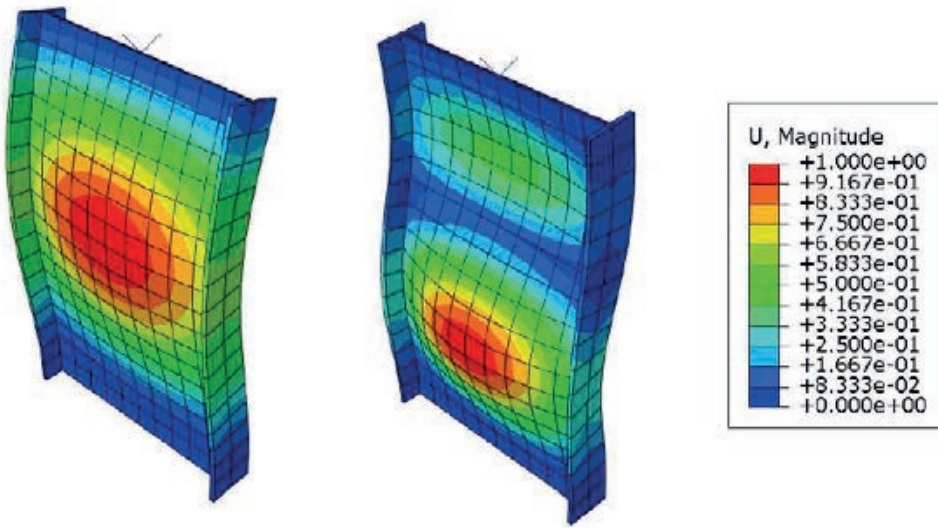
07.2020 – 06.2024

► **Teilprojektleiter | Subproject managers**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Dr.-Ing. Silke Scheerer

► **Bearbeiter | Contributor**

Iurii Vakaliuk, M.Sc.



Erster und zweiter Eigenwert in der FEM-Analyse | First and second eigenvalue in the FEM analysis | Graphic: Kai Gebuhr

# STABILITÄT VON DÜNNWANDIGEN CARBON-BETONBAUTEILEN

## STABILITY OF CARBON REINFORCED CONCRETE COMPONENTS

Der Vorteil von carbonbewehrten Bauteilen liegt in deutlich filigraneren Tragstrukturen und Querschnittsabmessungen gegenüber den heute üblichen konventionellen Stahlbetonkonstruktionen. Carbonbetonbauteile ermöglichen damit erhebliche Betoneinsparungen im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetonkonstruktionen und sparen gleichzeitig Ressourcen. Diese filigranere Bauweise ist unter Druckbeanspruchung deutlich empfindlicher gegenüber Stabilitätsversagen. Im Gegensatz zu Betonstahl weist das Material Carbon kein duktilen, sondern ein sprödes Materialverhalten auf. Die Verbundkonstruktion Carbonbeton bietet damit deutlich geringere Verformungskapazitäten als die Verbundkonstruktion Stahlbeton. Die bewährten Entwurfsgrundsätze aus dem Stahlbetonbau sind für den Carbonbetonbau somit nicht mehr anwendbar beziehungsweise nicht übertragbar. Es bedarf an dieser Stelle neuer Untersuchungen und Erkenntnisse, die die Konsequenzen der spröden Material-

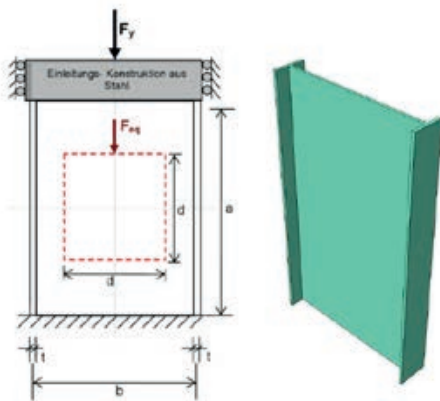
*The predominant advantage of carbon-reinforced concrete structures is associated with slimmer structural members and smaller cross-sectional dimensions compared with steel reinforced solutions. Consequently, carbon reinforced concrete structures allow a reduction in the amount of concrete and further the use of resources. On the other hand, the opportunity to build more slender structures increases the sensitivity to stability failure. Also, carbon fibres are considerably more brittle than reinforcing steel, leading to a significant reduction of the deformation capacity. The design criteria and recommendations developed for steel-reinforced concrete structures are either not applicable or need to be adapted, especially concerning the brittle behaviour of carbon and the use in composite structures.*

*The TP C04 project intends to provide the engineering background for the design of slender, carbon reinforced structural concrete members, which are sensitive to stability failure and serve as the basis for practical solutions, design criteria and recommendations. The main focus lies on the*

eigenschaft des Carbons in der Verbundkonstruktion Carbonbeton untersuchen.

Das TP C04 dient dabei der Erforschung wissenschaftlicher Grundlagen für filigrane, schlanke Strukturen, die stabilitätsgefährdet sind. Diese Grundlagen sollen die Basis zur Entwicklung von praxistauglichen Konstruktionsprinzipien und Bemessungsregeln für stabilitätsgefährdete Bauteile und Querschnittsteile aus Carbonbeton bilden. Dabei gilt es insbesondere die deutlich geringere Verformungsfähigkeit des Carbons auszugleichen, weswegen der Zusammenhang zwischen Stabilität, Quasiduktilität sowie die Baukörperform im Fokus der Betrachtungen steht. Das TP C04 wird in Kooperation mit der RWTH Aachen verwirklicht.

Der Schwerpunkt Stabilität wird an der TU Dresden und der Schwerpunkt Quasiduktilität wird an RWTH Aachen erforscht. Da bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen bereits geringfügige Abweichungen der Ist-Geometrie von der Soll-Geometrie eine überproportionale Minderung der Tragfähigkeit zur Folge haben können, werden im ersten Schritt Imperfektionen untersucht. Dafür werden Bauteilgeometrien sowohl numerisch als auch experimentell geprüft. Gegenstand der aktuellen Untersuchungen an der TU Dresden sind hierbei geometrische Abweichungen, inhomogene Materialeigenschaften der Betone für Carbonbeton, Lage der Bewehrungslegge im Betonquerschnitt, herstellungsbedingte Imperfektionen und Abweichungen aus Lasteinleitungen.



Versuchsaufbau | *Experimental setup* | Graphic: Kai Gebuhr

*significantly reduced deformation capacity and the correlation with stability, quasi-ductility and cubage. The TP C04 project is a cooperation between the RWTH in Aachen and Technische Universität Dresden.*

*The project members belonging to the Technische Universität Dresden are predominantly responsible for the stability topic. The stability behaviour is affected by geometrical deviations (geometrical imperfections) on the one hand and structural imperfections on the other. In this regard, both calculations and tests will be accomplished. At the moment, we are focussing on structural imperfections caused by the concrete inhomogeneity, location of the reinforcement, fabrication issues as well as load-dependent imperfections.*

► **Titel | Title**

TP C04: Stabilität und Quasiduktilität von Carbonbetonbauteilen

*TP C04: Stability and quasi-ductility of carbon reinforced concrete structural members*

► **Förderer | Funding**

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 280

► **Zeitraum | Period**

07.2020 – 06.2024

► **Teilprojektleiter | Subproject manager**

Dr.-Ing. Frank Schladitz

► **Bearbeiter | Contributor**

Kai Gebuhr, M.Eng.

► **Projektpartner | Project partner**

Institut für Massivbau, RWTH Aachen University



# DAS C<sup>3</sup>-PROJEKT

*THE C<sup>3</sup> PROJECT*





C | c r o  
co cr  
co o i

# AKTUELLES ZUM C<sup>3</sup>-PROJEKT

## UPDATE ON THE C<sup>3</sup> PROJECT

Im Jahr 2020 kann das Großforschungsprojekt C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite auf eine siebenjährige Forschungsarbeit in Bezug auf eine anwendungstechnische Etablierung des Verbundmaterials Carbonbeton zurückblicken. Das Ende des C<sup>3</sup>-Projektes rückt geradewegs in Sichtweite. Der im Jahr 2014 zunächst für die Durchführung des C<sup>3</sup>-Projektes ins Leben gerufene Carbon Concrete Composite e. V. (C<sup>3</sup> e. V.) vertritt derzeit 162 Mitglieder (Stand 16.10.2020) aus ganz Deutschland.

Bis zum Ende des Jahres 2020 wurden 40 C<sup>3</sup>-Vorhaben der insgesamt 61 C<sup>3</sup>-Vorhaben (Verbundvorhaben) mit 298 Teilvorhaben beendet. Die weiteren 21 werden die Arbeiten im Laufe des Jahres 2021 beenden. Die Roadmap zeigt einen vollständigen Überblick aller am C<sup>3</sup>-Projekt beteiligten C<sup>3</sup>-Verbundvorhaben. Die letzten im Jahr 2021 endenden Vorhaben fassen die bisher erarbeiteten Ergebnisse zusammen. Die wichtigsten größeren Themenkomplexe sollen im Folgenden kurz dargestellt werden:

Das ist zum einen das Vorhaben „Lückenschluss Regelwerke“ (L9), welches die noch fehlenden relevanten Ergebnisse des Vorhabens „Normung und Zulassung“ (V1.2) zusammenstellt. Das Vorhaben V1.2 befasste sich aufbauend auf vorangegangenen C<sup>3</sup>-Vorhaben zur Entwicklung standardisierter Prüfmethode mit den Verfahrenswegen und Nachweiskonzepten für Richtlinien, Normen und Zulassungen im Bereich des Neubaus und der Verstärkung. Diese definieren neben Bemessungsverfahren die Anforderungen an den C<sup>3</sup>-Beton, die C<sup>3</sup>-Bewehrung, den Verbundwerkstoff sowie die Bauausführung, Prüfung und Produktionskontrolle. Da nicht alle Ergebnisse bis zum Laufzeitende von V1.2 vorliegen, soll im Vorhaben L9 ein Lückenschluss erfolgen. Dieser bezieht sich vor allem auf die Themenbereiche: Gebrauchstauglichkeit (Rissbreitenbegrenzung, Durchbiegung), Ermüdung, Dauerstand, Querkraft,

*In 2020, the large-scale research project C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite will be able to reflect on seven years of research work on establishing the composite material carbon reinforced concrete in terms of application technology. The end of the C<sup>3</sup> project is fast approaching. The Carbon Concrete Composite e. V. (C<sup>3</sup> e. V.), which was initially founded in 2014 to carry out the C<sup>3</sup> project, is now in its final phase. (C<sup>3</sup> e. V.) currently represents 162 members (status: 16.10.2020) from all over Germany.*

*By the end of 2020, 40 C<sup>3</sup> projects of a total of 61 C<sup>3</sup> projects (collaborative projects) with 298 sub-projects were completed. The other 21 will complete their work in 2021. The roadmap shows a complete overview of all C<sup>3</sup> collaborative projects involved in the C<sup>3</sup> project. The last projects ending in 2021 summarise the results achieved so far. The most important larger thematic complexes will be briefly described below:*

*On the one hand, there is the project „Closing the Gaps in Regulations“ (L9), which compiles the still missing relevant results of the project „Standardisation and Approval“ (V1.2). Building on previous C<sup>3</sup> projects on the development of standardised test methods, project V1.2 dealt with the procedures and verification concepts for guidelines, standards and approvals in the area of new construction and reinforcement. In addition to design methods, these define the requirements for C<sup>3</sup> concrete, C<sup>3</sup> reinforcement, composite material as well as construction, testing and production control. Since not all results will be available by the end of V1.2, a gap is to be closed in project L9. This relates primarily to the topics: Serviceability (crack width limitation, deflection), fatigue, fatigue life, shear force, punching shear, torsion, theory II. The second-order theory, prestressing (immediate bond, without bond), reinforcement rules, design rules and construction rules.*

*Equally, the activities for the construction of the CUBE (V3.1), which is to serve as a „lighthouse“ of*

Durchstanzen, Torsion, Theorie II. Ordnung, Vorspannung (sofortiger Verbund, ohne Verbund), Bewehrungsregeln, Konstruktionsregeln und Bauausführungsregeln.

Ebenso werden sich die Aktivitäten zur Errichtung des CUBE (V3.1), das als „Leuchtturm“ des gesamten C<sup>3</sup>-Projektes dienen soll, bis zum Ende des C<sup>3</sup>-Projektes erstrecken. Der CUBE soll alle im C<sup>3</sup>-Projekt gewonnenen Ergebnisse sichtbar und öffentlichkeitswirksam in Form eines nutzbaren Gebäudes aus Carbonbeton präsentieren.

Damit das C<sup>3</sup>-Projekt erfolgreich abgeschlossen werden kann, werden im Innovationsmanagementvorhaben (I) sämtliche koordinativen Arbeiten des Gesamtprojektes weitergeführt, wie bspw. die Ergebnisstrukturierung, Vernetzung, Lobbyarbeit und die Initiierung von Anschlussprojekten. Weitere Schwerpunkte sind die öffentlichkeitswirksame Verbreitung der Ergebnisse sowie die vorbereitenden Arbeiten für eine Überführung des C<sup>3</sup>-Konsortiums in eine selbsttragende Institution.

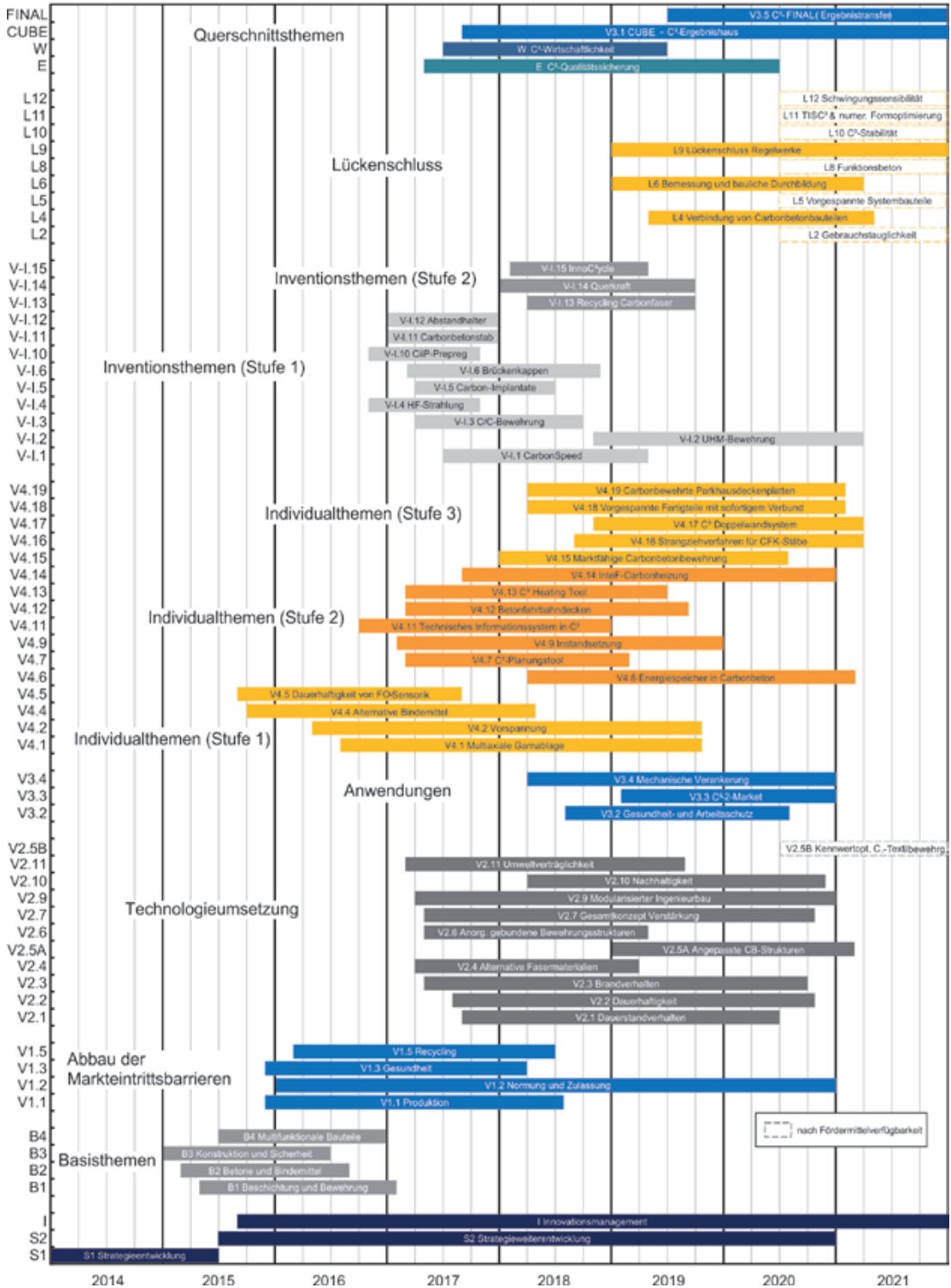
Um die umfangreichen Ergebnisse des C<sup>3</sup>-Projektes nutzbar zu machen, hat das Vorhaben C<sup>3</sup>-FINAL (V3.5) eine entscheidende Bedeutung. Der Wissenstransfer aus der Forschung in das Bauwesen ist ein notwendiger Baustein, um das im C<sup>3</sup>-Projekt angestrebte Ziel „Schaffung aller Voraussetzungen für den Markteintritt“ zu erreichen und den Paradigmenwechsel anzustoßen. Dazu ist neben der technischen Machbarkeit, die in den C<sup>3</sup>-Vorhaben nachgewiesen wurde, ein neues Konzept des Wissenstransfers sowie auch Konzepte zur Einbindung und thematischen Sensibilisierung der wichtigen Zielgruppen erforderlich. Erster Schritt ist die Erarbeitung einer Vorgehensweise (Konzept) zum Strukturwandel, also „Mit wem?“ muss „Wie?“ über „Was?“ gesprochen werden, um „Wodurch?“ einen Paradigmenwechsel einleiten zu können. Dazu kommt der Wissenstransfer einmal in die Bereiche Lehre und Ausbildung, aber auch direkt an die Unternehmen durch Erläuterungen zur praxistauglichen Anwendung. Aufbauend darauf soll sowohl an (Fach-)Hochschulen als auch in den Unternehmen gezeigt werden, wie Innovation im Bauwesen am Beispiel von Carbonbeton weiter betrieben werden kann. An ausge-

*the entire C<sup>3</sup> project, will extend until the end of the C<sup>3</sup> project. The CUBE is to present all the results obtained in the C<sup>3</sup> project visibly and with public appeal in the form of a usable building made of carbon reinforced concrete.*

*To ensure that the C<sup>3</sup> project can be completed, the innovation management project (I) will continue all the coordinative work of the overall project, such as the structuring of results, networking, lobbying and the initiation of follow-up projects. Further focal points are the dissemination of the results to the public and the preparatory work for the transfer of the C<sup>3</sup> consortium into a self-supporting institution.*

*To make the extensive results of the C<sup>3</sup> project usable, the C<sup>3</sup>-FINAL (V3.5) project is of decisive importance. The transfer of knowledge from research to construction is a necessary step towards achieving the C<sup>3</sup> project's goal of „creating all prerequisites for the market entry“ and initiating the paradigm shift. In addition to the technical feasibility, which has been demonstrated in the C<sup>3</sup> projects, this requires a new concept of knowledge transfer as well as concepts for the involvement and thematic sensitisation of the important target groups. The first step is the development of an approach (concept) to structural change, i.e. „With whom?“ must be discussed „How?“ about „What?“ to be able to initiate a paradigm shift „Through what?“. Besides, there is the transfer of knowledge once to the areas of teaching and training, but also directly to the companies through explanations of practical applications. Building on this, it will be shown both at (technical) universities and in companies how innovation in the construction industry can be further pursued using the example of carbon reinforced concrete. Using selected examples of carbon reinforced concrete construction, potential analyses for marketability are to be developed and the gaps that still exist for market entry are to be clarified to contribute to closing the gap. For this purpose, there will be parallel scientific support, which will disseminate knowledge about the carbon reinforced concrete construction method in a targeted manner and bring it into use, both in terms of publicity and on-site (mobile task force). The implementation of the goals will focus on 2021.*

*So far, 123 partners of C<sup>3</sup> e. V. have actively participated in the overall project. Companies have the*



Roadmap der C<sup>3</sup>-Vorhaben (Stand Oktober 2020) | Roadmap of the C<sup>3</sup> projects (as of October 2020) | Graphic: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.



suchten Beispielen der Carbonbetonbauweise sollen Potenzialanalysen zur Marktfähigkeit erarbeitet und die noch bestehenden Lücken zum Markteintritt verdeutlicht werden, um somit einen Beitrag zum Lückenschluss zu leisten. Dazu wird es eine parallel laufende wissenschaftliche Begleitung geben, die sowohl öffentlichkeitswirksam als auch vor Ort (mobiles Einsatzteam) das Wissen über die Carbonbetonbauweise gezielt verbreitet und zur Anwendung bringt. Die Umsetzung der Ziele wird schwerpunktmäßig im Jahr 2021 stattfinden.

Bisher haben am Gesamtprojekt 123 Partner des C<sup>3</sup> e. V. aktiv an den Forschungsarbeiten mitgewirkt. Dabei haben die Unternehmen mit 66 % Beteiligung den größten Anteil, gefolgt von den Forschungseinrichtungen mit 29 % und den Vereinen/Verbänden von 5 %.

Der hohe Anteil der C<sup>3</sup>-Vorhaben, welche noch bis ins Jahr 2021 laufen werden, ist auf die aktuellen Einschränkungen infolge der Corona-Pandemie zurückzuführen. Bei einem Großteil der laufenden C<sup>3</sup>-Vorhaben sind bisher daher Verzögerungen bei der planmäßigen Bearbeitung von bis zu neun Monaten eingetreten. Insbesondere betrifft dies C<sup>3</sup>-Vorhaben mit experimentellen Fragestellungen, da hier kein oder in Ausnahmefällen nur ein stark eingeschränkter Laborbetrieb möglich war (bspw. zur Überwachung von Dauerständen). Teilweise sind Versuche auch zu wiederholen, da die entsprechenden festen Prüfzeitpunkte (bspw. Probenalter) nicht eingehalten werden konnten. Ebenso davon betroffen waren die Aktivitäten, welche die direkte Interaktion von mehreren Beteiligten erfordern, wie direkte Absprachen oder Ausführungen vor Ort (bspw. Errichtung von Demonstratoren). Insgesamt werden in allen C<sup>3</sup>-Vorhaben durch Anpassung der Arbeitspläne starke Anstrengungen unternommen, die gesetzten Ziele innerhalb des C<sup>3</sup>-Projektes vollständig zu erreichen.

### **Quo vadis, CUBE? Das weltweit erste Haus aus Carbonbeton**

Der CUBE ist ein Test- und Versuchsstand mit der Anmutung eines Gebäudes, so wurde die Antragstellung beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Errichtung des ersten Carbonbetongebäudes beschrieben. Durch

*largest share with 66% participation, followed by research institutions with 29% and associations with 5%.*

*The high proportion of C<sup>3</sup> projects, which will continue until 2021, is due to the current restrictions as a result of the Corona pandemic. For a large part of the ongoing C<sup>3</sup> projects, delays of up to nine months have therefore occurred in the scheduled processing. This applies in particular to C<sup>3</sup> projects with experimental questions, since no laboratory operation or, in exceptional cases, only very limited laboratory operation was possible (e.g. for monitoring permanent stands). In some cases, tests also had to be repeated because the corresponding fixed test dates (e.g. sample age) could not be met. Also affected were activities that require the direct interaction of several participants, such as direct agreements or on-site implementation (e.g. construction of demonstrators). Overall, strong efforts are being made in all C<sup>3</sup> projects to fully achieve the goals set within the C<sup>3</sup> project by adapting the work plans.*

### **Quo vadis, CUBE? The world's first house made of carbon reinforced concrete**

*The CUBE is a test and experimental unit with the appearance of a building, which is the description used in the application to the Federal Ministry of Education and Research for the construction of the first carbon reinforced concrete building. The CUBE is intended to demonstrate what is currently technically feasible and what makes economic sense. The 220 square metre building contains the results obtained from over six years of intensive research by the C<sup>3</sup> network. The building is subject to all necessary building law requirements. Due to the still missing standardisation, these are fulfilled, among other things, by approvals in individual cases (the so-called Zustimmung im Einzelfall, ZIE).*

*The CUBE project has two main areas, on the one hand, the research and on the other the commercial part. Both are highly interdependent and interlinked. In addition to TU Dresden, the research partners HTWK Leipzig (building physics), AIB GmbH (planning), Assmann Beraten und Planen GmbH (structural design), Betonwerk Oschatz GmbH (prefabricated parts) and Bendl HTS GmbH & Co. KG (structural implementation) are intensively involved. Here, results from the C<sup>3</sup> project*

den CUBE soll das derzeit technisch Machbare zusammen mit dem wirtschaftlich Sinnvollen gezeigt werden. Das 220 m<sup>2</sup> große Gebäude beinhaltet die gewonnenen Ergebnisse aus über sechs Jahren intensiver Forschung des C<sup>3</sup>-Netzwerks. Das Gebäude unterzieht sich allen notwendigen baurechtlichen Anforderungen. Auf Grund der noch fehlenden Normung werden diese u. a. durch Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) erfüllt.

Das CUBE-Vorhaben hat zwei wesentliche Bereiche, zum einen die Forschung und zum anderen den gewerblichen Teil. Beide hängen stark voneinander ab und sind miteinander verzahnt. Im Bereich Forschung des CUBE-Ergebnishauses arbeiten neben der TU Dresden die Forschungspartner HTWK Leipzig (Bauphysik), AIB GmbH (Planung), Assmann Beraten und Planen GmbH (Tragwerksplanung) sowie das Betonwerk Oschatz GmbH (Fertigteile) und Bendl HTS GmbH & Co. KG (bauliche Umsetzung) intensiv mit. Hier werden aus dem C<sup>3</sup>-Projekt Ergebnisse in Bauteile und Konstruktionen übersetzt, berechnet und geprüft. Dabei wurde die BOX als wirtschaftliches Halbfertigteil in Fertigteilbauweise entwickelt. Die TWIST-Schalen werden als architektonisch und bautechnisch anspruchsvolles, raumabschließendes Bauteil direkt vor Ort hergestellt. Der gewerbliche Teil arbeitet direkt mit der Planungs- und Baubranche über klassische Aufträge zusammen. So durchläuft der CUBE alle Phasen, die jedes andere Gebäude am Markt ebenfalls durchlaufen müsste. Das Designkonzept stammt vom Architektenbüro HENN. Für die Planung konnten die Architekten Ingenieure Bautzen GmbH als Generalplaner und die Assmann Beraten und Planen GmbH als Tragwerksplaner gewonnen werden. Für die Heizung-, Lüftung- und Sanitärplanung wurde Ingenieurbüro Scheffler & Partner GmbH beauftragt. Die Planung des Tiefbaus wurde vom Ingenieurbüro für Abwasser und Umwelttechnik – IBAUT und die Tiefbauarbeiten selbst von TRS Stolpen GmbH durchgeführt. Diese Arbeiten wurden unter der Leitung des SIB – Sächsisches Immobilien und Baumanagement im Sommer 2020 abgeschlossen. Die Landesstelle für Bautechnik Sachsen übernahm die Erteilung der Zustimmungen im Einzelfall sowie auch die Funktion des Prüfstatikers.

*are translated into components and constructions, calculated and tested. In the process, the BOX was developed as an economical semi-prefabricated component in prefabricated construction. The TWIST shells are produced directly on-site as an architecturally and structurally sophisticated, space-enclosing component. The commercial part works directly with the planning and construction industry via classic orders. In this way, the CUBE goes through all the phases that any other building on the market would also have to go through. The design concept comes from the architectural firm HENN. Architekten Ingenieure Bautzen GmbH acts as general planner, and Assmann Beraten und Planen GmbH are responsible for the structural planning. Ingenieurbüro Scheffler & Partner GmbH are commissioned for the heating, ventilation and sanitation planning. The civil engineering planning was carried out by Ingenieurbüro für Abwasser und Umwelttechnik – IBAUT and the civil engineering work itself by TRS Stolpen GmbH. This work was completed under the direction of SIB – Sächsisches Immobilien und Baumanagement in summer 2020. The Landesstelle für Bautechnik Sachsen (Saxony State Office for Construction Technology) took over the granting of approvals in individual cases and also the function of the test structural engineer.*

*The multi-stage award procedure for the construction services started in November 2019. Care was taken to ensure that all interested companies were allowed to participate in the award procedure. Since carbon reinforced concrete is a new technology, the negotiated procedure with a call for tenders, following §3 VOB/A, was chosen as the award procedure. Similar to the EU-wide tendering procedure, this offers a competitive dialogue and the greatest flexibility in the design together with the bidders to achieve the best result. The first phase was a tendering competition that asked for the basic suitability certificates and the interest of the market. In the next phase, suitable bidders were asked to prepare an implementation concept, which included the structural implementation of the TWIST. These concepts were finally presented to the decision-making body. From these concepts, the three most promising were selected. These bidders were then asked to carry out a technology test in the third phase. This involves the production of a 1:1 TWIST section from the highly curved area. The technology tests were assessed at the bidders' premises by*

Im November 2019 startete das mehrstufige Vergabeverfahren der Bauleistungen. Dabei wurde darauf geachtet, dass allen interessierten Unternehmen die Möglichkeit geboten wird, an dem Vergabeverfahren teilzunehmen. Da es sich bei Carbonbeton um eine neue Technologie handelt, wurde bei der Wahl des Vergabeverfahrens auf das Verhandlungsverfahren mit Teilnahmewettbewerb nach §3 VOB/A gesetzt. Dieses bietet, ähnlich dem EU-weiten Ausschreibungsverfahren, einen wettbewerblichen Dialog und die größte Flexibilität in der Ausgestaltung gemeinsam mit den Bietern, um zum besten Ergebnis zu gelangen. Die erste Stufe war ein Teilnahmewettbewerb der die grundlegende Eignungsnachweise und das Interesse des Marktes abfragte. Im nächsten Schritt wurden die geeigneten Bieter aufgefordert ein Umsetzungskonzept zu erstellen, was die bauliche Umsetzung des TWIST zum Inhalt hatte. Die entstandenen Konzepte wurden schließlich dem Entscheidungsgremium präsentiert. Aus den Konzepten wurden wiederum die drei Vielversprechendsten ausgewählt. Auf der dritten Stufe wurden die Bieter daraufhin gebeten, einen Technologietest durchzuführen. Er beinhaltet die Herstellung eines 1:1-TWIST-Ausschnitts aus dem stark gekrümmten Bereich. Die Technologietests wurden Anfang März bei den Bietern durch das Entscheidungsgremium begutachtet. Nach diesen erfolgreichen Technologietests wurde eine funktionale Leistungsbeschreibung angefertigt und damit die Bieter aufgefordert, erste Angebote für die Erstellung des CUBE als Generalunternehmer abzugeben. Daraus ergaben sich mehrere Fragestellungen und es wurden im Rahmen des Verhandlungsverfahrens mehrere Intensivgespräche zu verschiedenen Detailfragen geführt. Das Ziel war dabei die gemeinsame Erarbeitung einer detaillierten Leistungsbeschreibung des Bau-Solls. Dadurch entsteht eine Grundlage, die auch für weitere Ausschreibungen mit Carbonbeton genutzt werden kann, da aufgrund der detaillierten Aufarbeitung gut preisbare und in Einzelpositionen aufgliederte Beschreibungen existieren.

Parallel zu diesem Vergabeprozess wurden die Zustimmungen im Einzelfall für die beiden Teile TWIST und BOX herbeigeführt und liegen nun vor. Ebenfalls freigegeben ist die gesamte Ausführungsplanung durch die Landesstelle für Bautechnik.

*the decision-making panel in early March. After these successful technology tests, a functional performance specification was prepared and thus the bidders were invited to submit initial offers for the construction of the CUBE as a general contractor. Several questions arose from this and several intensive discussions were held on various detailed issues as part of the negotiation procedure. The goal was the joint development of a detailed performance description of the construction target CUBE. This creates a basis that can also be used for further tenders with carbon reinforced concrete, as the detailed elaboration means that there are descriptions that can be easily priced and broken down into individual items.*

*Parallel to this award process, the approvals in individual cases for the two parts TWIST and BOX were obtained and are now available. The entire implementation planning has also been approved by the State Office for Structural Engineering.*

*In addition to the civil engineering works already carried out, the contracts for the supply of reinforcement for the BOX have now also been awarded by solidian GmbH, thyssenkrupp Carbon Components GmbH and Wilhelm Kneitz - Solutions in Textile GmbH. A special feature in the production was implemented with the bar material from SGL Carbon GmbH. Here, the stirrup forming was carried out entirely by a team from the Institute for Concrete Structures in the textile machine hall of the Institute for Textile Machinery and High Performance Materials Technology in Dobritz. For this purpose, SGL provided the bending machine as well as the bar material and training personnel. Furthermore, the factory planning and production of the BOX prefabricated parts were awarded to Betonwerk Oschatz GmbH.*

*The negotiations for the construction of the CUBE result house have now been completed in terms of content. The construction contract was negotiated with the consortium consisting of Hentschke Bau GmbH and bendl Hoch- und Tiefbau GmbH und Co. KG and all necessary contract components have already been agreed upon so that the signing of the contract took place in mid-December and an award of the construction work could be carried out. The work will be completed in 2021.*



Der Bauvertrag ist unterzeichnet, nun kann es losgehen. | The building contract is signed, now we are ready to go. | Photo: Stefan Gröschel

Neben den schon ausgeführten Tiefbauleistungen wurden nun auch die Aufträge für die Bewehrungslieferung der BOX von der solidian GmbH, der thyssenkrupp Carbon Components GmbH sowie der Wilhelm Kneitz - Solutions in Textile GmbH vergeben. Eine Besonderheit in der Herstellung wurde mit dem Stabmaterial von der SGL Carbon GmbH umgesetzt. Hierbei wurde das Bügelformen komplett mit einem Team des Instituts für Massivbau in der Textilmaschinenhalle des Institutes für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik in Dobritz durchgeführt. Dafür stellte SGL die Biegemaschine sowie das Stabmaterial und Schulungspersonal zur Verfügung. Des Weiteren wurde die Werkplanung und Herstellung der BOX-Fertigteile an die Betonwerk Oschatz GmbH vergeben.

