

# 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“

Im Rahmen von Ertüchtigungsmaßnahmen eines Brückenzugs über die über die Nidda wurden im Jahr 2020 erstmals zwei Spannbetonbrücken mit Carbonbeton verstärkt. Bei den im Jahr 1971 errichteten Teilbauwerken wurde sogenannter Sigma-Oval Spannstahl verbaut, der als spannungsrissskorrosionsgefährdet gilt. Die Straßenbrücken zeigten rechnerisch kein ausreichendes Ankündigungsverhalten im Sinne der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion, sodass ein plötzliches Versagen den Verkehrsteilnehmer gefährdete. Um dieses Defizit zu beheben, wurde eine Verstärkung notwendig. In Hinblick auf die exponierte Lage im Verkehrsnetz am Westkreuz Frankfurt a. M., stellte sich die Verstärkung mit Carbonbeton als die wirtschaftlichste und minimalinvasivste Verstärkungsmöglichkeit heraus. Nachfolgender Beitrag ist Bestandteil eines dreiteiligen Aufsatzes, der die notwendigen Planungsschritte und erste Erfahrungen aus der Ausführung zusammenträgt. In Teil 1 wurden neben den Grundlagen zur Spannungsrissskorrosion das Konzept und die Planungsschritte erläutert. Der nachfolgende zweite Teil stellt die Besonderheiten des Carbonbetons im Brückenbau dar und vergleicht diesen mit gängigen Verstärkungsmethoden. Teil 3 umfasst detaillierte Angaben zur Verstärkungsmaßnahme und erste Erfahrungen aus der baulichen Umsetzung.

**Stichworte** Carbonbeton; Spannbetonbau; Spannungsrissskorrosion; Verstärkungsmethoden; Brückenbau; Brücken im Bestand

**Carbon reinforced concrete – An alternative method for strengthening Concrete Bridges; Part 2: Strengthening of concrete bridges with carbon reinforced concrete – pilot project “federal highway bridges (A 648) across the river Nidda**

In 2020 two of three bridges, which are part of the German highway road A 648, were strengthened with carbon reinforced concrete for the first time in Germany. The two superstructures were erected in the 1970s as a pre-stressed beam. As tendons a so called -sigma-oval-steel was used, which is sensitive for stress corrosion cracking. According to German guidelines and to exclude a sudden failure, it has to be verified if a damage of the tendons can be seen at the surface of the cross section via cracks along the superstructure. This -crack before failure-criteria was not fulfilled for the described superstructures. With reference to the relevance of the bridges in the local infrastructure around Frankfurt a. M., a strengthening concept was necessary. Due to that fact, a strengthening with carbon reinforced concrete was identified as an economic and minimal invasive method. The report on that forerunner project is spread into three parts. The first part gives an overview about the bridges and the background on stress corrosion cracking, added with explanations about the planning steps. The following second part describes the strengthening with carbon reinforced concrete with focus on bridges. The third part goes further into detail, regarding the construction and the design of a carbon reinforced strengthening.

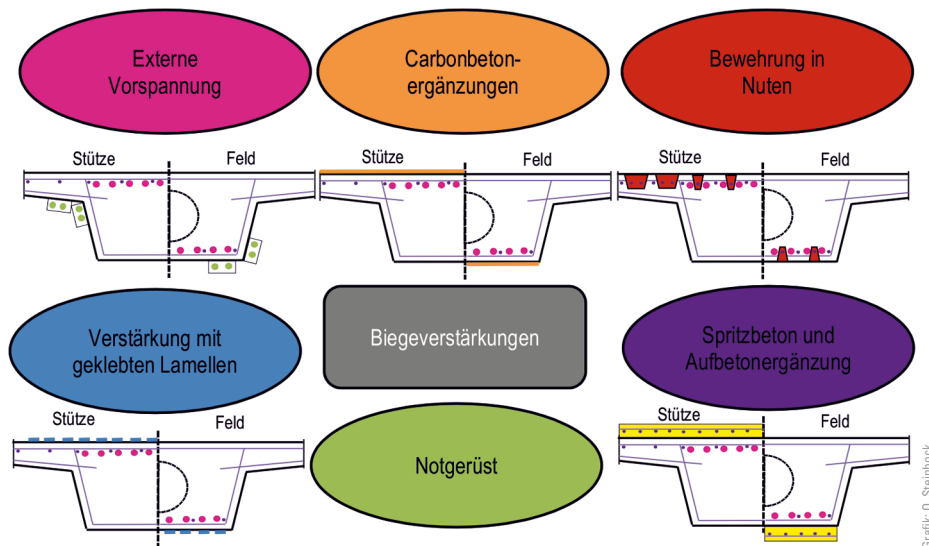
**Keywords** carbon reinforced concrete, pre-stressed reinforced structures, stress corrosion cracking, strengthening of concrete structures, bridge constructions, existing bridges

### 1 Verstärkungsmethoden im Überblick

Verstärkungsmethoden dienen der Wiederherstellung (Instandsetzung) oder Erhöhung der Tragsicherheit (Ertüchtigung) und können somit gegenüber Sanierungsmaßnahmen (Wiederherstellung der Dauerhaftigkeit) abgegrenzt werden, vgl. auch [1] bzw. [2]. Unterschieden werden kann einerseits zwischen örtlich begrenzten (lokalen) und das Gesamtsystem betreffende (globalen) Verstärkungsmaßnahmen, andererseits zwischen, externen geklebten und homogenen Verstärkungsmethoden. Eine externe Verstärkungsmethode stellt hierbei die externe, Vorspannung dar. Geklebte Verstärkungen sind zwar unmittelbar mit dem Querschnitt verbunden, weisen jedoch eine gewisse Nachgiebigkeit im Tragmechanismus auf. Homogene Verstärkungsmethoden bilden bei sachge-

rechter Ausführung eine monolithische Verbindung mit dem Altbetonquerschnitt. Neben den klassischen Methoden der Spritzbetonverstärkung bzw. den Aufbetonergänzungen, können hierzu sowohl die Verstärkung mit Bewehrung in Nuten als auch Textilbetonverstärkungen gezählt werden. Eine ausführliche Darstellung der Verstärkungsmethoden kann im Rahmen des Beitrages nicht erfolgen, jedoch sollen die etablierten Methoden für eine Diskussion herangezogen werden. Weiterführende Informationen zu unterschiedlichen Verstärkungsmöglichkeiten enthalten beispielsweise [3, 4].

