

30. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM – ERGÄNZUNGSBAND 2021

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

8./9. MÄRZ 2021

WIR GESTALTEN AUTOBAHN



Leonhardt, Andrä und Partner
www.lap-consult.com

GESTALTUNGSHANDBUCH • MUSTERENTWÜRFE • AUSFÜHRUNGSPLANUNG

BAB A3, BW 400c
Foto: Hajo Dietz

© 2021 Technische Universität Dresden
Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Sabine Wellner
Layout: Ulrich van Stipriaan
Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Die 1950 fertiggestellte Gänstorbrücke in Ulm soll 2024 abgebrochen und durch einen Neubau ersetzt werden. (Foto: Dicleli, 2008)

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

SSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-664-0

Das Potential von Carbonbeton für den Brückenbestand – das ist heute schon möglich!

*Dipl.-Ing. Philipp Riegelmann, Dipl.-Ing. Sebastian May, Dr.-Ing. Alexander Schumann
CARBOCON GMBH, Dresden*

1 Einleitung

Die meisten Straßenbrücken im Netz der Bundesfernstraßen in Deutschland wurden im Zeitraum zwischen 1965 und 1985 errichtet [1], [2]. Davon sind knapp 70 % in Spann- und 17 % in Stahlbetonbauweise ausgeführt worden [3]. Während der vergangenen Jahrzehnte jedoch sind die Brücken in Deutschland einer ständig wachsenden Belastung ausgesetzt: durch die Zunahme des Güterverkehrs und der damit einhergehenden hohen dynamischen Beanspruchung weisen Bestandsbauwerke teils erhebliche Tragfähigkeitsdefizite auf [4]. Aufgrund normativer Änderungen durch den heutigen Kenntnisstand besitzen zahlreiche Bauwerke zusätzlich rechnerische Defizite in der Tragfähigkeit, vgl. [5]. So sind bei den älteren Bestandsbrücken vor allem Mängel im Bereich der Querkraft, der Torsionslängsbewehrung, des Gurtanschlusses und der Ermüdung in den Koppelfugen zu nennen [6]. Lassen sich diese Defizite rechnerisch mit alternativen Nachweisformaten [5] nicht beheben, muss das Bestandsbauwerk entweder abgerissen und neu gebaut oder verstärkt werden.

Beim Abriss des Bestandsbauwerks und dem Ersatzneubau entstehen für den Verkehr erhebliche Einschränkungen. So führt der Ersatzneubau im Allgemeinen zu langen Sperrzeiten von Fahrspuren, was wiederum einen signifikanten Einfluss auf die Verkehrsführung und den Verkehrsfluss hat. Darüber hinaus kann es durch den Verkehrsstau an Baustellen zu erheblichen wirtschaftlichen Schäden in den nationalen und internationalen Lieferketten kommen. Zusätzlich zu den wirtschaftlichen und logistischen Auswirkungen eines Ersatzneubaus nehmen heutzutage auch die Aspekte der Nachhaltigkeit bzw. des Ressourcenverbrauchs eine immer stärkere Rolle bei der Beurteilung von Bestandsbauwerken ein. So fallen in Deutschland mit 230 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfällen knapp 55 % des jährlichen Abfallaufkommens im Bauwesen an [7]. Hierzulande wird der gebrochene Recycling-Beton in der Regel nur als Schottermaterial weiterverwendet, die im Beton gebundenen

Ressourcen (Sand, Gestein, Wasser) können für den Neubau nicht erneut genutzt werden. Aktuell werden jährlich allein über 50 Mio. Kubikmeter Transportbeton in Deutschland verbaut [8]. Der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) gibt für 2019 einen Zementverbrauch von knapp 30 Mio. Tonnen an [9]. Die Herstellung einer Tonne Zement ist in Deutschland mit rund 600 kg CO₂-Emission verbunden [9]. Das Bauwesen gilt daher als einer der treibenden Faktoren bei der Klimaerwärmung.

Infolge der Ressourcenverknappung weltweit und der steigenden CO₂-Emissionen ist der Erhalt von Bestandsbauwerken die ökologischste und wirtschaftlichste Alternative. Aus diesem Grund sollte die Verstärkung von Bauwerken im Vergleich zum Abriss und Ersatzneubau, soweit technisch möglich, immer angestrebt werden.

Zur Vermeidung von kostenintensiven, zeitaufwendigen und ressourceninvasiven Neubauten konnte sich in den vergangenen Jahren neben den klassischen Verstärkungsmaßnahmen (u. a. externe Vorspannung, Spritzbeton) die Verstärkung mit Carbonbeton immer mehr am Markt etablieren, insbesondere im Bereich des Hoch- und Wohnungsbaus, aber auch schon vereinzelt im Brückenbau, u. a. [10] bis [17].

In diesem Beitrag wird das hohe Potential des Werkstoffs Carbonbeton speziell für den Brückenbau im Bereich der Verstärkung vorgestellt. Denn mit Hilfe der leistungsfähigen und nicht rostenden Verstärkungsvariante können aufgrund der dünnen Schichtstärken im Vergleich zur konventionellen Spritzbetonverstärkung über 85 % an Ressourcen und über 52 % an CO₂-Emission eingespart werden [18], wodurch auch der Brücken- und Ingenieurbau einen Beitrag zur CO₂-Reduzierung leisten kann. Neben dem Aspekt der Ressourcenersparnis ergeben sich, bedingt durch die hohe Leistungsfähigkeit und der hohen Resistenz der Carbonfasern gegenüber nahezu allen Medien, vielfältige Anwendungsbereiche. Darüber hinaus konnte durch experimentelle Versuche an klein- und großbauteiligen Probekörpern gezeigt werden,

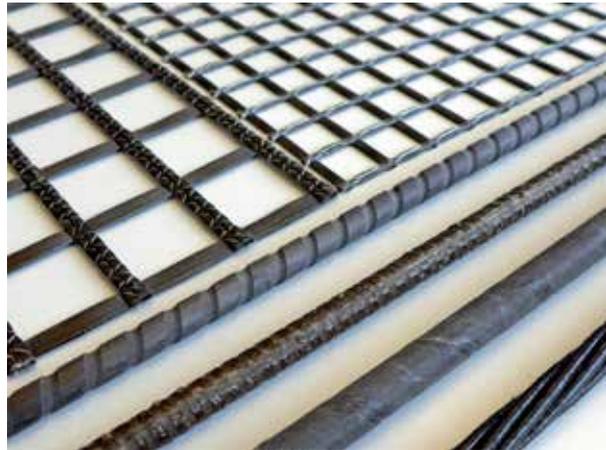


Bild 1 Größenvergleich Carbonbeton – Stahlbeton (links) sowie Carbongelege und -stäbe für die Anwendung in Beton (rechts) Fotos: © Jörg Singer, filmaton (links), © Sandra Kranich, C³ (rechts)

dass die hochfeste Carbonbewehrung nahezu ermüdungsresistent und somit speziell für den Brückenbau prädestiniert ist [19], [20].