Die Verhandlungen zur Erstellung des CUBE-Ergebnishauses sind nun inhaltlich abgeschlossen. Der Bauvertrag wurde mit der Arbeitsgemeinschaft bestehend aus Hentschke Bau GmbH und bendl Hoch- und Tiefbau GmbH und Co. KG verhandelt und alle notwendigen Vertragsbestandteile wurden bereits abgestimmt, sodass die Vertragsunterzeichnung von beiden Seiten Mitte Dezember stattfinden und eine Vergabe der Bauleistung durchgeführt werden konnte. Die Ausführung der Arbeiten erfolgt im Jahr 2021.

### **Digital stage for the 12<sup>th</sup> Carbon and Textile Reinforced Concrete Days**

*The Corona pandemic also brought new challenges to the planning and implementation of the 12<sup>th</sup> Carbon and Textile Reinforced Concrete Days. Until early summer, the focus was still on a face-to-face event. However, the health of the participants and employees was at the centre of all considerations at all times, so that the C<sup>3</sup> team and the Institute for Concrete Structures ultimately decided on a digital event. In July, a race against time then began, on unfamiliar software terrain and with many technical hurdles. The event, which usually takes a year to plan and prepare, now had to be organised within 2.5 months. Thanks to the unwavering commitment of the staff and the intensive work of the speakers, exhibitors and partners, more than 500 participants from 23 nations were able to eagerly follow the opening lecture by Frank Schladitz on 22<sup>nd</sup> September at 9:00 am.*

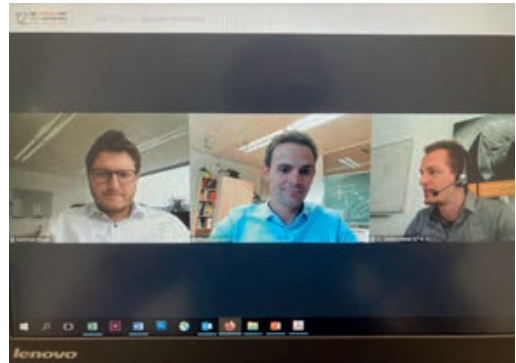
*The CUBE, the so-called C<sup>3</sup> results house, which is currently being built in Dresden and is the world's first house to be constructed entirely of carbon reinforced concrete, provided a very special virtual stage for all participants of the 12<sup>th</sup> Carbon and Textile Reinforced Concrete Days. With a new record number of participants, the digital conference exceeded all expectations of the new event format. In 23 digital lectures in German and English, three online seminars, a trade fair exhibition and a live panel discussion, a wide range of information and*

## Digitale Bühne für die 12. Carbon- und Textilbetontage

Die Corona-Pandemie hat auch die Planung und Umsetzung der 12. Carbon- und Textilbetontage vor eine neue Herausforderung gestellt. Bis in den Frühsommer lag der Fokus noch auf einer Präsenzveranstaltung. Das gesundheitliche Wohl der Teilnehmenden und Mitarbeitenden stand jedoch jederzeit im Zentrum aller Überlegungen, so dass sich das C<sup>3</sup>-Team und das Institut für Massivbau letztendlich für eine digitale Veranstaltung entschieden haben. Im Juli begann dann ein Wettlauf gegen die Zeit, auf unbekanntem Softwareterrain und mit vielen technischen Hürden. Die Veranstaltung, die sonst ein Jahr geplant und vorbereitet wird, musste nun innerhalb von 2,5 Monaten organisiert werden. Dank unerschütterlichem Engagement der Mitarbeiter und intensiver Arbeit der Referenten, Aussteller und Partner konnten am 22. September um 9:00 Uhr über 500 Teilnehmer aus 23 Nationen gespannt dem Eröffnungsvortrag von Frank Schladitz folgen.

Der CUBE, das sogenannte C<sup>3</sup>-Ergebnishaus, welches gegenwärtig in Dresden entsteht und das weltweit erste Haus ist, das komplett aus Carbonbeton errichtet wird, bot dabei eine ganz besondere, virtuelle Bühne für alle Teilnehmenden der 12. Carbon- und Textilbetontage. Mit einem neuen Teilnehmerrekord übertraf die digitale Konferenz alle Erwartungen an das neue Veranstaltungsformat.

In 23 digitalen Vorträgen in Deutsch und Englisch, drei Online-Seminaren, einer Messeausstellung und einer Live-Podiumsdiskussion wurden vielfältige Informationen und kompaktes Wissen rund um Carbon- und Textilbeton vermittelt. Von besonderem Interesse waren Vorträge aus dem Bereich der Praxis, wie zur Verstärkung und dem Neubau von Brücken mit Carbonbeton, die Entwicklung von (vorgespannten) Bauteilen aber auch Fragen zur Planung und Bemessung. Nach jedem Vortrag standen die Referenten den Teilnehmern für Fragen live zur Verfügung – eine Möglichkeit zum effektiven Erfahrungs- und Ergebnisaustausch, die von zahlreichen Teilnehmern genutzt wurde. Vorträge aus dem Bereich der Forschung, die sich u. a. mit verschiedenen Temperatureinflüssen, der Dauerhaftigkeit oder auch dem Tragwerksverhalten beschäftigten, erfreuten sich ebenfalls großer Beliebtheit.



Stefan Minar moderiert den Live Chat mit den Referenten Matthias Egger und Christoph Waltl | *Stefan Minar moderates the live chat with the speakers Matthias Egger and Christoph Waltl* | Photo: Sandra Kranich

*compact knowledge about carbon and textile reinforced concrete was conveyed. Of particular interest were lectures from the field of practice, such as on the reinforcement and new construction of bridges with carbon reinforced concrete, the development of (prestressed) structural elements, but also questions on planning and design. After each lecture, the speakers were available to answer the participants' questions live - an opportunity for an effective exchange of experience and results, which was actively used by numerous participants. Lectures from the field of research, which dealt with the effects of temperature, durability or even structural behaviour, among other things, also enjoyed great popularity.*

*Frank Schladitz, co-organiser of the event and representative of the C<sup>3</sup> board, was extremely satisfied: "Even though there were minor technical teething problems, we were once again able to offer the participants a compact and comprehensive conference format with an entertainment aspect on a digital level over two days. Besides, we also noticed a much greater interest on an international level - an aspect that pleases us and shows that we are also on the right track with the thematic of our event."*

*The exhibition hall was also well occupied with 13 exhibitors from the construction industry, construction planning and knowledge transfer. Here, too, there was the opportunity to enter into conversation with the exhibitors easily and conveniently via live chat. In the virtual tour that followed, the conference participants were given an exclusive insight into the C<sup>3</sup> results house CUBE.*



12. Carbon- und Textilbetontage in digitaler Form | 12<sup>th</sup> Carbon and Textile Reinforced Concrete Days | Visualisation: Iurii Vakaliuk

Frank Schladitz, Mitorganisator der Veranstaltung und Vertreter des C<sup>3</sup>-Vorstandes zeigte sich überaus zufrieden: „Trotz kleiner technischer Startschwierigkeiten konnten wir den Teilnehmenden an zwei Tagen ein erneut kompaktes und umfangreiches Tagungsformat mit Unterhaltungsaspekt auf digitaler Ebene bieten. Zudem konnten wir auch ein sehr viel größeres Interesse auf internationaler Ebene feststellen – ein Aspekt, der uns freut und zeigt, dass wir mit unserer Veranstaltung auch thematisch auf dem richtigen Weg sind.“

Die Messehalle war mit 13 Ausstellern aus dem Bereich der Bauwirtschaft, Bauplanung und dem Wissenstransfer ebenfalls gut besetzt. Auch hier gab es die Möglichkeit, mit den Ausstellern via Live-Chat einfach und bequem ins Gespräch zu kommen. Im sich anschließenden virtuellen Rundgang erhielten die Konferenzteilnehmenden einen exklusiven Einblick in das C<sup>3</sup>-Ergebnis haus CUBE.

*A highly exciting conclusion to the first day of the conference was the panel discussion, which was broadcast live from the German Hygiene Museum in Dresden. Moderated by Nadine Lindner, a correspondent for Deutschlandradio, Manfred Curbach from the Institute for Concrete Structures at the Technische Universität Dresden, Josef Kurath from the Institute for Design and Civil Engineering at the Zurich University of Applied Sciences, Oliver Heppes from GOLDBECK GmbH, Udo Wiens from the German Committee for Reinforced Concrete and Gerhard Breitschaft from the German Institute for Structural Engineering answered questions on the current state of carbon reinforced concrete construction.*

*The fact that this topic also met with great relevance among the spectators worldwide was shown by the wide range of questions posed to each of the experts. With the help of the interpreters on-site, a good round of talks succeeded, which was also noticed beyond the European borders in America and Asia.*



Digitaler Messestand des C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V. | Digital exhibition stand of the C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V. | Rendering: Iurii Vakaliuk | Visualisation: ExpalP GmbH; Bearbeitung: Stefan Gröschel



Ein Blick hinter die Kulissen der Podiumsdiskussion | A look behind the scenes of the panel discussion | Photo: Sandra Kranich

Einen hoch spannenden Abschluss des ersten Konferenztages bildete die Podiumsdiskussion, die live aus dem Deutschen Hygiene-Museum in Dresden übertragen wurde. Unter der Moderation von Nadine Lindner, Korrespondentin des Deutschlandradios, standen Manfred Curbach vom Institut für Massivbau der TU Dresden, Josef Kurath vom Institut für Konstruktives Entwerfen der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Oliver Heppes von der GOLDBECK GmbH, Udo Wiens vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton sowie Gerhard Breitschaft vom Deutschen Institut für Bautechnik Rede und Antwort zum aktuellen Stand der Carbonbetonbauweise.

Dass dieses Thema auf große Relevanz auch bei den Zuschauenden weltweit stieß, zeigten die vielfältigen Fragen an jeden einzelnen Experten. Mithilfe der Dolmetscher vor Ort gelang eine gute Gesprächsrunde, die über die europäischen Grenzen hinaus auch in Amerika und Asien wahrgenommen wurde.

„Die positive Resonanz ist in diesem Jahr überwältigend. Uns haben während und nach der Veranstaltung Nachrichten von überall auf der Welt erreicht, die uns Glückwünsche, aber auch den Wunsch nach einer Fortsetzung übermittelten. Das ist großartig und zeigt einmal mehr, welchen enormen Stellenwert neues, nachhaltiges und innovatives Bauen weltweit besitzt“, betont Frank Schladitz.

*“The positive response this year has been overwhelming. We have received messages from all over the world during and after the event, congratulating us but also expressing the wish for a continuation. This is great and shows once again the enormous importance that new, sustainable and innovative building has worldwide,” says Frank Schladitz.*

- ▶ **Titel | Title**  
C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite  
C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite
- ▶ **Förderer | Funding**  
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF);  
Projekträger: FZ Jülich GmbH/C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.
- ▶ **Zeitraum | Period**  
C<sup>3</sup>-Projekt: 09.2013 – 12.2021
- ▶ **Leiter | Project manager**  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
- ▶ **Bearbeiter | Contributors**  
Dr.-Ing. Frank Schladitz, Chris Gärtner M.A.,  
Dipl.-Ing. (FH) Maximilian Krämer,  
Anja Giesder, Sandra Kranich M.A.,  
Dr.-Ing. Matthias Lieboldt, Dr.-Ing. Stefan Minar,  
Jana Strauch, Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Tietze,  
Dipl.-Ing. Sandra Zagermann,
- ▶ **Partner | Project Partners**  
Über 162 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft

# LEHRE

## TEACHING





# LEHRVERANSTALTUNGEN DES INSTITUTS FÜR MASSIVBAU

## LECTURES AT THE INSTITUTE OF CONCRETE STRUCTURES



Mit Abstand und ausreichend Frischluft – Vorlesung im Sommersemester 2020 im Parktheater des Großen Gartens | *With enough distance and sufficient fresh air – lecture in the summer semester 2020 in the park theater of the Großer Garten* | Photo: Stefan Gröschel

Neben der Forschung ist die Ausbildung der Studierenden und die Qualifizierung des akademischen Nachwuchses ein wesentlicher Auftrag der Universität und des Instituts. Gerade im Sommersemester 2020 standen wir bei der Erfüllung dieser Aufgabe vor vielen Veränderungen und Herausforderungen. Zunächst wurde das Lehre-Team durch zahlreiche neue Mitarbeiter ergänzt, allen voran Professor Steffen Marx. Mit seinen langjährigen Erfahrungen im Brücken- und Ingenieurbau setzt er neue Impulse in den Lehrveranstaltungen und vermittelt anschaulich und praxisgerecht die Lehrinhalte. Neben der reinen Wissensvermittlung möchten wir aber auch die Faszination und Begeisterung für unser innovatives Fachgebietes wecken. Dies geschieht in Vorlesungen, Seminaren und Übungen.

*Besides research, educating students and qualifying young academics is an essential mission of the university and the institute. Especially in the summer semester of 2020, we faced many changes and challenges in fulfilling this task. First, the teaching team was supplemented by numerous new staff members, most notably Professor Steffen Marx. With his many years of experience in bridge construction and civil engineering, he provides new energy in the courses and conveys the teaching content in a demonstrative and practice-oriented manner. In addition to the pure transfer of knowledge, we also want to arouse fascination and enthusiasm for our innovative technical field. This is done in lectures, seminars and exercises.*

Wie wertvoll dabei der direkte Kontakt zu den Studierenden ist, der Blick in faszinierte und wissbegierige Gesichter oder die interessierten Zwischenfragen sind, wurde uns dieses Jahr noch einmal deutlich bewusst, als dies aufgrund der Corona-Pandemie nahezu vollständig entfiel. Am Anfang etwas improvisiert entwickelten sich bisher kaum genutzte Lehrformen, von Vorlesungs- und Übungsvideos über interaktive Online-Seminare und -Konsultationen bis hin zu Vorträgen im Park und unter Elbbrücken. In Hausaufgaben und Belegen, die überwiegend im pdf-Format abgegeben und auch korrigiert werden, zeigen die Studenten, ob sie das Gelernte anwenden können. Besonders intensive Kontakte und kreativer Gedankenaustausch werden bei der Betreuung der Semester- und Abschlussarbeiten gepflegt. Nur die traditionelle gemeinsame mehrtägige Brückenexkursion musste dieses Jahr entfallen.

Als Maßstab für die Qualität der Lehre sehen wir vor allem die Meinung der Studierenden. Neben den obligatorischen, dieses Jahr als Online-Umfrage durchgeführten Evaluationen suchen wir das Gespräch mit den Lernenden, um Anregungen und Kritik aus erster Hand zu erfahren. Besonders direkte Verbindungen pflegen wir zu den studentischen Hilfskräften am Institut, die zumeist in die Forschungsarbeit eingebunden sind. Diese Tätigkeit erfordert sowohl fundiertes Wissen als auch Phantasie und Kreativität – ein ideales Aufgabenfeld für begabte und motivierte Studenten und zukünftige Ingenieure. Gleichzeitig fließen die Anforderungen der Bauindustrie an Hochschulabsolventen in die Lehrkonzeption ein. Viele Abschlussarbeiten werden gemeinsam mit einem Praxispartner betreut. So können wir unseren Studenten einen optimalen Start ins Berufsleben ermöglichen.

Unsere Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen betreuen überwiegend Lehrveranstaltungen der Diplom- und Diplomaufbaustudiengänge Bauingenieurwesen (BIW). Der Diplomstudien-gang beruht auf einem dreistufigen Curriculum aus Grund-, Grundfach- und Vertiefungsstudium und wird nach zehn Semestern Regelstudienzeit mit dem Diplom abgeschlossen. Ein Bachelorabschluss ist nur im Rahmen des Fernstudiums möglich. Das Diplomaufbaustudium

*We appreciate how valuable direct contact with the students is, to look into fascinated and inquisitive faces, or to answer interesting questions in between are. All this became clear to us again this year, when this was almost completely omitted due to the Corona pandemic. Somewhat improvised at the beginning, previously hardly used forms of teaching developed, from lecture and exercise videos to interactive online seminars and consultations to lectures in the park and under Elbe bridges. By completing homework and project assignments, which are mostly submitted in pdf format and are also corrected, students show that they can apply their knowledge. Intensive contact and the creative exchange of ideas are maintained through supervision during masters' theses and project work. Only the traditional collective bridge excursion of several days had to be cancelled this year.*

*We see the students' opinions as an important benchmark for the quality of our teaching. In addition to mandatory evaluations conducted this year as an online survey, we seek out conversations with students to receive suggestions and critique first-hand. We keep close contact with students, especially to the assistants, who are mainly involved in research. For this activity, they need sound knowledge as well as imagination and creativity, which makes it an ideal working field for motivated, talented students and future engineers. At the same time, the requirements that the construction industry has for graduates can flow into the teaching concept. Many Master's Theses are supervised by industry partners, allowing for an optimal start of a student's career.*

*Our faculty mainly supervise lectures for a degree known in Germany as Diplom-Ingenieur. Also, graduate and postgraduate programs in civil engineering (BIW) are offered. The Diplom-Ingenieur program is based on a three step curriculum, which consists of a foundation, consolidation and in-depth studies. After ten semesters, the standard period of study is completed, and a diploma and degree are granted to the student. A bachelor's degree is only offered to long-distance students. The postgraduate program starts in the 7th semester, and it is a fundamental program that has a similar depth, and it is equivalent to the master's programs of other universities. It can also be completed via a distance learning program. It is special in that students also graduate with a diploma.*

beginnt im siebten Semester des grundständigen Studiengangs und ist somit vom Umfang her mit Masterstudiengängen anderer Universitäten vergleichbar, wird aber ebenfalls mit dem Diplom abgeschlossen und kann auch als Fernstudium absolviert werden.

Darüber hinaus wird ein englischsprachiger Masterstudiengang Advanced Computational and Civil Engineering Structural Studies (ACCESS) angeboten. In vier Semestern Regelstudienzeit erlangen im Schnitt 50 Studierende aus der ganzen Welt ihren Masterabschluss.

Überdies werden Lehrveranstaltungen für den Bachelorstudiengang Hydrowissenschaften (BHYWI) sowie für den Diplomstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen (D-WW-ING) angeboten.

*Furthermore, we offer a master's program for English-speaking students, called Advanced Computational and Civil Engineering Structural Studies (ACCESS). After a standard study period of four semesters, around 50 students from all over the world graduate with a master's degree.*

*Besides, we offer lectures for the bachelor's program in hydrosience (BHYWI) as well as for the diploma program in industrial engineering (D-WW-ING).*



**Nachfolgend geben wir einen kurzen Einblick in die Lehrveranstaltungen des Studienjahres 2019/2020.**

Genauere Modulbeschreibungen können der Webseite unseres Institutes

<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/> oder den entsprechenden, ebenfalls online verfügbaren Studienordnungen entnommen werden.

*In the following pages, we will take a short look into the lectures that were offered during the academic year 2019/2020. More detailed descriptions of the modules can be found on the institute's website*

*<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/> or in the respective study regulations, which are also available online.*

## LEHRVERANSTALTUNGEN AM INSTITUT FÜR MASSIVBAU

### ► Stahlbetonbau (BIW 2-05)

Dr.-Ing. Kerstin Speck, Dipl.-Ing. Melchior Deutscher, Dipl.-Ing. Marc Koschemann

▷ **4. Semester:** 2 SWS Vorlesung

▷ **5. Semester:** 1 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung

▷ **6. Semester:** 2 SWS Vorlesung und 2 SWS Übung

Inhalt des Moduls sind die Entwurfs-, Konstruktions- und Bemessungsgrundlagen des Stahl- und Spannbetonbaus sowie die wesentlichen Modelle für den Nachweis typischer Stahl- und Spannbetonbauteile.

### ► Konstruktionslehre und Werkstoffmechanik im Massivbau (BIW 3-02)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe, Dipl.-Ing. Enrico Baumgärtel

▷ **5. Semester:** Mauerwerksbau, 1 SWS Vorlesung

▷ **6. Semester:** Stahlbetonkonstruktionslehre, 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung

Inhalt des Moduls sind die Besonderheiten des Tragverhaltens und der Konstruktionsweisen des Stahlbetonbaus und wesentliche Grundlagen des Mauerwerksbaus sowie dessen spezielle Bemessungs- und Konstruktionsmethoden.



Modell einer Fuß- und Radwegbrücke in Magdeburg, das im Rahmen des Seminars „Entwurf von Massivbauwerken“ entstanden ist. | *Model of a pedestrian and bicycle bridge in Magdeburg created in the context of the seminar „Design of Solid Structures“.* | *Model: Erkki Bartczak, Benjamin Majid, Henrik Mewes* | *Photo: Stefan Gröschel*

### ► **Entwurf von Massivbauwerken** (BIW 4-11)

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dr.-Ing. Silke Scheerer, Dipl.-Ing. Peter Betz, Dipl.-Ing. Marcus Hering, Dipl.-Ing. Marc Koschemann, Dr.-Ing. Harald Michler, Dr.-Ing. Kerstin Speck

▷ **7. Semester:** 2 SWS Vorlesung

▷ **8. Semester:** 1 SWS Vorlesung und 3 SWS Seminar

Inhalt des Moduls ist der Entwurf von Ingenieurbauwerken wie z. B. Brücken, Hochhäuser, Türme unter Berücksichtigung geeigneter Konstruktionsweisen und Bautechnologien sowie deren funktionaler und gestalterischer Wirkung.

### ► **Bauen im Bestand – Verstärken von Massivbauwerken** (BIW 4-12)

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dr.-Ing. Torsten Hampel, Dipl.-Ing. Peter Betz, Dipl.-Ing. Marcus Hering, Dipl.-Ing. Egbert Müller

▷ **7. Semester:** Verstärken von Massivbauwerken, 2 SWS Vorlesung

▷ **8. Semester:** Verstärken von Massivbauwerken, 1,5 SWS Übung

▷ **8. Semester:** Mess- und Versuchstechnik, 1 SWS Vorlesung und 0,5 SWS Übung

Inhalt des Moduls sind Analyse und Nachrechnung sowie Instandsetzung und Verstärkung von bestehenden Massivbauwerken sowie Grundlagen der Mess- und Versuchstechnik.

### ► **Brückenbau** (BIW 4-16)

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach, Dipl.-Ing. Oliver Steinbock

▷ **7. Semester:** Massivbrückenbau, 2 SWS Vorlesung

Inhalt des Moduls sind Entwurf, Konstruktion und Berechnung von Brücken in Stahl-, Massiv- und Verbundbauweise. Im Blickpunkt stehen dabei sowohl Straßen- als auch Eisenbahn- und Gehwegbrücken.

### ► **Beton im Wasserbau und Stahlwasserbau** (BIW 4-52)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

▷ **8. Semester:** 1 SWS Vorlesung

Inhalt des Moduls ist die Betontechnik im Neuwasserbau und bei der Instandsetzung bestehender Bauwerke sowie Spezialbauwerke des Beton-, Stahlbeton- und Stahlwasserbaus.



Prof. Steffen Marx bei einer Vorlesung im Park. | Prof. Steffen Marx gives a lecture in the park. | Photo: Stefan Gröschel

► **Bauökologie – Bautechnik** (BIW 4-56)

Dr.-Ing. Kerstin Speck

▷ **7. Semester:** Nachhaltige Tragwerksplanung, 1 SWS Vorlesung

Inhalt des Moduls sind die Besonderheiten bei der nachhaltigen Bauwerksplanung hinsichtlich des Entwurfs, der Produktion, des Transportes und der Montage sowie der erforderlichen, ökologisch relevanten Nachweise samt Konstruktionsbeispielen.

► **Computational Engineering im Massivbau** (BIW 4-65)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

▷ **7. Semester:** 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung

▷ **8. Semester:** 2 SWS Vorlesung und 1 SWS Übung

Inhalt des Moduls sind die Grundlagen der Anwendung von numerischen Verfahren im Massivbau, geeignete Verfahren zur Lösung der nichtlinearen Problemstellungen sowie die speziellen Verfahrensmerkmale und die Anwendungsmöglichkeiten. Im Blickpunkt stehen auch außergewöhnliche Beanspruchungen wie Anprall und Explosionsdrücke.

► **Projektarbeit** (BIW 5-01)

▷ **9. Semester:** 16 Wochen Bearbeitung eines Projektes und 2 SWS Seminar

Mit der Projektarbeit soll die Fähigkeit zur Entwicklung, Durchsetzung und Präsentation von Konzepten zu fachspezifischen Themen und Fragestellungen nachgewiesen werden. Hierbei sollen die Studierenden zeigen, dass sie an einer größeren Aufgabe Ziele definieren sowie interdisziplinäre Lösungsansätze und Konzepte erarbeiten können. Das Ergebnis ist in schriftlicher Form abzugeben und mündlich in einem Kolloquium zu präsentieren.

► **Diplomarbeit** (BIW)

▷ **10. Semester:** 4 Monate Bearbeitung der Diplomarbeit und öffentliche Verteidigung

Die Diplomarbeit soll zeigen, dass die Studierenden in der Lage sind, innerhalb einer vorgegebenen Frist ein Problem aus ihrem Fachbereich selbständig mit wissenschaftlichen Methoden zu bearbeiten. Die Diplomarbeit ist der Abschluss des Studiums.

► **Design of Concrete Structures** (ACCESS, BIWE-01)

Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi, Iurii Vakaliuk, M. Sc.

▷ **2<sup>nd</sup> semester:** 2 lecture hours and 1 exercise hour per week

The contents of the module include maintenance principles for bridges and buildings, e.g., inspection, testing, examination and condition assessment of existing reinforced concrete structures, load testing and monitoring of steel-reinforced structures, calculation of the load-bearing capacity and reserve strength of existing buildings and bridges using special computation methods, strengthening methods for massive structures and their calculation (shotcrete, steel lamellae, CFRP lamellas, textile-reinforced concrete, external prestressing).

► **Computational Methods for Reinforced Concrete Structures** (ACCESS, BIWE-06)

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe, Iurii Vakaliuk, M. Sc.

▷ **2<sup>nd</sup> semester:** 2 lecture hours and 1 exercise hour per week

The module is comprised of special numerical methods that are suitable for the calculation of reinforced concrete (RC) structures. This includes the modelling of cracking and bond behaviour of RC, special non-linear calculation methods, the load bearing behaviour of cracked steel reinforced concrete elements, numerical methods for truss models, multi-axial constitutive laws for concrete, finite elements for structural members made of RC, in particular for shear walls and slabs.

► **Cable-stayed Bridges** (ACCESS, BIWE-11)

Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi

▷ **2<sup>nd</sup> semester:** 2 lecture hours and 1 exercise hour per week

The scope of the module includes the analysis of the loads acting on cable-stayed bridges as well as the dimensioning, dynamics, production and installation of load-bearing cables, the design of concrete and steel crossbeams, towers, and bridge girders. In such analysis, the nonlinear theory and the aerodynamic stability of the cables, stiffening beams is taken into account. The design and dimensioning of cable-stayed bridges according to Eurocode, and selected construction details for reinforced concrete, steel and steel composite structures are presented.

► **Practice-oriented Project Work** (ACCESS, BIWO-08)

▷ **3<sup>rd</sup> semester:** 16 weeks working on a project and a public defence

The goal of the project work is to demonstrate the students' ability to develop, implement and present subject-specific topics and questions based on specific tasks of civil engineering, materials science, and computer-oriented mechanics. Students should show that they can define goals on a larger task, as well as elaborate interdisciplinary approaches and concepts. The results shall be given and presented in written form.

► **Master's Thesis** (ACCESS)

▷ **4<sup>th</sup> semester:** 4 months working on a Master's Thesis and a public defence

The master's thesis is intended to show that the student is able to work on a problem within his or her subject independently and according to scientific methods. Therefore, the Master's Thesis is the completion of the studies.



Praxisbezogene Ausbildung – Fahrradexkursion zu den Dresdner Elbbrücken | *Practice-oriented training – bicycle excursion to the Elbe bridges in Dresden* | Photo: Stefan Gröschel

## PROJEKTARBEITEN | PROJECT WORKS

Studienjahr 2019/20 | *Academic year 2019/20*

Im neunten. Semester des Diplomstudiengangs bzw. im dritten Semester des Diplom-Aufbaustudiengangs Bauingenieurwesen wird von den Studierenden eine Projektarbeit angefertigt. Durch die Arbeit an einem Projekt zu aktuellen fachspezifischen Themen und Fragestellungen der gewählten Vertiefung soll die Fähigkeit zur methodischen wissenschaftlichen Arbeitsweise nachgewiesen werden. Hierbei sollen die Studierenden zeigen, dass sie an einer größeren Aufgabe Ziele definieren sowie interdisziplinäre Lösungsansätze und Konzepte erarbeiten können. Die während ihres Studiums erworbenen Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten sind möglichst selbständig, einzeln oder im Team auf eine konkrete Aufgabenstellung anzuwenden, die Arbeitsschritte nachvollziehbar zu dokumentieren sowie die Ergebnisse im Rahmen eines Kolloquiums zu präsentieren und zur Diskussion zu stellen.

Mit der gleichen Zielstellung und einem ähnlichen Arbeitsumfang bearbeiten die Studentinnen und Studenten des englischsprachigen Masterstudiengangs Advanced Computational and Civil Engineering Structural Studies ACCESS im dritten Semester ein anwendungsbezogenes Wissenschaftsprojekt – kurz Project Work.

Ausgewählte Arbeiten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

*In the 3<sup>rd</sup> semester of the MSc program ACCESS, students make a project work on a current and technical topic. In this manner, the students show their capability to work in a methodical and scientific way, and to define project goals that are feasible and within the scope of their task.*

*Interdisciplinary solutions and concepts are applied. The students should be aware of their knowledge and skills and be able to work in an independent manner.*

*At the end of the semester, the project work is presented at a colloquium, followed by an individual oral examination.*

*With the same goal and a similar scope of work, the students work on a so-called "Projektarbeit" (project work) in the 9<sup>th</sup> semester of the diploma study course or in the 3<sup>rd</sup> semester of the diploma postgraduate study course in civil engineering.*

*Selected works are briefly presented below.*



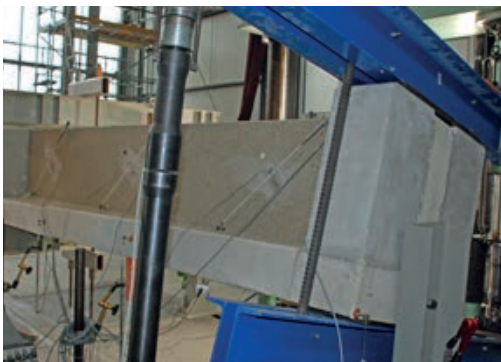
## Florian Fűrll

### Torsionskraftverstärkung von Bauteilen mit Carbonbeton (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Egbert Müller,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Aufgrund des zunehmenden Alters der Bestandsgebäude wird das Verstärken von Bauwerken in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen. Eine Variante ist der Einsatz von Carbonbeton, der gegenüber anderen Verstärkungsarten zahlreiche Vorteile aufweist. Gegenwärtig stehen allerdings die häufig noch fehlenden Normen und Zulassungen einer flächendeckenden baupraktischen Umsetzung im Weg. Daher werden an der TU Dresden Versuche durchgeführt, um die Steigerung der Tragfähigkeit von Bauteilen durch eine angebrachte Verstärkungsschicht aus Carbonbeton zu verifizieren.

Im Rahmen der Projektarbeit ging es um derartige Versuche, spezieller um Torsionsversuche an carbonbetonverstärkten Plattenbalken. Diese wurden wissenschaftlich begleitet, dokumentiert und ausgewertet. Dabei konnte ein deutlicher Einfluss der Carbonbetonverstärkung auf das Torsionstragverhalten der Stahlbetonbauteile festgestellt werden. Weiterhin erfolgte ein Vergleich zwischen den Versuchsergebnissen und bestehenden Berechnungsansätzen zur Beschreibung des Torsionstragverhaltens. Da jedoch während der Bearbeitungszeit der Projektarbeit erst vier der insgesamt 14 Probekörper untersucht wurden, kann noch keine sichere Aussage über die Genauigkeit der vorhandenen Berechnungsmodelle getroffen werden.



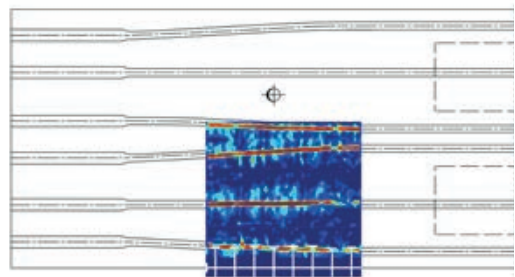
Versuchsstand während eines Torsionsversuchs | Foto: Florian Fűrll

## Nina Josiane Giese

### Untersuchungen an spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannbetonfertigteilträgern (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Oliver Steinbock,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Im Rahmen von Rückbaumaßnahmen einer Eisenbahnbrücke aus Spannbeton sind dem Institut für Massivbau der TU Dresden sieben Überbaufertigteile für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt worden. In den im Jahr 1970 hergestellten Fertigteilen wurde der sogenannte Hennigsdorfer Spannstahl verbaut, welcher als spannungsrissskorrosionsgefährdet gilt. Da es sich bei den Trägern um Bauteile eines Rückbauwerkes handelt, bestand die Möglichkeit, umfangreiches Probenmaterial zu



BTE-Träger vor dem OML und Detektion des Spanngliedverlaufs im Grundriss | Foto/Grafik: Nina Josiane Giese

erhalten. Diverse kleinteilige Bauteiluntersuchungen lieferten Kenntnisse über den aktuellen Erhaltungszustand der Träger. Der Schwerpunkt der Bestandsaufnahme lag neben der Erfassung der Lage der vorhandenen Bewehrung durch ein zerstörungsfreies Prüfverfahren auch auf der Analyse des Bauwerksbetons und des Spannstahls. Hierzu sind entsprechende Proben aus den Brückenträgern entnommen und ihre relevanten Materialeigenschaften un-

tersucht worden. Im Vergleich der Versuchsergebnisse mit der planmäßigen Ausführung der Fertigteile gemäß den Bestandsunterlagen konnte grundsätzlich eine weitestgehend hohe Übereinstimmung festgestellt werden. Hinweise auf Schäden infolge Spannungsrissskorrosion wurden bislang nicht vorgefunden. Auf Grundlage der bestimmten Materialparameter erfolgte abschließend eine numerische Simulation geplanter Biegeversuche, deren Ziel die Prognose des Versagensmechanismus der Brückenträger sowie die Abschätzung ihrer maximal aufnehmbaren Belastung darstellte.