Um das Defizit eines fehlenden Ankündigungsverhaltens zu kompensieren, sind die aussichtsreichsten Verstärkungsmethoden für das vorliegende Tragwerk in Bild 1 dargestellt. Aufgrund folgender Randbedingungen sollte



Grafik: O. Steinbock

**Bild 1** Verstärkungsmethoden auf Biegung für den vorliegenden gedruckenen Spannbetonüberbau im Vergleich  
Comparison of different strengthening methods for the pre-stressed superstructure

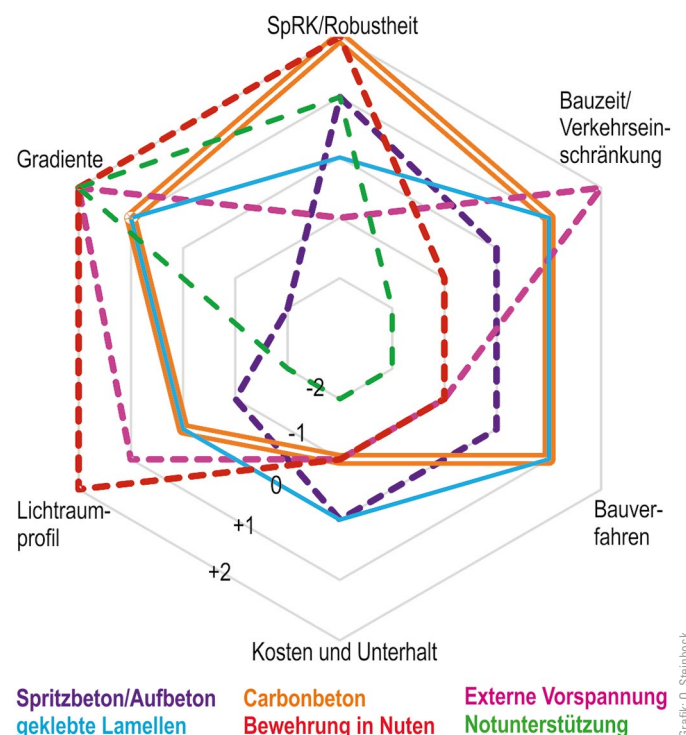
die Verstärkungsmethode weitere Anforderungen erfüllen:

- **Spannungsrissskorrosion/Robustheit:** Effektivität der Verstärkungsmethode in Hinblick auf die Tragfähigkeitsdefizite
- **Bauzeit/Verkehrseinschränkungen:** Kurze Bauzeit aufgrund der Relevanz im Verkehrsnetz und schnelle Umsetzung, da die vorläufige Restnutzungsdauer der Brücken im Ist-Zustand auf das Jahr 2020 beschränkt ist
- **Bauverfahren:** Vermeidung von Arbeits- und Schalgerüsten im Bereich der Nidda
- **Kosten und Umwelt:** Minimalinvasive Verstärkungsmaßnahme, da zunächst eine Nutzungsdauer von  $\approx 15$  Jahren sichergestellt werden soll
- **Lichttraumprofil:** minimale weitere Einschränkung der Durchfahrthöhe des Rad- und Fußgängerwegs entlang der Nidda
- **Gradiente:** keine/minimale Anpassung der Gradiente

Zum Vergleich der Verstärkungsmethoden wird die Einhaltung der Randbedingungen in fünf Stufen bewertet. Dabei beschreibt eine Wertung mit null keine zusätzliche Einschränkung bzw. stellt die Methode die Referenz des Kriteriums dar. Ergeben sich Einschränkungen oder ergeben sich Nachteile aus der jeweiligen Verstärkungsmethode, erfolgt eine negative Wertung, je nach Umfang in zwei Stufen (-1 und -2). Erfolgt dagegen eine Verbesserung bzw. ein Vorteil aus der Verstärkungsmethode, wird diese positiv, ebenfalls in zwei Stufen gewertet (+1 und +2), Bild 2.

Das wichtigste Kriterium stellt sicherlich das Ziel der Verstärkungsmaßnahme dar, in diesem Fall die Erlangung eines ausreichenden Ankündungsverhaltens im Falle des Auftretens von Spannungsrissskorrosion (SpRK). Die Carbonbetonbewehrung (Wertung +2) kann wie auch die Verstärkungsmethoden Bewehrung in Nuten (Wertung +2) und Spritzbetonverstärkung (Wertung +1 wegen zusätzlichem Eigengewicht) im Sinne einer

schaffen Bewehrung fungieren. Hinsichtlich des Ankündungsverhaltens, welches durch Rissbildung im Beton angezeigt werden soll, ergeben sich keine Einschränkungen. Dies ist bei homogenen Verstärkungsmethoden durch ihren monolithischen Verstärkungscharakter gegeben, sodass sich Risse im Altbetonbauteil auch in den Verstärkungsschichten zeigen. Die Wirksamkeit der externen Vorspannung wird beim Vergleich der Verstärkungsmethoden herabgesetzt, da sie gemäß [5] den gesamten spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahl kompensieren soll und daher mit einem enormen Verstärkungsgrad einhergeht. Eine Anordnung im Stützbe- reich ist zudem schwierig und aus statischer Sicht nur



Grafik: O. Steinbock

**Bild 2** Verstärkungsmethoden in der Diskussion – Punktesystem  
Comparison of strengthening methods under discussion – scoring system

gering wirksam. Des Weiteren führt die zusätzliche Vorspannung zu einer Überdrückung der Risse, sodass Spannstahlschäden nicht mehr detektiert werden können (Wertung -1). CFK- und Stahllamellen sind einerseits in ihrem Verstärkungsgrad begrenzt, andererseits im Außenbereich und bei Spannbetonkonstruktionen nur beschränkt einsetzbar (Wertung 0), vgl. [6].