2 Der Verbundwerkstoff Carbonbeton

Der Verbundwerkstoff Carbonbeton besteht aus der hochzugfesten und nicht korrodierenden Carbonbewehrung sowie in der Regel aus einem Feinbeton – einem höherfesten Beton mit einem geringen Größtkorn. Durch die Verwendung eines höherfesten Betons kann die hochleistungsfähige Bewehrung bei dünnen Betondeckungen voll ausgenutzt werden. Jedoch kommen heutzutage neben den Feinbetonen auch vermehrt konventionelle DIN-Betone zum Einsatz. Der Werkstoff Carbonbeton findet heutzutage neben dem Verstärkungsbereich auch Anwendung im Neubau, z. B. für Fußgängerbrücken, siehe u. a. [21], [22].

Das Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton ist seit 2014 in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [23] für den Hochbau geregelt. Im Hochbau z. B. können mit Hilfe dieser Zulassung Bestandsdecken bemessen und mit Carbonbeton verstärkt werden. Abhängig von der statisch erforderlichen Lagenzahl der Verstärkung sind Schichtstärken zwischen 10 bis 20 mm üblich. Durch den minimalinvasiven Eingriff werden nur sehr geringe Zusatzlasten infolge von Eigengewicht in den Bestand gebracht, wodurch viele Bestandsbauwerke vor dem Abriss gerettet werden können.

Nachfolgend wird auf die bei der Verstärkung zum Einsatz kommenden Komponenten näher eingegangen.

2.1 Bewehrung

Die verwendeten Bewehrungen beim Carbonbeton, früher auch Textilbeton genannt, wurden in den vergangenen Jahren stetig weiterentwickelt und optimiert. Zu Beginn der Forschungen wurden Gitter aus Glasfasern verwendet, die Zugfestigkeiten im Bereich von 600 bis 1.300 N/mm² aufwiesen [24]. Später kamen vermehrt Carbongitter der früheren Generationen zum Einsatz, die sogar Zugfestigkeiten im Bereich von 2.000 N/mm² erlaubten (vgl. [25]). Bis heute konnte die Leistungsfähigkeit noch einmal wesentlich gesteigert werden, insbesondere durch verbesserte Herstellungstechnologien und bessere Tränkungen. Infolgedessen sind Zugfestigkeiten von über 3.000 N/mm² kein Wunschdenken mehr, u. a. [26].

Zusätzlich zu den verbesserten Zugtragfähigkeiten der Carbongelege konnten die aktuellen Carbongelege auch hinsichtlich des Anwendungsbereiches im Brückenbau optimiert werden. Im Vergleich zu früheren Gelegen kann die heutige Gelegegeneration für Temperaturen von -20 °C bis +80 °C eingesetzt werden, da die neueren Tränkungen Glasübergangstemperaturen von über 100 °C aufweisen [27]. Darüber hinaus weisen die aktuellen Carbongelege eine für den Brückenbau erforderliche Grundrobustheit gegenüber zyklischen Beanspruchungen auf, worauf in den Abschnitten 3 und 4 näher eingegangen wird.

Carbongelege bestehen aus einzelnen Fasersträngen in Längs- (Kettfaden) und Querrichtung (Schussfaden) und sind ähnlich einer herkömmlichen Bewehrungsmatte aufgebaut. Jeder Faserstrang besteht dabei aus mehre-

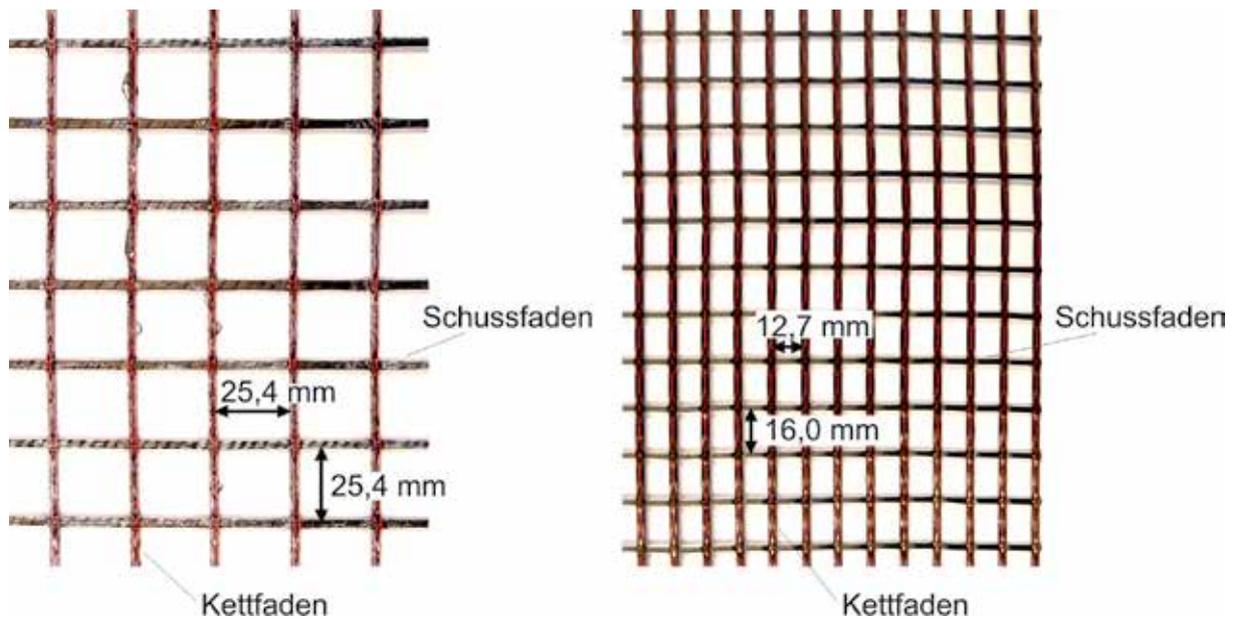


Bild 2 Biaxiales Carbongelege SITgrid 041 für die Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg (links) und einaxiales Carbongelege SITgrid 040 für die Verstärkung des Brückenzuges über die BAB A 648 (rechts)
Fotos: A. Schumann, © CARBOCON

ren Tausend Einzelfilamenten, die mit einer Tränkung kraftschlüssig miteinander verklebt sind. Gängige Tränkungsmaterialien sind zurzeit auf Epoxidharz- oder Polyacrylatbasis. Die Carbonfasern sind dabei gegen nahezu alle an Bestandsbauwerken auftretenden Medien resistent.