### Lisa Ostwald

#### **Berechnung verschiedener Stützen-Binder-Systeme in Hallenkonstruktionen aus Betonfertigteilen und anschließende vergleichende Bewertung der untersuchten Varianten** (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Peter Betz,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Betrieblicher Betreuer: Dipl.-Ing. Bernd Herrmann (IGBFB mbH)

Um kurze Bauzeiten und eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erzielen, hat sich in der Planung von Produktions- und Logistikhallen, neben Konstruktionen aus Stahl oder Holz, vor allem der Einsatz von Betonfertigteilen bewährt. Diese Bauweise besticht durch kurze Montagezeiten infolge des hohen Vorfertigungsgrades, durch das Entfallen der Notwendigkeit von aufwendigen Aussteifungssystemen sowie durch einfaches Einhalten der Brandschutzanforderungen. Bei der Bemessung und Konstruktion von Hallentragwerken aus Betonfertigteilen werden üblicherweise gekoppelte Kragstützen als statisches Grundsystem gewählt, bei dem sich die ergebenden Horizontalkräfte aus der Windbelastung auf alle Stützen verteilen und demgemäß jede Stütze anteilig am Lastabtrag beteiligt wird. In einer Variantenuntersuchung wird diesem statischen „Regelsystem“ eine alternative Systemvariante ohne Koppelkraftübertragung gegenübergestellt und hinsichtlich möglicher Differenzen im Ressourcenaufwand und etwaigen Unterschieden in der Knotenpunktausbildung ausgewertet.



Hallenkonstruktion mit Stahlbetonbindern | Foto: Ingenieurgesellschaft Beton-Fertigteil-Bau IGBFB mbH

### Sebastian Probst

#### **Vergleich und Optimierung von Nachweisformaten zum Ankündigungsverhalten von spannungsrissskorrosionsgefährdeten Brücken** (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Oliver Steinbock,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

In den achtziger Jahren versagten einige Bauwerke mit Spannbetonquerschnitten unerwartet nach circa 30 Jahren Standzeit. Die damaligen Untersuchungen führten das Versagen auf eine Schädigung des Spannstahls durch wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion zurück. Diese Korrosionsart bildet ein erhebliches Risiko für den Nutzer, da das Bauwerk infolgedessen seine Fähigkeit, auf ein mögliches Versagen durch sichtbare Rissbildung hinzuweisen, verliert. Um den gravierenden volkswirtschaftlichen Folgen eines generellen Rückbaus der gefährdeten Bauwerke auszuweichen, stehen für eine rechnerische Beurteilung des Ankündigungsverhaltens zwei Nachweisformate zur Verfügung. Im Rahmen der Projektarbeit werden die beiden Konzepte jeweils auf zwei unterschiedliche Bauwerke angewendet. Die Aussagen zum Ankündigungsverhalten lassen sich dadurch in vielen Aspekten gegenüberstellen. Die ausführliche Analyse der Berechnungsschritte ermöglichte zudem das Aufzeigen verschiedener Abhängigkeiten von Eingangsgrößen, welche dem Leser über zahlreiche Diagramme erläutert werden. In einer kritischen Betrachtung wird abschließend auf Optimierungsmöglichkeiten der Nachweisformate aufmerksam gemacht.

## Nora Schubert

### Bemessung von Versuchskörpern zur experimentellen Untersuchung an Holz-Beton-Verbundbrücken mit ultrahochfestem Faserbeton (UHPFRC) (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Kristina Farwig,  
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
 Kooperationspartner: Prof. Paul Gauvreau  
 (Department of Civil & Mineral Engineering,  
 University of Toronto)

In der heutigen Zeit wird die Problematik des Klimawandels mehr denn je diskutiert und so wird auch in der Baubranche nach nachhaltigen Bauweisen gestrebt. Aufgrund der hohen Kohlenstoffdioxidemissionen bei der Herstellung von Zement und dementsprechend bei der Verwendung von Beton, muss die Bauindustrie neue Strategien entwickeln, um ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu minimieren. Eine Möglichkeit, umweltfreundlicher zu bauen, ist die gemeinsame Nutzung bestehender Baustoffe als neue Verbundbaustoffe. Diese Projektarbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen im Brückenbau, wobei zusätzlich ultrahochfester Faserbeton eingesetzt wird. Die Brücken können aus vorgefertigten Modulen auf der Baustelle zusammengefügt werden, was Zeit und Kosten spart. Diese Module bestehen aus zwei Brettschichtholzträgern mit eingeklebten Gewindestangen, zwischen denen die dünne Betonplatte gegossen wird. Der Fokus liegt auf dem optimalen Entwurf eines dieser Module bezüglich des Durchmessers und des Abstands der Gewindestangen, um die



Visualisierung des Versuchsbauteils | Grafik: Nora Schubert

Tragfähigkeit beider Baustoffe – Holz und ultrahochfester Faserbeton – optimal auszunutzen und ein angekündigtes Biegeversagen zu erreichen.

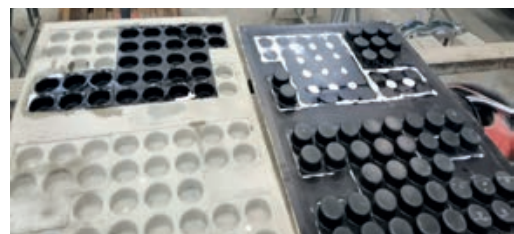
Die Projektarbeit entstand in Zusammenarbeit mit der University of Toronto, weshalb die Berechnungen für ein Maßstabsmodell einer 30 m weit gespannten kanadischen Autobahnbrücke nach den kanadischen Normen erfolgten.

## Sophie Uhlemann

### Experimentelle Untersuchung von Verbindungselementen für strukturoptimierte Platten aus Carbonbeton (Projektarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Dominik Schlüter,  
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Die strukturoptimierten Platten bestehen aus Carbonbeton und bilden dünnwandige Fassadenplatten, welche gleichzeitig eine hohe Tragfähigkeit aufweisen, architektonische Gestaltungsmöglichkeiten mit zahlreichen Anwendungen sowie die Fähigkeit der Energieerzeugung und -speicherung ermöglichen. Für die Befestigung dieser Fassaden wurden verschiedene schon bestehende Verankerungssysteme recherchiert, welche für dünnwandige, mit Carbontextil bewehrte Fassadenplatten geeignet sind. Nach einer Bewertung der Anker unter Beachtung unterschiedlicher Kriterien, wie Tragfähigkeit, Montierbarkeit und Wirtschaftlichkeit, wurden drei Vorzugsvarianten in Tastversuchen auf ihre Eignung für die betrachtete strukturoptimierte Fassadenplatte geprüft. Für die Vorbereitung der Prüfungen werden die erwarteten Kräfte aus den Einwirkungen aus Eigengewicht und Wind ermittelt, die Geometrie der Probekörper und ein



Ausgeschaltete Fassadenelemente | Foto: Sophie Uhlemann

geeigneter Versuchsaufbau entwickelt. Alle geprüften Anker haben die durch die Einwirkung hervorgerufenen Belastungen auf-

nehmen können und sind dahingehend für die Verwendung der betrachteten Fassadenplatten geeignet.

Liste aller weiteren Projektarbeiten | *List of all other Project Works*

Student:innen	Betreuer:innen		Titel der Projektarbeit
Eckstein, Phillip	Dipl.-Ing. Marc Koschemann	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Validierung von Materialmodellen von Beton anhand von Laborversuchen
Eibner, Rebekka	Dipl.-Ing. Kristina Farwig, Dr.-Ing. Kerstin Speck M. Eng. Korbinian Falk (Leonhardt, Andrä und Partner, Beratende Ingenieure VBI AG), Dresden	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Besonderheiten und Herangehensweise der Tragwerksplanung beim Bauen im Bestand anhand repräsentativer Beispielprojekte
Göbel, Rebecca	Dipl.-Ing. Melchior Deutscher Dipl.-Ing. Andreas Stiller (iproplan Planungsgesellschaft)	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Variantenvergleich eines Ersatzneubaus einer einfeldrigen Straßenbrücke
Nymdavaa, Evlegbat	Dipl.-Ing. Dominik Schlüter	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Untersuchung des Einflusses von Kerbformen auf das Biegetragverhalten von strukturoptimierten Platten
Pech, Jenny	Dipl.-Ing. Dominik Schlüter	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Entwurf einer funktionsintegrierten Holzkonstruktion
Schenkelberg, Julia	Dipl.-Ing. Oliver Steinbock Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark (Ingenieurbüro Grassl GmbH, Düsseldorf)	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Vergleich historischer und aktueller Auslegungen von Spannbetonbrücken am Beispiel einer Hochstraße

## DIPLOMARBEITEN | *MASTER'S THESES*

Studienjahr 2019/20 | *Academic year 2019/20*

Die Diplomarbeit bildet den berufsqualifizierenden Abschluss des Studienganges. In der Abschlussarbeit sollen die Studierenden an einem komplexen Ingenieurproblem die eigenständige wissenschaftlich methodische Vorgehensweise demonstrieren und somit zeigen, dass sie die für den Übergang in die Berufspraxis notwendigen gründlichen Fachkenntnisse erworben haben.

*The Master's Thesis constitutes the professional qualification of the student at the end of the ACCESS Master's Program. In the thesis, the students should demonstrate their own scientific and methodical approach to a complex engineering problem, and thus show that they have earned the skills necessary and fundamental knowledge for transition into a professional life.*



Bestandsanalyse im Rahmen einer Diplomarbeit | Foto: Sebastian May

## Niclas Oette

### Interaktion verschiedener Bewehrungselemente bei der Verstärkung mit Carbonbeton (Diplomarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Oliver Steinbock,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Das Verstärken von Stahlbetonbauwerken mit Carbonbeton rückt zunehmend in den Fokus der baupraktischen Anwendung. Um einen wirtschaftlichen Einsatz der Verstärkungsmethode zu gewährleisten, gilt es alle Bewehrungselemente optimal auszunutzen. Bereits aus dem Spannbetonbau ist bekannt, dass sich verschiedenartige Bewehrungselemente entsprechend ihrer Verbundeigenschaften unterschiedlich am Lastabtrag beteiligen. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde eine Versuchsreihe zur Interaktion von Carbonbewehrung mit verschiedenen Betonstahlbewehrungen durchgeführt. In diesem Zusammenhang erfolgte die Prüfung der Anwendbarkeit aktueller Formelapparate und Verbundmodelle zur Berücksichtigung verbundbedingter Spannungsumlage-

rungen bei carbonbetonverstärkten Bauteilen. Neben Berechnungen und numerischen Untersuchungen wurden faseroptische Dehnungsmessungen durchgeführt, um eine vollständige messtechnische Überwachung der Bauteile zu ermöglichen. Im Versuchsverlauf konnte bei allen Bauteilen eine Entlastung der Betonstahlbewehrung durch die Carbonbewehrung beobachtet werden. Des Weiteren wurde im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine vollständige Ausnutzung aller Bewehrungselemente erreicht. Die Versuche zeigten somit, dass sich



Balken mit kombinierter Stahl- und Carbonbewehrung im Biegeversuch | Foto: Niclas Oette

Carbonbeton, auch bei großen Verbundunterschieden zwischen Bewehrungselementen, als Verstärkungsmethode eignet. Zudem kann durch die hohe Verbundsteifigkeit der mattenartigen Bewehrung eine Reduktion der Ermüdungsbeanspruchung des Betonstahls erreicht werden, wodurch sich die Verstärkungsmethode insbesondere für ältere Bauwerke eignet.

### Enrico Baumgärtel

#### Erweiterung MITEX – Rissüberbrückung im Wasserbau (Diplomarbeit)

Betreuer: Dr.-Ing. Harald Michler,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Die Sanierung und Verstärkung von Bauwerken mit Textilbeton stellt in den letzten Jahren eine zunehmende Alternative zum Stahlbeton dar. Im Gegensatz zu Stahlbeton benötigt Textilbeton eine wesentlich geringere Mindestbetondeckung, da Textil nicht wie Stahl vor Korrosion geschützt werden muss. Das im Jahr 2019 von der Bundesanstalt für Wasserbau herausgegebenes Merkblatt „Flächige Instandsetzung von Wasserbauwerken mit textilbewehrten Mörtel- und Betonschichten (MITEX)“ stellt eine erste Richtlinie für den Einsatz von Textilbeton im Wasserbau dar. Dieses Merkblatt ist auf die Instandsetzung von frei bewitterten Bauteilen beschränkt. Insbesondere bei Schleusenbauten muss mit vorder- und rückseitig anstehenden Wasserdruck gerechnet werden. Ziel der Diplomarbeit ist es, die effektiven Wasserdrücke zu bestimmen und das im Merkblatt vorgesehene Verstärkungssystem so abzuändern, dass es die entsprechenden Drücke aufnehmen und ableiten kann. Die Diplomarbeit beschäftigt sich außerdem mit den gewählten Randbedingungen. Darauf aufbauend wurde eine entsprechende Erweiterung entwickelt. Die effektiven Wasserdrücke können durch bereits veröffentlichte Merkblätter bzw. Richtlinien für jedes Schleusenbauwerk ermittelt werden. Kritisch ist die Bestimmung des Wasserdruckes in einem Riss, welcher zusätzlich zum inneren Wasserdruck direkt auf das aufgebrachte Instandsetzungssystem einwirkt. Eine Verringerung aufgrund von Rissrauigkeit und Rissverlauf ist denkbar. Die exakte Abminderung ist allerdings nur durch eine numerische Simulation möglich.



Schäden an einer wasserwirtschaftlichen Anlage | Foto: Kerstin Speck

Aufbauend auf den gewonnenen Kenntnissen wurden vier verschiedene Sanierungsprinzipien entwickelt. Bei drei der Prinzipien sind zwei Lagen textiler Bewehrung vorgesehen, bei einem nur eine Lage. Die wesentliche Erweiterung des im Merkblatt vorgesehenen Instandsetzungssystems ist die Verwendung von Verankerungen bzw. Dübeln. Die Befestigungen sollen zum einen die Bewehrungen in ihrer Lage fixieren und zum anderen die auftretenden Drücke in den Altbeton ableiten. In jedem der entwickelten Prinzipien sind andere Verankerungen vorgesehen. Zusätzlich wurden Vorschläge für die Ausführung einer Schleusensanierung erarbeitet. Für eine ausreichende Bemessung/Beurteilung der Sanierungsmethoden müssen allerdings noch weitere Untersuchungen und praktische Versuche durchgeführt werden.

### Elisabeth Wetzel

#### Untersuchungen zur Rekonstruktion des Wolfshügelsturms Dresden (Diplomarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Sebastian May,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Betrieblicher Betreuer: Dr.-Ing. Sebastian Wilhelm (IBB Ingenieurbüro Baustatik Bautechnik)

Ziel dieser Diplomarbeit war die Erstellung eines Konzepts für den Wiederaufbau des Wolfshügelsturms in der Dresdner Heide unter Berücksichtigung der vorhandenen Bausubstanz. Zur Schaffung von aussagefähigen Grundlagen für die Erstellung des Konzeptes wurden Informa-

tionen über den Turm in Form von Bestandsuntersuchungen vor Ort und aus Planunterlagen gesammelt. Aus der Literatur konnten neben Angaben zur Geometrie des Aussichtsturms und seiner Bauteile Aussagen zur Herstellungstechnologie und den damals geltenden Lastannahmen sowie Berechnungsvorschriften entnommen werden. Für die statische Nachrechnung und die Simulation möglicher Bauabläufe wurden dreidimensionale Computermodelle erstellt. Das Ergebnis der statischen Nachrechnung der bestehenden Sockelkonstruktion ergab, dass trotz der über 100-jährigen Standzeit und der seit der Zerstörung des Turms 1945 stattgefundenen Vernachlässigung eine Sanierung der Konstruktion möglich sein sollte. Aufgrund der komplexen Geometrie der neu zu errichtenden Turmkonstruktion wird eine vollständige Fertigung dieser in Ortbetonbauweise als unwirtschaftlich erachtet. Bei derartigen Bauwerken kommen heutzutage typischerweise Fertigteile zum Einsatz. Nur große bzw. massive Bauteile wie die Decken der Aussichtsebenen und die Ringbalken am oberen Ende der Turmstützen sollten in Ortbeton ausgeführt werden.



Überreste des Wolfshügelsturms in der Dresdner Heide | Foto: Sebastian May

Für den Wiederaufbau wurden detailliertere Überlegungen mit dem Ziel angestellt, das Eigengewicht der Konstruktion zu verringern und auf diese Weise die Beanspruchung des bestehenden Sockels zu minimieren. Beispielsweise sei die Herstellung der Decke aus vorgespannten Carbonbetonplatten genannt. Die Verwendung von dickwandigen Hohlprofilen aus hochfestem Stahlbeton oder Carbon- bzw. Tex-

tilbeton für die Hauptturmstützen und gegebenenfalls für die Wendeltreppen könnte ebenfalls zur Minimierung der Belastung des Sockels bei Einhaltung der Funktionalität des Turms führen. Diese Diplomarbeit stellt einen ersten Schritt für die geplante Wiedererrichtung des Wolfshügelsturms dar. Die Frage nach der Möglichkeit des Wiederaufbaus kann nach heutigem Kenntnisstand unter Verwendung der vorhandenen Konstruktion positiv beantwortet werden.

### Julius Bastians

#### Nachrechnung und Digitalisierung der Biegebemessungstabellen nach Czerny (Diplomarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Daniel Karl,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

Ziel dieser Diplomarbeit war es, die Czerny-Tafeln aus den 1950er Jahren nachzurechnen und zu digitalisieren. Im Zuge dessen wurde ein Überblick über die Person Friedrich Czerny gegeben und die geschichtlichen Wegpunkte aufgezeigt, welche zur Erstellung der Tabellen führten. Im Zusammenhang der Nachrechnungen sollten eventuelle Differenzen zwischen analytischen und numerischen Berechnungen herausgefunden und aufgezeigt werden.

Für den analytischen Teilbereich wurden die ermittelten Gleichungen der verschiedenen Lagerungsfälle in der Programmierumgebung Python ausgewertet. Die mathematischen Gleichungen wurden eigenständig implementiert, so dass sie an jeder beliebigen Position der Platte ausgewertet werden können. Für den numerischen Teilbereich wurden das FEM Programm ConFem verwendet um für die unterschiedlichen Lagerungen und Seitenverhältnisse Vergleichsergebnisse zu erhalten.

Beim Vergleich zwischen den ursprünglichen Ergebnissen von Friedrich Czerny und den analytischen Auswertungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden, konnten mit Ausnahme eines Lagerungsfalles nur sehr geringe Durchschnittabweichungen von weniger als 1 % festgestellt werden.



Historische Tafeln von Czerny zur Schnittgrößenermittlung bei Platten | Foto: Stefan Gröschel

Beim Auswerten der FEM Resultate fiel auf, dass die Czerny-Tafeln eine Auswertung der maßgebenden Stellen der Platten teilweise nicht zulassen. Die Feldmomente wurden von Czerny nur für die Plattenmittellinien ausgewertet und berechnet. Bei unsymmetrischen Systemen, verlagern sich die maximalen Feldmomente aus den Bereichen der Mittellinien heraus.

Deshalb wurden im Rahmen dieser Arbeit die Tabellen neu aufgesetzt. Mit den Resultaten der numerischen Berechnungen mit ConFem wurden die maßgebenden Stellen der verschiedenen Rechteckplatten bestimmt und die Tafelwerte entsprechend neu aufgesetzt. Zudem wurden die Tafelwerte mit passenden dreidimensionalen Schnittkraftverläufen ergänzt, sodass die Verläufe nun eindeutig erkennbar sind und die Tafeln als händisches Bemessungswerkzeug eingesetzt werden können.

### Florian Füll

#### **Auswirkungen von Imperfektionen auf die Fugentragfähigkeit segmentierter Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen** (Diplomarbeit)

Betreuer: Dr.-Ing. Kerstin Speck,  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Co-Betreuung: Fabian Klein, M. Sc. (Leibniz Universität Hannover)

Die Windenergie nimmt zur Bewältigung der Energiewende eine maßgebende Rolle ein. Um leistungsstärkere Anlagen zu errichten und auch Schwachwindregionen oder Wald-



Windenergieanlagen im Osterzgebirge | Fotos: Kerstin Speck

gebiete zu erschließen, geht der Trend in den letzten Jahren zu immer größeren Nabenhöhen. Für die Errichtung derartig hoher Türme hat sich die hybride Bauweise etabliert. Dabei bestehen diese Türme im unteren Bereich in der Regel aus vorgespannten Stahlbetonsegmenten, die trocken übereinandergestapelt werden. Zwangsläufig kommt es daher zum Auftreten von Fugen im Bauwerk, die als Schwachpunkte der Konstruktion ausgemacht werden können. Zur Bestimmung der Fugentragfähigkeit existieren bereits einige Bemessungsansätze, die jedoch die tatsächliche Tragfähigkeit der Fuge teilweise erheblich überschätzen. Eine Ursache für diese deutlichen Abweichungen zwischen den Bemessungsansätzen und den experimentellen Untersuchungen wird in auf der Fugenfläche auftretenden Imperfektionen vermutet.





Verschiedene Geometrien von Carbonstäben | Foto: Sven Hofmann

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden die Auswirkungen von Imperfektionen auf die Fugentragfähigkeit segmentierter Turmkonstruktionen für Windenergieanlagen untersucht. Demnach konnte anhand einer Analyse von Messdaten der Firma Max Bögl festgestellt werden, dass trotz eines in die Segmentherstellung integrierten Schleifprozesses geringfügige Imperfektionen auf den Fugenflächen anzutreffen sind. Besonders konnten eine elliptische Querschnittsform sowie Unebenheiten auf der Fugenfläche registriert werden. Weiterhin konnte mit Hilfe von numerischen Untersuchungen nachgewiesen werden, dass diese Imperfektionen teilweise einen deutlichen Einfluss auf das Fugentragverhalten besitzen. Zusätzlich wurden erste Ansätze formuliert, wie diese Einflüsse in vorhandenen Bemessungsmodellen berücksichtigt werden können.

**Tobias Guder**

### **Untersuchungen zum Verbundverhalten von Carbonstäben** (Diplomarbeit)

Betreuer: Dipl.-Ing. Peter Betz,  
 Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
 Betrieblicher Betreuer: Dr.-Ing. Alexander Schumann (CarboCon GmbH)

Die Anwendung von stabförmiger Carbonbewehrung birgt angesichts ihrer hohen Dauerhaftigkeit erhebliches Einsparpotential gegenüber konventioneller Stab- oder Mattenstahlbewehrung. Voraussetzung für die sichere und wirtschaftli-

che Bemessung solcher Carbonstäbe ist jedoch die genaue Kenntnis ihrer Verbundeigenschaften und daraus abgeleitete, praktisch anwendbare Bemessungsvorschriften. Basierend auf den bekannten Zusammenhängen metallischer Bewehrung werden im Rahmen dieser Arbeit verbundbeeinflussende Parameter zusammengetragen und die Entstehungsgeschichte, der im Eurocode verankerten Bemessungsverbundspannung diskutiert. Darauf aufbauend erfolgt ein Literaturbericht zum Verbund von Faserverbundkunststoffstäben (FVK-Stäben). Nach diesen allgemeinen Betrachtungen werden am Institut für Massivbau durchgeführte Pull-out-Versuche ausgewertet. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Festlegung einer geeigneten Oberflächenprofilierung für FVK-Stäbe aus Carbonfasern. Vergleichend wird eine aus Beiträgen anderer Forscher zusammengetragene Datenbank herangezogen. Den Abschluss der Arbeit bilden Ausführungen zu geeigneten Festlegungskriterien einer Bemessungsverbundspannung für FVK-Stäbe. Neben der Darstellung bereits existierender, internationaler Normenvorschriften wird ein eigener Ansatz erarbeitet.

Im Fazit wird unter anderem die Schwierigkeit deutlich, welche die Festlegung von Bemessungswerten angesichts einer so vielfältigen Werkstoffgruppe wie FVK mit sich bringt. Selbst im Hinblick auf Oberflächenprofil und Material vermeintlich ähnliche Bewehrungsstäbe wiesen zwar ein qualitativ ähnliches Verbundverhalten auf, streuen im Hinblick auf Verbundfestigkeit und Steifigkeit jedoch stark.

Liste aller weiteren Diplomarbeiten

Student:innen	Betreuer:innen		Titel der Diplomarbeit
Göbel, Rebecca	Dipl.-Ing. Melchior Deutscher Dipl.-Ing. Andreas Stiller (iproplan Planungsgesellschaft, Dresden)	Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx	Variantevergleich zum Ersatzneubau einer zweifeldrigen Straßenbrücke
Schipka, Philipp	Dr.-Ing. Frank Schladitz	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Stabilität von Carbonbeton
Grundmann, Lenne	Dipl.-Ing. Maximilian May Dipl.-Ing. Dominik Schlüter	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx	Analytische und experimentelle Betrachtung der Verankerungswirkung von gekrümmten Textilbewehrungen im Carbonbeton
Kastner, Jan	Dipl.-Ing. Dominik Schlüter	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx	Entwurf einer funktionsintegrierten Holzfassade
Nymdavaa, Evlegbat	Dipl.-Ing. Sebastian May Dr.-Ing. Alexander Schumann (CarboCon GmbH, Dresden)	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Entwurf von Bauteilen aus Carbonbeton
Hoinka, Jennifer	Dipl.-Ing. Sebastian May	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Querkraftverstärkung von Bauteilen mit Carbonbeton
Zander, Patrick	Dipl.-Ing. (FH) Franz Bracklow Dr.-Ing. Marcus Hering	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Stahlbetonplatten unter Impakt – Maßstabeffekte
Kopec, Aleksander	Dipl.-Ing. Melchior Deutscher Dipl.-Ing. Gunnar Goepfert (Prof. Dr.-Ing. H. Bechert + Partner Ingenieurbüro für Bauwesen, Dresden)	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Untersuchung einer Spannbetonbrücke hinsichtlich Torsionssteifigkeit des Oberbaus
Muller, Jeane	Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Katrin Hanses M. A.	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Entwicklung von Kriterien für die Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken
Lange, Lucas	Dipl.-Ing. Karoline Holz Dr.-Ing. Alexander Schumann Dipl.-Ing. Elisabeth Schütze	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach	Bemessung von Carbonbetonbauteilen
Rubin, Marcel	Dipl.-Ing. Daniel Karl	Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe	Nachrechnung und Digitalisierung der Biegebemessungstafeln nach Czerny

**Margarita Kondrakhina**

**Development of a parameterized BIM model based on the structural analysis and design of Railway Bridges in the form of a half frame with variable bridge skew (Master's Thesis)**

Supervisors: Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Industrial supervisor: Dipl.-Ing. Markus Reypka  
(GRE – Gauff Rail Engineering GmbH & Co. KG, Dresden)

The focus of this research topic is the evaluation of the Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) as a material for prestressing tendons. High-strength steel and CFRP are compared in-depth within the analysis of a prestressed concrete beam with a double-T cross-section for use in multi-level parking. Carbon fibre reinforced polymer is a promising material because of its

beneficial properties, such as high strength and durability. However, its greatest disadvantage is brittleness and high cost. Although an economical solution is desirable, the unfavourable material partial safety factor for CFRP reinforcement leads to the low utilization level of the material. Such high safety factors prevent a brittle failure occurs, by guaranteeing small initial strains, as a way to allow greater strain capacity under the ultimate load limit state. Design according to foreign standards, such as ACI 440, CAN/CSA-S806 and CNR-DT 203, demonstrates the crucial role of the material partial safety factor for the required number of tendons. Allowable concrete stresses are also stricter in comparison with steel design. As a result of all normative applied limitation, prestress level of the CFRP is only around 30% of the strength, while for high-strength steel it is 80%. CFRP number of strands is on average 10% lower in comparison with steel reinforcement. Since CFRP strands are significantly more expen-



Comparative design of the double-T beams with span 6.0 m – 17.5 m | Graphic: Margarita Kondrakhina

sive in comparison with steel strands (around 20 times), this leads to uneconomical design results.

**Victoria Loss**

**Numerical investigation of the influence of the impactor and pulse shapers on the waveform in the “split-Hopkinson-bar” experiment (Master’s Thesis)**

Supervisors: Dipl.-Ing. Oliver Mosig, Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

The split-Hopkinson pressure bar (SHPB) is an efficient and commonly used experiment to determine the behaviour of a body under dynamic conditions. It characterizes the mechanical response at high strain rates, and it is based on the one one-dimensional wave theory. The SHPB experiment consists of a striker that, with the impulse of a gas gun, hits an incident bar. The wave created by this impact propagates along the incident bar to the specimen, usually made of concrete, and to the transmittance bar. This thesis focus on the investigation of the incident wave and the influence factors to change the wave shape. The pulse shaping technique aims to shape the incident wave and to avoid oscillations, where it gives more representative stress-strain data for a particular type of material, i.e. a higher rise time or a different geometry shape of the wave. In this thesis, this is achieved by adding a pulse shaper. Numerical experiments with the finite element software Ansys are carried out with striker and incident bar models, with different simulations with various striker

lengths and its their mechanical properties, and the addition of single and combined pulse shapers. More simulations are done, where the striker and incident bar are is made of the same and, afterwards, different materials in order to investigate the behaviour of the experiment and the influence of mechanical impedance. Finally, the pulse shapers are added to the head of the incident bar, and it works as a “filter” of the impact loading, producing stress equilibrium with the specimen and a constant strain rate condition. Pulse shapers made of steel, copper and polyethylene (the latter’s result shown in the graph below) were used, with different thicknesses and diameters, where distinct strain rates are obtained according to the propagation velocity for the three materials. Also, simulations are carried out with pulse shapers in Ansys and in the laboratory in order to compare the results of numerical and experimental results.



5ct coin as a pulse shaper at the input bar of the split-Hopkinson bar | Photo: Oliver Mosig

**List of all other Master’s Theses**

Student	Supervisors	Title of the Master’s Thesis
Muslli, Loren	Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx Dr.-Ing. Frank Jesse (Hentschke Bau GmbH, Bautzen)	Design and Detailing of Prefabricated Concrete Elements for Railway Bridges

# FAHRRADExKURSION ZU DEN DRESDNER ELBBRÜCKEN

Bauwerke zu analysieren, darüber zu diskutieren und von besonders imposanten Bauwerken und ihren Baumeistern zu lernen, stellt ein wichtiges didaktisches Element der Lehre im Modul „Brückenbau“ dar. Unter normalen Umständen wird daher vom Institut für Massivbau alljährlich eine einwöchige Brückenbauexkursion angeboten. Aber was war im vergangenen Jahr 2020 schon normal? Aufgrund der Situation musste leider auch die Exkursion weichen.

Onlinelehre stand dagegen auf der Tagesordnung. Den Umständen angepasst und unter Wahrung des Sicherheitsabstands, konnte dennoch ein erstes gemeinsames Kennenlernen arrangiert werden: Im Rahmen einer Fahrradexkursion brachte der Exkursionsleiter, Prof. Marx, den Studierenden die theoretischen Grundlagen des Brückenbaus anhand ausgewählter Dresdner Elbbrücken näher.

Zunächst wurden am Beispiel der 375 m langen Carolabrücke die unterschiedlichen Bestandteile einer Brücke aufgezeigt und die verschiedenen Klassifizierungsmöglichkeiten erläutert. Ab welcher lichten Weite spricht man überhaupt von einer Brücke? Auf dem Bauwerk konnten sich die Studierenden einen Überblick über die jüngst durchgeführte Brückenverbreiterung durch Kappen aus Carbon- und Basaltbeton verschaffen. Die Verbreiterung der Kappe von 3,60 m auf 4,25 m wäre aus statischen Gründen mit konventionellem Stahlbeton nicht möglich gewesen.

Danach ging es weiter zur geschichtsträchtigen Augustusbrücke. Die gegenwärtige Gewölbebrücke wurde im Jahr 1910 fertiggestellt und wird derzeit ebenfalls umfangreich saniert. Prof. Marx zeigte die Vorteile von Fahrbahnwannen bei Gewölbebrücken



auf und erläuterte, was sich die damaligen Ingenieure beim Einbau der Kämpfer- und Scheitelgelenke gedacht haben.

Zu guter Letzt endete die Fahrradexkursion am Fuße der Marienbrücken. An dieser Stelle verbinden zwei parallel verlaufende Bauwerke die Wilsdruffer Vorstadt mit der Inneren Neustadt. Mit dem Bau der Straßenbrücke wurde im Jahr 1852 abgeschlossen, was das Bauwerk nun zum ältesten der Dresdner Elbbrücken macht. Die Marienbrücke ist wie die zuvor besichtigte Augustusbrücke ein technisches Denkmal sowie Kulturdenkmal Dresdens.



Erläuterungen von Prof. Marx zur Marienbrücke (Eisenbahnbrücke) | Alle Fotos: Stefan Gröschel



# OTTO-MOHR- LABORATORIUM

*OTTO MOHR  
LABORATORY*





4-Punkt-Biegeversuch einer Stütze der Carbonbetonbrücke für das Deutsche Museum München | 4-point bending test of a prop of the carbon concrete bridge for the "Deutsches Museum München" | Photo: Stefan Gröschel

## TESTEN AUF HÖCHSTEM NIVEAU

### TESTING AT THE HIGHEST LEVEL

Das Otto-Mohr-Laboratorium ist eines der am modernsten und am besten ausgestatteten Versuchseinrichtungen im Bereich des Bauwesens in Sachsen. Bereits vorhandene sowie regelmäßig neu angeschaffte Maschinen und Gerätschaften sowie deren regelmäßige Prüfung und Kalibrierung garantieren einen hohen Standard bei der Prüfung und Versuchsdurchführung, und dies trotz der rasanten Entwicklung des Bausektors. Das Otto-Mohr-Laboratorium besteht als Versuchshalle des konstruktiven Ingenieurbaus seit mittlerweile 40 Jahren; seit 30 Jahren ist es unter dem heutigen Namen bekannt. Das Otto-Mohr-Laboratorium führt neben Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden – und hier vorrangig für das Institut für Massivbau – als technischer Dienstleister für Firmen und andere Fakultäten unserer Universität, aber auch für auswärtige Forschungseinrichtungen, Prüfungen im Bereich der zerstörungsfreien wie auch der zerstörenden Versuche durch. Darüber hinaus können wir auf langjährige Erfahrungen bei der Untersuchung von Bauwerken im Auftrag für öf-

*The Otto Mohr Laboratory (OML) is one of Saxony's most modern and best-equipped laboratories in the field of construction. The testing machines and testing equipment are audited and calibrated regularly. Also, a high standard of testing is guaranteed by a steady expansion of the portfolio. The laboratory, as an experimental hall of the constructive engineers at TU Dresden, was established more than 40 years ago. The name 'Otto Mohr Laboratory' exists since nearly 30 years. The OML offers services to all TU Dresden institutions, especially the Institute of Concrete Structures, as well as non-university institutions and companies. The services offered include e. g., destructive and non-destructive examination of building materials or construction components. We have many years of experience in the examination of constructions on behalf of public and private organizations, institutions and associations, companies, engineers and architects, public and private clients and construction industry.*



fentliche und private Bauherrn, Ingenieure und Architekten, Behörden, Verbände sowie für das Baugewerbe und die Bauindustrie zurückgreifen.