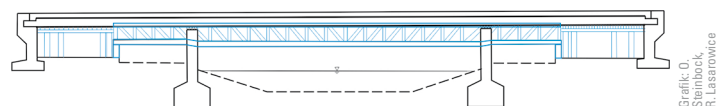
Im Hinblick auf die resultierenden Einschränkungen für den Verkehr während der Bauzeit sowie der Dauer der Bauzeit bietet die Anbringung einer externen Vorspannung Vorteile, da diese am Bauwerk ausschließlich an den Stegen appliziert werden kann. Ein Eingriff in den Fahrbahnbereich wäre bei der externen Vorspannung daher nicht zwangsläufig notwendig, jedoch sind aufwendige Ankerkonstruktionen und Umlenkstellen in Form von Lisenen nötig (Wertung +2/-1). Unabhängig davon war es vorgesehen, die Fahrbahn zu erneuern, sodass dieser Vorteil nicht ausschlaggebend bewertet wird. Die Ausführungszeiten für Carbonbeton werden im Vergleich zu bewehrten Betonergänzungen (Wertung 0/0) etwas günstiger bewertet, da der Querschnitt sowohl von oben als auch von unten im Spritzverfahren verstärkt werden kann (Wertung +1/+1). Der Aufwand zur Vorbereitung der Oberfläche ist stark von der Betonqualität abhängig, wird jedoch geringer eingeschätzt als für die Vorbereitung von Bewehrung in Nuten. Hier müsste zunächst der Bewehrungsverlauf im Bestand aufwendig erfasst werden, bevor die Nuten gefräst oder mit Hochdruckwasserstrahlen ausgeführt werden könnten (Wertung -1/-1). Der Einbau einer Carbonbewehrung ist aufgrund der großflächigen Applikation ebenfalls einfacher anzusehen als das Einfädeln der Längsbewehrung in die bestehende Bewehrung. Der Aufwand für die Applikation von geklebten Lamellen ist dem einer Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton gleichzusetzen (Wertung +1/+1). Einschränkungen ergeben sich bei Carbonbetonverstärkungen (wie auch bei geklebten Lamellen) durch die Anforderungen an Einbautemperatur und Luftfeuchtigkeit.

Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit (Kosten und Unterhalt) ergeben sich durch den Carbonbeton aktuell keine nennenswerten Vorteile gegenüber einer konventionellen Spritzbetonverstärkung. Da die Carbonbetonbauweise im Brückenbau noch eine Nischenmethode darstellt, ergeben sich bei der Umsetzung heutzutage noch höhere Kosten (Wertung -1). Weitere Kosten entstehen durch die notwendige Zustimmung im Einzelfall, da es sich bei der Carbonbetonbauweise um eine nicht geregelte Bauweise handelt. Im Vergleich zu den Gesamtkosten sind diese jedoch gering. Aufgrund des hohen händischen Aufwands beim Bewehren in Nuten bzw. dem Kleben von Lamellen ist hier ebenfalls mit einem höheren Kostenaufwand im Vergleich zu einer Spritzbetonergänzung zu rechnen (Wertung -1). Vor dem Hintergrund der beschränkten Nutzungsdauer soll bei der Wirtschaftlichkeit auch eine Abschätzung der Rückbaumaßnahmen erfolgen. Hier ist durch die Carbonbetonverstärkungen und Lamellen mit Mehraufwand zu rechnen, wohingegen bei

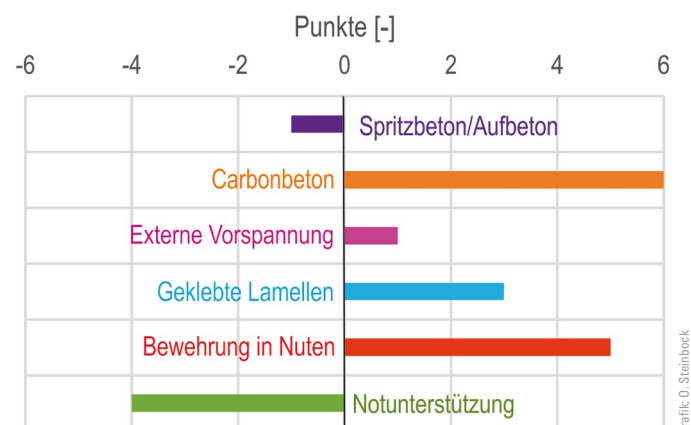
Betonergänzungen mit Betonstahl keine zusätzlichen Aufwendungen zu erwarten sind (Wertung 0).

In puncto Nutzung der Brücken kommt der Einschränkung des Lichtraumprofils unterhalb des Tragwerks sowie einer Anpassung der Gradienten eine besondere Bedeutung zu. Bei Betonergänzungen ist mit einer Mindestdicke von 8 cm zu rechnen. Somit würde man das ohnehin zu geringe Lichtraumprofil von lediglich 1,75 m weiter einschränken (Wertung -1). Übliche Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton liegen bei weniger als 4 cm, sodass die Einschränkungen deutlich geringer sind (Wertung 0). Insbesondere in Hinblick auf die Anpassung der Gradienten bietet die Carbonbetonverstärkung hier Vorteile (Wertung +1), da sie aufgrund ihrer geringen Stärke sogar in den Fahrbahnaufbau integriert werden kann. Dies ist bei Aufbetonergänzungen nicht möglich, sodass eine Gradientenanpassung vor und hinter dem Bauwerk notwendig wäre (Wertung -2). Bei der Verstärkungsmethode Bewehrung in Nuten ist dagegen mit keinerlei Einschränkung zu rechnen (Wertung +2/+2), bei geklebten Lamellen mit einem geringen zusätzlichen Auftrag (Wertung 0/+1). Die externe Vorspannung kann nur mit hohem Aufwand bzw. wenn sie statisch ungünstig im Querschnitt angeordnet wird ohne Einschränkungen angebracht werden (Wertung +1/+2).