Analog den im Stahlbeton bekannten Mattenbewehrungen können die Carbonbewehrungen sowohl als axiales Gelege (R-Matte) als auch als biaxiales Gelege (Q-Matte) hergestellt werden (Bild 2). Soweit die Anwendung eines biaxialen Geleges statisch erforderlich ist, erlaubt die Verwendung von Gelegen mit zweiaxialer Tragwirkung während der späteren Ausführung einen deutlich schnelleren Baufortschritt, da die Verstärkung mit einer anstatt zwei Lagen erfolgen kann, vgl. [10].

Die Carbongelege können sowohl als Matten als auch als Rollenware hergestellt und transportiert werden. Dies ist insbesondere bei großen Verstärkungsflächen ein großer Vorteil hinsichtlich des Transports, der Logistik und des Baufortschritts.

Die Faserstränge der heutigen Generationen besitzen dabei eine mittlere Zugfestigkeit von über 3.000 N/mm². Unter konservativer Anwendung von Abminderungsfaktoren für Dauerstand, Temperatur und Dauerhaftigkeit sowie eines Teilsicherheitsbeiwertes liegen die in der Bemessung verwendeten Festigkei-

ten in einem Bereich von 1.200–1.500 N/mm², u. a. [21].

2.2 Beton

Für Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton kann u. a. der hochfeste Feinbeton nach [23] verwendet werden. Dieser Beton besitzt ein Größtkorn von 1 mm und kann im Spritzverfahren an die zu verstärkenden Oberflächen oder per Laminierverfahren appliziert werden. Der Feinbeton weist nach 28 Tagen eine mittlere Druckfestigkeit von über 80 N/mm² und Biegezugfestigkeiten > 6 N/mm², ermittelt an 40 × 40 × 160 mm³ Mörtelprismen, auf. Die hohe Zugfestigkeit des Feinbetons sorgt für eine ausreichende Tragfähigkeit zum Bestand, sodass auf eine zusätzliche Verdübelung der Verbundfuge beim Carbonbeton in der Regel verzichtet werden kann. Weiterhin besitzt der in [23] definierte Feinbeton ebenfalls die für den Brückenbau erforderlichen Expositionsklassen.

Da die Carbonbewehrung nicht durch ein alkalisches Milieu gegen Korrosion geschützt werden muss, können auch andere, nachgewiesene Betone verwendet werden. Alternative Verstärkungsbetone sollten dabei ebenso eine ausreichend hohe Betonzugfestigkeit aufweisen, damit die Verbundfuge zum Bestand ohne zusätzliche Verdübelung ausgeführt werden kann. Des Weiteren muss das Größtkorn in Abhängigkeit der Maschenweite des Geleges festgelegt werden.

2.3 Verfahrensschritte beim Verstärken mit Carbonbeton

Die Verfahrensschritte beim Verstärken von Stahl- und Spannbetonbauteilen mit Carbonbeton sind in vielen Bereichen identisch mit klassischen Verstärkungsmaßnahmen. Bevor der Carbonbeton aufgebracht wird, muss der Altbetonuntergrund entsprechend vorbereitet werden. Die vorbereitenden Maßnahmen zum Verstärken mit Carbonbeton sind aktuell in [23] geregelt und orientieren sich an den Angaben aus der Instandsetzungsrichtlinie [28]. Risse oder Abplatzungen im Bereich der Verstärkung, welche zur Korrosion der Bestandsbewehrung führen können, müssen fachgerecht instandgesetzt werden. Lose Materialien oder Verunreinigungen müssen ebenso entfernt sein. Weiterhin ist in [23] geregelt, dass der Untergrund des Bestandes soweit aufgeraut werden muss, bis das Größtkorn ≥ 4 mm freiliegt und eine mittlere Rautiefe ≥ 1 mm vorhanden ist, sofern in den statischen Berechnungen keine höheren Angaben gefordert werden. Die Oberflächenzugfestigkeit des Bestandes wird vor dem Verstärken stichpunktartig gemessen und muss nach [23] im Mittelwert des Erwartungswertes mit einer unteren Vertrauensgrenze von 95 % Zuverlässigkeit über $1,0$ N/mm² liegen. Dies bedeutet, dass die Oberflächenzugfestigkeit mit Auswertung nach EC0 [29] dem 5%-Quantil von $1,0$ N/mm² entsprechen muss, sofern in der Planung nicht höhere Werte in der Nachweisführung angesetzt wurden. Somit weichen die Anforderungen beim Carbonbeton von den bekannten Anforderungen aus der Instandsetzungsrichtlinie ab, in welcher eine mittlere Zugfestigkeit von $1,5$ N/mm² (Mindesteinzelwert $\geq 1,0$ N/mm²) definiert ist [30]. Beim Verstärken mit Carbonbeton orientiert man sich zum aktuellen Zeitpunkt an den Anforderungen beim Verstärken mit geklebten Lamellen.

Als letzter Schritt vor dem Aufbringen der Carbonbetonschicht muss die Altbetonoberfläche ausreichend vorgehästet werden. Nach [23] muss der Bestand 24 Stunden vor Verstärkung kräftig vorgehästet und tagsüber in einem Intervall von 2 Stunden nachgehästet werden.

Das Aufbringen der Carbonbetonschichten erfolgt i. d. R. im Frisch-in-Frisch-Verfahren. Zunächst wird die erste Feinbetonschicht mit der gewünschten Stärke, bei den aktuellen Carbonbeteilen liegen die Schichtdicken zwischen 3–5 mm, aufgebracht. Anschließend wird in diese Schicht die erste Lage Carbongelege eingearbeitet. Aufgrund des geringen Gewichts



Bild 3 Verstärkung des Brückenzuges über die BAB A 648 Foto: © O. Steinbock, cbing

der Carbongelege können diese Verfahrensschritte sowohl über Kopf als auch horizontal zügig ausgeführt werden, was zu einer schnellen Bauausführung führt. Nach dem Einarbeiten der ersten Lage Carbongelege wird die nächste Schicht Feinbeton aufgetragen. Diese Verfahrensschritte (Aufbringen Feinbeton, Einarbeiten Carbongelege) wiederholen sich, bis die in der Statik ausgewiesene erforderliche Lagenanzahl erreicht ist. Die letzte Feinbetonschicht dient gleichzeitig als Deckschicht und wird entsprechend der Vorgaben der Ausführungsplanung ausgeführt. Aufgrund der hohen Festigkeit der Feinbetone muss die Verstärkungsschicht nach dem ersten Ansteifen unverzüglich nachbehandelt werden. Die Anforderungen an die Nachbehandlung werden dabei an den verwendeten Beton sowie an die örtlichen und witterungsbedingten Gegebenheiten angepasst.