Neben üblichen Prüfungen, wie z. B. statische Druck- und Zugversuche an Kleinproben oder Tests an großen Bauteilen ist das Otto-Mohr-Laboratorium in der Lage, auch ungewöhnliche oder neuartige Prüfbereiche des Bauwesens abzudecken. An dieser Stelle seien beispielhaft die Untersuchung von Baustoffen oder Bauteilen unter Anprall- bzw. Impaktbeanspruchungen und die Schwingungsanalyse an Bauteilen, in Gebäuden oder bei Brückenbauwerken genannt.

Ein Spezialgebiet des Otto-Mohr-Laboratoriums sind gutachterliche Bewertungen anhand von In-situ-Versuchen, z. B. von Stützen, Decken und Wänden in Neu- und Bestandsbauten, von historischen Gebäuden sowie an Brückenbauwerken. Gerade die Untersuchungen an Brücken gewinnen derzeit immer mehr an Bedeutung, da im Zuge der Einführung der Nachrechnungsrichtlinie die Bewertung von Bestandsbrücken mit experimentellen Methoden oder auch die Bewertung hinsichtlich der Gefahr von Spannungsrisskorrosion eine immer größere Rolle spielen.

*The range of service includes common tests like static compression and tensile tests on small samples, tests on large-scale components and tests under special loading conditions like multi-axial, cyclic, long-term or impact loading.*

*As a special field, the Otto Mohr Laboratory carries out expert evaluations based on in-situ tests on, e. g., beams, ceilings, and walls at new, old or historical buildings and bridge structures. Here, we have special knowledge about existing bridges in the context of analysis and implementation of the German recalculation guideline using experimental methods or evaluation concerning the risk of stress corrosion cracking.*

Durchführen eines Bewehrungsscans bei einer Stahlbetonwand | Scanning of a reinforced concrete wall | Photo: Sabine Wellner



Reinigen des Stahls vor dem Applizieren eines Dehnmessstreifens | Cleaning the steel before applying a strain gauge | Photo: Sabine Wellner



# LEISTUNGEN

## SERVICES

Unser Leistungsangebot umfasst sowohl die Durchführung von standardisierten Materialprüfungen als auch die Neuentwicklung von Versuchsaufbauten für spezielle Prüfaufgaben, die nicht mit genormten Tests gelöst werden können. Wir besitzen langjährige Erfahrungen auf den Gebieten der zerstörenden und zerstörungsfreien Materialprüfungen. Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt liegt bei Planung, Durchführung und Auswertung von experimentellen Tragfähigkeitsanalysen. Weiterhin verfügen unsere Mitarbeiter über umfangreiche Erfahrungen mit Textilbeton. Das betrifft sowohl die Herstellung neuer Bauteile als auch die Ausführung von Verstärkungsarbeiten. Nachfolgend wurde ein Auszug aus unserem Leistungsangebot zusammengestellt.

*Our range of services includes the execution of standardized material tests as well as the development of new test setups for special test tasks, which cannot be solved with standardized tests. We have many years of experience in the fields of destructive and non-destructive material testing. A further focus is on planning, carrying out and evaluating experimental load bearing capacity analyses. Furthermore, our employees have extensive experience with textile reinforced concrete. This applies to the production of new components as well as the execution of strengthening work. A short description of the services offered is compiled below.*

### Materialprüfungen an Prüfkörpern unterschiedlicher Geometrie und Beschaffenheit *Material tests on test specimens of different geometry and composition*

#### **ZERSTÖRUNGSFREIE MATERIALPRÜFUNG** (Auswahl)

##### *NON-DESTRUCTIVE MATERIAL TESTING (selection)*

- Kraft-, Verschiebungs- und Dehnungsmessung inkl. Photogrammetrie | *Measurement of forces, displacements, and strains including photogrammetry*
- Kriech- und Schwindversuche | *Creep and shrinkage tests*
- Dauerstandversuche | *Long-time tests*
- Bewehrungssuche | *Locating of steel reinforcement*
- (Video-)Endoskopie | *(Video) Endoscopy*

#### **ZERSTÖRENDE MATERIALPRÜFUNG** (Auswahl)

##### *DESTRUCTIVE MATERIAL TESTING (selection)*

- Tests bei statischer und dynamischer Belastung | *Static and dynamic load tests*
- Ein- und mehraxiale Druck- und Zugfestigkeit | *Uni- and multiaxial compression and tensile strength tests*
- Elastizitätsmodul und Querdehnungszahl | *Determination of modulus of elasticity and Poisson's ratio*
- Bruchmechanische Kennwerte | *Properties for fracture mechanics*
- Verbundversuche | *Bond tests*

## Dienstleistungen für die Industrie *Service for industrial partners*

- Neuentwicklung von Versuchsaufbauten zur Prüfung von Baustoffen und Bauprodukten | *Development of special test set-ups for the testing of building materials and construction products*
- Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, Technologietransfer | *Execution of research and development work, technology transfer*

## In situ Versuche an Neu- und Bestandsbauten *In situ tests on new or existing buildings*

- Planung, Durchführung und gutachterliche Bewertung von experimentellen Tragfähigkeitsanalysen an Neu- und Bestandsbauten | *Planning, execution and expert assessment of experimental load bearing capacity tests on new and existing buildings*
- Bauwerks- und Bauteilprüfungen bei Schadensfällen oder geplanten Umnutzungen | *Structural and component tests in case of damage or planned reuse*



Auch in diesem Frühjahr waren zwei Schüler der siebten Klasse des Martin-Andersen-Nexö Gymnasiums (MANOS) im Rahmen der alljährlich stattfindenden wissenschaftlichen Projektwoche zu Gast am Institut für Massivbau. Wissbegierig und voller Motivation widmeten sich die Schüler dem Thema „Vom Stahl- zum Carbonbeton“, bei dem das Biegen und Brechen nicht nur sprichwörtlich eine zentrale Rolle einnehmen sollte. | *This spring, two seventh grade students from the Martin-Andersen-Nexö Gymnasium (MANOS) were once again guests at the Institute for Concrete Structures as part of the annual scientific project week. Inquisitive and full of motivation, the pupils devoted themselves to the topic “From reinforced to carbon reinforced concrete”, in which bending and breaking were not only to play a proverbial central role.* | Photos: Franz Bracklow

# AUSSTATTUNG

## EQUIPMENT

Unser Labor verfügt über eine umfangreiche Ausstattung für die Herstellung von Normalbeton und von verschiedensten Sonderbetonen mit und ohne Bewehrung. Eine Holzwerkstatt und eine Metallwerkstatt erlauben zudem die Bearbeitung anderer Werkstoffe.

*Our laboratory has extensive equipment for the production of normal strength concrete and various special concrete types with and without reinforcement. Also, a wood workshop and a metal workshop allow us to work with other materials.*

Aktuell stehen uns ein 126 m<sup>2</sup> großes Aufspannfeld, eine große Anzahl von Prüfportalen und Prüfzylindern unterschiedlichster Geometrie und Leistungsfähigkeit zwischen 10 kN und 10 MN und verschiedene Spezial-Prüfmaschinen zur Verfügung. Für Bauwerksprüfungen ist eine große Anzahl von Belastungsrahmen vorhanden. Wir verfügen über eine umfangreiche Mess- und Speichertechnik zur Datenerfassung, verschiedenste Messgeräte und Messmittel einschließlich Photogrammetrie und Hochgeschwindigkeitskameras.

*Currently, a 126 m<sup>2</sup> clamping field, a large number of load frames and hydraulic actuators, with different geometry and capacities ranging from 10 kN up to 10 MN are available together with various special testing machines. A large number of load frames are available for testing building elements. We have a comprehensive selection of measuring devices as well as devices for data acquisition and storage, a wide range of measuring equipment including photogrammetry and high-speed cameras.*



Eine vollständige Liste finden Sie unter <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/labor/>

*You can find a complete list of the equipment on <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/labor/>*

### Probenherstellung

- Stahl-Standardformen und -schalungen für die üblichen Standardtests für Betone und Textilbeton | verschiedene Spezialformen und Sonderanfertigungen
- Mischer für Betone und Zemente, Fassungsvermögen 12 – 350 Liter | Geräte und Apparaturen zur Verdichtung inkl. Nadelprüfgerät und Porenvolumen-Messgerät | Klimakammern und Klimaschränke
- Ausrüstung zur Betonbearbeitung wie Betonsägen, Kernbohrgeräte, Bohrhämmer und Doppel-Planschleifmaschine

### Sample production

- *Standard steel molds and formwork for the standard concrete and textile reinforced concrete tests | various specially shaped and custom-made molds and products*
- *Concrete and cement mixers, with capacities of 12 to 350 liters | equipment for concrete consolidation and related measurements, including needle testing and pore volume measuring device | climatic chambers and cabinets*
- *Concrete cutting equipment such as concrete saws, core drilling machines, rotary hammers and double-surface grinding machine*

### Aufspannfelder und Portale

- 2 Aufspannfelder mit 1,5-m-Raster und bis zu 1 MN Kapazität je Prüfportal
- Portale für die Prüfung von Einzelelementen bis zu 10 t Gewicht und 5 m Höhe möglich | mehrere Steuerpulte

### Strong-floor, testing frames, attachments

- *Two strong floor testing areas with anchor points on a 1.5 m grid | up to 1 MN capacity per testing frame*
- *Frames for the testing of individual elements with weights up to 10 t and heights up to 5 m | various control stations*

### Prüfmaschinen und -vorrichtungen für statische Standardtests

- Diverse Prüfmaschinen für statische Druck-, Zug- und Biegeversuche | maximale Lasten: 6 MN Druck, 1 MN Zug | variable Prüfraumhöhen bis max. 4,0 m lichte Einbauhöhe

### Prüfmaschinen für statische und dynamische Zug-, Druck- und Biegeprüfungen

- Prüfzylinderanlage mit 1000 kN maximale Lasthöhe
- Pulsatoranlage mit bis zu 6 Hz Lastwechselfrequenz
- Hydropulsprüfmaschine mit zwei Belastungsrahmen; Rahmen 1: statische Maximallast: 1000 kN Druck bzw. Zug; Rahmen 2: statische Maximallast: 250 kN Druck bzw. Zug; dynamische Maximallast: jeweils 80 % vom statischen Wert
- Z 100: statische Maximallast: 100 kN Druck bzw. Zug, dynamische Maximallast: 80 kN Druck bzw. Zug
- ZD 2500: statische Maximallast: 2500 kN Druck bzw. Zug, dynamische Maximallast: 500 kN Druck bzw. Zug

### Testing machines and devices for standard static tests

- *Various testing machines for compression, tensile and bending tests | maximum loads: 6 MN pressure, 1 MN tension | variable clearance heights up to 4 m*

### Testing machines for standard static and dynamic tension, compression, and bending tests

- *Servo-hydraulic test bench with a maximum load of 1000 kN*
- *Test bench for cyclic loading with up to 6 Hz load frequency*
- *Hydropuls testing machine with two load frames; frame 1: maximum static load: 1000 kN compression or tension; frame 2: maximum static load: 250 kN compression or tension; maximum dynamic load: 80% of the static value*
- *Z 100: static load (maximum): 100 kN compression or tension, dynamic load (maximum): 80 kN compression or tension*
- *ZD 2500: static load (maximum): 2500 kN compression or tension, dynamic load (maximum): 500 kN compression or tension*



Am 20. August 2020 begrüßten wir ein Drehteam der Pro7-Sendereihe „Galileo“ im OML, das sich vor Ort den Herstellungsprozess von Carbonbeton ansah. | On 20 August 2020, we welcomed a film crew from the Pro7 TV series „Galileo“ to the OML; on site, they viewed the manufacturing process of carbon reinforced concrete. | Photos: Sabine Wellner

### Spezielle Prüfmaschinen

- Triaxial-Prüfmaschine: Lasten bis 500 kN Zug oder 5000 kN Druck je Achse | Lasteinleitung mit starren Platten oder Belastungsbürsten unterschiedlicher Geometrie | Prüfkörpergröße, Standard: 10er Würfel, max. 30er Würfel
- Biaxial-Prüfmaschine: max. 90 kN Zug je Achse
- Triaxialzelle: vertikal max. 125 kN Druck, radial max. 5 MPa | zylindrische Proben mit  $\varnothing = 2,54$  cm und  $h = 5,08$  cm | Temperaturen bis 150 °C möglich
- Horizontaler 20-MN-Belastungsrahmen: Maximallast: derzeit 10 MN (auf 20 MN aufrüstbar) | 5,0 m maximale Prüflänge (freie Länge) bei Druck- und bis zu 7,50 m bei Zugversuchen
- 10-MN-Bauteilprüfmaschine: Prüfkörpergröße bis  $B \times L \times H = 2,5$  m  $\times$  15,0 m  $\times$  3,7 m | derzeit 60 t maximales Probengewicht (auf 120 t aufrüstbar)
- Split-Hopkinson-Bar für hochdynamische Belastungsversuche: maximale Belastungsgeschwindigkeit: 35 m/s | zylindrische Prüfkörper mit  $\varnothing = 50$  mm und  $l_{\max} = 150$  mm bei Druck- und  $l_{\max} \geq 200$  mm bei Spallationsversuchen | kinetische Energie des Impaktors: bis zu 1,8 kJ
- Zweiaxialer Split-Hopkinson-Bar für hochdynamische Belastungsversuche: maximale Belastungsgeschwindigkeit: 35 m/s | Prüfkörper: 60 mm  $\times$  60 mm  $\times$  60 mm | kinetische Energie des Impaktors: je Achse bis zu 1,8 kJ
- Kleiner Fallgewichtsversuchsstand: 5,0 m maximale Fallhöhe | 49,1 kg maximales Fallgewicht
- Großer Fallversuchsstand (Fallturm) mit Fallschlitten- und Beschleunigungssystem:  $H_{\max} = 11,0$  m; Fallschlittensystem: maximales Fallgewicht 2500 kg, maximale Impact-Geschwindigkeit bis 15 m/s | Beschleunigungssystem: maximales Fallgewicht 100 kg, maximale Impact-Geschwindigkeit von 6 m/s bis 250 m/s
- Versuchsstände für den Test von Platten und Fassaden (bis 2,4 m  $\times$  2,4 m) | Kriechstände | Ausstattung für Tests mit variabler Temperaturbeanspruchung

### Special testing machines

- *Triaxial testing machine: loads up to 500 kN in tension or 5000 kN in compression per axle | loads can be introduced using rigid plates or load-bearing brushes of different geometries | test specimen: cubes with 10 cm edge length (standard), max. 30 cm cubes*
- *Biaxial testing machine: max. 90 kN tension per axle*
- *Triaxial cell: 125 kN maximum vertical compression and up to 5 MPa radial pressure | specimen: cylindrical samples with a diameter of 2.54 cm and a height of 5.08 cm | heating up to 150 °C possible*
- *Horizontal 20 MN load frame: 10 MN current maximum load (can be upgraded to 20 MN) | maximum (free) test length: 5 m for compression tests and up to 7.50 m for tensile tests*
- *10 MN testing machine: specimen sizes up to 2.5 m (width)  $\times$  15 m (length)  $\times$  3.7 m (height) | currently maximum weight of specimens: 60 t (can be upgraded to 120 t)*
- *Split-Hopkinson bar for high-dynamic load tests: maximum load rate of 35 m/s | for testing cylindrical test specimens with  $\varnothing = 50$  mm and  $\leq 150$  mm length for compression tests resp.  $\leq 200$  mm length for spallation tests | kinetic energy of the impactor can reach up to 1.8 kJ*
- *Biaxial split-Hopkinson bar for high-dynamic load tests: maximum load rate: 35 m/s | test specimen: 60 mm  $\times$  60 mm  $\times$  60 mm | kinetic energy of the impactor: up to 1.8 kJ per axle*
- *Small drop weight test stand: 5.0 m maximum fall height | 49.1 kg maximum drop weight*
- *Large drop test rig (drop tower): 11 m maximum drop height | free falling impactors: maximum drop weight 2500 kg, max. velocity: 15 m/s | with acceleration system: maximum drop weight 100 kg and velocity from 6 m/s up to 250 m/s*
- *Test rigs for testing panels and facades (up to 2.4 m  $\times$  2.4 m) | creep test bed | equipment for tests with variable temperatures is available*

### **Ausrüstung für Bauwerksprüfungen**

- Verschiedene Belastungsrahmen für In-situ-Prüfungen an Brücken, Decken, Stützen, Masten, Geländern etc.
- Ultraschallmessgerät | Profometer 3 (Bewehrungsart) | (Video-)Endoskopie Rückprallhammer | Ausrüstung zur Entnahme von Bohrkernen

### **Messtechnik**

- Messdatenerfassung mittels verschiedener Messverstärker wie MGC, MGCplus, Quantum MX840 und Spider 8 | Vielstellenmessgerät: UPM100 | Transientenrekorder für Messungen bei Hochgeschwindigkeitsversuchen | Geräte zur Fernüberwachung von Messungen | AOS-Messgerät für Faser-Bragg-Gitter-Sensoren
- Besondere Kameras: Hochgeschwindigkeitskameras Photron Fastcam SA5
- Nahbereichsphotogrammetrie: AICON-3D-System mit vier Kameras und Zubehör | GOM ARAMIS 3D- und 2D-System mit Kameras von 5 MP und 12 MP, auch mit Hochgeschwindigkeitskameras und externen Bildserien nutzbar
- Verschiedenste Kraftmessdosen bis 10000 kN
- Übliche Messmittel | faseroptische Sensoren | Beschleunigungsaufnehmer, dynamische Kraftsensoren, Extensometer | Thermoelemente und Feuchtesensoren (Luftfeuchte) und Anemometer | Seilzugensensoren | Laservibrometer für berührungslose Weg- und Geschwindigkeitsmessung über große Distanzen | Datenlogger
- Geräte für Vermessungsarbeiten inkl. Neigungssensor und Inclinometer | mechanische Längenmessgeräte etc.

### **Sonstige Ausrüstung**

- Brückenkranen in den Laborgebäuden | Gabelstapler (Tragkraft: 3,5 t) | Schwerlastwagen bis 60 t Tragkraft | Geräte zum Anheben und Verschieben von bautechnisch relevanten Lasten bis 120 t durch Einsatz hydraulischer Hebeteknik
- Schweißerausrüstung (elektro und autogen) | mobile Druckölaggregate | Sandstrahlaggregat

### **Equipment for in-situ tests of structures**

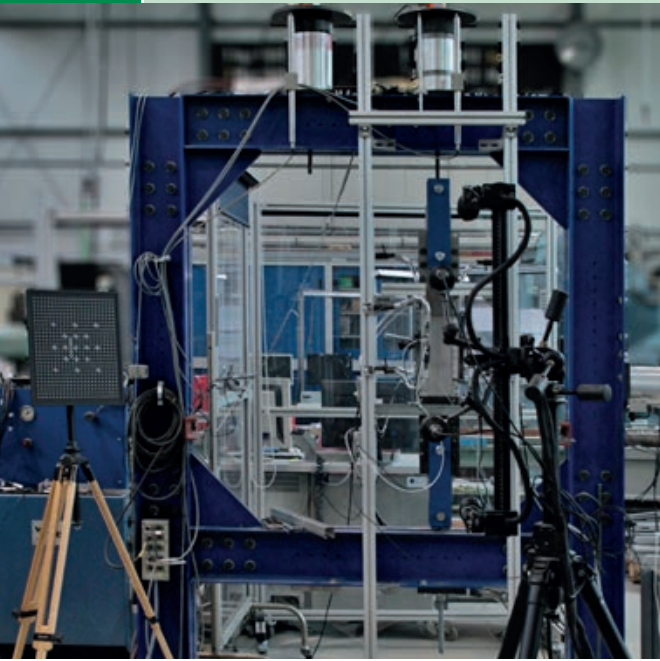
- *Various load frames for in-situ tests on bridges, ceilings, columns, masts, railings, etc.*
- *Ultrasonic measuring device; reinforcement detector (Profometer 3) | (video) endoscopy | rebound hammer | equipment for drilling concrete cores*

### **Measuring technique**

- *data collecting using various measuring amplifiers such as MGC, MGCplus, Quantum MX840 and Spider 8 | UPM100 | Transient recorder for measurements in high-speed tests | devices for remote monitoring of measurements | AOS measuring device for fiber Bragg grating sensors*
- *Special cameras: high-speed cameras Photron Fastcam SA5*
- *Close-range photogrammetry: AICON 3D system with four cameras and accessories | GOM ARAMIS 3D & 2D with 5 MP and 12 MP cameras, also usable with highspeed cameras and external picture series*
- *Various force measuring devices up to 10000 kN*
- *Standard measuring instruments | fiber Bragg gratings | accelerometers, dynamic force sensors, extensometers | thermocouples and humidity sensors and anemometers | tension cable sensors | laser vibrometer | data logger*
- *Devices for surveying work including inclination sensor and inclinometer | mechanical length measuring devices, etc.*

### **Other equipment**

- *Lift cranes within the laboratory facilities | forklift with a lifting capacity of 3.5 t | strong-wagons with load carrying capacity up to 60 t | hydraulic lifting technology devices for lifting and moving elements with typical construction weights of up to 120 t*
- *Welding equipment (electrical and auto-genous) | mobile oil pressure aggregates | sandblasting unit*



Zugversuch im Biaxrahmen mit Heizstand (links), Flachprobe im offenen Heizstand (Zugversuch, rechts) | Tensile test in biax frame with heating stand (left), flat sample in open heating stand (tensile test, right) | Photos: Frank Naumann

## IM FOKUS: BIAXIAL-PRÜFMASCHINE

### IN THE FOCUS: BIAXIAL TESTING MACHINE

Die Biaxial-Prüfmaschine wird zur Durchführung ein- und zweiachsender statischer Zugversuche an Flachproben, wie z. B. Carbonbetonzugproben oder Kreuzproben, genutzt. Damit ist es möglich auch zweiachsige Verformungszustände zu simulieren.

Die „Biax“ besteht aus einem Belastungsrahmen mit vier Hohlkolbenzylindern, die in der jeweiligen Achse frei positionierbar sind. So wird die voneinander unabhängige Belastung in zwei zueinander stehenden orthogonalen Achsen ermöglicht. Die Größe der einfach wirkenden Prüfzylinder kann je nach Anforderung an die erforderliche Prüfkraft um bis zu 100 kN angepasst werden. Es sind verschieden große Zylinder verfügbar, welche über eine Kraft- und Wegregelung angesteuert werden. Ein Hydraulikaggregat versorgt dabei die Zylinder über Servoventile mit Öl. Die Proben können sowohl in einer hydraulischen (1-achsige Prüfung) als auch in einer mechanischen Klemmvorrichtung (1- und 2-achsige Prüfung) mit jeweils frei einstellbarem Klemmdruck fixiert werden.

*The biaxial testing machine is used to perform uniaxial and biaxial static tensile tests on flat specimens, such as carbon concrete tensile specimens or crossed specimens. It is possible to simulate biaxial deformation states.*

*The „Biax“ consists of a load frame with four hydraulic cylinders, which can be placed freely in the respective axis. This enables independent loading in two orthogonal axes. The size of the single-acting cylinders can be adapted to the required test load of up to 100 kN, depending on requirements. Different sizes of cylinders are available which are controlled by a load and stroke monitoring. A hydraulic unit supplies the cylinders with oil via servo valves. The specimens can be fixed in a hydraulic (1-axis testing) as well as in a mechanical clamping device (1- and 2-axis testing) with freely adjustable clamping pressure.*

*Due to the open test frame the specimen can be inspected from all sides during the test. Additional measuring equipment can also be added without space problems. The Otto Mohr Laboratory also*



Durch den offenen Prüfrahmen kann der Prüfkörper während des Versuchs allseitig beobachtet werden. Auch zusätzliche Messmittel können ohne Platzprobleme ergänzt werden. Im OML besteht zudem die Möglichkeit der Messung mit 3D-Kameras und die Auswertung mit der Bildkorrelationssoftware ARAMIS. Die Sensoren erfassen dabei berührungslos und materialunabhängig Koordinaten, Verschiebungen und Oberflächendehnungen. Somit kann z. B. die Entstehung und Entwicklung von Rissbildern detailliert dokumentiert werden.

Neben diversen Möglichkeiten zur Nutzung von Messtechnik stehen an der „Biax“ auch zwei Heizstände inkl. Abluftanlage zur Verfügung. Diese können, je nach Anforderungen an die Prüfung, offen oder geschlossen in den Prüfstand integriert werden. Bei einer geschlossenen Anwendung ist die Auswahl der Messtechnik, aufgrund der Hitzebelastung, begrenzt. Die Prüfkörper können auf Temperaturen bis zu 400 °C erwärmt werden. Diese Versuche werden v. a. durchgeführt, wenn das Materialverhalten bei Brandbeanspruchung untersucht werden soll. So wurden beispielsweise Zugversuche an Carbonbetonproben unter einer Hochtemperaturbeanspruchung durchgeführt.

Durch den universellen Prüfrahmen der Biax sind Prüfungen an weiteren Materialien mit vielseitigen Messmöglichkeiten durchführbar.

*offers the possibility of measuring with 3D cameras and evaluation with the image correlation software ARAMIS. The sensors record coordinates, displacements and replacements of the surface without contact and independent of material. Thus, for example, the formation and development of cracks can be documented in detail.*

*In addition to various possibilities for the use of measuring technology, two heating stations including an exhaust air system are also available at the “Biax”. These can be integrated into the test stand either open or closed, depending on the test requirements. In case of a closed application, however, the choice of measurement technology is limited due to the heat load. The test specimen can be heated up to temperatures of up to 400 °C. These tests are mainly carried out if the material behaviour under fire load is to be investigated. For example, tensile tests were carried out on carbon concrete specimens under high temperature stress.*

*Due to the universal test frame of the Biax testing machine, tests can be carried out on other materials with versatile measuring possibilities.*

## Technische Informationen | *Technical information*

Maximale statische Prüfkraft   <i>Maximum static test load</i>	100 kN
--	--------

Anzahl regelbarer Zylinder   <i>Number of adjustable cylinders</i>	4
--	---

Prüfraummaße ohne Einspannung / Klemmung   <i>Test chamber dimensions without clamping</i>	
--	--

Innenbreite   <i>Interior width</i>	1300 mm
-------------------------------------	---------

Innenhöhe   <i>Interior height</i>	1300 mm
------------------------------------	---------

Nenndruck Hydraulik   <i>Nominal pressure hydraulics</i>	250 bar
--	---------

Zubehör | *Accessoires*

- Diverse Hohlkolbenzylinder mit unterschiedlichen Hubwegen | *Various hollow piston cylinders with different stroke paths*
- Verschiedene Klemmvorrichtungen für Flachproben | *Various clamping devices for flat samples*
- Zwei Heizstände mit Temperaturregelung und Absaugmöglichkeit | *Two heating stations with temperature control and exhaust system*
- Photogrammetrie mit 12-MP-Kameras und GOM-ARAMIS-Software | *Photogrammetry with 12 MP-cameras and GOM-ARAMIS software*



Belastungsfahrzeuge auf der Brücke bei Probelastung | Loading vehicles on the bridge during the load test | Photo: Sabine Wellner

## HÄRTETEST: DDR-BALKENREIHENTRAGWERKE HEAVY LOAD TEST FOR GDR BRIDGES

Im Rahmen eines Brückenrückbaus über ehemalige Anlagen der DB im Zuge der BAB A19, zwischen den Anschlussstellen Wittstock/Dosse und Leizen, ergab sich die Möglichkeit umfangreiche Untersuchungen an einem Brückenüberbau, der als sogenanntes Balkenreihentragwerk in DDR-Zeiten hergestellt wurde, durchzuführen. Diese Bauart ist als Fertigteilkonstruktion in Verbindung mit einer Ortbetonergänzung in dieser Form ausschließlich in den neuen Bundesländern zu finden und ist in deren Bestand noch weit verbreitet. Die Tatsache, dass bei den Balkenreihentragwerken spannungsrissskorrosionsgefährdeter Spannstahl aus Hennigsdorfer Produktion verbaut wurde, beeinträchtigt die Standsicherheit.

Um weiterführende Kenntnisse zum Tragverhalten der Überbauten aus Balkenreihentragwerken zu erhalten, wurden experimentelle Untersuchungen im Labor sowie in-situ durchgeführt, die letztlich zur Validierung von ingenieurmäßigen Rechenmodellen herangezogen werden sollen. Im Zuge des Abrisses des Teilbauwerks I wurden die Einzelträger zur Untersuchung ins

*During bridge demolition works over former facilities of the DB along the BAB A19, between the junctions Wittstock/Dosse and Leizen, the possibility of carrying out some extensive investigations on a bridge structure, which was built as so-called beam-row supporting structure in GDR times, were given. This type of prefabricated part construction in conjunction with a local concrete supplement is found in this form exclusively in the newly-formed German states and is still widely used in their stock. The fact that tension-cracking corrosion-threatened tensioning steel made of Hennigsdorfer production was installed in the beam-row carriers adversely affects the stability. In order to obtain further knowledge on the load-bearing behavior of the beam-row structures, experimental investigations were carried out in the laboratory and in-situ, which should be used for validation of engineering computational models.*

*After the demolition of the substructure I, several beams were brought to the Otto Mohr Laboratory for further tests. There, in preparation for the in situ tests at the substructure II, load tests were*

Otto-Mohr-Laboratorium gebracht. Dort wurden, in Vorbereitung der in-situ-Versuche am Teilbauwerk II, Belastungsprüfungen zur Ermittlung der Gebrauchs- und Bruchlast durchgeführt. Zudem wurde die vorhandene Vorspannung in den Spanndrähten anhand von Rückdehnungsmessungen ermittelt. Die in situ-Versuche am Teilbauwerk II erfolgten sowohl unter Gebrauchslastniveau (Lastaufbringung mittels Belastungsfahrzeugen – hier Mobilkrane) als auch über das Gebrauchslastniveau hinaus mittels Belastungsgeschirr.

Im Hinblick auf das Tragverhalten im Falle einer Schädigung durch Spannungsrisskorrosion, erfolgten die Untersuchungen im ungeschädigten als auch im geschädigten Zustand. Die Schädigung wurde durch das gezielte Durchtrennen von Spanndrähten realisiert. Da das Tragverhalten vor und nach der Schädigung der Spannglieder messtechnisch erfasst wurde, sind Aussagen zum Einfluss der Schädigung bzw. des Ankündungsverhaltens möglich. Die ermittelten Verformungen waren in allen Teilversuchen vergleichsweise klein. Die Auswirkungen der Schädigung einzelner Träger waren nur in einem geringen Maße feststellbar, sodass ein gutes Umlagemögen des Systems Balkenreihe unterstellt werden kann. Entsprechende Empfehlungen zur Berücksichtigung dieser Tragreserven sind Gegenstand der laufenden Auswertung.

Die Untersuchungen wurden durch die BAST bzw. Bundesmittel im Rahmen von ARS 11/1999 „Untersuchungen an abzubrechenden Brücken“ unterstützt.



Belastungsversuch an einem Einzelträger im Otto-Mohr-Laboratorium | *Load test on a single beam in the Otto-Mohr-Laboratory* | Photo: Oliver Steinbock

*carried out to determine the usage and breaking load. In addition, the existing prestressing in the tension wires was determined. The in-situ tests on partial structure II were carried out under service load level (load application via loading vehicles – here mobile cranes) and beyond the service load level via loading gear. With regard to the load-bearing behavior in the event of damage due to stress crack corrosion, the tests were carried out in undamaged as well as in damaged state. The damage was realized by cutting the tension wires.*

*The load-bearing behavior were measured before and after damaging the tension wires, statements on the influence of the damage or the announcement behavior are possible. The deformations determined were comparatively small in all partial experiments. The effects of damage to individual beams could only be determined to a small extent, so that a good repositioning ability of the system beam row can be assumed. Corresponding recommendations for the consideration of these load-bearing reserves are the subject of ongoing evaluation.*

*The investigations were supported by the BAST resp. federal funds within the frame of ARS 11/1999 "Investigations on bridges to be demolished".*

► **Titel | Title**

Experimentelle Untersuchungen zur Beurteilung des Tragverhaltens an Balkenreihentragwerken

*Experimental investigations of load bearing behaviour of beam row supporting structures*

► **Förderer | Funding**

Landesamt für Straßenbau und Verkehr Mecklenburg-Vorpommern

► **Zeitraum | Period**

01.2020 – 12.2020

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dr.-Ing. Torsten Hampel, Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner

► **Projektpartner | Project partner**

Stump-Franki Spezialtiefbau GmbH, Berlin



Rahmenkonstruktion zur Lasteinleitung | Frame construction for load transfer | Photo: Sabine Wellner

## DDR-FERTIGTEILDECKEN IM TEST

### TEST LOADING OF GDR PREFABRICATED CEILINGS

In Vorbereitung des anstehenden Umbaus eines DDR-Fabrikgebäudes aus den 1960er Jahren in ein modernes Archiv- und Bürogebäude sollte die Tragfähigkeit der Stahlbetonfertigteildecken experimentell nachgewiesen werden. Ein rechnerischer Nachweis konnte aufgrund fehlender Bauunterlagen nicht geführt werden. Die Kombination von großen Deckenflächen ohne tragende Zwischenwandkonstruktionen, die als Gegenlast zur aufzubringenden Last aktiviert werden könnten, sowie hohe nachzuweisende Ziellasten von ca. 22 kN/m<sup>2</sup> erforderten dabei eine aufwändige Verankerungskonstruktion.