Letztlich war die Umsetzung einer externen Vorspannung für den vorliegenden Querschnitt unter Beachtung der Randbedingungen und aus statischer Sicht nicht zielführend, sodass diese Variante nicht weiter in Betracht gezogen wurde. Da die etablierten Verstärkungsmethoden, insbesondere mit dem Ziel, ein ausreichendes Ankündungsverhalten sicherzustellen, keine sinnvollen und effektiven Alternativen darstellten, wurde von Bauherrenseite zunächst eine Notunterstützung vorgesehen. Einen



**Bild 3** Konzeption einer Notunterstützung. Längsschnitt nach [7]  
Concept of a temporary support of the superstructure, according to [7]



**Bild 4** Verstärkungsmethoden im Vergleich  
Comparison of strengthening methods



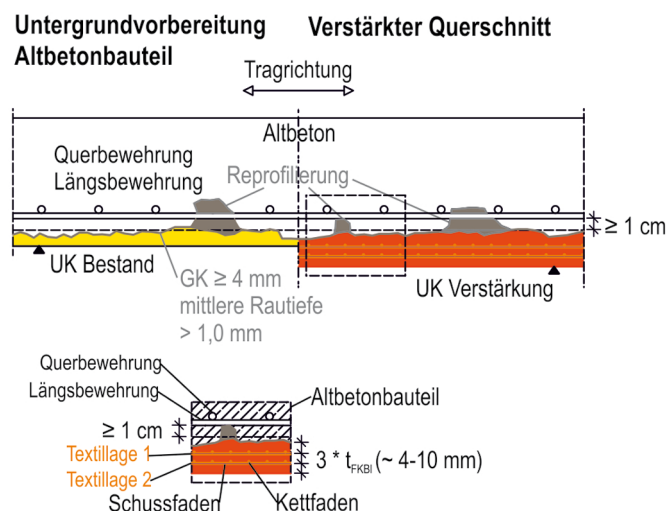
Eindruck hierzu vermittelt Bild 3. Die Lösung sah eine zusätzliche Stahlbrücke unterhalb des Bestands vor. Diese Maßnahme wäre jedoch nur mit großem Aufwand bzw. baulichen Maßnahmen (Wertung Bauzeit/Bauverfahren/Kosten mit je -2) und mit einem eingeschränkten Lichtraumprofil (Wertung -2) möglich geworden. Lediglich eine Anpassung der Gradiente wäre hier entfallen (Wertung +2). Der Vollständigkeit halber wurde die Variante Notunterstützung daher bei der Betrachtung berücksichtigt.

Unter Beachtung der aufgeführten Aspekte wurde die Verstärkung mit Carbonbeton als die aussichtsreichste Verstärkungsmethode identifiziert und für die weitere Planung zugrunde gelegt. Einen Überblick hierzu bietet Bild 4, welches die obigen Aspekte und Ausführungen zusammenfasst. Da das oberste Ziel der Verstärkung darin bestand, die Standsicherheit des Tragwerks zu erreichen, wurde dieser doppelt gewertet. Die Betrachtung zeigt das Potenzial von Carbonbeton für Verstärkungsmaßnahmen im Brückenbau. Es war deshalb sehr zu begrüßen, dass Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement der neuen Carbonbetonbauweise offen gegenüberstand. Daher erfolgte eine Ausarbeitung eines Verstärkungskonzepts unter der Verwendung von Carbonbeton, vgl. [8].

## 2 Verstärken mit Carbonbeton

### 2.1 Das Verfahren im Überblick

Der Werkstoff Carbonbeton kommt heutzutage aufgrund seiner vielen Vorteile immer öfter im Bereich der Verstärkung oder der Sanierung zum Einsatz. Seit 2014 liegt ebenfalls eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den Werkstoff vor, welche den Bausatz bestehend aus Carbongelege und einem Feinkornbeton regelt. Neben den in [9] gelisteten Materialien kommen auch schon Weiterentwicklungen bzw. andere Gelege zum Einsatz.



**Bild 5** Prinzip einer Verstärkungsmaßnahme mit Textil- bzw. Carbonbeton  
Principle of a strengthening with textile respectively carbon reinforced concrete



Foto: O. Steinbock

**Bild 6** Exemplarische Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton an einem Laborprüfkörper im Laminierverfahren  
Strengthening of a test beam in a lamination process with carbon reinforced concrete

Durch die hohe Leistungsfähigkeit in Kombination mit den geringen Schichtdicken kann der Werkstoff vielseitig eingesetzt werden, vgl. [10–12]. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick zu den Verfahrensschritten bei der Verstärkung mit Carbonbeton gegeben.

Zunächst wird das Korngerüst des Altbetonbauteils freigelegt, bis Zuschläge mit Durchmessern  $\geq 4$  mm sichtbar sind, Bild 5. Standardmäßig wird eine raue Fuge gefordert, wobei aus statischen Gründen höhere Anforderungen möglich sein können. Nach [9] ist mindestens eine mittlere Rautiefe von 1 mm über die zu verstärkende Fläche notwendig. Unebenheiten in der Altbetonoberfläche mit einer Tiefe von bis zu 30 mm können mit Feinkornbeton ausgeglichen bzw. reprofiliert werden. Bei größeren Schadstellen empfiehlt sich eine Altbetonsanierung mit einem Reparaturmörtel oder Reparaturbeton. Gefordert ist eine bleibende Mindestbetondeckung der vorhandenen Betonstahlbewehrung von 1 cm, um deren vollständigen Verbund sicherzustellen, vgl. auch Bild 5 bzw. [9]. Die so vorbereitete Oberfläche entspricht den gleichen Anforderungen, welche auch bei einer Verstärkungsmaßnahme mit Spritzbeton vorausgesetzt werden. Hinsichtlich der Oberflächenzugfestigkeit werden bei der Verstärkung mit Textilbeton nur  $1,0 \text{ N/mm}^2$  als charakteristischer Wert gefordert, wohingegen eine Spritzbetonverstärkung einen Wert von  $1,5 \text{ N/mm}^2$  (bzw. Mindesteinzelwert von  $1,0 \text{ N/mm}^2$ ) vorschreibt, vgl. [9] bzw. [13].