Wesentliche Vorteile während der Bauausführung beim Verstärken mit Carbonbeton im Vergleich zu alternativen Verstärkungsvarianten ergeben sich zum einen durch die dünnen Verstärkungsdicken (im Hochbau liegen diese zwischen 9–15 mm, im Brückenbau aktuell bei 20–50 mm) in Verbindung mit der leichten Carbonbewehrung, wodurch eine zügige Verstärkung gewährleistet werden kann. Zum anderen zeichnet sich Carbonbeton darin aus, dass in der Regel auf eine zusätzliche Verdübelung der Fuge zwischen Bestandsbauwerk und Verstärkungsschicht auch bei zyklischen Beanspruchungen verzichtet werden kann. Des Weiteren hat sich als vorteilhaft erwiesen, dass beim Verstärken mit Carbonbeton ein Auftragen mittels Spritzen auf der Oberseite möglich ist, was bei konventionellen Verstärkungsmaßnahmen überwiegend ausgeschlossen ist.

In Bild 3 ist beispielhaft die Verstärkung der Oberseite der Brücke Nidda in Hessen mit Carbonbeton gezeigt.

Ausführliche Informationen zu den einzelnen Arbeitsschritten einer Verstärkung mit Carbonbeton sind u. a. in [41] gegeben.

3 Verstärkungen mit Carbonbeton im Brückenbau: Potentiale und aktueller Stand

In den vergangenen Jahren hat der Werkstoff Carbonbeton bereits den Weg in den Brückenbau geschafft, wie z. B. einige einzigartige und filigrane Bauwerke im Neubau eindrucksvoll zeigen [31]–[33]. Dabei haben sich die genannten Projekte nicht nur aus ästhetischen Gründen, sondern ebenfalls aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten gegenüber konventionellen Maßnahmen durchgesetzt.

Im Bereich der Verstärkung von Brückenbauwerken mit Carbonbeton konnten in den vergangenen Jahren ebenfalls wesentliche Fortschritte erlangt werden. Das zeigen nicht nur die vielen neuen Forschungsergebnisse, sondern auch einige bereits ausgeführte Praxisprojekte. Nachfolgend werden bereits heute technisch umsetzbare und mögliche Anwendungsszenarien gezeigt. Darüber hinaus werden zukünftige Einsatzbereiche aufgezeigt, deren Eignung bereits nachgewiesen wurde, jedoch noch nicht anwendungsreif vorliegt.

3.1 Carbonbeton im Bereich der Instandsetzung bzw. der Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit

Der Verbundwerkstoff Carbonbeton hat neben statischen Verstärkungsmaßnahmen auch für die Instandsetzung von bestehenden Brückenbauwerken ein großes Potential. Durch das sehr gute Verbundverhalten der Carbongelege im Beton weisen Carbonbetonschichten nur ein sehr feines Rissbild mit kleinen Rissbreiten auf. Aus diesem Grund kann Carbonbeton zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit oder zur Instandsetzung eingesetzt werden. Zusätzlich konnte bereits experimentell und am realen Bauwerk gezeigt werden, dass dünne Carbonbetonschichten auch als Abdichtungen verwendet werden können. Als Praxisbeispiel für eine Instandsetzung mit Carbonbeton dient an dieser Stelle die Bogenbrücke in Naila, [15], s. Bild 4. Die Brücke, welche 1910 errichtet wurde, besteht aus drei unbewehrten Hauptbögen aus Stampfbeton.

Die Bögen dieser Brücke wiesen eine Vielzahl an netzartigen und ungerichteten Rissen auf. Zudem war das Bauwerk aufgrund der schadhafte Teerabdichtung stark durchnässt und mit großflächigen Aussinterungen durchzogen. Zum Erhalt des Bauwerks musste eine geeignete Instandsetzungsmaßnahme gefunden werden, die auch Zwangsspannungen infolge von Temperaturen aufnehmen kann. Die Wahl fiel auf Carbonbeton, u. a. auch aufgrund sei-



Bild 4 Bogenbrücke in Naila nach der Sanierung

Foto: Ammar Al-Jamous, © CARBOCON



Bild 5 Brücke Kleinsaubernitz vor der Verstärkung

Foto: © Oliver Steinbock, IMB, TU Dresden

ner wirtschaftlichen Vorteile. Zur Wiederherstellung der Gebrauchstauglichkeit reichten zwei Lagen Carbonbeton mit einer maximalen Instandsetzungsdicke von 20 mm aus. Für weiterführende Informationen wird an dieser Stelle auf [15] verwiesen.

Ein weiteres, bereits ausgeführtes Projekt ist die Erneuerung der Brückenkappe an der Carolabrücke. Die Carolabrücke wurde im Jahre 1971 erbaut und ist eines der ingenieurtechnischen Wahrzeichen der Stadt Dresden. Bei diesem Praxisbeispiel wurden in die erneuerten Brückenkappen der Bestandsbrücke innerhalb der vorhandenen Betondeckung der Stahlbewehrung nichtmetallische Bewehrungen eingebaut, um die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonkonstruktion gewährleisten zu können. Bedingt durch die sehr guten Verbundeigenschaften und die minimal erforderlichen Betondeckungen der nichtmetallischen Bewehrung können ein feines Rissbild und damit die Dauerhaftigkeit der gesamten Konstruktion sichergestellt werden. Dazu musste „lediglich“ innerhalb der Betondeckung der Stahlbewehrung von 4,5 cm eine zusätzliche Lage an nichtmetallischer Bewehrung eingebracht werden, vgl. [16].

3.2 Carbonbeton für die statische Ertüchtigung

Neben dem Bereich der Instandsetzung bzw. der Sanierung oder der Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit weist Carbonbeton aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit ein enor-

mes Potential bei der statischen Ertüchtigung von bestehenden Brückenkonstruktionen auf.

Heutzutage muss eine Vielzahl an Bestandsbrücken, u. a. aufgrund des gestiegenen Verkehrsaufkommens, hohe Belastungen infolge von Schwerlastverkehr aushalten, wofür die Brücken ursprünglich nicht ausgelegt waren. Folglich kann eine Erhöhung der Brückenklasse unumgänglich werden, was fast zwangsläufig zu einer notwendigen Verstärkung der bestehenden Struktur führt. Zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit stellt die Verstärkung mit Carbonbeton eine überaus sinnvolle und effiziente Alternative zu konventionellen Verstärkungsvarianten dar, da bereits mit wenigen Zentimetern an Carbonbeton eine höhere Brückenklasseneinstufung möglich ist. Experimentelle Versuche, u. a. in [26] beschrieben, zeigen beispielhaft, dass mit aktuellen Generationen an Carbongelelagen die Biegetragfähigkeit im Vergleich zu einem unverstärkten Bauteil um das Drei- bis Vierfache gesteigert werden kann. Das zeigt die hohe Leistungsfähigkeit von Carbonbeton im Bereich der Biegeverstärkung. Die Verstärkung der Brücke in Kleinsaubernitz (Sachsen, vgl. Bild 5), bestätigt als Praxisbeispiel die zuvor genannten Potentiale auch am realen Bauteil. Das Brückenbauwerk besteht aus einer Einfeldbrücke mit einer Spannweite von circa 9,3 m und wurde im Jahr 2020 mit Carbonbeton verstärkt. Aufgrund des hohen Schwerlastverkehrs und der Nutzung als Ausweichroute für die Autobahn sollte die bestehende Brückenklasse 30/30 auf 60/30 angehoben. Weitere Bedingung für die Verstärkung

war, dass das Lichtraumprofil nicht weiter eingeschränkt wird, um bei einem möglichen Hochwasser einen Einstau zu vermeiden.

Zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit in die gewünschte Brückenklasse reichten drei Lagen Carbongelege in Längs- und eine Lage in Querrichtung mit einer Gesamt-Carbonbetondicke von 25 mm aus. Dieser Brückentyp steht dabei sinnbildlich für eine Vielzahl solcher Brückenbauwerke, die in Zukunft ressourcensparend und effizient mit Carbonbeton verstärkt werden können und das enorme Potential des Werkstoffs im Brückenbau aufzeigt. Für ausführlichere Informationen wird an dieser Stelle auf [13] verwiesen.

Neben der „klassischen“ Biegeverstärkung zur Erhöhung des Biegemoments durch eine Carbonbetonverstärkung bietet Carbonbeton ebenfalls ein großes Potential bei der statischen Ertüchtigung von Hohlkästen beim Nachweis der Querbiegung und beim Anschluss von Druck- und Zuggurten. In Bild 6 ist beispielhaft die Ertüchtigung eines Stahl- oder Spannbetonhohlkastens für die beiden zuvor genannten Nachweise dargestellt. Aktuell befindet sich eine Straßenbrücke in Bayern mit dem zuvor genannten statischen Defizit in den letzten Planungsschritten. Das große Potential bei Carbonbeton im Vergleich zu konventionellen Verstärkungsmaßnahmen sind die schnelle Bauausführung, die geringen Schichtdicken, wodurch ein nur geringes Eigengewicht in die Bestandskonstruktion gebracht wird, und der Verzicht auf eine Verdübelung der Schubfu-

ge. Der letztgenannte Punkt stellt eines der größten Vorteile gegenüber konventionellen Spritzbetonverstärkungen dar. Somit kann eine wirtschaftliche und zügige Ausführung gewährleistet werden und es besteht nicht die Gefahr, dass bei der Verdübelung u. a. die Spannglieder beschädigt werden.

Ein weiteres Feld, welches bereits heute mit Carbonbeton erschlossen ist, ist die Verstärkung von Brücken mit spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl, [34]. Mit der Hilfe von mehreren Lagen Carbongelege kann die erforderliche Restsicherheit im Falle eines Spanngliedausfalls wiederhergestellt und eine ausreichende Versagensankündigung erzielt werden. Dieses Anwendungsfeld wird mit Hilfe des Praxisbeispiels in Abschnitt 4 ausführlicher vorgestellt.

Zusätzlich zu den Verstärkungsformen, die sich im weitesten Sinn auf „klassische“ Biegeverstärkungen beziehen, können auch weitere statische Defizite von bestehenden Brückenbauwerken behoben werden. Aktuell wird die Verstärkung mit Carbonbeton für eine Brücke mit Schwerlasttransport geplant. Hier soll Carbonbeton zur Verstärkung der Torsionstragfähigkeit angewendet werden. Bei diesem Beispiel reichen bereits drei Lagen an Carbonbeton mit einer Gesamtdicke von 20 mm aus, um die geforderte Torsionstragfähigkeit mit Verstärkung der Torsionslängsbewehrung zu erreichen. Bei diesem Projekt sind die Planungen weitestgehend abgeschlossen und die Versuche zur Erlangung der Zustim-

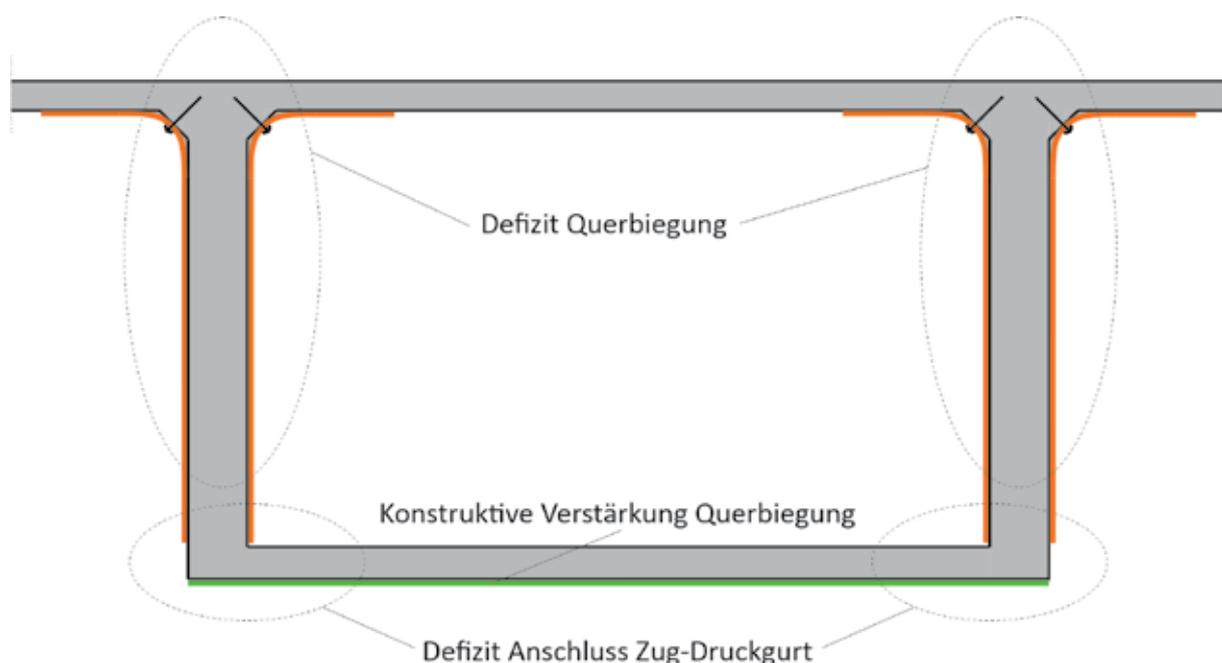


Bild 6 Prinzipiskezze Ertüchtigung Spannbetonhohlkasten

Grafik: Philipp Riegelmann, © CARBOCON

mung im Einzelfall (ZiE) für den Nachweis der Torsionsverstärkung kurz vor dem Abschluss. Carbonbeton stellt also auch im Bereich der Torsionsverstärkung eine Alternative zu konventionellen Maßnahmen dar. Für die Planungen und die Versuche zur Erreichung der ZiE konnten die grundlegenden Untersuchungen und Ingenieurmodelle zum Torsionstragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbetonverstärkung der Technischen Universität Dresden, u. a. [34] und [35], herangezogen werden.