Um einen Kräftekreislauf zu erzeugen, wurden die auf die Geschossdecke einzutragenden Lasten über Zugstangen und Stahltraversen in eine entsprechend dimensionierte Widerlagerkonstruktion im Sockelgeschoss eingeleitet. Die beiden Widerlager wurden an den massiven Zwischen- und Außenstützen befestigt, um sie als Gegenlast nutzen zu kön-

*In preparation for the upcoming reconstruction of a GDR factory building from the 1960s into a modern archive and office building, the load-bearing capacity of the precast reinforced concrete ceilings was to be verified experimentally. A mathematical proof could not be provided due to missing construction documents. The combination of large ceiling areas and rooms without load-bearing partition wall constructions, which could be activated as counter load to the load to be applied, as well as high target loads of approx. 22 kN/m<sup>2</sup>, which had to be proven, required a complex anchoring construction.*

*In order to create a circulation of forces, the loads to be applied to the floor slab were transferred via tension rods and steel trusses to a correspondingly large dimensioned abutment construction on the base floor. The two abutments were attached to the massive columns (intermediate and outer support) in order to be able to use their ballast as counter load to the*

nen. Über Traversen und Holzbretter wurde die Last gleichmäßig auf einen definierten Deckenstreifen aufgebracht. Mit mehreren induktiven Wegaufnehmern wurde die Verformung an verschiedenen Stellen unter Belastung in Echtzeit verfolgt. Kraftmessdosen an den Hydraulikzylindern gaben Auskunft über die Höhe der Belastung. Durch eine schrittweise gesteigerte Last konnte das Verformungsverhalten der Decke beobachtet werden. Die gemessenen Verformungen lagen dabei im zulässigen Bereich. Schäden, wie beispielsweise breite Risse, konnten nicht festgestellt werden. Der experimentelle Nachweis der Funktionsfähigkeit der Deckenkonstruktion konnte somit erfolgreich erbracht werden.

Zusätzlich stand auch die Bewertung der bestehenden Bausubstanz durch eine zerstörungsfreie Aufnahme des Bewehrungsgehalts von Unterzügen, Stützen sowie weiteren Deckenkonstruktionen im Fokus. Mittels Bewehrungsscans wurde die Bewehrungsanordnung, deren Durchmesser und Betondeckung bestimmt. Des Weiteren wurden im Bereich der Stützen Bohrkern zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit sowie Stahlproben zur Ermittlung der Stahlzugfestigkeit entnommen. Diese Proben wurden anschließend im OML geprüft.

Die erfolgreiche Prüfung der Bestandsdecke sowie die Bestimmung der Materialkennwerte waren ein wichtiger Schritt für die Planung und derzeit stattfindende Durchführung des Umbaus.

*load to be applied. The load was applied evenly to a defined ceilings surface via cross beams and wooden boards. Using several inductive displacement transducers, the deformation at various points under load was monitored in real time. Load cells on the hydraulic cylinders provided information on the level of the load. The deformation behavior of the ceiling could be observed by a stepwise increasing load. The measured deformations were within the permissible range. Damage, such as wide cracks, could not be detected. The experimental proof of the functionality of the ceiling construction could thus be successfully provided.*

*In addition to the experimental load-bearing capacity analysis of the ceiling, the focus was also on the evaluation of the existing building structure by non-destructive recording of the reinforcement content of beams, columns and other ceiling constructions. By means of reinforcement scans the reinforcement arrangement, its diameter and concrete cover was determined. Furthermore, drill cores were taken in the area of the columns to determine the concrete compressive strength as well as steel samples to determine the steel tensile strength. These samples were then tested in the Otto Mohr Laboratory.*

*The successful testing of the existing ceiling as well as the determination of the material characteristics were an important step for the planning and currently taking place execution of the reconstruction.*



Messtechnikaufbau unter der Decke | *Setup of the measuring technology* | Photo: Sabine Wellner

► **Titel | Title**

Probebelastung von DDR-Fertigteildecken

*Test loading of GDR prefabricated ceilings*

► **Förderer | Funding**

FME Verwaltungs GmbH & Co. Grundstücksgesellschaft Adorfer Straße KG, Oelsnitz/Erzgebirge

► **Zeitraum | Period**

02.2020 – 06.2020

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner, Dr.-Ing. Torsten Hampel, Bernd Wehner, Andreas Thieme, Heiko Wachtel

► **Projektpartner | Project partners**

Kaiser Baucontrol Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden | Kröning und Schröter Ingenieurgesellschaft mbH, Dresden



Versagensbild des Spannschlusses 2 | Failure pattern of the turnbuckle number 2 | Photo: Silke Scheerer

## MATERIALUNTERSUCHUNG AN HISTORISCHEM BINDER

### MATERIAL EXAMINATION OF A HISTORICAL ROOF TRUSS

Im Projekt war der Tragwiderstand eines denkmalgeschützten Daches experimentell zu bestimmen. Aufgrund der Randbedingungen wurde beschlossen, einen Binder komplett auszubauen und die einzelnen Komponenten im Labor zu testen, um eventuelle Schwachstellen der Konstruktion aufzeigen zu können.

Bei dem zu untersuchenden Dachträger handelte es sich um einen sogenannten Wiegmann-Polonceau-Binder (auch französischer Binder genannt) – ein Tragsystem, welches aus Holz-Druckgurten und sprengwerkgleich darunter angeordneten, metallenen Zugstangen besteht. Wer im ersten Drittel des 19. Jahrhunderts zum ersten Mal ein solches System verwirklichte, ist nicht bis ins letzte Detail geklärt. Neben den namensgebenden Ingenieuren Camille Polonceau und Rudolf Wiegmann wird der Franzose Emy genannt. Andere Quellen führen Bauwerke im Ural aus den 1820er Jahren an. Es handelt sich um ein äußerst leichtes und effizientes Tragsystem, was bei der umzubauenen Halle möglichst erhalten werden

*In the project, the load-bearing capacity of a listed roof was to be determined experimentally. Due to the boundary conditions, it was decided to completely dismantle one truss and to test its individual components in the laboratory in order to identify any weak points in the construction.*

*The roof truss under investigation was a so-called Wiegmann-Polonceau truss (also known as a French truss) – a load-bearing system consisting of wooden compressive ties and metal tension rods arranged underneath. It is not clarified in detail who was the first to realise such a system in the first third of the 19th century. In addition to the engineers who gave it its name, Camille Polonceau and Rudolf Wiegmann, the Frenchman Emy is mentioned. Other sources cite buildings in the Ural Mountains from the 1820s. It is an extremely light and efficient load-bearing system, which should be preserved as far as possible in the hall to be rebuilt, partly because Gustave Eiffel is thought to have designed it.*

soll, u. a. auch deshalb, da Gustave Eiffel als Entwurfsverfasser vermutet wird.

Es waren verschiedenste Versuche durchzuführen, um alle denkbaren Schwachstellen auszuloten. Neben reinen Zugversuchen an geraden Stababschnitten unterschiedlichen Durchmessers waren die Anschlüsse und Verbindungen zu testen: Augen an den Stabenden, Gewinde, aufgeschraubte Muttern sowie Bolzen, Spannschlösser und Verbindungsbleche. Ermittelt werden sollten neben der Versagenskraft stahlspezifische Materialkennwerte wie E-Modul und Streckgrenze. Allerdings konnten die Verformungskennwerte wegen der oft heterogenen Probengeometrie nicht exakt angegeben werden. Der leicht gegen die Vertikale geneigte Druckstab wurde als unkritisch eingestuft und war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Insgesamt ergaben die fast 30 Tests, dass es sich um ein sehr ausgewogenes Tragwerk handelt. Keines der einzelnen Tragelemente hat sich konzeptionell als Schwachstelle herausgestellt. Sehr hohe, ausgewogene Tragfähigkeiten wurden in den geraden Stabbereichen, niedrigere in der Nähe von Anschlussbereichen erzielt. Den Grund ist in der Fertigung zu suchen, wenn bspw. der Anschlussbereich für die Geometrieänderung nochmals erwärmt wurde. Indiz dafür waren lokale Inhomogenitäten in den Bruchflächen. Schwächstes Glied war eines der Spannschlösser. Zum Versagenszeitpunkt befanden sich die anschließenden Stäbe aber bereits im Bereich der Streckgrenze.



Die dünneren Stäbe wiesen im Versagensbereich eine sehr fein strukturierte Bruchfläche und eine deutliche Brucheinschnürung auf. | *The thinner bars showed a very finely structured fracture surface and a clear necking in the failure area.* | Photo: Silke Scheerer

*A wide variety of tests had to be carried out in order to find all possible weak points. In addition to tensile tests on straight bar sections of different diameters, the connections and joints had to be tested: eyes at the ends of the bars, threads, screwed-on nuts as well as bolts, turnbuckles and connecting plates. In addition to the failure force, steel-specific material parameters such as modulus of elasticity and yield strength were to be determined. However, the deformation parameters could not be given exactly because of the often heterogeneous specimen geometry. The compression bar, which was slightly inclined against the vertical, was classified as non-critical and was not the subject of the investigations.*

*Altogether, the almost 30 tests revealed that it is a very well-balanced supporting structure. None of the individual load-bearing elements was found to be conceptually weak. Very high, balanced load-bearing capacities were achieved in the straight bar areas, lower ones near connection areas. The reason for this can be found in the manufacturing process, for example when the connection area was heated again for the geometry change. This was indicated by local inhomogeneities in the fracture surfaces. The weakest element was one of the turnbuckles. At the time of its failure, however, the connecting bars were already in the area of the yield point.*

► **Titel | Title**

Behördenkantine Polizeiareal Dresden

*Authority canteen police area Dresden*

► **Förderer | Funding**

Freistaat Sachsen, vertreten durch das SMF, vertreten durch das SIB, NL Dresden 1

► **Zeitraum | Period**

06.2020 – 01.2021

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

► **Bearbeiter | Contributors**

Dr.-Ing. Silke Scheerer, Dr.-Ing. Torsten Hampel, Michael Liebe, Tino Jänke, Doreen Sonntag, Maik Patricny, Bernd Wehner

► **Projektpartner | Project partner**

LAP, Dresden



DMS-Applikation und Rissbild an einem Abscherversuch in Dübel-Längsrichtung | Arrangement of strain gauges and crack pattern after a push-out test in longitudinal direction | Photo: Cécilia Karge

## ABSCHERVERSUCHE AN VERBUNDDÜBELLEISTEN

### PUSH-OUT TESTS ON COMPOSITE DOWEL STRIPS

Orthotrope Stahlfahrbahnplatten im Brückenbau zeichnen sich durch eine hohe Tragfähigkeit bei geringem Eigengewicht aus. Kerbschärfe in den Details und stark angestiegene Verkehrsbelastungen führten jedoch zu Ermüdungsschäden. Mit der sogenannten Orthoverbundfahrbahnplatte, die aus einem längsausgesteiften Fahrbahnblech, einer relativ dünnen Stahlbetonschicht und Dübelleisten als Verbundmittel besteht, wird eine leichte und robuste Fahrbahnplatte als Alternative entwickelt. Durch experimentelle und numerische Untersuchungen werden wesentliche Voraussetzungen geschaffen, dass wodurch sich die Bauweise als wirtschaftliche und dauerhafte Alternative zur Stahlbetonfahrbahnplatte und zur orthotropen Stahlfahrbahnplatte etablieren kann.

Anders als im herkömmlichen Stahlverbundbrückenbau stellt die Leiste einen flächigen Verbund her. Sie ist demzufolge nicht nur Längs- sondern auch Querschubbeanspruchungen ausgesetzt. Bisher wurde weder die Höhe der Tragfähigkeit noch der Tragmechanismus unter Querschubbeanspruchung von Verbunddübelleisten untersucht. Daher wurden Versuche mit

*Orthotropic steel decks in bridge construction are characterised by a high load-bearing capacity with low dead weight. However, notch sharpness in the details and strongly increased traffic loads led to fatigue damage. With the so-called orthotropic composite slab, which consists of a longitudinally stiffened deck plate, a relatively thin reinforced concrete layer and dowel strips as a bonding element, a lightweight and robust deck plate is being developed as an alternative. Through experimental and numerical investigations, essential prerequisites are created for the construction method to establish itself as an economical and durable alternative to the reinforced concrete slab and the orthotropic steel slab.*

*In contrast to conventional steel composite bridge, the strip creates a laminar bond. It is therefore not only exposed to longitudinal but also to transverse shear stresses. Up to now, neither the level of load-bearing capacity nor the load-bearing mechanism under transverse shear stress of composite dowel bars has been investigated. Therefore, tests were carried out with test specimens in which the strip was arranged in and perpendicular to the direction of loading.*



Probekörpern durchgeführt, in denen die Leiste in und senkrecht zur Kraftrichtung angeordnet wurde. Auf die Verbunddübelleiste wurden vor der Betonage Dehnmessstreifen appliziert, die Rückschlüsse auf die plastischen Verformungen und den Tragmechanismus der Leiste geben sollen. Insgesamt wurden je vier statische Abscherversuche durchgeführt. Dabei werden zunächst 25 Lastwechsel zwischen 40 % und 5 % der zu erwartenden Bruchlast durchgeführt. Die Zyklen sind notwendig, um einen möglichen Haftverbund zu lösen. Anschließend wird die Last bis zur Bruchlast gesteigert. Bei Wiedererreichen von 80 % der Bruchlast kann die Belastung gestoppt werden. Die 25 Zyklen werden kraftgesteuert auf den Versuchskörper aufgebracht. Danach wird mittels Wegregelung belastet, um auch den abfallenden Ast in der Last-Verformungskurve abbilden zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Querschubtragfähigkeit 75 % größer ist als die Längsschubtragfähigkeit. Des Weiteren konnte eine Analogie des Tragverhaltens der Leiste in Querrichtung zu dem eines Kopfbolzendübels hergestellt werden. Diese Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage des Verständnisses der Tragmechanismen von Dübelleisten und damit für die Entwicklung von Konstruktions- und Bemessungsvorschriften der Orthoverbundfahrbahnplatte.

*Strain gauges were applied before concreting to provide information on the plastic deformations and the load-bearing mechanism of the strip. A total of four static shear tests were carried out on each. First 25 load cycles between 40% and 5% of the expected breaking load were carried out. The cycles are necessary to release a possible adhesive bond. Then the load is increased until the breaking load is reached. When 80% of the breaking load is reached again, the load can be stopped. The 25 cycles are applied to the test specimen under force control. Afterwards, the load is applied by means of path control in order to be able to reproduce the falling path in the load-deformation curve.*

*In the course of the tests it was found that the transverse shear load bearing capacity is 75% greater than the longitudinal shear load bearing capacity. Furthermore, an analogy of the load bearing behaviour of the dowel strip in transverse direction to that of a headed shear bolt dowel could be established. These findings form an important basis for understanding the load-bearing mechanisms of dowel strips and thus for the development of design and dimensioning guidelines for the orthotropic composite deck.*



Versagensmodus und DMS-Applikation für einen Abscherversuch in Dübel-Querrichtung | Failure mode and arrangement of strain gauges for a push-out test in transverse direction | Photo: Cécilia Karge

► **Titel | Title**

Wirtschaftliche und dauerhafte Orthoverbundfahrbahnplatten mit Dübelleisten für Straßenbrücken

*Economical and durable orthotropic composite slabs with dowel strips for road bridges*

► **Auftraggeber | Funding**

FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., AiF – Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e. V., IGF – Industrielle Gemeinschaftsforschung

► **Zeitraum | Period**

09.2018 – 02.2022

► **Leiter | Project manager**

Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann, Institut für Stahl- und Holzbau, TU Dresden

► **Bearbeiterin | Contributor**

Dipl.-Ing. Cécilia Karge, Institut für Stahl- und Holzbau, TU Dresden

► **Versuchsdurchführung | Experimental procedure**

OML-Personal



# DAS INSTITUT



**MB** Institut für  
Massivbau

„Ein gescheiter Mann muss so gescheit sein,  
Leute anzustellen, die viel gescheiter sind als er.“

John F. Kennedy

Im Vordergrund unserer Arbeit stehen Forschung und Lehre. Das Gesamtbild unseres Instituts macht allerdings noch viel mehr aus. Es finden Exkursionen mit unseren Studierenden statt und für die Berufsorientierung betreiben wir Nachwuchsförderung in Schülerprojektwochen und bei öffentlichen Veranstaltungen. Den Wissenstransfer zwischen Forscherinnen und Forschern sowie Vertretern der Wirtschaft und der Politik intensivieren wir auf Treffen und Konferenzen. Teambildende Projekttag, sportliche Events, Ehrungen von ehemaligen Wegbegleitern und einiges mehr schaffen eine Vielfalt, die unsere tägliche wissenschaftliche Arbeit bereichert. 2020 wurden pandemiebedingt viele Angebote digital durchgeführt oder verschoben.

**Beiträge von:**

Sandra Kranich, Stefan Gröschel und zum Teil aus dem BauBlog der Fakultät Bauingenieurwesen: <http://baublog.tu-dresden.de>

# EIN FÖRSTER? EIN ARCHITEKT? EIN BRÜCKENBAUER!

Ein Ingenieur, der über Umwege zurück nach Dresden kehrte

**Ein Interview mit Professor Steffen Marx,  
von Sandra Kranich und Stefan Gröschel**

*Wie sind Sie dazu gekommen, Bauingenieurwesen zu studieren? Was waren Ihre Beweggründe?*

Ich bin in der DDR groß geworden und mein Kindheitstraum war es, Förster zu werden. Die normalen Abiturplätze waren damals knapp, aber in Dresden konnte ich Baufacharbeiter mit Abitur lernen. Dadurch bin ich überhaupt erst mit dem Bau in Berührung gekommen. Zudem haben meine Eltern ihr Haus umgebaut und das war mein zweiter Bezug zum Handwerk und zum Bau. Die handwerklichen Tätigkeiten und der „Beruf mit Abitur“ haben mir sehr viel Spaß bereitet. Dadurch habe ich dann auch angefangen, Bauingenieurwesen an der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar zu studieren.

*Wie ging Ihr Weg nach einem erfolgreichen Studienabschluss in Weimar dann dort weiter? Sind Sie erstmal eine Zeit lang in Weimar geblieben oder sind Sie gleich woanders hingezogen?*

Also in Weimar wollte ich eigentlich – nach einem halben Studienjahr Bauingenieurwesen – zu den Architekten wechseln, weil mich die Ausbildung in ihrer Kleinteiligkeit und ihrer Zerrissenheit in einzelne Schnipsel genervt hat. Bei den Architekten sah es dagegen ganz anders aus: Sie haben im ersten Studienjahr bereits Hörsäle, Stadien und Pavillons geplant, und das wollte ich auch. Nach zwei Jahren Bauingenieurstudium hat sich die Chance ergeben, in einem Ingenieurbüro in Stuttgart ein Praktikum zu absolvieren. Dort habe ich dann auf einmal gemerkt: „Hey, ich kann das alles, was die dort von mir wollen, und es macht mir großen Spaß.“ Nach dem Abschluss des Studiums an der Bauhaus-Universität Weimar – welcher durch dieses Praktikum ganz klar in Richtung Konstruktiver Ingenieurbau ging – hat mich mein Massivbau-professor, Herr Professor Raue gefragt, ob ich vielleicht promovieren möchte. Und weil ich

Freude am Forschen und an der Lehre gefunden hatte, habe ich mich dafür entschieden. Ab diesem Zeitpunkt habe ich mit dem Gedanken gespielt, dass dieser wissenschaftliche Weg etwas für mich sein könnte.

*Irgendwann nach Ihrer Promotion sind Sie dann in Dresden gelandet. Wann war das?*

Nach meiner Promotion bin ich mit meiner Frau und unseren zwei Kindern nach Dresden umgezogen und habe in meiner ersten Anstellung Kontakt mit dem Brückenbau bekommen. Da ich Brückenbau weder studiert noch vertieft habe, war ich fasziniert, wie komplex und zugleich spannend das Thema ist. Der Brückenbau hat mich dann mein ganzes Leben nicht mehr losgelassen. Daraus habe ich auch die Lehre gezogen, dass es enorm wichtig ist, wofür man sich unmittelbar nach dem Studium entscheidet. Viele meiner Kommilitonen sind noch heute genau in dem Bereich tätig, in dem sie nach dem Studium angefangen haben.

*Wie haben Sie Herrn Professor Curbach kennengelernt und wie kam es dazu, dass Sie am Institut für Massivbau tätig waren? Was war Ihre damalige Aufgabe am Institut?*

Wir haben uns beim Bau der Eisenbahnbrücke am Hohen Stein im Plauenschen Grund in Dresden kennengelernt. Manfred Curbach war der zuständige Prüflingenieur und ich der Ausführungsplaner. Er fragte mich 2001, ob ich Interesse hätte, den Lehrauftrag für Mess- und Versuchstechnik an der TU Dresden zu übernehmen. Diesen Lehrauftrag habe ich dann einige Jahre lang nebenberuflich ausgeführt.

2006 wurde Manfred Curbach zum Prorektor für Universitätsentwicklung an der TU Dresden gewählt. Er fragte mich deshalb, ob ich an die TU Dresden kommen würde, um ihn drei Jahre lang in der Lehre zu vertreten. Da habe ich ihm sofort zugesagt.



August 2009: Östereichexkursion, vor der Hängebrücke über den Inn (Wernstein-Neuburg) | Foto: Erhard Kargel

Als ich dann im März 2007 an der TU Dresden angefangen habe und zum ersten Mal mit meinen Kollegen in die Alte Mensa gegangen bin, habe ich gedacht: „Herrlich, jetzt bist du wieder Student!“ Ich habe dann die ganze Lehre im Massivbau übernommen, viele Studentenkursionen durchgeführt und auch eigene Forschungsprojekte realisiert. Damit bin ich aus der Praxis wieder in die wissenschaftliche Laufbahn gekommen.

*Es folgte noch einmal ein nördlicher Exkurs in Richtung Hannover. Dort waren Sie auch eine ganze Zeit lang tätig und sind dann aber 2020 wieder in Dresden gelandet. Wie kam es dazu?*

Nachdem die drei Jahre an der TU Dresden fast beendet waren, habe ich mich an verschiedenen Stellen beworben und auch einen Antrag für ein International Outgoing Fellowship im Marie-Curie-Programm gestellt. Letztlich bekam ich in Hannover und San Diego eine Zusage.

Als Familie haben wir uns (nach einem 10-monatigen Abstecher nach San Diego) für Hannover entschieden. Die Arbeit an der Leibniz Universität war total cool und es machte riesigen Spaß, dort zu arbeiten. Es passte alles und es gab ei-



„Familienausflug“ 10 Monate Kalifornien: Rundreise von San Diego nach San Francisco (2010) | Foto: Privat

gentlich gar keinen Grund, da wegzugehen. Dennoch sind wir schon 2017 wieder als Familie nach Dresden umgezogen, um unsere Eltern zu unterstützen. Ich habe dann in den sauren Apfel gebissen und bin gependelt. 2020 habe ich den Ruf auf die Stiftungsprofessur in Dresden erhalten, was fachlich perfekt passt und eine zusätzliche Weiterentwicklung für das Institut ermöglicht. Für mich ist Dresden in vielerlei Hinsicht der Sechser im Lotto. Sowohl persönlich als auch beruflich.



Wandern am Angels Landing im Zion National Park in Utah, 2011 | Foto: Privat

*Wie ist es für Sie in die Fußstapfen von Herrn Curbach zu treten? Er ist schließlich eine Koryphäe auf seinem Gebiet und zudem der Gewinner des Deutschen Zukunftspreises. Wie wollen Sie die Arbeit am Institut voranbringen bzw. ausrichten?*

Das sind schon riesige Fußstapfen, da stimme ich Ihnen zu. Das Institut für Massivbau ist mit zahlreichen etablierten Forschungsfeldern und vielen Alleinstellungsmerkmalen bereits sehr gut aufgestellt. Diese Felder muss und will ich auch weiterführen. Gleichzeitigkeit ist es auch

so, dass ich meine eigenen Bereiche voranbringen möchte. Das sind der Brückenbau und die Windenergieanlagen, zu denen ich in Hannover gekommen bin und die ich für sehr zukunftsfähig halte. Da der Tag aber nur 24 Stunden hat, bin ich mir dessen bewusst, dass es allein nicht machbar ist. Deswegen ist für mich ein ganz wichtiger Schritt in den nächsten Jahren unser Team weiterzuentwickeln. Das Institut braucht eine ganz breite Basis, eine gute Struktur und gute Köpfe, die diese Verantwortung auch wahrnehmen und bestimmte Bereiche selbstbewusst und eigenständig bespielen.

Über die Ausrichtung der Arbeit am Institut denke ich zurzeit sehr viel nach. Was mich dabei treibt, ist vor allem die Frage: „Wie können wir als Bauingenieure zu mehr Nachhaltigkeit der menschlichen Entwicklung beitragen?“ Dieser Frage möchte ich unsere ganze Forschung unterordnen. Da passen unsere jetzigen Projekte gut rein. Aber auch neue Themen, die wir entwickeln, werden sich alle diesem Ziel widmen. Wie das genau gestaltet werden kann, das ist die Aufgabe für die nächsten zwei Jahre – für mich und für alle Mitarbeiter:innen. Mit dieser Frage können wir wirklich für die Gesellschaft nutzbringend sein und eine nachhaltige Entwicklung vorantreiben. Das ist etwas, das vielen von uns auf der Seele brennt und dem wir uns in unserer täglichen Arbeit stellen werden.

*Zum Schluss eine letzte Frage. Vielleicht können Sie uns ein wenig über Sie als Privatperson erzählen? Wer ist Steffen Marx persönlich? Eins muss man sagen, egal, wie das Wetter ist, Sie kommen immer mit dem Fahrrad.*

Ich bin ein Draußen-Mensch und sehr gern an der frischen Luft und in der Natur. Ich gehe sehr gern wandern oder fahre Kajak. Und ja, ich fahre gern mit dem Fahrrad. Außerdem baue ich gern mit meinen Kindern Baumhäuser. Als Familie machen wir immer Urlaub mit dem Zelt, ein Hotel oder eine Pension kommen bei uns gar nicht in Frage.

Zudem bin ich total gerne mit anderen Menschen zusammen, sei es mit meiner Familie, den Studierenden oder meinen Mitarbeiter:innen oder Kolleg:innen. Deswegen nervt mich die aktuelle Corona-Pandemie sehr, denn der unmittelbare Kontakt fehlt.



Baumhausbau 2018 | Foto: Privat



Wandern in den Südtiroler Alpen, 2019 | Foto: Privat

*Wir hoffen alle, dass diese Zeit sich bald dem Ende neigt und wir uns alle wieder bei einer Weihnachtsfeier oder im Rahmen eines Projekttagess persönlich treffen können. Bis dahin wünschen wir Ihnen alles Gute und bedanken uns für das Interview.*

# PASST ES GERADE? HOMEOFFICE IN CORONAZEITEN

Aus der Sicht eines Muttertiers

Natürlich passt es nicht. Kein Elternteil der Welt schrie „Hurra“, als der erste Lockdown kam und die Aussicht auf Homeoffice mit Kind zu einer bitteren Realität wurde. Die Zerrissenheit zwischen Professionalität und Mutter- bzw. Vatersein war deutlich spürbar. Mein Sohn war zu dem Zeitpunkt zweieinhalb Jahre alt und ein großer Yakari-Fan. Als die Hiobsbotschaft kam, dass Kindergärten und somit auch Tagesmütter schließen, war auch meine Familie im Ausnahmezustand. Da mein Mann im Deutschen Roten Kreuz tätig ist, war schnell klar, wer zu Hause das unberechenbare Monster pflegen wird, nämlich das Muttertier. Diskussionen über die Wichtigkeit des Carbonbetons und die Revolution des Bauens waren zwecklos – privat und als Begründung für die Notfallbetreuung.



Netflix-Kinderbetreuung mit Yakari und Kleiner Donner | Foto: Sandra Kranich

Bereits am ersten Tag des Homeoffice musste ich zu den harten Waffen greifen – iPad und Netflix waren die Erlösung. Ich bin nicht stolz darauf, aber so war mein Sohn zumindest eine Stunde beschäftigt, ohne ständig auf meinem Schoß zu sitzen, alle Tasten zu drücken und andauernd zu fragen „Was machst du, Mami?“ oder „Wer sind diese Menschen, Mami?“. Was ich natürlich nicht bedacht habe, war die Tatsache der Anrufweiterleitung auf mein Handy. Grundsätzlich eine tolle Sache. Die Anrufe von der Arbeit

wurden direkt auf mein Handy umgeleitet. Soweit so gut. Ganz wichtig ist jedoch die Deaktivierung der Funktion „Anrufe auf iPad erlauben“. Während ich mich nichts ahnend zum Drucker im Zimmer nebenan begab, klingelte mein Handy und gleichzeitig auch das iPad auf dem Yakari lief – der kleine Indianerjunge und sein bester Freund Kleiner Donner. Plötzlich hörte ich nur „Frau Kranich? Hallo? Habe ich mich verwählt?“ „Yakari, ja und sein bester Freund ist das tolle Pferd“, hörte ich meinen Sohn sagen. Ein Journalist der Süddeutschen Zeitung wollte mich sprechen, statt Frau Kranich erreichte er jedoch Herrn Kranich in Mini und unterbrach unwissend sein Unterhaltungsprogramm.

Nach dem ersten Schock mit der Süddeutschen Zeitung kam das nächste Ereignis. Die Grundsteinlegung für das Carbonbetonhaus CUBE sollte digital stattfinden und jegliche Vorbereitungen des digitalen Events lagen im meinem Verantwortungsbereich. Während eines Telefonats mit einem Kollegen des Medienzentrums brüllte mein kleiner Kranich ins Telefon „Ich habe gekackert, Mami!“ Stille am Ende des Apparates. Wie toll für den kleinen Mann, der erste große Meilenstein auf dem Weg ins Erwachsensein wurde erreicht. Gleichzeitig wurde das Muttertier in eine peinliche Situation gebracht. „Nun ja, Frau

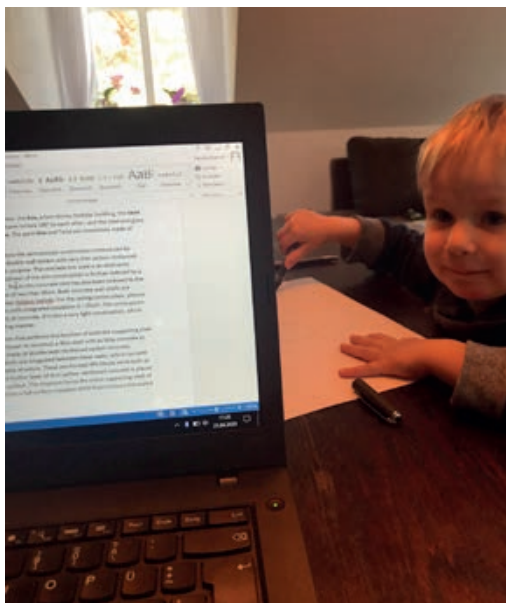


Arbeitsplatzergonomie 2020 | Foto: Kai Kranich



Kranich, vielleicht beseitigen Sie erst einmal das Problem und wir telefonieren später“. Den Weg ins Bad konnte man glatt als „The Walk of Shame“ bezeichnen. Das Gute war, ich war nicht die einzige Person, die diesen Überlebenskampf – Häufchen hin oder her – führte. Tausende andere Elternteile hatten die Gleichen und auch größere Probleme. So egoistisch es klingen mag, die Gewissheit, nicht allein zu sein, gab mir Kraft.

Die ersten zwei Wochen waren der blanke Horror. Gefangen zwischen Arbeit, Essen zubereiten, Kuscheln, Buchlesen, Hörbuch einschalten, an Videokonferenzen teilnehmen, Kind zum Schlafen bringen, in der Telefonkonferenz etwas Schlaues sagen, Kind beruhigen, E-Mails beantworten, E-Mails mit vielen Rechtschreibfehlern (woran das wohl lag?) wieder zurückrufen, musste ich darauf achten, nicht selber aus dem Fenster zu springen. Zum Glück wohne ich im Dachgeschoss und habe Höhenangst. Nach ein paar Videotelefonaten mit Freunden, in denen Tränen flossen, in denen aber auch gemeinsam und digital das Abendessen vorbereitet wurde, habe ich den Entschluss gefasst, dass eine Strategie entwickelt werden muss. So wurde ein Essensplan entwickelt, eine Gemüsebox inkl. Lieferservice bestellt und ein



Homeoffice mit Kind. Dieser Zustand hat genau 30 Sekunden angehalten. | Foto: Sandra Kranich

Sportplan erstellt. Die Überschrift der Mission Impossible war es, den kleinen Wirbelwind kaputtzuspielen.

So fing der Tag um 6:00 Uhr an – schnell den Laptop einschalten und ein paar Mails beantworten. Machen wir uns hier nichts vor: im Bademantel und zerzausten Haaren. In der Zeit bereitete mein Mann das Frühstück vor. Gegen 7:00 Uhr wachte Monsieur Kranich auf, lies ein paar schlaue Sprüche los, die das Muttertier entweder erfreuten oder wahlweise auf die Palme brachten, wie „Mami ich möchte einen Smoothie!“ Erstens sagt man Bitte und zweitens, klar, man hat sonst nichts anderes zu tun. Es wurde gefrühstückt, gequengelt, rumgezankt und gelacht – je nach Lust und Laune. Mein Mann verabschiedete sich, ging auf Arbeit und überließ uns unserem Schicksal. Der nächste Schritt bezog sich auf das wortwörtliche Kaputtspielen des Kindes. Unter Kaputtspielen waren sportliche Aktivitäten zu verstehen, mit dem Ziel eines sehr langen Mittagsschlafes. Dresden-Plauen entpuppte sich als der ultimative Standort, um diese Strategie erfolgreich umzusetzen. In der Nähe des Hohen Steins wohnend, bin ich jeden Morgen mit Don Krawallo „wandern“ gegangen. Zwei bis drei Kilometer, auf und ab durch die kleinen Berge. Das zahlte sich aus. Nach dem Mittagessen schlief mein Sohn ganze drei Stunden, die ich voll und ganz für ungestörtes Arbeiten nutzen konnte. Alle Eltern mit kleinen Kindern denken vermutlich, dass durch das viele Schlafen der Abend wohl „gelaufen“ war. Zum Glück nicht. Nach der zweiten sportlichen Betätigung am Nachmittag war für das Energiebündel spätestens um 19:30 Uhr Schicht im Schacht.

Der Spruch „Man wächst mit seinen Aufgaben“ hat sich in meinem Fall bewahrheitet. Valentin und ich sind zu einem eingespielten und unzertrennbaren Team geworden. Die Zeit mit ihm war sehr herausfordernd, nervenzerrend und anstrengend. Sie war aber auch sehr lehrreich, aufschlussreich und voller herzlicher und schöner Momente.

# PREISE UND EHRUNGEN

## „PREIS DER BAUINDUSTRIE SACHSEN“ FÜR IURII VAKALIUK

Der Bauindustrieverband Ost e. V. (BIVO) hat zum 13. Mal den „Preis der Bauindustrie Sachsen“ für herausragende Abschlussarbeiten im Bereich des Bauingenieurwesens und der Architektur verliehen. Die Auszeichnung erfolgte coronabedingt im Rahmen der verbandsinternen Sitzung des Ausschusses für Personalentwicklung am 14. Oktober 2020 in Leipzig.