Nachdem der Untergrund vorbereitet, gereinigt sowie mindestens 24 Stunden kräftig vorgehärtet wurde, kann mit dem Applizieren der Verstärkungsschicht begonnen

werden. Hierzu wird zunächst eine erste Feinkornbetonschicht am Bauwerk aufgebracht. Dies kann im Handlaminierverfahren (in der Regel für kleine Verstärkungsflächen) oder im Spritzverfahren (in der Regel für großflächige Verstärkungsmaßnahmen) erfolgen, Bild 6. Die erste Schicht gleicht Unebenheiten von bis zu 3 mm aus und wird anschließend in der entsprechenden Schichtstärke des Feinkornbetons (üblich sind 3 – 10 mm) aufgetragen. In diese erste Verstärkungsschicht wird anschließend das gewählte Gelege oberflächennah eingebettet. Falls mehrere Lagen erforderlich sind, wird erneut eine Feinkornbetonschicht aufgebracht und das Textil erneut eingebettet. Dieser Vorgang kann nach [9] mit bis zu vier Lagen Textil ausgeführt werden. Als abschließende Schicht erfolgt der Auftrag der Feinkornbetondeckschicht. Wichtig im Rahmen der Ausführung nach [9] ist, dass die einzelnen Feinkornbetonschichten – frisch in frisch – verarbeitet werden, um eine mögliche Schalungsbildung in der Verstärkungsschicht auszuschließen. Die Verarbeitungsdauer und der Erstarrungsprozess hängen entscheidend von den Randbedingungen (Flächengröße, Luftfeuchtigkeit, Temperatur etc.) ab und können daher stark schwanken. Während die Feinkornbetondeckschicht geglättet wird, verbleiben die zuvor applizierten Schichten spritzrau. Arbeitsfugen bzw. Verstärkungsabschnitte sind möglich, wobei in den Übergangsbereichen eine Aufrauung mit Besenstrich erforderlich ist. Des Weiteren wird empfohlen, diese in wenig beanspruchte Bereiche zu legen. Erschütterungen und Bewegungen während der Verstärkungsarbeiten sind nicht zulässig. Aufgrund der vergleichsweise dünnen Verstärkungsschichten (Gesamtstärke 10 mm –  $\approx$  40 mm) sind diese anfällig für schnelles Austrocknen. Im Rahmen der Nachbehandlung ist dem Austrocknen durch Feuchthalten mittels Jute-tüchern oder Folien entgegenzuwirken. Aufgrund der Besonderheiten der Verstärkungsmethode ist die Umsetzung von Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton nur durch speziell geschultes Personal zulässig und zu überwachen, vgl. [9].

## 2.2 Umsetzung von Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton im Brückenbau

In der Vergangenheit wurden bereits Carbon- bzw. Textilbetonschichten an Brücken im Bestand appliziert. Hierbei handelt es sich weniger um Instandsetzungsarbeiten, sondern vielmehr um Sanierungsarbeiten. Exemplarisch hierfür stehen die in [10] aufgeführten Beispiele zu Sanierungsarbeiten an Fußgängerbrücken. In diesen Fällen wurden dünne Lagen Textilbeton als Schutz- und Verschleißschicht appliziert. Zu Sanierungsmaßnahmen mit Carbonbeton im Brückenbau gehörten auch die Maßnahme an der Bogenbrücke in Naila. Hier wurden die Stampfbetonbögen einer ehemaligen Eisenbahnbrücke mit Carbonbeton saniert, da die Bögen zuvor Rissbildungen und Abplatzungen aufwiesen. Die Sanierung mit Carbonbeton stellte dabei die wirtschaftlichste Sanierungsmethode dar, da geringe Zwangsspannungen von der Verstärkungsschicht aufgenommen werden können, vgl. [14].



**Bild 7** Verstärkungsarbeiten an der Plattenbrücke in Kleinsaubernitz/Sachsen  
Strengthening of a concrete bridge in Kleinsaubernitz/Saxony

Eine bereits erprobte Anwendung der Carbonbetoninstandsetzung ist die Verwendung als befahrbare Aufbetonergänzung. Hierzu sei auf die Ausführungen von [15] verwiesen, in denen eine sogenannte hybride Aufbetonergänzung ausgeführt wurde. Im Konkreten wurden an Plattentragwerken konventionelle Aufbetonergänzungen angebracht, die mit einer dünnen Textilbetonschicht ergänzt wurden. Weitere Verstärkungsmaßnahmen befinden sich im Planungsstadium, worauf u. a. in [16] verwiesen wird. Ziele der Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton sind neben einer Verbesserung des Biege-, Querkraft- und des Torsionswiderstands auch lokale Verstärkungsmaßnahmen im Gurtanschlussbereich. Ein vom Hauptautor bearbeitetes Pilotprojekt zu einer Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton an einer Plattenbrücke in Sachsen wurde ebenfalls im Sommer umgesetzt, Bild 7. Hierbei wurde durch die Applikation einer Carbonbetonverstärkung eine Steigerung der Tragfähigkeit (Ertüchtigung) erzielt und bereits erfolgreich nachgewiesen, vgl. [17].