Zusätzliche Verfahren, die ebenfalls bereits Anwendung fanden oder sich in der Forschung befinden, wie z. B. das SMART-DECK-System, mit welchem Bestandsbauwerke gleichzeitig instandgesetzt, monitort und zusätzlich verstärkt werden können, werden an dieser Stelle nicht weiter aufgeführt. Es wird stellvertretend für das weitere Forschungs- und Anwendungsfeld auf [36] verwiesen.

3.3 Weitere Potentiale einer Carbonbetonverstärkung sowie aktueller Stand der normativen Aspekte

Die Erhöhung der Querkraftfähigkeit von Bestandsbrücken mit Hilfe von Carbonbeton ist aktuell Gegenstand der Forschung. So konnten bereits Versuche in [37] und [39] zeigen, dass die Querkrafttragfähigkeit von bestehenden Bauteilen mit Carbonbeton signifikant erhöht werden kann. Im Zuge dieser Forschungstätigkeiten konnte ebenfalls gezeigt werden, dass der Querkraftwiderstand von zyklisch beanspruchten Bauteilen im Vergleich zu einem unverstärkten Probekörper durch eine Carbonbetonverstärkung wesentlich gesteigert werden kann, u. a. [20]. Die Versuche in [19] und [20] zeigten, dass die Tragfähigkeit von Bauteilen aus Carbonbeton bzw. mit Carbonbetonverstärkung infolge zyklischer Beanspruchung nicht wesentlich abnimmt.

Neben den zuvor beschriebenen Forschungstätigkeiten zeigen ähnliche Ansätze von der TU Innsbruck, dass für Carbonbetonverstärkungen die Verdübelung der Verstärkungsschicht noch höhere Tragfähigkeitserhöhungen im Vergleich zu einem unverstärkten Bauteil zulassen. Das kann speziell für den Brückenbau von großer Bedeutung sein. Bei diesen Forschungstätigkeiten kommen speziell entwickelte Dübel zur Anwendung, womit eine sichere Verankerung gewährleistet ist.

Die Praxistauglichkeit soll zeitnah an einem realen Bauwerk in Österreich gezeigt werden, vgl. [39].

Einige vielversprechende Forschungsergebnisse zeigen, dass auch im Bereich der Verstärkung bzw. Sanierung von Fahrbahnkappen und Fahrbahndecken von Bestandsbrücken Carbonbeton in Zukunft eine große Rolle spielen kann, vgl. [40].

Neben all den genannten Anwendungspotentialen und Vorteilen von Carbonbeton steht der weiteren Verbreitung des Werkstoffs im Brückenbau das Fehlen einer normativen Grundlage entgegen. Zum jetzigen Zeitpunkt bestehen keine normativen Regelungen für den Einsatz des Werkstoffs im Brückenbau, sodass in den aktuellen Projekten immer auf eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bzw. auf eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung zurückgegriffen werden muss. Die derzeit gültige Zulassung für das Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit Textilbeton [23] ist noch nicht für den Anwendungsbereich im Brückenbau genehmigt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt dürfen lediglich Stahlbetonbauteile im Innenbereich mit vorwiegend ruhenden Lasten auf Biegung verstärkt werden. Derzeit laufen Bestrebungen zur Erweiterung der Zulassung, damit auch langfristig der Brückenbau erschlossen werden kann. Aus diesem Grund müssen Brückenprojekte über eine ZiE geregelt werden. Jedoch stellt der ZiE-Prozess kein Hemmnis für eine Verstärkung mit Carbonbeton dar, wie die Vielzahl an bereits ausgeführten Projekten zeigt. So kann dieser Genehmigungsprozess im Allgemeinen in die herkömmlichen Planungsschritte integriert werden, sodass die Beantragung einer ZiE nicht zu einer Verzögerung des Projektes führt, siehe [42]. Unter Berücksichtigung der vielen Vorteile bei der Bauausführung, der Dauerhaftigkeit, der Wirtschaftlichkeit und der Ressourcenersparnis beim Carbonbeton wird der Weg über eine ZiE immer öfter gewählt. Ebenfalls lässt sich der Umfang einer ZiE durch fachkundige Planer im Bereich des Carbonbetons reduzieren. So konnte für die in Abschnitt 4 beschriebene Baumaßnahme die ZiE bereits nach wenigen Monaten erteilt werden.

4 Ausführungsbeispiel Brückenverstärkung Nidda

Im Zuge des Brückenzuges über die BAB A 648 wurden im Sommer 2020 zwei Spannbetonbrücken mit Carbonbeton verstärkt. Bei dieser Baumaßnahme handelt es sich um die erste



Bild 7 Brückenzug Nidda

Foto: Sebastian May, © CARBOCON

Verstärkung einer Autobahnbrücke in Deutschland mit Carbonbeton.

Die beiden Teilbauwerke wurden 1970 bzw. 1971 errichtet und weisen als dreifeldrige Brücken Stützweiten von circa 32 m (Hauptfeld) und circa 17 m (Randfelder) auf, siehe Bild 7. Die Teilbauwerke wurden als zweistegige Plattenbalken mit einer konstanten Konstruktionshöhe von 1,20 m ausgeführt.

Bei der Errichtung der Teilbauwerke kam Sigma-Oval-Spannstahl zum Einsatz, der bekanntlich gegenüber Spannungsrissskorrosion anfällig ist [34]. Im Zuge der Nachrechnung konnte für die bestehenden Teilbauwerke kein ausreichendes Ankündungsverhalten festgestellt werden. Infolgedessen wurde eine Machbarkeitsstudie zu verschiedenen Verstärkungsvarianten durch das Ingenieurbüro cbing – Curbach Böschke Ingenieurpartner durchgeführt. Im Zuge dessen stellte sich heraus, dass eine Verstärkung mit Carbonbeton die beste Lösung darstellt. Für eine ausreichende Versagensankündigung infolge Spannungsrissskorrosion waren dafür in den Endfeldern der Brücken auf der Unterseite fünf Lagen Carbongelege (Gesamt-Schichtdicke 30 mm) und auf der Oberseite in den Stützbereichen sechs Lagen (Gesamtdicke 35 mm) erforderlich. Auf der Oberseite wurden zusätzlich zwei Lagen Carbonbeton über die gesamte Länge appliziert, damit eine Integration in den Fahrbahnaufbau über die gesamte Brückenlängsrichtung möglich war.

Ausschlaggebend für die Anwendung von Carbonbeton als Verstärkungsmaßnahme waren die hohe Leistungsfähigkeit (statische Wirk-

samkeit), die schnelle Bauausführung, der minimale Eingriff in das Lichtraumprofil der Brücke sowie die nicht erforderliche Anpassung der Gradienten vor den Brückenendfeldern, da der Carbonbeton auf der Oberseite in den Fahrbahnaufbau integriert werden konnte. Die konventionellen Instandsetzungsmaßnahmen schnitten im Vergleich schlechter ab.