„Der Preis ist für den Bauindustrieverband ein bedeutender Baustein zur Förderung des Nachwuchses der Bauwirtschaft“, betont BIVO-Präsident Wolfgang Finck und freut sich mit den Preisträgern. Die Fachkräftesicherung gehöre neben der Digitalisierung zu den großen Herausforderungen der Branche. „Zusätzlich zu den demografischen Entwicklungen spüren wir zunehmend, dass die Bereitschaft nachlässt, unter den besonderen Bedingungen des Bauens zu arbeiten. Die Prämierung von Abschlussarbeiten ist dabei nur ein Baustein, die Vielseitigkeit des Bauens zu betonen und das Image der Branche zu pflegen“, so Finck.

Der BIVO-Präsident bemerkt, dass in den Bauunternehmen interessante und anspruchsvolle Betätigungsfelder mit hervorragenden beruflichen Perspektiven für den Berufsnachwuchs warteten. Um als Branche im Wettbewerb mit anderen Industriezweigen attraktiver zu werden, müsse es gesamtgesellschaftlich gelingen, dass der Bauberuf und die Bedeutung der Baukultur für die Gesellschaft wieder positiver wahrgenommen werden.

Der „Preis der Bauindustrie Sachsen 2020“ im Teilbereich Bauingenieurwesen wurde verliehen an Iurii Vakaliuk vom Institut für Massivbau an der TU Dresden für seine Masterarbeit zum Thema „Konzeptionelle Entwicklung für die Anordnung von modularen textilbewehrten Makrozellen“. Im Teilbereich Architektur gewann



Der „Preis der Bauindustrie Sachsen“ für herausragende Abschlussarbeiten im Bereich des Bauingenieurwesens und der Architektur ging 2020 an Iurii Vakaliuk vom IMB und Robert Bretschneider (TU Dresden). | Foto: Bauindustrieverband Ost e.V.

Robert Bretschneider den Preis für seine Diplomarbeit zum Thema „Radrennbahn Dresden-Reick“. Herr Vakaliuk und Herr Bretschneider studierten beide an der Technischen Universität Dresden.

Zur Begründung führt Finck aus: „Die Arbeit im Bereich Bauingenieurwesen zeigt ein sehr gutes Konzept zur Reduzierung der Gesamtbaukosten, insbesondere zur Verringerung des Materialvolumens von Beton, auf. Die Architekturarbeit beschreibt den Entwurf einer modernen Sportanlage, die Strahlkraft für die Landeshauptstadt Sachsens besitzt und den Fahrradverkehr fördern sowie den Radsport in der Region prägen kann. Zwei ganz ausgezeichnete Arbeiten, die des Sächsischen Baupreises würdig sind.“

Der alle zwei Jahre ausgelobte „Preis der Bauindustrie Sachsen“ ist mit 2.000 Euro dotiert.

# WEITSICHT

Manfred Curbach gehört zweifelsohne zu den Menschen, die mit Mut und guten Ideen Innovationen in und aus Deutschland vorantreiben. Rückschläge und Kritik konnten ihn nicht aufhalten, sondern bestärkten ihn darin seine Vision des Bauens mit Carbonbeton stets zu akzelerieren. Heute sehen wir die Früchte seiner Arbeit. Die Entwicklung, Erforschung und Überführung des Materials Carbonbeton in die Praxis erobert aktuell den Markt. Ein wunderbares Beispiel ist die Entstehung des ersten Gebäudes CUBE vollständig aus Carbonbeton und zwar in der Landeshauptstadt Dresden.

Kein Wunder also, dass auch Manfred Curbach im Rahmen der Kampagne des Bundesministerium für Bildung und Forschung „#innovationsland Deutschland“ porträtiert wurde. Die Kampagne stellt nicht nur die Forscher:innen in den Mittelpunkt, sondern macht zudem deren Innovationen für jeden sichtbar und erfahrbar und so auch die der Carbonbetonbauweise.

In einem eigens für diese Kampagne produzierten Porträtfilm zeigt Prof. Manfred Curbach einerseits auf, wie leistungsfähig und nachhaltig der neue Werkstoff Carbonbeton ist und andererseits spricht er darüber wie Weitsicht und Innovationsgeist seinen Werdegang begleitet haben.

Mit der Informations- und Dialogkampagne „#innovationsland Deutschland“ möchte das Bundesministerium für Bildung und Forschung Innovationen sichtbar und erfahrbar machen, indem möglichst vielen unterschiedlichen Menschen ebenso viele unterschiedliche Themenzugänge geboten werden.

**Webseite der Kampagne:**  
[www.innovationsland-deutschland.de](http://www.innovationsland-deutschland.de)



Smartphone mit der Startseite der BMBF-Kampagne #innovationsland Deutschland (aufgerufen am 24.11.2020) | Foto: Stefan Gröschel



Prof. Manfred Curbach im Interview | Foto: Stefan Gröschel



Schauplatz für einige Szenen des Porträtfilmes war unter anderem das Otto-Mohr-Laboratorium | Foto: Stefan Gröschel

# WEGE AUS DEM SANIERUNGSSTAU – ZDF ZU GAST IM OML

Am 3. September 2020 konnten wir kurzfristig ein ZDF-Drehteam im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden begrüßen. Geplant war eine Sendung zum Thema „Wege aus dem Sanierungsstau“. Ein Lösungsvorschlag ist der Einsatz von Carbonbeton, der maßgeblich an der TU Dresden und RWTH Aachen University erforscht wird. Prof. Steffen Marx (Stiftungsprofessur Ingenieurbau) und Juliane Wagner

(Sprecherin der Forschungsgruppe Carbonbeton II am Institut für Massivbau), standen dem ZDF-Team Rede und Antwort. Durch die Anwendung des zukunftsweisenden Baustoffes zeigte sich die Landeshauptstadt Dresden als Innovationsmotor. Sie setzt bei der Sanierung der Carolabrücke auf den Einsatz von Carbonbeton und damit auf Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung.



Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx berichtet über den Einsatz von Carbonbeton bei der Sanierung der Carolabrücke. | Foto: Stefan Gröschel



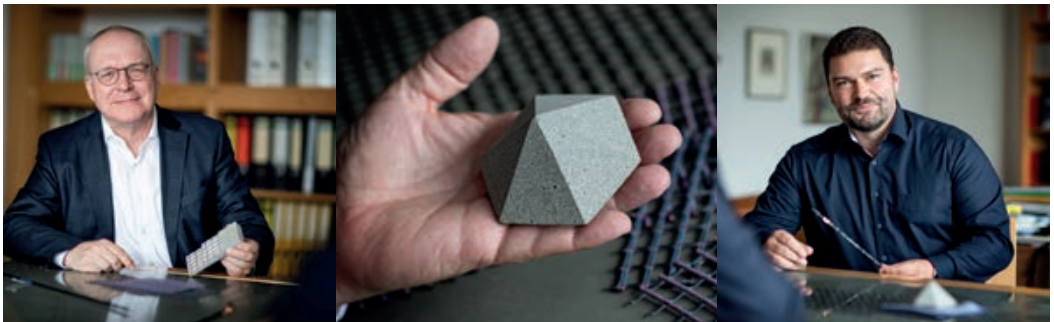
Dipl.-Ing. Juliane Wagner stellt den Versuchsstand vor und zeigt, welche enorme Belastungen auf einen Probekörper aus Carbonbeton wirken. | Foto: Stefan Gröschel

## DIE WELT SCHAUT AUF DRESDEN

Genauer gesagt auf eine kleine Baustelle am Fritz-Förster-Platz. Hier wird in den nächsten Monaten der CUBE entstehen – das weltweit erste Haus aus Carbonbeton. Für die Kampagne „SO GEHT SÄCHSISCH.“ gaben Initiator Prof. Manfred Curbach und Oberbauleiter Matthias Tietze ein interessantes Interview und zeigten auf, was es mit der Euphorie auf

sich hat. Unter „SO GEHT SÄCHSISCH.“ vereint der Freistaat Sachsen standortrelevante Themen, um zu zeigen, wie wir denken und handeln, was uns ausmacht und was das Land an Vielfalt zu bieten hat.

Webseite: [www.so-geht-saechsisch.de](http://www.so-geht-saechsisch.de)



Interview zum CUBE – Carbonbetonhaus in der Rubrik „Gründen und Unternehmen“ bei „SO GEHT SÄCHSISCH.“ | Fotos: Anne Schwerin

# 150. TODESTAG VON JOHANN ANDREAS SCHUBERT

Für drei herausragende Entwicklungs- und Ingenieurleistungen, die weltweit eine besondere Faszination ausüben – die erste deutsche Lokomotive »Saxonia«, das Dampfschiff »Königin Maria« und die »Göltzschthalbrücke« – ist er berühmt geworden: Johann Andreas Schubert.

Das Werk des angesehenen Professors, dessen Todestag sich am 6. Oktober 2020 zum 150. Male jährte, erfreut sich bis heute weit über Dresden und Sachsen hinaus großen Interesses.

Als einer der letzten Universalisten unter den Polytechnikern des 19. Jahrhunderts hat er vor allem ein weit gespanntes, fast den gesamten Fächerkanon seiner Bildungsanstalt überspannendes Werk hinterlassen. Schuberts Spuren in Technik und Industrie sowie als Direktor der Königlich-Technischen Bildungsanstalt Dresden, der Vorgängerin der TU Dresden, sind markant und nachhaltig.

Die TU Dresden ehrte den Pionier als einen ihrer bedeutenden Lehrer am 6. Oktober 2020 mit einer Kranzniederlegung auf dem Dresdner Inneren Matthäusfriedhof.

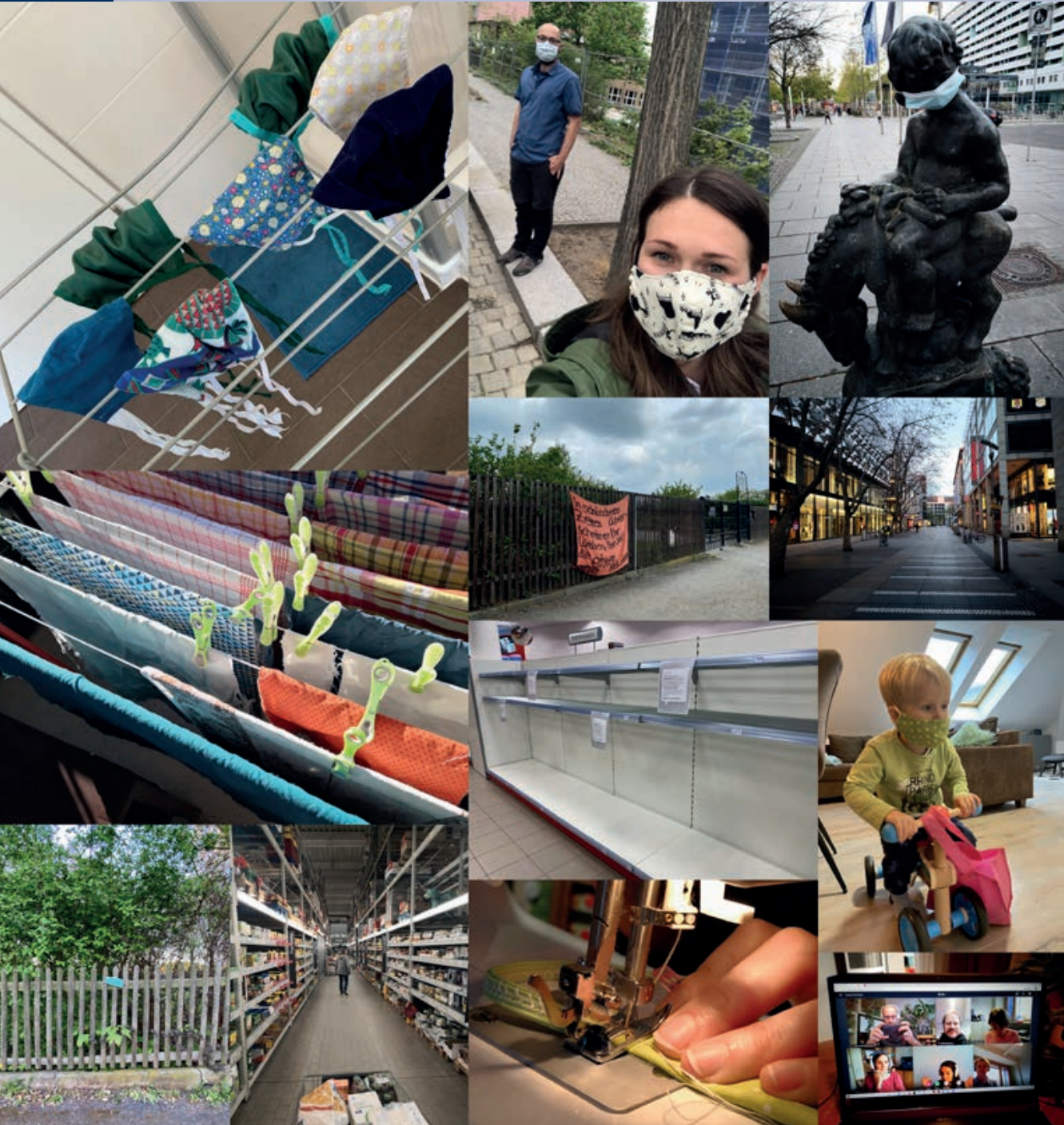
In Vertretung für die Fakultät Bauingenieurwesen nahmen Institutsdirektor Prof. Manfred Curbach und der emeritierte Professor Jürgen Stritzke an der Zeremonie teil.



Prof. Manfred Curbach vom Institut für Massivbau bei der Kranzniederlegung | Foto: Stefan Gröschel

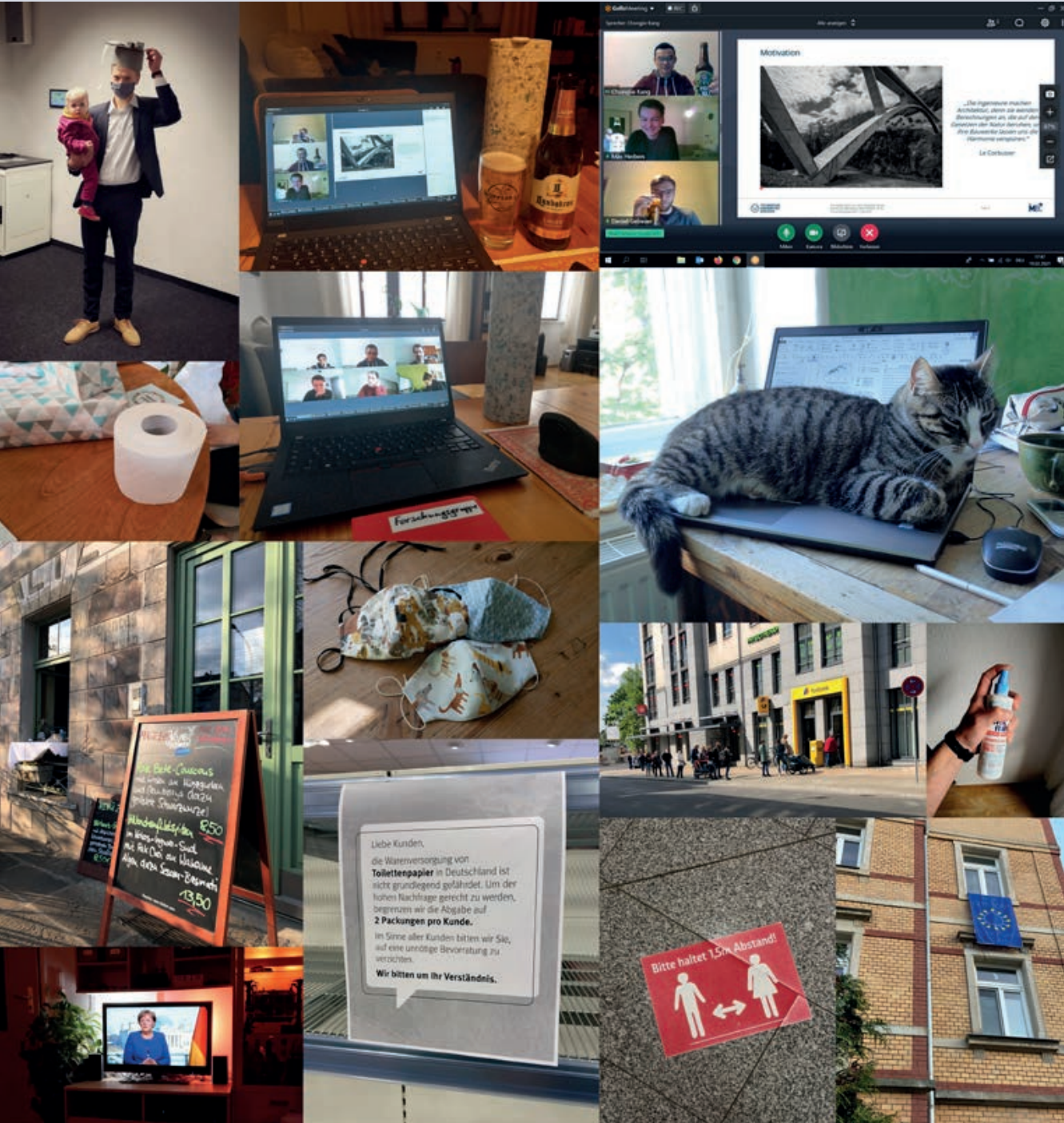


Gedenken mit Kranzniederlegung am 6. Oktober auf dem Dresdner Inneren Matthäusfriedhof | Foto: Stefan Gröschel

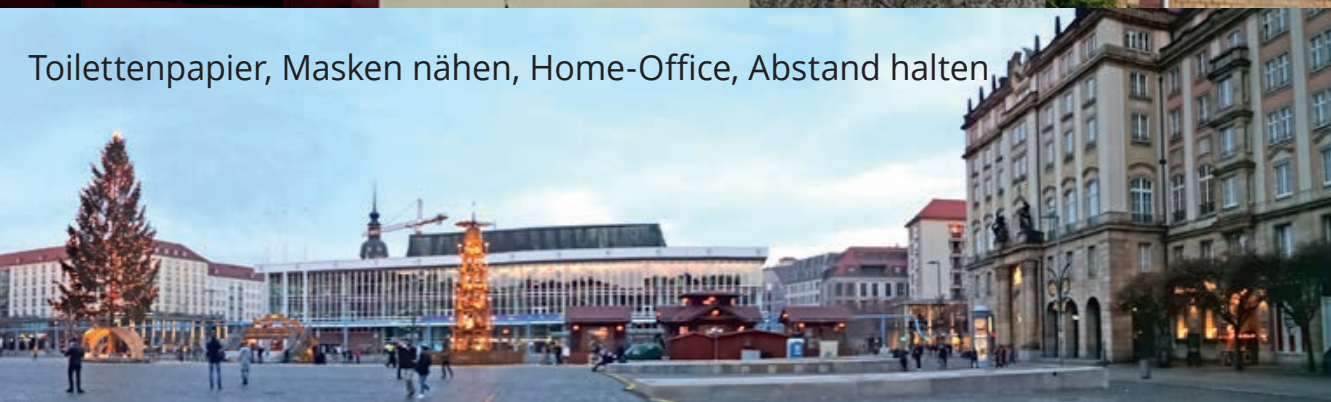


## IMPRESSIONEN AUS DEM LOCKDOWN





Toilettenpapier, Masken nähen, Home-Office, Abstand halten





Tino Kühn, M.Sc. empfängt die Glückwünsche von Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe. | Tino Kühn, M.Sc. receives the congratulations from Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe. | Photo: Stefan Gröschel

## PROMOTIONEN



**Tino Kühn**

## MESO- UND MAKROSKOPISCHE MODELLIERUNG VON BETON

### MESO AND MACROSCOPIC MODELING OF CONCRETE

Die Arbeit mit dem Titel „Experimentelle Grundlagen für die meso- und makroskopische Modellierung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten“ widmet sich detailliert der Frage von Geschwindigkeitseffekten bei der dynamischen Kennwertermittlung von Betonen. Der ursprüngliche Leitgedanke einer skalenübergreifenden numerischen Betrachtung der Geschwindigkeitseffekte und die Einbindung dieser Erkenntnisse in das makroskopische VERD-Modell wurden zugunsten einer detaillierten experimentellen Studie zum Dehnrateneinfluss verworfen. Es zeigte sich, dass die Ursachen vieler dieser Geschwindigkeitseffekte vor allem im experimentellen Umfeld und den zugrunde liegenden Annahmen zu finden sind statt in der Reaktion des Werkstoffes. Der Autor liefert aus diesem Grunde notwendige Kennwerte und eine detaillierte Analyse der möglichen Ursachen, die zur Fehlinterpretation der stofflichen Reaktionen führen können. Er geht davon aus, dass der

*The work with the title “Experimental fundamentals for the meso and macroscopic modeling of concrete at high loading velocities: A critical review of the strain rate effect” analyses in detail the questions of speed effects in the dynamic determination of concretes properties. The original idea of a cross-scaled numerical analysis of velocity effects and the integration of these findings into a macroscopic VERD-model has been abandoned in favour of a detailed experimental study of the so called strain rate influence. It became quite clear that the causes of many of these velocity effects can be found in the experimental environment and the underlying assumptions, rather than in the pure material reaction. For this reason, the author provides necessary parameters and a detailed analysis of possible causes that may lead to the misinterpretation of material reactions. He assumes that the classical strain rate effect is a purely structural property and no reaction on material level.*



klassische Dehnrateneffekt eine rein strukturelle Eigenschaft ist, die nichts mit einer stofflichen Kenngröße zu tun hat.

Daten von ca. 3.000 SHB-Tests im Zug- und Druckbereich sind Grundlage für numerische Analysen auf meso- und makroskopischer Ebene. Klassischen Bewertungsmethoden werden eigene Ansätze gegenübergestellt. Vor allem gehen anlagenspezifische Wechselwirkungen mit ein. Dieser Ansatz wird ebenso konsequent bei der Betrachtung der statischen Referenzmethoden angewandt. Hier führt dies bspw. zu einer kritischen Bewertung des statischen Nachbruchverhaltens im Zugversuch.

Diese Gesamtbetrachtung von Prüfmaschine und Prüfling ist wesentlich und dem Maschinenbau- und Automatisierungstechnik-Hintergrund des Autors geschuldet. Eine selbst entwickelte alternative Prüfmethodik am SHB ähnlich dem Perlschnurverfahren erlaubt eine verbesserte statistische Bewertung der Ergebnisse, z. B. durch Verhinderung der Einbeziehung des Energieüberschusses in die Beurteilung von Festigkeiten. Eine konsequente Energiebetrachtung bezieht die kinetische Energie der resultierenden Bruchstücke mit ein. Zudem wurden die resultierenden Bruchflächen ermittelt. Sie finden Anwendung bei spezifischen Festigkeiten und Bruchenergien im Zugbereich oder bei der Quantifizierung einer Schädigung im Druckbereich. In Anlehnung an das VERD-Modell wurde ein Schädigungsansatz mit wenigen Parametern entwickelt und in die Auswertung der Einzelversuche integriert. Aus ihm lassen sich alle wesentlichen stofflichen Kennwerte analytisch ableiten. Der entwickelte Ansatz zur Trägheitskompensation relativiert den scheinbaren Geschwindigkeitseffekt wesentlich. Der Autor entscheidet sich bei seiner Herangehensweise bewusst für den Blick über den Tellerrand und hinterfragt kritisch etablierte Methoden, wie bspw. den biaxialen Verlauf der Festigkeit im DIF-Diagramm nach Empfehlung der CEB, auf die logarithmische Darstellung eines sog. DIFs wird grundsätzlich verzichtet. Die umfangreiche und systematische Datenbasis soll weitere Diskussionen anregen.

*Data of approx. 3,000 SHB tests in the tensile and compressive region are the basis for numerical analyses on a mesoscopic and macroscopic level. For the evaluation, the classical methods are compared with own approaches. This mainly includes the facility-specific interactions. This approach is also as consistently applied when analysing the static reference methods. Here, e.g., this leads to a critical review of the static post cracking behaviour in the tensile test.*

*This overall consideration of testing facility and test specimens is essential and due to the mechanical engineering and automation technology background of the author. An alternative testing methodology developed for the SHB allows improved statistical evaluation of results. It resembles a fatigue testing method and prevents the inclusion of a certain surplus of energy in the assessment of strengths. A consistent energy balance involves the kinetic energy of the resulting fragments. At the same time, the resulting fracture surfaces were determined and used in the evaluation of specific strengths and fracture energies in tension and in the quantification of damage in the compressive domain. Based on the VERD-model, a damage evolution approach with few parameters was developed and integrated into the evaluation of the individual tests. From it, all essential material properties can be derived analytically. The developed approach to inertia compensation significantly relativizes the apparent velocity effects. In his approach, the author decides to look beyond the box and critically scrutinizes established methods such as the biaxial course of the strength in the DIF-diagram as recommended by the CEB. A logarithmic representation of a the DIFs was avoided. The extensive and systematic database should stimulate further discussions.*

► **Gutachter | Experts**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Universität der Bundeswehr, München

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx



Dipl.-Ing. Marcus Hering empfängt die Glückwünsche von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. | Dipl.-Ing. Marcus Hering receives the congratulations from Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach. | Photo: Dajana Musiol

## Marcus Hering

# IMPAKTVERSTÄRKUNG MIT MINERALISCHEN VERSTÄRKUNGSSCHICHTEN

## IMPACT STRENGTHENING WITH MINERAL STRENGTHENING LAYERS

Thematisch befasst sich die Dissertation mit der Verstärkung von Stahlbetonkonstruktionen gegen eine Impaktbeanspruchung. Im Rahmen von Vorversuchen wurden grundlegende experimentelle Betrachtungen angestellt, um sich der Thematik der Verstärkung von Stahlbetonplatten gegen eine Impaktbeanspruchung zu nähern. Die Erkenntnisse dieser Vorversuche wurden für die weiterführenden Betrachtungen herangezogen. Um die Gesamtproblematik effizient zu bearbeiten, wurde der umfangreiche Themenkomplex aufgeteilt. Hierfür wurden zum einen Untersuchungen der Verstärkungsschicht mithilfe von kleinmaßstäblichen Probekörpern durchgeführt. Hierbei galt es, die Leistungsfähigkeit der zur Verfügung stehenden Verstärkungsmaterialien aufzuzeigen. Zum anderen wurden die Stahlbetonplatten, die es zu verstärken galt, unter einer Impaktbelastung untersucht. Durch diese Betrachtungen sollten die wirkenden Schädigungsmechanismen erforscht werden. Anschließend erfolgte der Zusam-

*Thematically, the dissertation deals with the strengthening of reinforced concrete structures against an impact load. In the course of preliminary tests, fundamental experimental considerations were made in order to approach the topic of the strengthening of reinforced concrete plates against an impact load. The results of these preliminary tests were taken into account for further considerations. In order to efficiently deal with the overall problem, the extensive complex of topics was separated. For this purpose, investigations of the strengthening layers were carried out using small-scale test specimens. The aim was to show the performance of available strengthening materials. On the other hand, the reinforced concrete plates to be strengthened were examined under an impact load. By these considerations the acting damage mechanisms should be considered. Subsequently, the collected findings were combined to strengthen reinforced concrete plates against an impact load. For the maximum 2 cm thick strengthening layers carbon concrete as*

menschluss der gesammelten Erkenntnisse im Rahmen der Verstärkung von Stahlbetonplatten gegen eine Impaktbeanspruchung. Für die maximal 2 cm dicken Verstärkungsschichten wurden sowohl Carbonbeton als auch weitere vielversprechende Materialkombinationen verwendet.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden in der Fallturmanlage des Otto-Mohr-Laboratoriums umgesetzt.

Die Versuche wurden durch die Verwendung von numerischen Simulationen mithilfe des FEM- und DEM-Programms LS-Dyna unterstützt, um eine bessere Vorstellung von den komplexen Vorgängen im Bauteil im Moment des Impakts zu erhalten. Die angestellten numerischen Untersuchungen hatten hierbei vorrangig das Ziel, die während der Experimente gesammelten Beobachtungen phänomenologisch abzubilden, um prinzipielle Effekte besser verstehen zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zum einen die grundlegenden experimentellen Beobachtungen aufgearbeitet und systematisiert. Zum anderen wurde anhand dieser gesammelten Daten eine Schädigungsbeschreibung entwickelt, um eine Abschätzung bzw. Bewertung des Schädigungsgrades bzw. Schädigungsmaßes eines impaktbeaufschlagten Bauteils zu ermöglichen. Mithilfe der gesammelten Erkenntnisse wurde ein bestehendes Ingenieurmodell um die Wirkung der Verstärkungsschicht erweitert.



Unterseite eines Probekörpers nach dem Impaktexperiment | *Bottom side of a specimen after the impact experiment* | Photo: Marcus Hering

*well as other promising material combinations were used.*

*The experimental investigations conducted within the framework of this work were carried out in the drop tower facility of the Otto Mohr Laboratory.*

*The experimental investigations were supported by the use of numerical simulations using the FEM and DEM program LS-Dyna to get a better understanding of the complex processes in the structure at the moment of impact. The main goal of these numerical simulations was the phenomenological representation of the observations collected during the experiments in order to be able to examine the principal effects in more detail.*

*In the context of the investigations carried out, the fundamental experimental observations were processed and systematized. Furthermore, a damage characterization was developed on the basis of these collected data in order to enable an estimation or evaluation of the degree of damage of an impacted structural component. With the help of the collected knowledge, an existing engineering model was extended by the effect of the strengthening layer.*

#### ► Gutachter | *Experts*

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
 Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich, TU Berlin  
 Dr.-Ing. Frank Jesse, Hentschke Bau GmbH, Bautzen



Dipl.-Ing. Alaleh Shenhi (Mitte) verteidigte im September 2020 erfolgreich ihre Dissertation und darf sich nun Dr.-Ing. nennen. | Dipl.-Ing. Alaleh Shenhi's (in the middle) successful defence was in september 2020. | Photo: Stefan Gröschel

## Alaleh Shenhi

# MODELLIERUNG VON ZEMENT- GEBUNDENEN KOMPOSITMATERIALIEN MIT VERFESTIGUNG (SHCC)

## MODELING OF STRAIN-HARDENING CEMENT-BASED COMPOSITES (SHCC)

Heutzutage ist die Zugabe eines kleinen Volumens kurzer Fasern eine bekannte Strategie, um neben der Optimierung der Rissöffnung die Duktilität und Zähigkeit von zementbasierten Matrizen zu erhöhen. Verfestigende zementbasierte Verbundwerkstoffe (SHCC) sind eine besondere Klasse von faserverstärkten Betonen (FRC), die kontrollierte Mehrfachrisse entwickeln können, während sie inkrementellen Zugbelastungen ausgesetzt sind. Die korrekte Auslegung der Zusammensetzung, insbesondere hinsichtlich der Faser- und Verbundeigenschaften, folgt jedoch immer noch einem Trial-and-Error-Ansatz. In dieser Arbeit wird ein numerisches Modell zur Simulation von SHCC auf Meso-Skala-Ebene vorgestellt. Dieses Modell basiert auf der Finite-Elemente-Methode und erlaubt nicht-lineares Verhalten für Zementmatrix, Faserma-

*Nowadays, the addition of a small volume of short fibers is a well-known strategy to increase the ductility and toughness of cementitious matrices besides optimization of the crack opening. Strain-hardening cement-based composites (SHCCs) is a particular class of fiber-reinforced concretes (FRCC) that can develop controlled multiple cracks while subjected to incremental tensile loading conditions. However, a proper composition design, especially concerning fiber and bond properties, still follows a trial and error approach.*

*This work presents a numerical model to simulate SHCC at the meso-scale level. This model is based on Finite Element Method and allows for nonlinear behavior for cement matrix, fiber material, and bond laws. Extra features are added*

terial und Verbundgesetze. Dem Standard-FE werden zusätzliche Funktionen hinzugefügt, die drei Komplexitäten der Ziel-FRC betreffen, d.h. (1) Weiterentwicklung des Strong Discontinuity Approach (SDA) zur Modellierung der diskreten Rissbildung von Kontinuumelementen auf Elementebene, (2) Diskretisierung einzelner Fasern durch Stabelemente mit unabhängig von Kontinuums-knoten platzierten Stabknoten, (3) Verbindung von SDA-Elementen mit expliziten Fachwerkselementen durch spezielle Verbundelemente.

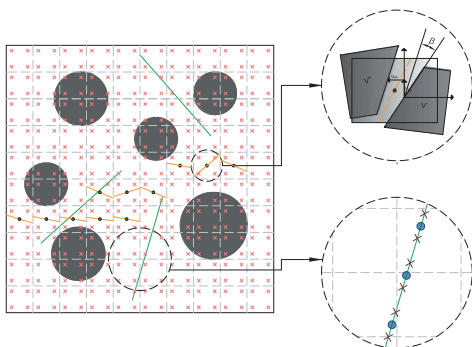
Das neu entwickelte Modell wird mit mehreren einfachen Konfigurationen kalibriert. Das in der Simulation verwendete Verbundgesetz wird aus einem Einzelfaserauszugstest abgeleitet und mit mehreren Analysen kalibriert. Weiterhin werden 2D SHCC-Hantelproben unter Zugbelastung simuliert und eine Reihe von numerischen Fallstudien durchgeführt, um die Qualität, Glaubwürdigkeit und Grenzen des numerischen Modells zu bewerten. Unter Berücksichtigung vereinfachender Annahmen scheint das Simulationsmodell das aufgezählte SHCC-Verhalten auf einem akzeptablen Niveau zu beschreiben.

Diese Forschungsarbeit liefert eine weitere Grundlage für die zielgerichtete Auslegung der FRC-Materialzusammensetzung, um die vorgegebenen Ziele der Materialeigenschaften zu erreichen. Die in dieser Studie vorgestellten Konzepte und Methoden können kurze und dünne Polymerfasern in einer zufälligen Position und Stahlfasern und Strukturen mit langer Bewehrung in regelmäßiger Anordnung simulieren.

to standard FE concerning three complexities of target FRCC, i.e., (1) further development of the Strong Discontinuity Approach (SDA) to model discrete cracking of continuum elements on the element level, (2) discretization of single fibers by truss elements with truss nodes independently placed of continuum nodes, (3) connecting SDA elements to explicit truss elements by particular bond elements.