## 2.3 Aktuelle Regelungen zum Bauen mit Carbonbeton

Die in [9] enthaltene Materialkombination ist für Verstärkungsmaßnahmen im Brückenbau nur bedingt geeignet. Neben den Einschränkungen durch die Umgebungsbedingungen (Innenbauteile bis 40°C und relative Luftfeuchte  $\leq 65\%$ ) ist lediglich eine Nutzung bei vorwiegend ruhenden Lasten vorgesehen. Des Weiteren lag der prognostizierte Verstärkungsgrad für die Brücken über die Nidda, basierend auf Voruntersuchungen für die vorliegenden Spannbetonüberbauten, über den in [9] ausgewiesenen vier Lagen textiler Bewehrung. Jüngere Forschungen, vorwiegend Entwicklungen aus dem größten Bauforschungsprojekt C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite [18], brachten höherwertige Carbongelege hervor, die auch den Anforderungen hinsichtlich einer Anwendung im Außenbereich genügen und gleichzeitig höhere Festigkeiten aufweisen. Aufgrund der nicht geregelten Bauweise, der Anwendung im Brückenbau und der Verwendung neuer Materialien wurde eine Zustimmung im Einzelfall



(ZiE) notwendig. Diese wurde in enger Zusammenarbeit mit CARBOCON und dem Institut für Massivbau der TU Dresden parallel zum Planungsprozess erreicht. Dabei konnte auf zahlreiche Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite zurückgegriffen werden. Das Versuchsprogramm konnte damit auf ergänzende großbauteilige Versuche beschränkt werden, die den hohen Verstärkungsgrad in Verbindung mit der gewählten Materialkombination experimentell belegen, vgl. [19].

## 2.4 Gewählte Materialkombination für die Verstärkungsmaßnahme

Da es sich beim Carbonbeton um einen Verbundwerkstoff handelt, waren Komponenten für den Beton als auch für die Bewehrung festzulegen. Hinsichtlich des Feinkornbetons konnte auf den bereits in [9] aufgenommenen Pagel-Spezial-Beton TF 10 zurückgegriffen werden. Zum einen weist dieser alle notwendigen Eigenschaften im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit, Hafteigenschaften, Mischverfahren etc.) und die erforderlichen Festigkeiten (Biegezugfestigkeit etc.) auf. Zum anderen erfüllt der Feinkornbeton Pagel TF 10 alle Anforderungen hinsichtlich der Expositionsklassen für die Anwendung im Brückenbau, vgl. [20]. Beim Gelege fiel die Wahl auf das sogenannte Referenztextil für die Verstärkung aus C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite (SIT-grid 040 von Wilhelm Kneitz Solutions in Textile; ehemals V.FRAAS), vgl. [21]. Das Material erreicht die erforderlichen mechanischen Kennwerte und erfüllt gleichzeitig die Anforderungen für die Anwendung im Außenbereich. Die Dauerhaftigkeit und die Widerstandsfähigkeit der Materialkombination konnte anhand klein-



**Bild 8** Kleinbauteilige Prüfkörper, hier: Dehnkörper zur Bestimmung des Zugtragverhaltens  
Small scale test specimens, here: Determination of tensile behavior

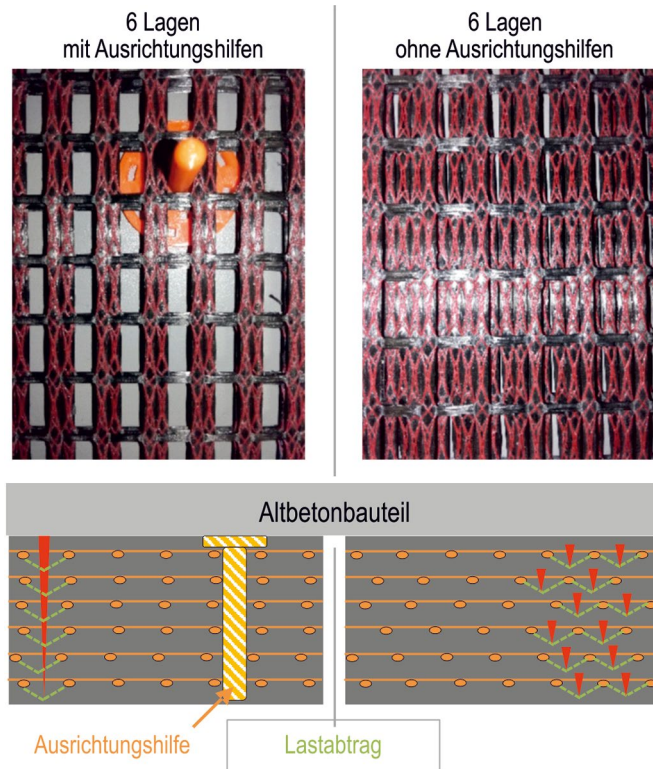


**Bild 9** Verstärkte Prüfkörper zur Bestimmung des Tragverhaltens – Detail Verstärkungsschicht  
Big scale test specimens – detail of strength layer with carbon reinforced concrete

teiliger Versuche belegt werden. Im Carbonbetonbau werden zur Beschreibung des Verhaltens unter Zug sogenannte Dehnkörperversuche herangezogen, Bild 8 bzw. [21]. Die Beschreibung des Verbundverhaltens erfolgt an SPO-Versuchen (Single-Side Pull Out), an denen ein Einzelstrang aus dem Beton gezogen wird und eine Verbund-Spannungs-Schlupf-Beziehung abgeleitet werden kann, vgl. [23]. Ergänzt werden die Versuchsergebnisse durch Dauerstand-, Übergreifungs- und Endverankerungsversuche. Im Rahmen der ZiE erfolgte die Zusammenstellung von Forschungsergebnissen aus den C<sup>3</sup>-Forschungsvorhaben, die die Temperaturbeständigkeit und die Dauerhaftigkeit des Materials bestätigen.

Da für die vorgesehene Verstärkungsmethode die Applikation von bis zu sechs Lagen an Carbongelege notwendig wurde, waren zusätzliche Versuche zum Tragverhalten notwendig. Bisherige Ausführungen beschränkten sich auf vier Lagen Carbongelege, vgl. [24]. Das Tragverhalten wurde an insgesamt sieben Plattenstreifen mit den Querschnittsabmessungen 50 cm × 20 cm durchgeführt, wobei die Stützweite zwischen 5,0 m und 5,20 m variierte. Die Verstärkung der Prüfkörper erfolgte an der Bauteilunterseite partiell, um ein Betondruckversagen bei den Biegeversuchen auszuschließen, Bild 9.