Für die Ausführung der Baumaßnahme musste eine ZiE beantragt werden. Für die Durchführung der experimentellen Versuche, die im Zuge der ZiE erforderlich waren, sowie für die Erstellung der Gutachten war die CARBOCON GMBH in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden beauftragt. Zusätzlich wurden in diesem Vorhaben das Ingenieurbüro H+P Ingenieure GmbH – Beratende Ingenieure im Bauwesen sowie die Bundesanstalt für Straßenwesen (bast) als zusätzliche Gutachter und Prüfer herangezogen. Im Rahmen der Erstellung des Gutachtens für das Bauvorhaben konnte auf weitreichende Forschungsarbeiten aus dem Projekt C³ – Carbon Concrete Composite [42] zurückgegriffen werden. Dadurch konnte der erforderliche Versuchsumfang wesentlich reduziert werden. Durch die vorliegenden Forschungsarbeiten des C³-Projektes konnten beispielhaft die Einflussfaktoren Temperatur, Dauerhaftigkeit und Dauerstand usw. und deren Auswirkungen auf die Materialfestigkeiten übernommen werden. Zum Nachweis der Eignung der sechs Lagen Carbongelege für das Bauvorhaben mussten dennoch einige Großbauteilversuche mit statischen und zyklischen Beanspruchungen durchgeführt werden, um die ZiE zu erlangen. So musste u. a. gezeigt werden, dass auch bei



Bild 8 Prüfung der Großbauteile mit sechs Lagen Carbongelege
Foto: Alexander Schumann, © CARBOCON

sechs Lagen Carbongelege unter zyklischer Beanspruchung auf eine zusätzliche Verdübelung der Schubfuge verzichtet werden kann.

Durch die gute Zusammenarbeit aller Partner konnte der ZiE-Prozess innerhalb weniger Monate durchgeführt und die Carbonbetonarbeiten im Sommer 2020 fristgerecht ausgeführt werden.

Für ausführlichere Informationen zum vorgestellten Brückenzug, zur Nachweisführung und zur Anwendung von Carbonbeton bei den Teilbauwerken wird auf die Veröffentlichungsserie [11], [43] und [44] verwiesen. Als Bauherr trat Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement auf. Für die fachliche Umsetzung des Projektes waren das Ingenieurbüro Curbach Bösche Ingenieurpartner für die Tragwerksplanung, das Ingenieurbüro H+P Ingenieure GmbH als Prüflingenieur und das Ingenieurbüro CARBOCON GMBH als ZiE-Planer und Gutachter (in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der TU Dresden) beauftragt. Ausgeführt wurde die Brückenverstärkung durch eine ARGE aus den Bauunternehmen der Implenia Instandsetzung GmbH (München), der Torkret GmbH (Essen) und der Ed. Züblin AG (Direktion Bauwerkserhaltung Stuttgart).

5 Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Überblick zum Stand von Carbonbeton im Brückenbau sowie ein Ausblick auf dessen zukünftige Anwendungsbereiche gezeigt. Carbonbeton hat bereits heute den Sprung in den Brückenbau bei ersten Praxisanwendungen geschafft und seine technische und wirtschaftliche Tauglichkeit unter Beweis gestellt. In den nächsten Jahren wird Carbonbeton mehr als eine Alternative

zu konventionellen Verstärkungsmaßnahmen darstellen. Durch die hohe Dauerhaftigkeit der Carbongelege, den geringen Zusatzeintrag an Eigengewicht und die enorme Leistungsfähigkeit kann in Zukunft hoffentlich eine Vielzahl an Bestandsbrücken vor dem Abriss gerettet oder effizienter verstärkt werden, wodurch auch der Brückenbausektor seinen Beitrag zum Klimaschutz und zur Einsparung wertvoller Ressourcen leisten kann. Denn bei Verstärkungen von Bestandsbauteilen mit Carbonbeton kann im Vergleich zu konventionellen Maßnahmen bis zu 52 % an CO₂ und bis zu 85 % an

Ressourcen gespart werden, was in [18] an einem ausgeführten Bauteil eindrucksvoll gezeigt wurde.

Literatur

- [1] Homepage des BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/bruecken-zahlen-daten-fakten.html>. [geprüft am 20.01.2021]
- [2] Homepage der Bundesanstalt für Straßenwesen: https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf. [geprüft am 20.01.2021]
- [3] Fischer, O.; Lechner, T.; Wild, M.: Nachrechnung von Betonbrücken, systematische Auswertung nachgerechneter Bauwerke. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bericht B 124, 2016
- [4] Naumann, J.: Brückenertüchtigung jetzt – Ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Mobilität auf Bundesfernstraßen. In: DBV – Deutscher Beton- und Bautechnik-Verband E. V. (Hrsg.), DBV-Heft 22, Berlin, 2011
- [5] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – Abteilung Straßenbau: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand; 1. Ergänzung. Ausgabe April 2015
- [6] Fischer, O.; Müller, A.; Lechner, T.; Wild, M.; Kessner, K.: Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland. Beton- und Stahlbetonbau 109 (2014) 2, S. 107–127 – DOI: 10.1002/best.201300084
- [7] Homepage des Statistischen Bundesamts: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/06/PD20_195_321.html. [geprüft am 24.01.2021]