The newly developed model is calibrated with several simple configurations. The bond law utilized in the simulation is derived from single fiber pullout test and calibrated with several analyses. Furthermore, 2D SHCC dumbbell specimens under tensile loading condition are simulated, and a series of numerical case studies are performed to assess the quality, credibility, and limitations of the numerical model. Taking the effect of random field and other simplifying assumptions into account, the simulation model seems to describe enumerated SHCC behavior at an acceptable level.

This research work provides a further base for the target-oriented design of FRCC material composition to reach the given objectives of material properties. The concepts and methods presented in this study can simulate short and thin polymer fibers in a random position and steel fibers and structures with long reinforcement in a regular arrangement.



FE basiertes Modell für FRCC bestehend aus erweiterten Kontinuumelementen und eingebetteten Stabelementen | FE based model of FRCC consists of extended continuum elements with SDA, and embedded truss elements. | Graphic: Alaleh Shenhi

#### ► Gutachter | Experts

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
 Prof. Dr.-Ing. Marco Di Prisco, Politecnico di Milano  
 Dr.-Ing. Christina Scheffler, IPF e. V., Dresden



Dipl.-Ing. Tilo Senckpiel-Peters empfängt die Glückwünsche von Prof. Ulrich Häußler-Combe. | Dipl.-Ing. Tilo Senckpiel-Peters receives the congratulations from Prof. Ulrich Häußler-Combe. | Photo: André Terpe

## Tilo Senckpiel-Peters

# EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN UND MODELLVERGLEICHE VON CARBON- BETONTRAGWERKEN

## *EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS AND COMPARISONS OF SIMULATION MODELS OF CARBON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES*

Am 26.11.2020 verteidigte Tilo Senckpiel-Peters erfolgreich seine wissenschaftliche Arbeit im Rahmen des Promotionsverfahrens mit dem Thema „Experimentelle Untersuchungen und Modellvergleiche von leichten Tragstrukturen aus Carbonbeton und betongetränkten Vliesstoffen“.

Der innovative Verbundwerkstoff N-TRC (Nonwoven-Textile Reinforced Concrete) bestehend aus Carbonbeton (CRC – Carbon Reinforced Concrete) und betongetränktem Nadelvliesstoff (CSN – Concrete Soaked Nonwovens) ist in Form von Material- und Bauteilversuchen getestet worden. Nach der Ermittlung des eindimensionalen Druck- und Zugtragverhal-

*On 26.11.2020, Tilo Senckpiel-Peters successfully defended his PhD thesis with the topic “Experimental investigations and comparisons of simulation models of lightweight structures made of carbon reinforced concrete and concrete soaked nonwovens”.*

*The innovative composite material N-TRC (nonwoven-textile reinforced concrete) consisting of carbon reinforced concrete (CRC) and concrete soaked nonwovens (CSN) has been tested in the form of material and component tests. After determining the one-dimensional compressive and tensile load-bearing behavior of the material, various design variants of a floor girder have been investigated in 6-point bending tests.*



6-Punkt-Biegeversuch bei einem ungefüllten, 4,5 m langen Deckenelement | 6-point bending test on an unfilled, 4.5 m long ceiling element |  
 Photo: Tilo Senckpiel-Peters

tens des Materials sind verschiedene Konstruktionsvarianten eines Deckenträgers in 6-Punkt-Biegeversuchen untersucht worden. Die Bauweise mit N-TRC ermöglicht dabei die Herstellung dünner Querschnitte mit einer hohen Maßgenauigkeit und Anpassungsfähigkeit an räumliche Flächentragwerke. Des Weiteren weist der betongetränkte Nadelvliesstoff eine sehr feine Rissbildung und außergewöhnlich hohe Duktilität auf.

Die untersuchten Bauteilabmessungen der Deckenträger reichen in der Spannweite von 3 bis 4,3 m und betragen in der Höhe 0,2 m und in der Breite 0,6 m. Die Bauelemente erreichen bei diesen Abmessungen Eigengewichte von 50–100 kg und übertreffen mit der experimentell ermittelten, maximalen Tragfähigkeit dabei die nominellen Gebrauchslasten um ein Vielfaches. Wie bei allen filigranen und leichten, aber sehr tragfähigen Tragstrukturen gehen diese Tragfähigkeiten mit hohen Verformungen einher, denen konstruktiv begegnet werden muss. Neben den experimentell durchgeführten Material- und Großbauteilversuchen sind mitunter relativ aufwändige numerische Simulationsmodelle entwickelt, auf die Bauteilversuche angewendet und untereinander verglichen worden. Dabei werden unter anderem mehrschichtige Carbonbewehrungen und das mehraxiale nichtlineare Spannungs-Dehnungsverhalten von Beton berücksichtigt, um das realitätsnahe Tragverhalten der Bauteile vom ungerissenen Zustand bis zum Zustand der abgeschlossenen Rissbildung abzubilden.

*The construction method with N-TRC allows the production of thin cross-sections with a high dimensional accuracy and adaptability to spatial surface structures. Furthermore, the concrete-impregnated needle punched fabric exhibits very fine cracking and exceptionally high ductility.*

*The investigated component dimensions of the floor beams range from 3 to 4.3 m in span and are 0.2 m in height and 0.6 m in width. At these dimensions, the structural elements achieve dead weights of 50–100 kg and, with the experimentally determined maximum load-bearing capacity, exceed the nominal service loads many times over. As with all filigree and lightweight, but very load-bearing structures, these load-bearing capacities are accompanied by high deformations, which must be counteracted by design. In addition to the material and large component tests carried out experimentally, some relatively complex numerical simulation models have been developed, applied to the component tests and compared with each other. Among other things, multilayer carbon reinforcement and the multi-axial nonlinear stress-strain behavior of concrete are taken into account in order to represent the realistic load-bearing behavior of the components from the uncracked state to the state of completed cracking.*

► **Gutachter | Experts**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
 Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graupner, TU Darmstadt  
 Dr.-Ing. Frank Jesse, Hentschke Bau GmbH, Bautzen



Dipl.-Ing. Alexander Schumann verteidigte Ende November 2020 erfolgreich seine Dissertation. | Dipl.-Ing. Alexander Schumann successfully defended his dissertation at the end of November 2020. | Photo: André Terpe

## Alexander Schumann

# EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DES VERBUNDVERHALTENS VON CARBON- STÄBEN IN BETONMATRICES

## *EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE COMPOSITE BEHAVIOUR OF CARBON RODS IN CONCRETE MATRICES*

Am 30.11.2020 verteidigte Alexander Schumann erfolgreich seine wissenschaftliche Arbeit im Rahmen des Promotionsverfahrens mit dem Thema „Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices“.

Zur Beschreibung des Tragverhaltens von FVK-bewehrten Bauteilen ist die Kenntnis über das Verbundverhalten zwischen FVK-Bewehrung und Beton essentiell, um eine Verwendung in der Baubranche finden zu können. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit das Verbundverhalten zwischen verschiedenen Carbonstäben und einem ausgewählten hochfesten Beton weitreichend untersucht, um neue Kenntnisse über die in Deutschland und auch international noch relativ unerforschte

*On 30.11.2020, Alexander Schumann successfully defended his scientific thesis within the framework of the doctoral procedure with the topic “Experimental investigations of the bond behaviour of carbon rods in concrete matrices”.*

*To describe the load-bearing behaviour of FRP-reinforced components, knowledge of the composite behaviour between FRP reinforcement and concrete is essential. Without this knowhow, it is not possible to use it in the construction industry. For this reason, the bond behaviour between different carbon rods and a selected high-strength concrete was extensively investigated within the scope of this work in order to be able to achieve new knowledge about the topic, which is still relatively unexplored in Germany and also internationally. Based on*



Thematik erzielen zu können. Aufbauend auf der Beschreibung des Wissenstands zum Verbundverhalten von Stahlbeton, zu FVK-Bauteilen im Allgemeinen und zum Verbundverhalten von FVK-bewehrten Bauteilen, wurden eine Vielzahl an experimentellen Verbundversuchen durchgeführt. Zu Beginn wurden in einer ersten Versuchsserie verschiedene Carbonstäbe mit unterschiedlichen Oberflächenprofilierungen und Herstellungsmethoden im Verbundversuch miteinander verglichen. Mit Hilfe der Voruntersuchungen konnte eine Stabvariante als Vorzugsvariante für weitergehende Betrachtungen ausgewählt werden. Anschließend wurde der zuvor als Referenzstab definierte Carbonstab experimentell umfangreich untersucht sowie erste analytische Modelle aufgestellt.

Zusätzlich zu den Auszugversuchen wurde die Spaltneigung des Carbonstabes mit Hilfe von verschiedenen Dehnkörper- und Endverankerungsversuchen in Zusammenhang mit dem hochfesten Beton erforscht. Im Zuge dessen konnte festgestellt werden, dass der Referenzcarbonstab aufgrund des guten Verbundverhaltens zwischen Carbonstab und dem hochfesten Beton bei Probekörpern mit realen Betondeckungen eine zum Teil hohe Spaltneigung aufweist. Durch die Verwendung von verschiedenen Probekörpern mit unterschiedlichen Betondeckungen konnte gezeigt werden, dass der Bewehrungsgrad einen maßgeblichen Einfluss auf die Spaltneigung besitzt. Zum Abschluss der Arbeit wurden ein analytisches Verbundgesetz für den Carbonstab sowie verschiedene Ansätze für die Herleitung eines Bemessungsverbundwertes aufgezeigt.



Zerstörter Carbonstab nach dem Verbundversuch | *Destroyed carbon rod after the composite test* | Photo: Sven Hofmann

*the description of the state of knowledge on the bond behaviour of reinforced concrete, on FRP components in general and on the bond behaviour of FRP-reinforced components, a large number of experimental bond tests were carried out. Initially, in a first series of tests, different carbon rods with different surface profiles and manufacturing methods were compared with each other in bond tests. With the help of the preliminary tests, one rod variant could be selected as the preferred one for further considerations. Subsequently, the carbon rod previously defined as a reference rod was extensively investigated experimentally and initial analytical models were set up.*

*In addition to the pull-out tests, the splitting tendency of the carbon rod reinforcement was investigated with the help of various tensile and end anchorage tests in connection with the high-strength concrete. In the course of this, it could be determined that the reference carbon rod, due to the good bond behaviour between the carbon rod and the high-strength concrete, shows a partly high splitting tendency in test specimens with real concrete covers. By using different specimens with different concrete covers, it could be shown that the degree of reinforcement has a significant influence on the splitting tendency. At the end of the work, an analytical composite law for the carbon rod as well as different approaches for the derivation of a design value for the bond parameter were shown.*

#### ► Gutachter | *Experts*

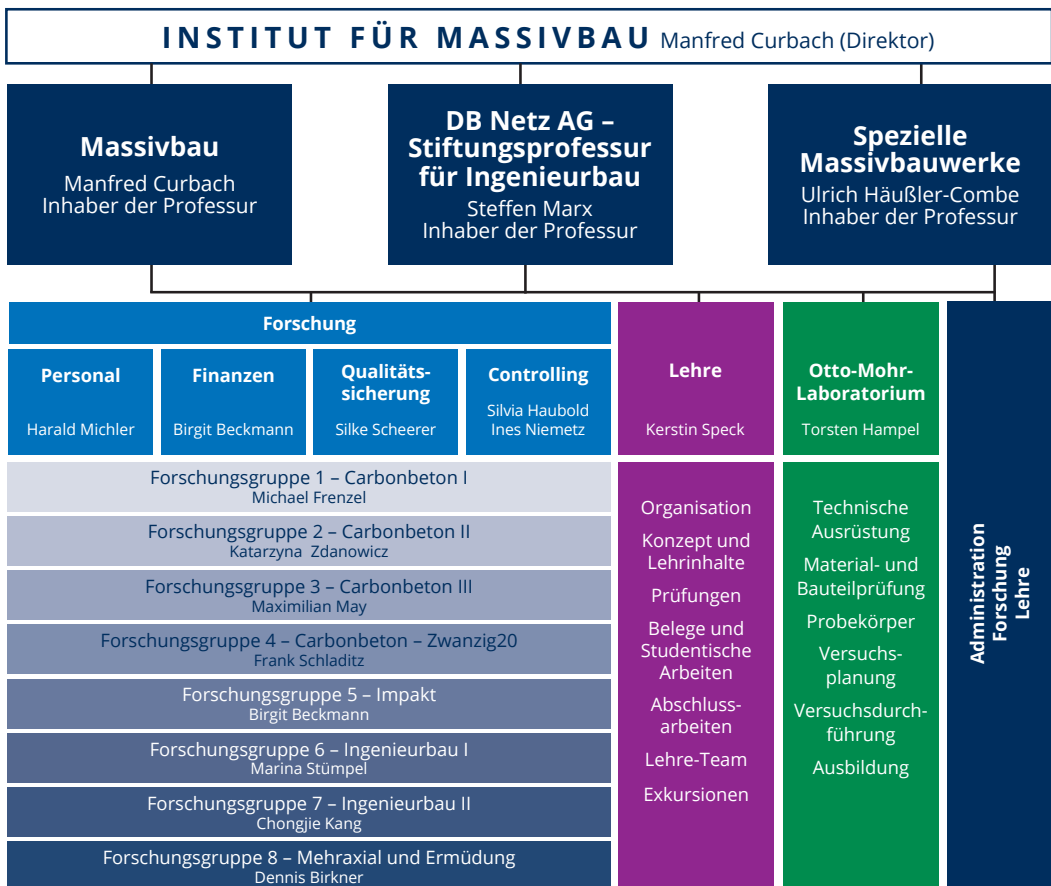
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
 Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich, TU Berlin  
 Prof. B.Sc. Dipl.-Ing. Dr. techn. Benjamin Kromoser,  
 Universität für Bodenkultur, Wien

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN UND FAKTEN

Die Arbeit an dem im Rahmen des Programms Zwanzig20 des BMBF geförderten Großprojekts C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite stellt weiterhin einen zentralen Schwerpunkt unserer Forschungsaktivitäten dar. Kern unserer Forschungsarbeit sind neben der Forschung an textil- bzw. carbonbewehrtem Beton und Untersuchungen zum Leichtbau mit Beton auch Untersuchungen von Beton unter hochdynamischer, mehraxialer oder zyklischer Beanspruchung sowie die Untersuchung von ultrahochfestem Beton (UHPC) – Betonverhalten in all seinen Facetten.

Am Institut für Massivbau waren im Jahr 2020 22 technische Mitarbeiter\*innen und 43 wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen und drei Professoren tätig. Im Jahr 2020 konnte die Stiftungsprofessur für Ingenieurbau unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx eingerichtet werden, die zum 01.02.2020 besetzt wurde. Im Jahr 2020 konnten Drittmittel in Höhe von annähernd 5,156 Mio. EUR eingeworben werden.

## Organisationsstruktur des Instituts



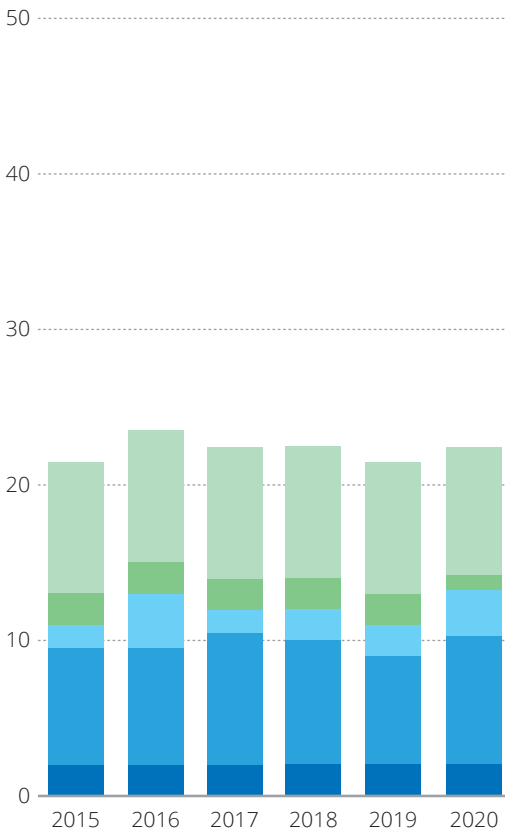
Organigramm des Instituts für Massivbau (Stand 31.12.2020)

## ■ Drittmittelausgaben in den Jahren 2016–2020

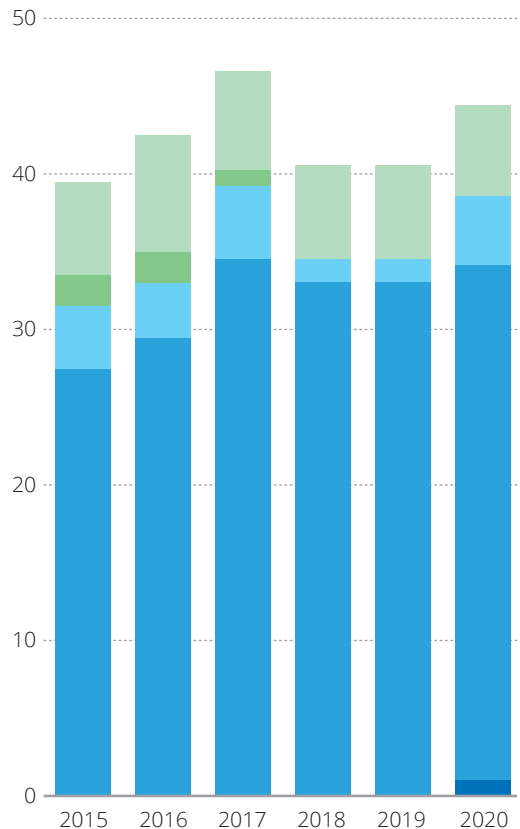
	2016	2017	2018	2019	2020
DFG	647.750 €	756.700 €	544.527 €	508.215 €	1.114.274 €
Bund/Länder	1.663.950 €	2.384.720 €	2.546.094 €	2.622.901 €	3.518.476 €
Stiftungen	98.600 €	57.270 €	-	-	120.888 €
Industrie	45.200 €	294.400 €	164.539 €	209.825 €	402.712 €
<b>Gesamt</b>	<b>2.455.500 €</b>	<b>3.493.090 €</b>	<b>3.255.161 €</b>	<b>3.340.941 €</b>	<b>5.156.350 €</b>

## ■ Personalentwicklung (Stand vom 31.12.2020)

Stellen aus Haushaltsmitteln finanziert



Stellen aus Drittmitteln finanziert



■ Technische Mitarbeiter\*innen Institut  
■ Wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen Institut  
■ Professoren

■ Technische Mitarbeiter\*innen Otto-Mohr-Laboratorium  
■ Wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen Otto-Mohr-Laboratorium

## ■ Forschungsprojekte

Im Folgenden sind die Forschungsprojekte aufgelistet, welche durch das Institut für Massivbau 2020 bearbeitet wurden.

### ► **Koordination, zentrale Aufgaben und Öffentlichkeitsarbeit des SPP 1542**

Förderer: DFG/SPP 1542  
 Laufzeit: 01.07.2011 – 30.09.2014 – Phase 1  
 01.10.2014 – 31.12.2021 – Phase 2

### ► **Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile**

Förderer: DFG/SPP 1542  
 Laufzeit: 01.07.2011 – 30.09.2014 – Phase 1  
 01.10.2014 – 30.06.2020 – Phase 2

### ► **Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Flüssigkeitsbehälter (Flugzeugtanks)**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: GRS  
 Laufzeit: 01.07.2012 – 31.12.2014 – Phase 1A  
 01.08.2014 – 31.07.2016 – Phase 1B  
 01.04.2017 – 31.06.2020 – Phase 1C

### ► **Verbund zwischen Beton und Bewehrungsstahl bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: GRS  
 Laufzeit: 01.10.2014 – 31.12.2017 – Phase 1  
 01.05.2018 – 30.04.2022 – Phase 2

### ► **Willy Gehler (1876–1953) – Spitzenforschung, politische Selbstmobilisierung und historische Rezeption eines bedeutenden Bauingenieurs und Hochschullehrers im „Jahrhundert der Extreme“**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.11.2014 – 31.10.2017 – Phase 1  
 01.11.2018 – 30.09.2022 – Phase 2

### ► **C3-S2: Strategiefortschreibung und konzeptionelle Innovationsförderung von Carbon Concrete Composite – C<sup>3</sup>**

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.07.2015 – 31.03.2021

### ► **Experimentelle Untersuchungen des Tragverhaltens von Textilbeton unter einaxialer Druckbeanspruchung**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.09.2015 – 31.05.2018 – Phase 1  
 01.03.2019 – 31.05.2023 – Phase 2

► **C3-V1.2: Nachweis- und Prüfkonzepte für Normen und Zulassungen**

TP C3-V1.2-I-a: Erstellung und Überprüfung von Sicherheits- und Bemessungskonzepten für Carbonbeton zur Erstellung eines normativen Regelwerkes

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.01.2016 – 31.12.2020

► **Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung**

TP: Verbund unter Zugschwellbeanspruchung

Förderer: BMWi/WinConFat  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.11.2016 – 28.02.2021

► **Experimentell gestützte Modellierung von Versagensmechanismen hochfester Betone unter multiaxialer Beanspruchung – MABET**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.04.2017 – 31.05.2021

► **C3-E-I: Qualitätssicherung Carbonbeton**

TP: C3-E-I-a: Entwicklung einer prozessintegrierten Qualitätssicherung zur Fertigung von Carbonbeton

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 30.06.2020

► **C3-V2.3: Brandverhalten von Carbonbeton**

TP: C3-V2.3-I-a: Materialverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 30.09.2020

► **C3-V2.7: Erstellung von Gesamtkonzepten für die nachträgliche Bauteilverstärkung mit Carbonbeton**

TP: C3-V2.7-I-a: Bemessungsmodelle und Materialspezifikation

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 31.10.2020

► **A5/I: Verstärkung von flächigen Massivbauelementen gegen Impact auf der impaktabgewandten Seite**

Förderer: DFG/GRK 2250  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 30.04.2020

► **A6/I: Verstärkung von flächigen Massivbauelementen gegen Impact auf der impaktzugewandten Seite**

Förderer: DFG/GRK 2250  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 30.04.2020

► **B2/I: Modellierung des Bewehrung-Matrix-Verbundes und des mechanischen Verhaltens von Verstärkungskompositen bei kurzzeitdynamischen Einwirkungen**

Förderer: DFG/GRK 2250  
 Laufzeit: 01.05.2017 – 30.04.2020

► **C3-V2.1: Dauerstandverhalten von Carbonbeton**

TP: C3-V2.1-I-a: Ermüdungsverhalten von Carbonbeton sowie carbonbetonverstärkte Bauteile unter statischer und zyklischer Dauerlast

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.09.2017 – 30.06.2020

► **C3-V3.1: Ergebnishaushaus des C<sup>3</sup>-Projektes – CUBE**

TP C3-V3.1-I: Weiterentwicklung, Untersuchung und Nachweisführung von Bauteilen und Tragwerken aus Carbonbeton sowie wissenschaftliche Begleitung von Entwurfs-, Konstruktions- und Bauüberwachungsprozessen im Carbonbetonbau

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.09.2017 – 31.12.2021

► **Einfluss lastinduzierter Temperaturfelder auf das Ermüdungsverhalten von UHPC bei Druckschwellbelastung**

Förderer: DFG/SPP 2020  
 Laufzeit: 01.09.2017 – 31.08.2020

► **Untersuchung des Einflusses von Porenwasser auf die Wellenausbreitung in Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: GRS  
 Laufzeit: 01.09.2017 – 30.11.2020

► **Simulation des Betonbruchverhaltens mit diskreten Elementen**

Förderer: Institut für Massivbau, TU Dresden  
 Laufzeit: seit 01.11.2017 fortlaufend

► **Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke**

Förderer: DEGES  
 Laufzeit: 01.02.2018 – 31.12.2020

► **C3-V4.6: Energiespeichernder Carbonbeton (ENERTON)**

TP C3-V4.6-II: Konstruktionskonzept eines funktionsintegrierten Bauelements

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.04.2018 – 28.02.2021

► **C3-V4.19: Carbonbewehrte Parkhausdeckenplatten**

TP C3-V4.19-III: Untersuchungen zum Verbundverhalten und der Endverankerung von Carbonbewehrungen

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.04.2018 – 31.01.2021

► **C3-V3.4: Mechanische Verankerung**

TP C3-V3.4-I: Untersuchungen zum Verbundverhalten mit mechanisch wirkenden Bewehrungsstrukturen

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.04.2018 – 31.12.2020

► **Bausystem 2.0 für Carbonbeton – Bezahlbare Bauen durch eine digitalisierte und automatisierte Wertschöpfungskette**

Förderer: ESF/Freistaat Sachsen  
 Laufzeit: 01.05.2018 – 30.04.2021

► **Modellierung von Stahlfaserbeton-Verbundwerkstoffen unter hohen Belastungsraten**

Förderer: Ministry of Higher Education and Scientific Research, Sudan  
 Laufzeit: 01.08.2018 – 31.12.2020

► **Profil-Carbonrovings – neuartige Carbonfaserstränge für eine optimierte Betonbewehrung**

Förderer: Institut für Massivbau, TU Dresden  
 Laufzeit: seit 01.08.2018 fortlaufend

► **Methoden zur Zustandsanalyse von WEA** (eingegliedert in WinConFat)

Förderer: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein (DBV)  
 Laufzeit: 01.09.2018 – 31.12.2020

► **Thermisch aktivierte Verbindungen im modularen Bauen (TAVIMBA)**

TP 4: Auslegung der Verbindungen gemäß bautechnischer Anforderungen

Förderer: BMBF/smart<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Zeitraum: 01.09.2018 – 31.08.2021

► **Digitale Instandhaltung von Eisenbahnbrücken (DiMaRB)**

Förderer: BMVI/mFUND und WIK-Begleitforschung  
 Projektträger: TÜV Rheinland Consulting  
 Laufzeit: 01.09.2018 – 28.02.2022

► **C3-V4.17: Automatisiertes C<sup>3</sup>-Doppelwandsystem**

TP 3: Prüfkonzeptentwicklung für und Kennwertermittlung von Doppelwandsystemen

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.11.2018 – 31.03.2021

► **Entwicklung einer Verbindungstechnologie für Brettsperrholz-Wandkonstruktionen mit hohem Schubwiderstand**

Förderer: BBSR/Zukunft Bau  
 Laufzeit: 15.12.2018 – 15.06.2021

► **C3-V2.5A: Beanspruchungsgerechte Carbonbewehrungsstäbe für einen wirtschaftlichen Einsatz im Bauwesen**

TP C3-V2.5A-I-b: Numerische Simulation des Verbundverhaltens zwischen Carbonstrukturen und Beton

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.01.2019 – 28.02.2021

► **C3-L6: Bemessung und bauliche Durchbildung**

TP C3-L6-II: Entwurf und Bemessung von Carbonbetonbauteilen mit Stabwerkmodellen und für Torsionsbeanspruchungen

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.01.2019 – 31.03.2021

► **Experimentelle Ermüdungsuntersuchungen an Schienen als Grundlage zur Ermittlung erhöhter zulässiger Schienenspannungen**

Förderer: DB Netz AG  
 Laufzeit: 01.01.2019 – 30.06.2021

► **C3-L9: Regelwerke**

TP C3-L9-II: Zusammenführung und Erstellung von Sicherheits- und Bemessungskonzepten für Carbonbeton zur Erstellung eines normativen Regelwerkes

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.05.2019 – 31.12.2021

► **Textilbewehrter Oberbeton als Basis für eine fugenlose Oberfläche von Betonfahrbahnen (TOBFOB)**

Förderer: BAST  
 Laufzeit: 01.05.2019 – 31.03.2021

► **C3-Invest: Carbonbetontechnikum Deutschland**

TP I: Prüflabor: Anpassung bestehender technischer Anlagen (Hydraulikanlage)

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.05.2019 – 31.12.2021

► **Entwicklung neuartiger praxistauglicher Verankerungs- und Übergreifungslösungen von Bewehrung aus Faserverbundkunststoff**

Förderer: BBSR/Zukunft Bau  
 Laufzeit: 15.05.2019 – 01.12.2021



► **Entwicklung einer Maschine für die Herstellung von Carbonstabmatten**

TP: Entwicklung von Bewehrungsmatten aus Carbonstäben

Förderer: BMWi  
 Projektträger: AiF/ZIM  
 Laufzeit: 01.06.2019 – 31.08.2021

► **Entwicklung der technisch-technologischen Lösung zur Dimensionierung und Herstellung von Textilbetonelementen für modular und formflexibel gestaltbare portable Großbehälter (TextonSilo)**

TP: Materialentwicklung und -prüfung von Fertigteilen aus Textilbeton für den Bau von Großbehältern

Förderer: BMWi  
 Projektträger: AiF  
 Laufzeit: 30.06.2019 – 31.03.2021

► **Einsatz von Carbonbeton in Syrien**

Förderer: Alexander von Humboldt Stiftung  
 Laufzeit: 01.07.2019 – 30.09.2021

► **Numerische und experimentelle Untersuchungen zu den Spannungsumlagerungen von ermüdungsbeanspruchten Betonbauteilen im Very-High-Cycle-Fatigue-Bereich**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.09.2019 – 28.02.2022

► **Dynamische Spallations- und Spaltzugversuche im Split-Hopkinson-Bar**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: GRS  
 Laufzeit: 01.09.2019 – 30.09.2020

► **Druckgehäuse aus ultrahochfestem Beton für die Meerestechnik (DeepCsolution)**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: PTJ/Maritimes Forschungsprogramm  
 Laufzeit: 01.12.2019 – 30.11.2022

► **ResoWind: Resonanzbasierte Prüfmethode für kosten- und zeitoptimierte Lebensdaueruntersuchungen an Tragstrukturelementen von Windenergieanlagen**

ABT.Reso.TUD: Entwicklung und Optimierung resonanzbasierter Prüfmethode für axial- und biegebeanspruchte Tragstrukturelemente

Förderer: BMWi/Resowind  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.12.2019 – 31.05.2022

► **Fahrbahnwannen auf Gewölbebrücken**

Förderer: DB Netz AG  
 Laufzeit: 01.01.2020 – 31.12.2022

► **Konzeptphase Spannungsbasierte Bemessung**

Förderer: Stiftung Bauwesen  
 Laufzeit: seit 01.01.2020

► **C3-I2: Anlage zur Erforschung der automatisierten Fertigung von Carbonbetonbauteilen im Werksumfeld**

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.03.2020 – 30.06.2021

► **Untersuchung der Rissbreitenentwicklung von Stahlbeton unter Langzeitbelastung anhand lokaler Verbundbeziehungen**

Förderer: BMWi  
 Projektträger: GRS  
 Laufzeit: 01.03.2020 – 28.02.2023

► **Ermüdungssicherheit HPC**

Förderer: Max Bögl  
 Laufzeit: 01.04.2020 – 31.03.2021

► **A5/II: Verstärkung von flächigen, bügelbewehrten Massivbauelementen gegen Impact auf der impactabgewandten Seite**

Förderer: DFG/GRK 2250  
 Laufzeit: 01.05.2020 – 30.04.2023

► **A6/II: Charakterisierung von mineralisch gebundenen Kompositen als Dämpfungsschichten für die Impactverstärkung flächiger Massivbauelemente**

Förderer: DFG/GRK 2250  
 Laufzeit: 01.05.2020 – 30.04.2023

► **C01: Auflösung kompakter Bauteile mittels sich durchdringender, lastabtragender schalenförmiger Strukturen**

Förderer: DFG/SFB/TRR 280  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

► **C04: Stabilität und Quasiduktilität von dünnwandigen Carbonbetonbauteilen**

Förderer: DFG/SFB/TRR 280  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

► **Ö: Vision, Assoziation, Kommunikation für nachhaltige Bauweisen der Zukunft**

Förderer: DFG/SFB/TRR 280  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

► **Z: Zentrale Aufgaben des SFB/TRR**

Förderer: DFG/SFB/TRR 280  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

► **Einfluss der Beanspruchungsgeschwindigkeit und der Belastungsfrequenz auf den**

## **Ermüdungswiderstand von Beton**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 31.03.2023

### ▶ **KI-unterstütztes Schallemissionsmonitoring zur automatischen Schadenserkenkung in Tragstrukturen von Windenergieanlagen**

Förderer: BMWi/KISWind  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 30.06.2023

### ▶ **Wissenschaftliche Begleitung und Beratung zur Minimierung der Anzahl erforderlichen Schienenauszüge**

Förderer: DB Netz AG  
 Laufzeit: 01.07.2020 – 31.12.2022

### ▶ **Konzeptphase Rubin ISC**

Förderer: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.09.2020 – 31.03.2021

### ▶ **Konzeptphase WIR RB-KRF-C-b**

Förderer: BMBF/C<sup>3</sup>  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.09.2020 – 31.05.2021

### ▶ **Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz**

Förderer: DFG/SPP 2255  
 Laufzeit: 01.10.2020 – 30.09.2023

### ▶ **High-temperature protective hybrid impregnation and coating for carbon reinforcement in concrete structures**

Förderer: DFG  
 Laufzeit: 01.10.2020 – 30.09.2023

### ▶ **Symbiose zweier Gegensätze – Transfer von innovativen Entwurfs- und Bewehrungskonzepten (CARBCO-Mesh) aus dem Leichtbau in den Betonbau**

Förderer: BMWi/TTP-LB  
 Projektträger: FZ Jülich GmbH  
 Laufzeit: 01.11.2020 – 31.10.2023

## ■ Ausgewählte Publikationen

Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F.; Schlaich, M.; Sobek, W.: Betoninnovationen – Gradienten-, Infralicht-, Textil- und Carbonbeton. In: Bundesingenieurkammer (Hrsg.): Ingenieurbaukunst 2020, Berlin: Ernst & Sohn, 2020, S. 172-177

Deutscher, M.; Tran, N. L.; Scheerer, S.: Experimental investigations on temperature generation and release of ultra-high performance concrete during fatigue tests. *Applied Sciences* 10 (2020) 17, 5845, 17 S. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10175845>

Häussler-Combe, U.; Shehni, A.; Chihadeh, A.: Finite element modeling of fiber reinforced cement composites using strong discontinuity approach with explicit representation of fibers. *Int. Journal of Solids and Structures* 200-201 (2020), S. 213-230 – DOI: [10.1016/j.ijsolstr.2020.04.036](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2020.04.036)

Häußler-Combe, U.; Weselek, J.: Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 3, S. 209-217 – DOI: [10.1002/best.201900047](https://doi.org/10.1002/best.201900047)

Hering, M.; Bracklow, F.; Kühn, T.; Curbach, M.: Impact experiments with reinforced concrete plates of different thicknesses. *Structural Concrete* 21 (2020) 2, S. 587-598 – DOI: [10.1002/suco.201900195](https://doi.org/10.1002/suco.201900195)