Neben der Applikation der Bewehrungslagen in unterschiedlichen Ausführungen (u. a. Abstufungen und Variation der Stöße) erfolgten zyklische und statische Belastungsversuche. Im Rahmen der Versuchsreihen wurde festgestellt, dass eine Ausrichtung der Gelege untereinander erforderlich ist, um die Wirksamkeit des hohen Verstärkungsgrads sicherzustellen. Bei einer unkontrollierten Anordnung der Carbongelege wurde ein verfrühtes Ablösen der Verstärkungsschicht beobachtet. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei sechs Lagen textiler Bewehrung keine durchgehende Betonsäule mehr in der Verstärkungsschicht vorhanden ist, die eine Übertragung der Kräfte (Querzugkräfte) in das Altbetonbauteil ermöglicht. Während sich bei einer Anordnung der Gelege mit Ausrichtung (Bild 10 links) ein Fachwerkmodell mit ge-



**Bild 10** Lastabtrag in der Verstärkungsschicht bei hohen Verstärkungsgraden  
Flow of forces in carbon reinforced concrete section with six carbon layers

zieltem Lastabtrag bis in die erste Verstärkungslage einstellen kann, ist dies bei einer unkontrollierten Anordnung der Bewehrungslagen (Bild 10 rechts) nicht mehr gegeben. Hier kann es zu lokalen Überschreitungen der Zugfestigkeit der Verstärkungsschicht kommen, die letztlich zu einem Ablösen führt. Das Ablösen trat vorwiegend in der ersten Bewehrungslage auf. Um die Verstärkungsgelege wirtschaftlich und statisch effektiv zu nutzen, wurde für die spätere Ausführung seitens der ZiE eine gegenseitige Ausrichtung der textilen Lagen untereinander vorgeschrieben, vgl. [19]. Dies war durch die Anordnung zweier Ausrichtungshilfen bereits sichergestellt, da im Rahmen der Textilherstellung Toleranzvorgaben an die Gelegegeometrie bestanden.

Alle Versuche der textilen Gelege erfolgten an Mattenware, da zum Zeitpunkt der Zulassungsversuche bzw. über das Forschungsprojekt C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite hinweg keine Rollenware zur Verfügung stand und somit keine fundierten Kenntnisse und Ergebnisse zur Rollenware vorlagen. Auf Grundlage der ZiE konnten folgende Bemessungskennwerte bzw. Konstruktionsempfehlungen ausgesprochen werden, Tab. 1.

**Tab. 1** Übersicht über die mechanischen Kennwerte der gewählten Materialkombination, vgl. [19]  
Overview of the mechanical properties of the used carbon grid

#### SITgrid 040 R 144/28-CCS-12,7/16

##### Geometrie

|                       |                           |                         |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Fadenabstand          | Schuss                    | 12,7 mm                 |
|                       | Kett                      | 16 mm                   |
| Bewehrungsquerschnitt | $a_{\text{tex},0^\circ}$  | 1,41 cm <sup>2</sup> /m |
|                       | $a_{\text{tex},90^\circ}$ | 0,28 cm <sup>2</sup> /m |

##### Konfiguration

|                |   |             |
|----------------|---|-------------|
| Tränkung       | – | Polyacrylat |
| Drapierbarkeit | – | mäßig       |

##### Kennwerte

##### Basierend auf Angaben in [19]

|                                                  |                     |                           |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------------|
| Zugfestigkeit                                    | $f_{\text{td,tex}}$ | 1 589 N/mm <sup>2</sup>   |
| Elastizitätsmodul                                | $E_t$               | 225 000 N/mm <sup>2</sup> |
| Dehnkörper                                       |                     |                           |
| Grenzdehnung                                     | $\varepsilon_t$     | 7,1 ‰                     |
| Verbundfluss                                     | $T_{\text{sd,tex}}$ | 4,3 N/mm                  |
| Empfohlene Länge für Endverankerung/Übergreifung | $f_{\text{td,tex}}$ | 700 mm                    |

### 3 Zwischenfazit

Nachdem Teil 1 die Grundlagen zur Spannungsrissskorrosion sowie das Bestandsbauwerk vorstellte [25], wird im zweiten Teil der Beitragsserie zunächst das Potenzial von Carbonbetonverstärkungsmaßnahmen im Brückenbau am Beispiel der beiden Teilbauwerke 1 und 2 im Zuge der BAB A 648 beschrieben. Dabei stellte sich die Verstärkungsmethode mittels Carbonbeton für das Bauvorhaben als Vorzugsvariante heraus, da sie im Vergleich mit konventionellen Verstärkungsmethoden zahlreiche Vorteile bietet. Der vergleichsweise geringe Eingriff in den Bestand verspricht zudem Vorteile bei der Bauzeit. Erläuterungen zum Verfahren stellen die Vorteile der Carbonbetonverstärkung und die Besonderheiten der gewählten Materialkombination dar. Da für die Anwendung von Carbonbeton im Brückenbau eine Zustimmung im Einzelfall einzuholen war, wurde ebenfalls ein Einblick zum entsprechenden Versuchsprogramm gegeben. Das Versuchsprogramm resultierte aus dem vergleichsweise hohen erforderlichen Verstärkungsgrad für eine Carbonbetonverstärkung. Die Versuche gaben Aufschluss über die notwendige Ausführung der Verstärkungsarbeiten und bewiesen die Tragfähigkeit der Carbonbetonverstärkung. Der abschließende Teil 3 der Berichtsserie wird den Schwerpunkt bei der Planung des Pilotprojekts setzen und über erste Erfahrungen aus der Umsetzung berichten, [26].