- [8] Homepage des Bundesverbands der Deutschen Transportindustrie e. V.: <https://www.transportbeton.org/branche/wirtschaftsdaten/#:~:text=Im%20Jahr%202019%20erzielte%20die,von%204%2C12%20Milliarden%20Euro.> [geprüft am 24.01.2021]
- [9] Homepage des Vereins Deutscher Zementwerke e.V.: <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementmarkt-und-baukonjunktur.> [geprüft am 24.01.2021]
- [10] Hentschel, M.; Schumann, A.; Ulrich, H.; Jentsch, S.: Sanierung der Hyparschale Magdeburg. Bautechnik 96 (2019) 1, S. 25–30 – DOI: 10.1002/bate.201800087
- [11] Steinbock, O.; Bösche, T.; Schumann, A.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. Beton- und Stahlbetonbau, first published online: 18.01.2021 – DOI: 10.1002/best.202000106
- [12] Feix, J.; Hansl, M.: Pilotanwendungen von Textilbeton für Verstärkungen im Brückenbau. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 25. Dresdner Brückenbausymposium, 09./10.3.2015 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2015, S. 99–110
- [13] 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 in Esslingen, Esslingen: Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 651–662
- [14] Erhard, E.; Weiland, S.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Beckmann, B.; Curbach, M.: Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung: Instandsetzung und Verstärkung bestehender Tragwerke mit Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) S1: Verstärken mit Textilbeton, S. 74–82 – DOI: 10.1002/best.201400124
- [15] Al-Jamous, A.; Uhlig, K.: Sanierung der historischen Betonbogenbrücke in Naila. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 27. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 13./14.03.2017 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2017, S. 71–78
- [16] Michler, H.: Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021, 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021
- [17] Schladitz, F.; Schumann, A.; May, S.; Curbach, M.: Carbonbetonbau im Brückenbau. Zeitschrift des Verein der Straßenbau- und Verkehrsingenieure im Freistaat Sachsen e.V. (2020), S. 34–37
- [18] Schumann, A.; Schladitz, F.; Schöffel, J.; May, S.; Curbach, M.: Ressourceneinsparung mit Carbonbeton – Am Beispiel der Verstärkung der Hyparschale in Magdeburg. In: Hauke, B. (Hrsg.): Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Klimaschutz, Konstruktive Lösungen für das Planen und Bauen – Aktueller Stand der Technik, Berlin: Ernst & Sohn, 2021
- [19] Wagner, J.; Spelter, A.; Hegger, J.; Curbach, M.: Ermüdungsverhalten von Carbonbeton unter Zugschwellbelastung. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020) 9, S. 710–719 – DOI: 10.1002/best.201900104
- [20] 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 in Esslingen, Esslingen: Technischen Akademie Esslingen, 2020, S. 643–650
- [21] Rempel, S.; Nigl, D.; Bielak, J.: Bemessung der Carbonbetonbrücken in Ottenhöfen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021, 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021
- [22] Rempel, S.; Kanschin, E.: Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium, 09./10.03.2020, verlegt auf 08./09.03.2021 (digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021
- [23] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-31.10-182: Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT® (Textilbewehrter Beton). Geltungsdauer: 01.12.2016–01.06.2021
- [24] Hegger, J.; Will, N.; Schneider, M.: Textilbeton: Tragverhalten – Bemessung – Sicherheit. In: Curbach, M.; Ortlepp, R.

- (Hrsg.): T Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6), Gemeinsames Abschlusskolloquium der Sonderforschungsbereiche SFB 528 (Dresden) und 532 (Aachen) am 19./20.09.2011 in Berlin, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2011, S. 269–284
- [25] Lorenz, E.; Schütze, E.; Weiland, S.: Textilbeton – Eigenschaften des Verbundwerkstoffs. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (2015) 1, S. 29–41 – DOI: 10.1002/best.201400114
- [26] Müller, E.; Schmidt, A.; Schumann, A.; May, S.; Curbach, M.: Biegeverstärkung mit Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 10, S. 758–767
- [27] Holz, K.; Curbach, M.: Zugtragverhalten von Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 3, S. 231–240 – DOI: 10.1002/best.201900037
- [28] DAfStb Betonbauteile: 2001-10; Instandsetzungs-Richtlinie: 2001-10; RL SIB:2001-10; Instandsetzungs-Richtlinie: 2001-10 RL SIB:2001-10
- [29] DIN EN 1990:2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010
- [30] Momber, A.; Schulz R.-R.: *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton – Bearbeitung, Eigenschaften, Prüfung*. Basel: Birkhäuser, 2006
- [31] Michler, H.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempten im Allgäu. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 5, S. 325–334 – DOI: 10.1002/best.201300023
- [32] Mittelstädt, J.: Remstalbrücken – Kombination von Carbonbeton und Holz. *C³ – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband der 11. Carbon- und Textilbetontage, 24./25.09.2019 in Dresden, 2019, S. 52–53*
- [33] Helbig, T.; Unterer, K.; Kulas, C.; Rempel, S.; Hegger, J.: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 10, S. 676–685 – DOI: 10.1002/best.201600058
- [34] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau: Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion); Ausgabe Juni 2011
- [35] Schladitz, F.: Torsionstragverhalten von textilbetonverstärkten Stahlbetonbauteilen. Diss., TU Dresden, 2011
- [36] Müller, E.: Torsionsversuche an carbonbetonverstärkten Plattenbalken mit neuen Carbonbewehrungssystemen – Experimentelle und analytische Betrachtungen. Diss., in Fertigstellung
- [37] Adam, V.; Will, N.; Hegger, J.: Verstärkung für Fahrbahnplatten von Massivbrücken aus Textilbeton: Versuche im Rahmen einer Demonstratorrealisierung. *Bauingenieur* 96 (2020) 3, S. 85–95 – DOI: 10.37544/0005-6650-2020-03-33
- [38] Brückner, A.: Querkraftverstärkung von Bauteilen mit textilbewehrtem Beton. Diss., TU Dresden, 2011
- [39] May, S.; Schumann, A.; Bergmann, S.; Curbach, M.; Hegger, J.: Versuche zur Querkraftverstärkung mit Carbonbeton. *Bauingenieur* 97 (2021) 3
- [40] Egger, M.; Waltl, C.: Brückenverstärkung mit Textilbeton – Einblick in ein österreichisches Pilotprojekt. In: *C³ – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e.V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 in Dresden, S. 18–19*
- [41] Farwig, K.; Neumann, J.; Schneider, R.; Breitenbücher, R.; Curbach, M.: Instandsetzung von gefugten Betonflächen mit einer dünnen Schicht aus Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 10, S. 768–778 – DOI: 10.1002/best.202000048
- [42] Schumann, A.; May, S.; Bochmann, A.: Zu neuer Leistungsfähigkeit – Denkmalgeschützte Bauwerke mit Carbonbeton sanieren und Verstärken. *Bautenschutz + Bausanierung* (2021) 1, S. 2-3
- [43] Homepage des Forschungsprojektes *C³ – Carbon Concrete Composite*: <https://www.bauen-neu-denken.de/>. [geprüft am 27.01.2021]
- [44] Steinbock, O.; Pelke, E.; Ost, O.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 1: Grundlagen und Hintergründe zum Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau*, first published online: 21.01.2021 – DOI: 10.1002/best.202000094
- [45] Steinbock, O.; Teworte, F.; Neis, B.: Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken, Teil 3: Planung und Umsetzung der Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton am Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau*, first published online: 21.01.2021 – DOI: 10.1002/best.202000107

5	Grußwort
7	Entwicklung des Instituts für Massivbau – wie geht es weiter?
11	Brücken aus Stahl-UHFB
19	„Denkmalschutz ist vom Tisch!“ – Denkmalpflege und Denkmalschutz im Ingenieurbau
37	Bemessung der Carbonbetonbrücke in Ottenhöfen
49	Stadtbahnbrücke über die A8 in Stuttgart – Eine integrale Netzwerkbogenbrücke mit Carbonhängern
63	Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden
79	Stadtbahnbrücke über die A8 in Stuttgart – Eine integrale Netzwerkbogenbrücke mit Carbonhängern
91	Chronik des Brückenbaus
111	Inserentenverzeichnis