Hering, M.; Bracklow, F.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Reinforced Concrete Plates under Impact Load – Damage Quantification. *Materials, Special Issue „Mineral-Bonded Composites for Enhanced Structural Impact Safety“* 13 (2020) 20, 4554, 13S. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13204554>

Kang, C.; Wenner, M.; Marx, S.: Background investigation on the permissible additional rail stresses due to track/bridge interaction. *Engineering Structures* (2020) 12 S. – DOI: [doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111505](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111505)

Mosig, O.; Curbach, M.: The crack propagation velocity as a reason for the strain rate effect of concrete – An analytical model. *civil engineering design*, first publ. online: 12.08.2020 – DOI: [10.1002/cend.202000018](https://doi.org/10.1002/cend.202000018)

Schumann, A.; May, M.; Schladitz, F.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Carbonstäbe im Bauwesen; Teil 2: Verbundverhalten – Verbundversuche an unterschiedlichen Carbonstäben. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 12, S. 962-971 – DOI: [10.1002/best.202000047](https://doi.org/10.1002/best.202000047)

Wendler, J.; Hahn, L.; Farwig, K.; Nocke, A.; Scheerer, S.; Curbach, M.; Cherif, Ch.: Entwicklung eines neuartigen Prüfverfahrens zur Untersuchung zugmechanischer Kennwerte von Fasersträngen für textile Bewehrungsstrukturen. *Bauingenieur* 95 (2020) 9, S. 325-334

Speck, K.; Rittner, S.; Bracklow, F.; Ewertowski, M.; Curbach, M.; Cherif, C.: Loop-shaped elements for anchoring carbon reinforcement in concrete. *civil engineering design* 2 (2020) 4 S. 104-113 – DOI: [10.1002/cend.202000014](https://doi.org/10.1002/cend.202000014)

Wagner, J.; Curbach, M.: Experimental Characterisation of Bond Fatigue of CRC. *civil engineering design* 2 (2020) 5-6, S. 169-176 – DOI: [10.1002/cend.202000019](https://doi.org/10.1002/cend.202000019)

Wedel, F.; Marx, S.: Prognose von Messdaten beim Bauwerksmonitoring mithilfe von Machine Learning. *Bautechnik* 97 (2020) 12, S. 836-845 – DOI: [10.1002/bate.202000073](https://doi.org/10.1002/bate.202000073)

Zdanowicz, K.; Schmidt, B.; Hansen, M.; Marx, S.: Biege- und Verbundverhalten von chemisch vorgespannten textiltbewehrten Betonelementen. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 12, S. 972-979 – DOI: [10.1002/best.202000039](https://doi.org/10.1002/best.202000039)

## ■ Leistungen in der Lehre

Lehrveranstaltungen im Wintersemester 2019/2020					
Veranstaltung	Art	Sem.	Vortragende/Betreuer	SWS	Studiengang
Stahlbetonbau	V/Ü	5.	Speck, Deutscher	1/1	BIW
Mauerwerksbau	V	5.	Häußler-Combe	1	BIW
Entwurf von Massivbauwerken	V	7.	Curbach, Scheerer	2	BIW
Verstärken von Massivbauwerken	V	7.	Müller	2	BIW
Massivbrückenbau	V	7.	Curbach, Steinbock	2	BIW
Schrägbelbrücken	V	7.	Svensson	1	BIW
Nachhaltige Tragwerksplanung	V	7.	Speck	1	BIW, EW
Innovation Massivbrückenbau – Faszination der Vielfalt	V	–	Curbach	0,13	Studium generale
Lehrveranstaltungen im Sommersemester 2020					
Stahlbetonbau	V	4.	Speck	2	BIW
Stahlbetonbau	V/Ü	6.	Speck, Deutscher	2/2	BIW
Stahlbetonkonstruktionslehre	V/Ü	6.	Häußler-Combe, Baumgärtel	2/1	BIW
Entwurf von Massivbauwerken	V/Ü	8.	Scheerer, Betz, Hering, Koschemann, Michler, Speck	1/3	BIW
Verstärken von Massivbauwerken	Ü	8.	Marx, Betz	1,5	BIW
Mess- und Versuchstechnik	V/Ü	8.	Hampel, Hering	1/0,5	BIW
Schrägbelbrücken	V	8.	Svensson	1	BIW
Spezialbauwerke des Wasserbaus	V	8.	Häußler-Combe	1	BIW

**Lehrveranstaltungen im Sommersemester 2020**

Veranstaltung	Art	Sem.	Vortragende/Betreuer	SWS	Studiengang
<i>Design of Concrete Structures</i>	VÜ	2.	Garibaldi, Vakaliuk	2/1	ACCESS
<i>Computational Methods for Reinforced Concrete Structures</i>	VÜ	2.	Häußler-Combe, Vakaliuk	2/1	ACCESS
<i>Cable stayed bridges</i>	VÜ	2.	Svensson, Garibaldi	2/1	ACCESS

**Studienjahr | Academic year**

	11/12	12/13	13/14	14/15	15/16	16/17	17/18	18/19	19/20
Projektarbeiten	7	11	17	22	13	12	24	20	12
<i>Project Works</i>	7	14	11	16	7	17	10	2	2
Bachelorarbeiten				1				-	1
Diplomarbeiten	9	11	19	17	26	15	10	28	17
<i>Master's Theses</i>	1	5	12	10	15	9	19	5	3

## ■ Wissenschaftlicher Nachwuchs

### Promotionen am Institut 2020

#### Tino Kühn

Meso- und makroskopische Modellierung von Beton

#### Marcus Hering

Impaktverstärkung mit mineralischen Verstärkungsschichten

#### Alaleh Shenhi

*Modeling of strain-hardening cement-based composites (SHCC) entation of fibers*

#### Tilo Senckpiel-Peters

Experimentelle Untersuchungen und Modellvergleiche von leichten Tragstrukturen aus Carbonbeton und betongetränkten Vliesstoffen

#### Alexander Schumann

Experimentelle Untersuchungen des Verbundverhaltens von Carbonstäben in Betonmatrices

**Anzahl der Promotionen als Erstgutachter 2012 2020**

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Promotionen	1	3	4	2	1	3	2	2	5

**Anzahl der Promotionen als Zweit- oder Drittgutachter 2012 2020**

Promotionen	1	1	1	1	1	5	-	-	-
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---

## ■ Austausch und Zusammenarbeit

Der Institutsdirektor und Inhaber des Lehrstuhls für Massivbau, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. **Manfred Curbach**, ist Mitglied in zahlreichen Gremien:

- Head of delegation fib Deutschland
- Convener der fib Task Group 1.6 History of Concrete Structures
- Convener der fib Task Group 2.10 Textile Reinforced Concrete Construction and Design
- Mitglied in ACI, ASCE, DAfStb, IngKammer, PCI, RILEM, VDI, VPI
- Mitglied des Forschungsbeirats des DAfStb
- Mitglied des Arbeitsausschusses „Bemessung und Konstruktion“ des DIN
- Mitglied des wissenschaftlichen Beirats der Zeitschrift „Beton- und Stahlbetonbau“
- Mitglied des Forschungsbeirates der TU Kaiserslautern
- Mitglied der Ständigen Kommission für Forschung und wissenschaftlichen Nachwuchs der Hochschulrektorenkonferenz (HRK)
- Mitglied in der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina
- Ordentliches Mitglied in der Technikwissenschaftlichen Klasse der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig
- Mitglied der Thüringer Programmkommission (TMWWDG)
- Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- Mitglied im Advisory Board von structure – Zeitschrift für Tragwerksplanung und Ingenieurbau
- Mitglied im Editorial Board der Zeitschrift „Civil Engineering Design“
- Mitglied in der acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
- Korrespondierendes Mitglied in der Klasse für Ingenieurwissenschaften der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

Prof. Curbach ist Initiator des Projekts C<sup>3</sup> und Vorstandsvorsitzender des gleichnamigen Vereins.

Der Inhaber des Lehrstuhls für Spezielle Massivbauwerke, Prof. Dr.-Ing. habil. **Ulrich Häußler-Combe**, ist

- Auslandsbeauftragter der Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden,
- Mitglied der Graduiertenkommission der TU Dresden und Mitglied des Promotionsausschusses der Fakultät Bauingenieurwesen,
- Mitglied im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb),
- Mitglied in der German Association for Computational Mechanics (GACM),
- Mitglied in der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik.

Als ausgewiesener Fachmann veröffentlichte er 2014 bei Ernst & Sohn das Fachbuch *Numerical Methods for Reinforced Concrete Structures*. Prof. Häußler-Combe arbeitet eng mit Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum, und Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer, TU München, zusammen.

Prof. Dr.-Ing. **Steffen Marx** ist Inhaber der DB Netz AG – Stiftungsprofessur für Ingenieurbau und

- Mitglied im Fachkollegium 410 der DFG,
- Member of fib Task group “Bridges”,
- Convener of fib WP “High Speed Railway Bridges”,
- Member of fib WP “Integral Bridges”,
- Mitglied des wissenschaftlichen Beirats der Zeitschrift „Bautechnik“,
- Mitglied des Beirats der Bundesstiftung Baukultur,
- Obmann DAfStb UA „Bewertung von Bestandsbauwerken“,
- Mitglied im DAfStb TA Bemessung und Konstruktion,
- Mitglied im CEN/TC 250/SC2/WG1/TG3,
- Mitglied in fib, iabse, DAfStb sowie
- Vorsitzender der Berufungskommission „Pavement Engineering“.



Blick in den Zentralen Lesesaal der Staats- und Universitätsbibliothek Dresden | Foto: Nils Eisfeld

## PUBLIKATIONEN

### ■ Monografien

Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium. 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020, 240 S.

Curbach, M.; Häußler-Combe, U. (Hrsg.): Jahresbericht 2019. Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020

Kühn, T.: Experimentelle Grundlagen für die meso- und makroskopische Modellierung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten - Eine kritische Beurteilung des Dehnrateneffekts. TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2020 (Jahr der Promotionsverteidigung) - URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-706700>

Minar, S.: Analyse des Einflusses von abwasserwirtschaftlichen Herausforderungen auf die Motivation von planungsrelevanten Akteuren zur Nutzung einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. Diss., Universität Leipzig, 2020 - URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:15-qucosa2-373259>

Quast, M.: Betondruckfestigkeit unter zweiaxialer dynamischer Belastung. TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2019 (Jahr der Promotionsverteidigung, erschienen 2020 in Curbach, M. et al. (Hrsg.): Schriftenreihe konstruktiver Ingenieurbau kid, Heft 51, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden) - URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-708844>

Shehni, A.: Modeling of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC): A Finite Element Method Using the Strong Discontinuity Approach (SDA) with Explicit Representation of Fibers. TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2020 (Jahr der Promotionsverteidigung, erschienen 2020 in Curbach, M. et al. (Hrsg.): Schriftenreihe konstruktiver Ingenieurbau kid, Heft 53, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden) - URL: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-741704>

### ■ Ausgewählte Forschungsberichte

Bode, M.; Béltran, R.; Gebauer, D.; Marx, S.: Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke (Überbau West) – Pos. 4: Ermüdung. Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020

Curbach, M.; Breitenbücher, R.; Farwig, K.: Instandsetzung von geschädigten Betonfahrbahndecken mit Carbonbeton – Rissbreitenuntersuchung. Abschlussbericht zum Teilvorhaben V4.12-II im Verbundvorhaben C3-V4.12, Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020



Gebauer, D.; Schacht, G.; Marx, S.: Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke (Überbau West) – Pos. 6: Versuchsbalken Verankerung. Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020

Herbers, M.; Gebauer, D.; Schacht, G.; Marx, S.: Laboruntersuchungen zum Rückbau der Lahntalbrücke (Überbau West) – Pos. 3: Kriechen. Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020

Mosig, O.; Curbach, M.: Dynamische Spallations- und Spaltzugversuche im Split-Hopkinson-Bar. Ergebnisbericht, Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020

## ■ Beiträge in Fachzeitschriften oder Monografien

Batarlar, B.; Hering, M.; Bracklow, F.; Kühn, T.; Beckmann, B.; Curbach, M.: Experimental investigation on reinforced concrete slabs strengthened with carbon textiles under repeated impact loads. *Structural Concrete*, first publ. online: 15.7.2020, 12 S. – DOI: 10.1002/suco.201900319

Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F.; Schlaich, M.; Sobek, W.: Betoninnovationen – Gradienten-, Infraleicht-, Textil- und Carbonbeton. In: Bundesingenieurkammer (Hrsg.): *Ingenieurbaukunst 2020*, Berlin: Ernst & Sohn, 2020, S. 172–177

Deutscher, M.; Tran, N. L.; Scheerer, S.: Experimental investigations on temperature generation and release of ultra-high performance concrete during fatigue tests. *Applied Sciences* 10 (2020) 17, 5845, 17 S. – DOI: <https://doi.org/10.3390/app10175845>

Farwig, K.; Neumann, J.; Schneider, R.; Breitenbücher, R.; Curbach, M.: Instandsetzung von gefügten Betonflächen mit einer dünnen Schicht aus Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 10, S. 768–778 – DOI: 10.1002/best.202000048

Figueiredo, T. C. S.P.; Curosu, I.; Gonzáles, G. L.G.; Hering, M.; Silva, F. de A.; Curbach, M.; Mechtcherine, V.: Mechanical behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) subjected to torsional loading and to combined torsional and axial loading. *Materials and Design*, first publ. online: 01.12.2020, 14 S. – DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109371

Frenzel, M.; Zschau, N.: Fertigteilbauweise mit Carbonbeton – Mock-up “BOX”. *BWI – BetonWerk International* (2020) 5, S. 156–167

Frenzel, M.; Zschau, N.: Precast components with carbon reinforced concrete – “BOX” prototype. *CPI – Concrete Plant International* (2020) 5, S. 146–157

Gebauer, D.; Schmidt, B.; Schacht, G.; Marx, S.: Beurteilung der Festigkeitseigenschaften bestehender Talbrücken aus Spannbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*, first publ. online: 25.11.2020, 13 S. – DOI: 10.1002/best.202000070

Hála, P.; Frydrýn, M.; Máca, P.; Sovják, R.: Comparative study on the crashworthiness of brittle blocks with thin-walled cellular structures. *Thin-Walled Structures* 148 (2020) 106578 – DOI: 10.1016/j.tws.2019.106578

Häussler-Combe, U.; Shehni, A.; Chihadeh, A.: Finite element modeling of fiber reinforced cement composites using strong discontinuity approach with explicit representation of fibers. *Int. Journal of Solids and Structures* 200 (2020), S. 213–230

Häußler-Combe, U.; Weselek, J.: Ermittlung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 3, S. 209–217 – DOI: 10.1002/best.201900047

Hegler, S.; Seiler, P.; Dinkelaker, M.; Schladitz, F.; Plettemeier, D.: Electrical Material Properties of Carbon Reinforced Concrete. *Electronics* 9 (2020) 5, 857, 14 S. – DOI: 10.3390/electronics9050857

Heravi, A.; Mosig, O.; Tawfik, A.; Curbach, M.; Mechtcherine, V.: An Experimental Investigation on the Behavior of Strain Hardening Cement-Based Composites (SHCC) under Impact Compression and Shear Loading. *Materials*, Special Issue “Mineral-Bonded Composites for Enhanced Structural Impact Safety” 13 (2020) 20, 4514, 19 S.

Hering, M.; Bracklow, F.; Kühn, T.; Curbach, M.: Impact experiments with reinforced concrete plates of different thicknesses. *Structural Concrete* 21 (2020) 2, S. 587–598 – DOI: 10.1002/suco.201900195

Hering, M.; Bracklow, F.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Reinforced Concrete Plates under Impact Load – Damage Quantification. *Materials, Special Issue “Mineral-Bonded Composites for Enhanced Structural Impact Safety”* 13 (2020) 20, 4554, 13 S. – DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13204554>

Hering, M.; Kühn, T.; Curbach, M.: Small-scale plate tests with fine concrete in experiment and first simplified simulation. *Structural Concrete*, first publ. online: 23.02.2020 – DOI: 10.1002/suco.201900333

Holz, K.; Curbach, M.: Zugtragverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 3, S. 231–240 – DOI: 10.1002/best.201900037

Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S.: Experimental investigation on rail fatigue resistance of track/bridge interaction. *Engineering Structures* 216 (2020), 13 S. – DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110747

Kang, C.; Schneider, S.; Wenner, M.; Marx, S.: Experimental investigation on the fatigue behaviour of rails in the transverse direction. *Construction and Building Materials* (2020), 14 S. – doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121666

Kang, C.; Wenner, M.; Marx, S.: Background investigation on the permissible additional rail stresses due to track/bridge interaction. *Engineering Structures* (2020) 12 S. – doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111505

Liebold, F.; Heravi, A.; Mosig, O.; Curbach, M.; Mechtcherine, V.; Maas, H.-G.: Crack propagation velocity determination by high-speed camera image sequence processing. *Materials, Special Issue “Mineral-Bonded Composites for Enhanced Structural Impact Safety”* 13 (2020) 19, 4415, 15 S. – DOI: 10.3390/ma13194415

Minar, S.: Motivation zur Umsetzung einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung. *WasserWirtschaft. Technik – Forschung – Praxis* 110 (2020) 10, S. 29–34

Mosig, O.; Curbach, M.: The crack propagation velocity as a reason for the strain rate effect of concrete – An analytical model. *civil engineering design*, first publ. online: 12.08.2020 – DOI: 10.1002/cend.202000018

Mosig, O.; Wellner, S.; Rudolph, J.: Belastungsprüfung im Kaufhaus Görlitz. *Bautechnik* 97 (2020) 1, 57–66 sowie als Zweitabdruck in: *Mauerwerk* 24 (2020) 3, S. 162–171

Müller, E.; Schmidt, A.; Schumann, A.; May, S.; Curbach, M.: Biegeverstärkung mit Carbonbeton – Neue Carbonbewehrung im Anwendungstest. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 10, S. 758–767 – DOI: 10.1002/best.202000012

Nerger, D.; Moosavi, R.; Bracklow, F.; Hering, M.; Kühn, T.; Curbach, M.; Hille, F.; Rogge, A.: Planar tomography and numerical analysis for damage characterization of impact loaded RC plates. *civil engineering design* 2 (2020) 4, S. 114–122 – DOI: 10.1002/cend.202000017

Riegelmann, P.; Schumann, S.; May, S.; Bochmann, J.; Garibaldi, M. P.; Curbach, M.: Müther’s shell structures in Germany – a solution to avoid demolition. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Engineering History and Heritage*, publ. online: 08.09.2020, 2000012, 9 S. – DOI: 10.1680/jenhh.20.00012

Rittner, S.; Speck, K.; Seidel, A.; Ewertowski, M.; Curbach, M.; Cherif, C.: Development of Loop-Shaped Textile Anchoring Reinforcements Based on Multiaxial Warp Knitting Technology. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* 28 (2020) 6, 144, S. 64–71 – DOI: 10.5604/01.3001.0014.3800

Schlüter, D.; Riegelmann, P.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Bauteiloptimierung durch Funktionsintegration. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 8, S. 598–606 – DOI: 10.1002/best.202000027

Schumann, A.; May, M.; Schladitz, F.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Carbonstäbe im Bauwesen; Teil 2: Verbundverhalten – Verbundversuche an unterschiedlichen Carbonstäben. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 12, S. 962–971 – DOI: 10.1002/best.202000047

Seifert, W.; Lieboldt, M.: Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 6, S. 469–478 – DOI: 10.1002/best.201900094

Speck, K.; Rittner, S.; Bracklow, F.; Ewertowski, M.; Curbach, M.; Cherif, C.: Loop-shaped elements for anchoring carbon reinforcement in concrete. *civil engineering design 2* (2020) 4 S. 104–113 – DOI: 10.1002/cend.202000014

Wagner, J.; Curbach, M.: Experimental Characterisation of Bond Fatigue of CRC. *civil engineering design 2* (2020) 5–6, S. 169–176 – DOI: 10.1002/cend.202000019

Wagner, J.; Spelter, A.; Curbach, M.; Hegger, J.: Ermüdungsverhalten von Carbonbeton unter Zugschwellbelastung. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 9, S. 710–719 – DOI: 10.1002/best.201900104

Wendler, J.; Hahn, L.; Farwig, K.; Nocke, A.; Scheerer, S.; Curbach, M.; Cherif, Ch.: Entwicklung eines neuartigen Prüfverfahrens zur Untersuchung zugmechanischer Kennwerte von Fasersträngen für textile Bewehrungsstrukturen. *Bauingenieur* 95 (2020) 9, S. 325–334

Wiemer, H.; Zierold, K.; Panzer, J.; Ihlenfeldt, S.; Curbach, M.; Cherif, Ch.: Datengetriebene Methoden zur Qualitätssicherung für Produkte aus Carbonbeton. *Bauingenieur* 95 (2020) 3, S. 105–113

## ■ Beiträge in Tagungsbänden

Bergmann, S.; May, S.: Shear Strengthening of RC T-Beams with CRC. In: *C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.*; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 (digital), 2020, S. 38–41

Deutscher, M.; Markert, M.; Tran, N. L.; Scheerer, S.: Influence of the compressive strength of concrete on the temperature increase due to cyclic loading. In: Zhao, B.; Lu, X. (Hrsg.): *CONCRETE STRUCTURES FOR RESILIENT SOCIETY – Proc. of the fib Symp.* 2020, 22.–24.11.2020, held online, Shanghai (China), 2020, Langfassung digital, S. 773–780

Hering, M.; Curbach, M.: Strengthening of RC plates with mineral-bonded composite layers for enhanced impact safety. In: Golewski, G. L. (Hrsg.): *Proc. of 10th Int. Conf. on Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures (AMCM2020)*, 21.–23.10.2020 (online), erschienen bei: MATEC Web Conferences 323 (2020), 01015, 10 S. – DOI: 10.1051/mateconf/202032301015

Leicht, L.; Bracklow, F.; Hering, M.; Curbach, M.: Behaviour of reinforcement in drop tower beam tests. In: Golewski, G. L. (Hrsg.): *Proc. of 10th Int. Conf. on Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures (AMCM2020)*, 21.–23.10.2020 (online), erschienen bei: MATEC Web Conferences 323 (2020), 01007, 10 S. – DOI: 10.1051/mateconf/202032301007

May, S.; Schumann, A.; Schütze, E.; Curbach, M.: Querkraftverstärkung aus Carbonbeton unter zyklischer Beanspruchung. In: Foster, F.; Gilbert, R.; Mendis, P.; Al-Mahaidi, R.; Millar, D. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken. 08./09.09.2020 an der Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 643–650

Marx, S.; Köppel, M.; Müller, J.: Historische Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium. 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020, S. 71–80

Nerger, D.; Hille, F.; Moosavi, R.; Grunwald, M.; Redmer, B.; Kühn, T.; Hering, M.; Bracklow, F.: Post-impact evaluation at RC plates with planar tomography and FEM. *Materials Today: Proceedings* 32 (2020) Part 2, S. 236–243 – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.05.671

Nerger, D.; Moosavi, R.; Bracklow, F.; Hering, M.; Kühn, T.; Curbach, M.; Hille, F.; Rogge, A.: Impact damage characterization at RC plates with planar tomography and FEM. In: Papadimitriou, M.; Fragiadakis, M.; Papadimitriou, Chr. (Hrsg.): *Proc. of XI. Int. Conf. on Structural Dynamics (EURODYN)*. 23.–26.11.2020 in Athen (Griechenland, online), erschienen bei: EASD Procedia (2020), S. 2521–2543 – DOI: 10.47964/1120.9206.19097

Schumann, A.; Schladitz, F.; Curbach, M.: Bond behavior of carbon rebars and concrete. In: *C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.*; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 (digital), 2020, S. 102–109

Steinbock, O.; Bösche, T.: Verstärkung von Brücken mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl mit Carbonbeton. In: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 (digital), 2020, S. 30–31 (Zweitabdruck in TUDALIT Magazin (2020) 23, S. 12)

Steinbock, O.; Curbach, M.; Bösche, T.: Ertüchtigung einer Stahlbetonstraßenbrücke mit Carbonbeton. In: Foster, F.; Gilbert, R.; Mendis, P.; Al-Mahaidi, R.; Millar, D. (Hrsg.): Tagungsband zum 4. Brückenkolloquium – Fachtagung für Beurteilung, Planung, Bau, Instandhaltung und Betrieb von Brücken. 08./09.09.2020 an der Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 651–662

Steinbock, O.; Curbach, M.: Entwicklung des Instituts für Massivbau – Lehre und Forschung im Brückenbau an der TU Dresden. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium. 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020, S. 13–23

Steinbock, O.; Riegelmann, P.: Brückenvielfalt in Süddeutschland und den Alpen – Bericht zur Brückenexkursion 2019. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium. 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020, S. 213–224

Triebert, J.; May, M.; Curbach, M.: Corrosion tests for hybrid construction with concrete, metal and carbon. In: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 (digital), 2020, S. 60–69

Wellner, S. (Zusammenstellung): Chronik des Brückenbaus. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium. 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2020, S. 227–236

## ■ Ausgewählte sonstige Beiträge

Curbach, M.: Eine Welt – eine Umwelt. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 2, S. 89–90 (Editorial) – DOI: 10.1002/best.202070203

Curbach, M.; Kranich, S.: Carbonbeton – daraus werden nicht nur Häuser gemacht. Das Haus Online (2020), verfügbar unter <https://www.haus.de/bauen/carbonbeton-cube-dresden> [04.01.2021]

Kranich, S.; Tietze, M.: CUBE – Entwickelt für die Zukunft des Bauens. Neuartige, resiliente und nachhaltige Baumaterialien sichern robuste und widerstandsfähige Bausysteme. Ingenieurwissenschaften 28 (2020) 4, S. 6

Kranich, S.; Schladitz, F.; Tietze, M.: Quantum leap in civil engineering defies climate crisis. Compositi 15 (2020) 56, S. 16/17

Kranich, S.; Schladitz, F.; Tietze, M.: Un salto di qualità nell'ingegneria civile sfida la crisi climatica. Compositi 15 (2020) 56, S. 13–15

Schumann, A.; Schladitz, F.; May, S.; Scheerer, S.: Carbonbeton in der Denkmalsanierung. Denkmalsanierung (2020/2021)

## ■ Ausgewählte Vorträge und Interviews

Faszination für Bau- und Ingenieurwesen gab es schon bei seinen Vorfahren. Nun ermöglicht Manfred Curbach kommenden Generationen nachhaltiges Bauen. Online-Portrait von Manfred Curbach im Rahmen der BMBF-Kampagne #innovationsland Deutschland 2020, 24.11.2020 <https://www.innovationsland-deutschland.de/de/weitsicht-2098.html>

Schladitz, F.: Verstärken von Betonbauteilen mit Textilbeton. Vortrag zur Weiterbildung für Tragwerksplaner 2020 (Online-Seminar), TU Darmstadt, 09.09.2020

Tietze, M.: Ergebnishaushaus des C<sup>3</sup>-Projekts CUBE – Entwicklung der TWIST Schalen, Vortrag im Rahmen der 64. Ulmer Betontage – Session Carbonbeton CU-Bau, 19.02.2020

Tietze, M.: Die Wirtschaftliche Wertschöpfungskette für Carbonbeton, Vortrag im Rahmen der 64. Ulmer Betontage – Session Carbonbeton CU-Bau, 19.02.2020

# DAS TEAM 2020

## Institut für Massivbau

### Professur für Massivbau

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

### Professur für Spezielle Massivbauwerke

Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe

### DB Netz AG – Stiftungsprofessur für Ingenieurbau

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

### Arbeitsgebietsleiter\*innen

Dr.-Ing. Birgit Beckmann (Forschung, Finanzen)

Dr.-Ing. Harald Michler (Forschung, Personal)

Dr.-Ing. Silke Scheerer (Forschung, Qualitätssicherung)

Dr.-Ing. Frank Schladitz (C<sup>3</sup> e. V.)

Dr.-Ing. Kerstin Speck (Lehre)

### Administration

Silvia Haubold (Controlling)

Stefan Gröschel (Öffentlichkeitsarbeit, Presse)

Dajana Musiol (Sekretariat)

Ines Niemetz (Controlling SFB/TRR 280)

Jana Strauch (Sekretariat und Konferenzen)

Matthias Zagermann (Systemadministrator)

### Wissenschaftliche Mitarbeiter\*innen

#### Forschungsgruppe 1: Carbonbeton I

Dipl.-Ing. Michael Frenzel  
(Forschungsgruppensprecher)

Dr.-Ing. Maria Patricia Garibaldi

Dipl.-Ing. Angela Schmidt

Dipl.-Ing. Oliver Steinbock

#### Forschungsgruppe 2: Carbonbeton II

Dipl.-Ing. Juliane Wagner  
(Forschungsgruppensprecherin)

Dipl.-Ing. Peter Betz

Olga Diring M.Sc.

Kai Gebuhr M.Sc.

Iurii Vakaliuk M.Sc.

Katarzyna Zdanowicz M.Sc.

#### Forschungsgruppe 3: Carbonbeton III

Dipl.-Ing. Maximilian May  
(Forschungsgruppensprecher)

Dr.-Ing. Zuhair Amer

Dipl.-Ing. Enrico Baumgärtel

Dipl.-Ing. Karoline Holz

Dipl.-Ing. Dominik Schlüter

#### Forschungsgruppe 4: Carbonbeton Zwanzig20

Dr.-Ing. Frank Schladitz  
(Arbeitsgebietsleiter C<sup>3</sup> und Forschungsgruppensprecher)

Dipl.-Ing. (FH) Maximilian Krämer

Dr.-Ing. Matthias Lieboldt

Dr.-Ing. Stefan Minar

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Matthias Tietze

Chris Gärtner M.A.

Anja Giesder

Sandra Kranich M.A.

Dipl.-Ing. Sandra Zagermann

#### Forschungsgruppe 5: Impact

Dr.-Ing. Birgit Beckmann  
(Forschungsgruppensprecherin)

Dipl.-Ing. (FH) Franz Bracklow

Dr.-Ing. Marcus Hering

Dipl.-Ing. Lena Leicht

M.Eng. Petr Máca Ph.D.

Dipl.-Ing. Oliver Mosig

#### Forschungsgruppe 6: Ingenieurbau I

Marina Stümpel M.Sc.  
(Forschungsgruppensprecherin)

Ammar Siddig Ali Babiker M.Sc.

Jan Hauke Bartels M.Sc.

Raúl Beltrán M.Sc.

Jiafeng Zhou M.Sc.

#### Forschungsgruppe 7: Ingenieurbau II

Chongjie Kang M.Sc.  
(Forschungsgruppensprecher)

Dipl.-Ing. Kristina Farwig

Daniel Gebauer M.Sc.

Max Herbers M.Sc.

Johanna Monka M.Sc.

Conrad Pelka M.Sc.

#### Forschungsgruppe 8: Mehraxialität und Ermüdung

Dennis Birkner M.Sc.  
(Forschungsgruppensprecher)

Dipl.-Ing. Melchior Deutscher

Dipl.-Ing. Marc Koschemann

Clara Schramm M.Sc.

Dr.-Ing. Kerstin Speck

Dipl.-Ing. Ronghua Xu

## Otto-Mohr-Laboratorium

### Leiter

Dr.-Ing. Torsten Hampel

### Stellvertreterin

Dipl.-Ing. Kathrin Dietz

### Sekretariat

Petra Kahle

### Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner

### Technische Mitarbeiter\*innen

Rainer Belger

Thomas Häntzschel

Jens Hohensee

Tino Jänke

Michael Liebe

Maik Patricny

Annett Pöhland

Mario Polke-Schminke

Doreen Sonntag

Andreas Thieme

Heiko Wachtel

Bernd Wehner

## DANK AN UNSERE FÖRDERER



Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH



STAATSBETRIEB IMMOBILIEN- UND BAUMANAGEMENT SIB



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Unterstützt von / Supported by



Alexander von Humboldt Stiftung / Foundation



Bundesministerium für Bildung und Forschung

Gefördert durch:



Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

## STIFTUNG BAUWESEN



# SFB/TRR 280 – KÖNNEN WIR DAS SCHAFFEN?



**YO, WIR SCHAFFEN DAS.**

Foto: Stefan Gröschel | #sftrr280



## Impressum

### Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden  
01062 Dresden

Besucheradresse:  
August-Bebel-Straße 30/30A  
01219 Dresden

Postadresse:  
Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
01062 Dresden

Paketadresse:  
Technische Universität Dresden  
Institut für Massivbau  
Helmholtzstr. 10  
01069 Dresden

Tel. +49 351 463-36568  
Fax +49 351 463-37289

[www.massivbau.tu-dresden.de](http://www.massivbau.tu-dresden.de)

ISBN 978-3-86780-682-4

### Redaktion

Sandra Kranich

### Texte

Zuhair Amer, Raúl Beltrán, Ammar Siddig Ali Babiker, Jan Hauke Bartels, Enrico Baumgärtel, Birgit Beckmann, Peter Betz, Dennis Birkner, Franz Bracklow, Manfred Curbach, Melchior Deutscher, Kristina Farwig, Michael Frenzel, Maria Patricia Garibaldi, Chris Gärtner, Daniel Gebauer, Kai Gebuhr, Stefan Gröschel, Thomas Häntzschel, Max Herbers, Marcus Hering, Chongjie Kang, Karoline Holz, Marc Koschemann, Tino Kühn, Lena Leicht, Matthias Lieboldt, Petr Máca, Maximilian May, Harald Michler, Johanna Monka, Oliver Mosig, Egbert Müller, Conrad Pelka, Silke Scheerer, Dominik Schlüter, Angela Schmidt, Alexander Schumann, Elisabeth Schütze, Clara Schramm, Tilo Senckpiel-Peters, Kerstin Speck, Oliver Steinbock, Matthias Tietze, Iurii Vakaliuk, Juliane Wagner, Sabine Wellner, Rongua Xu, Jiafeng Zhou

Die Kurzfassungen aller studentischer Arbeiten (Projektarbeiten, Bachelorarbeiten, Diplomarbeiten, Dissertationen) wurden von den jeweiligen Studierenden und Doktorand\*innen verfasst.

### Mitarbeit/Korrektur

Theresa Fritzsche, Maria Patricia Garibaldi, Chris Gärtner, Sandra Kranich, Silke Scheerer, Sabine Wellner

### „BLEIBT ZU HAUSE“ Illustration Deckblatt

Mit freundlicher Genehmigung von Mathieu Persan

### Gestaltung/Satz

Stefan Gröschel

### Druck

DZIERZON Druck, Freiberg

ISBN: 978-3-86780-682-4