## Literatur

- [1] Steinbock, O.; Curbach, M.; Bösche, T. (2020) *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. 8./9.9.2020 an der Technischen Akademie Esslingen, S. 651–662.
- [2] Seim, W. (2020) *Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [3] Schnellenbach-Held, M.; Peeters, M.; Scherbaum, F. (2010) *Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand* in: Bundesanstalt für Straßenwesen BAST (Hrsg.): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und Ingenieurbau. Heft B 75. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- [4] Schnellenbach-Held, M.; Welsch, T.; Fickler, S.; Hegger, J.; Reiß, K. (2016) *Erfahrungssammlung Dokumentation 2016* in: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur – vertreten durch Bundesanstalt für Straßenwesen BAST (Hrsg.): Verstärkungen älterer Spannbetonbrücken.
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.) (2011) *Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrissskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden (Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion)*. Ausgabe 2011-06.
- [6] DAfStb-Betonbauteile (2012) *Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung – Teil 1: Bemessung und Konstruktion – Teil 2: Produkte und Systeme für das Verstärken – Teil 3: Ausführung – Teil 4: Ergänzende Regelungen zur Planung von Verstärkungsmaßnahmen* in: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie: Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Ausgabe 2012-03.
- [7] Bauwerksübersichtsplan (2017) *Unterführung Nidda, Westkreuz Frankfurt – Temporäre Verstärkung der TBW 1 bis 3*. Entwurfsplanung. Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement. Stand 2017-12.
- [8] Steinbock, O.; Bösche, T. (2020) *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./23.9.2020 (in Dresden und digital), S. 30–31 (Zweitabdruck in TUDALIT Magazin (2020) 23, S. 12).
- [9] *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z.31.10-182. Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton)*. Deutsches Institut für Bautechnik. Geltungsdauer: 01.06.2015 bis 01.06.2021. bzw. Verlängerung: 01.12.2016 bis 01.06.2021. Berlin.
- [10] TUDALIT (2016) *Verstärken mit Textilbeton nach abZ Z-31.10-182 – Ein Leitfaden für planende Architekten und Ingenieure, für Ausführungsunternehmen und für Bauherren*. Planermappe. TUDAG. Dresden.
- [11] Erhard, E.; Weiland, S.; Lorenz, E.; Schladitz, F.; Beckmann, B.; Curbach, M. (2015) *Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung: Instandsetzung und Verstärkung bestehender Tragwerke mit Textilbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 110, Sonderheft, S. 74–82. <https://doi.org/10.1002/best.201400124>
- [12] Hentschel, M.; Schumann, A.; Ulrich, H.; Jentsch, S. (2019) *Sanierung der Hyparschale Magdeburg* in: Bautechnik 96, H. 1, S. 25–30. <https://doi.org/10.1002/bate.201800087>
- [13] Momber, A.; Schulz, R.-R. (2006) *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung, Eigenschaften, Prüfung*. Basel/Berlin: Birkhäuser.
- [14] Al-Jamous, A.; Uhlig, K. (2017) *Sanierung der historischen Betonbogenbrücke in Naila* in: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 27. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken. 13./14.3.2017 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, S. 71–78.
- [15] Feix, J.; Hansl, M. (2015) *Pilotanwendungen von Textilbeton für Verstärkungen im Brückenbau* in: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 25. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken. 09./10.3.2015 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, S. 99–110.
- [16] May, S. (2020) *Carbonbeton im Brückenbau – aktuelle ZiEs beim Verstärken und Neubau* in: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage. 22./23.09.2020 in Dresden. S. 28–29.
- [17] Steinbock, O.; Curbach, M.; Bösche, T. (2020) *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. 8./9.9.2020 an der Technischen Akademie Esslingen, S. 651–662.
- [18] *Homepage Carbon Concrete Composites* (2019) <https://www.bauen-neu-denken.de/>, geprüft am 11.09.2019
- [19] Curbach, M.; Michler, H.; Schumann, A.; Hentschel, M. (2019) *Gutachten zur Erlangung der ZiE für die Verstärkung der Baumaßnahme A 648: UF Nidda ASB-Nr. 5817-574. inkl. der Ergänzungsgutachten 1 und 2*. angefertigt von Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau und CARBOCON GmbH. Dresden.
- [20] Produktdatenblatt Pagel (2019) TUDALIT-Feinbeton TF10 TUDALIT-Feinbeton (0–1 mm).
- [21] Produktdatenblatt Wilhelm Kneitz Solutions in Textile (2019) SITgrid 040.
- [22] Schütze, E. (2021) *Prüfmethoden für die Charakterisierung von Carbonbeton*. Dissertation in Vorbereitung, Institut für Massivbau der TU Dresden. Dresden.
- [23] Lorenz, E. (2015) *Endverankerung und Übergreifung textiler Bewehrungen in Betonmatrices*. Dissertation, Institut für Massivbau der TU Dresden. Dresden.
- [24] Curbach, M.; Lorenz, E.; Schütze, E.; Schladitz, F.; Weiland, S. (2014) *Gesamtbericht der experimentellen Untersuchungen zur allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für ein Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT® (Textilbewehrter Beton)*, Dresden, unveröffentlicht, dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) vorliegend.
- [25] Steinbock, O.; Pelke, E.; Ost, O. (2021) *Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken. Teil 1: Grundlagen und Hintergründe zum Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“* in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 2, S. 109–117. <https://doi.org/10.1002/best.202000094>
- [26] Steinbock, O.; Teworte, F.; Neis, B. (2021) *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“* in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 2, S. 109–117. <https://doi.org/10.1002/best.202000107>



## Autoren



Dipl.-Ing. Oliver Steinbock (Korrespondenzautor)  
os@cbing.de  
Curbach Bösche Ingenieurpartner Beratende  
Ingenieure Part mbH  
Bergstraße 21 a  
01069 Dresden



Dr.-Ing. Alexander Schumann  
schumann@carbocon-gmbh.de  
CARBOCON GmbH  
World Trade Center Dresden  
Ammonstr. 72  
01067 Dresden



Prof. Dr.-Ing. Thomas Bösche  
tb@cbing.de  
Curbach Bösche Ingenieurpartner Beratende  
Ingenieure Part mbH  
Bergstraße 21 a  
01069 Dresden

### Zitieren Sie diesen Beitrag

Steinbock, O.; Bösche, T.; Schumann, A. (2021) *Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken – Teil 2*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 2, S. 109–117.  
<https://doi.org/10.1002/best.202000106>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 17. Dezember 2020; angenommen: 22. Dezember 2020.