

# **Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton**

Strengthening of steel reinforced and pre-stressed concrete bridges  
using carbon reinforced concrete

Von der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung der Doktorwürde (**Dr.-Ing.**)  
vorgelegte

## **DISSERTATION**

von **Dipl.-Ing. Oliver Steinbock**  
geboren am 28.10.1987 in Bamberg

### **Gutachter:**

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Manfred Curbach  
MR Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn  
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bösche

### **Vorsitzender:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

### **weitere Mitglieder:**

Hon.-Prof. Dipl.-Ing. Holger Svensson

Technische Universität Dresden

12/2021

## Kurzfassung

Im Bereich des Brücken- und Ingenieurbaus finden sich bisher nur vereinzelte Anwendungen von Textilbetonverstärkungen wohingegen im Hochbau bereits einige Verstärkungsmaßnahmen umgesetzt werden konnten. Die Einschränkung auf den Hochbau war einerseits auf die Materialeigenschaften der am Markt verfügbaren Bewehrungsmaterialien und andererseits auf offene Fragestellungen zum Tragverhalten zurückzuführen. Aufgrund der Lage im Außenbereich ergeben sich bei Brücken gegenüber einer Anwendung in Innenräumen höhere Anforderungen an die Komponenten der Verstärkungsmaßnahme. In Verbindung mit Forschungsvorhaben aus der jüngeren Vergangenheit wurden neue textile Bewehrungen entwickelt (u. a. Carbonbewehrungen im Forschungsprojekt C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite), die durch ihre Temperaturbeständigkeit auch eine Anwendung im Brückenbau ermöglichen. Im Gegensatz zum üblichen Hochbau unterliegen Brücken nicht vorwiegend ruhenden Lasten und sind somit einer hohen Ermüdungsbeanspruchung ausgesetzt. Die vorliegende Arbeit greift die speziellen Aspekte des Brückenbestandes in Deutschland auf um die Anwendungsmöglichkeiten von Verstärkungsmaßnahmen mit Textil- bzw. Carbonbeton darzustellen.

Im Mittelpunkt der Arbeit stand zunächst Defizite bestehender Massivbrücken herauszuarbeiten. Aufgrund erhöhter Nutzungsanforderungen ergibt sich bei einem alternden Brückenbestand häufig die Notwendigkeit einer Biegeverstärkung. In Zusammenhang mit steigenden Verkehrslasten bzw. -aufkommen ist auch eine mögliche Ermüdung der Tragwerke zu nennen, die sowohl Stahl- als auch Spannbetonbrücken betreffen. Gerissene Koppelfugen, aber insbesondere die Problematik der Spannungsrisskorrosion bei historischen Spannstählen, sind dagegen eine Besonderheit des Spannbetonbaus. Vor diesem Hintergrund wurde ein Vergleich zwischen etablierten Verstärkungsmethoden für Massivbrücken und einer Verstärkung mit Carbonbeton diskutiert. Um die Anwendbarkeit von Carbonbeton als Verstärkungsmaßnahme bewerten zu können, wurden zunächst Aspekte zur Materialbeschaffenheit auf Grundlage laufender Forschungsvorhaben zusammengetragen und gezielt durch eigene Versuchsserien ergänzt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag bei der Untersuchung des Tragverhaltens von verstärkten Stahl- und Spannbetontragwerken. Während zu Beginn der Arbeit bereits Erkenntnisse zum Tragverhalten für textilbetonverstärkte Stahlbetontragwerke im Bruchzustand vorlagen, gab es nur wenige Informationen über das Tragverhalten unter Gebrauchslastniveau. Bei nachträglich verstärkten Bauteilen handelt es sich um gemischt bewehrte Bauteile. Während die Verbundunterschiede zwischen Bewehrungsmaterial im Altbetonbauteil und der nachträglich angebrachten Verstärkungsschicht im Bruchzustand von untergeordneter Bedeutung sind, bestimmen diese im Gebrauchszustand das Tragverhalten maßgeblich. Im Spannbetonbau werden die Unterschiede im Verbundverhalten mit dem Umlagerungsfaktor  $\eta$  berücksichtigt, wodurch eine Korrektur der Zugkraftanteile in den Bewehrungselementen bei unterschiedlichen Verbundeigenschaften erfolgt. Erste Ansätze zur Umlagerung der Zugkraftanteile an textilbetonverstärkten Stahlbetontragwerken formulierte [Weiland 2009], die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erneut aufgegriffen und experimentell untersucht wurden. Im Konkreten wurden verschiedene 4-Punkt-Biegeversuche an carbonbetonverstärkten Stahl- und Spannbetonplattenstreifen durchgeführt. Bei den Stahlbetonplatten kamen sowohl gerippte als auch glatte Betonstähle zum Einsatz wohingegen die vorgespannten Bauteile mit Litzen im sofortigen Verbund bewehrt waren. Ziel der Untersuchung war die Größenordnung der Zugkraftanteile in den metallischen Bewehrungselementen über die Bauteillänge zu ermitteln und mit Hilfe faseroptischer Messsysteme zu erfassen um die entlastende Wirkung für das Altbetonbauteil infolge der nachträglichen Verstärkungsschicht zu validieren. Ergänzend hierzu gelang es einen Bemessungsansatz für den Grenzzustand der Tragfähigkeit von nachträglich mit Textilbeton verstärkten Spannbetonkonstruktionen abzuleiten.

Auch die weit verbreitete Problematik in Deutschland zur Verstärkung von Tragwerken mit spannungsrisskorrosionsgefährdetem Spannstahl wurde im Rahmen der Arbeit behandelt. Die Gefahr eines plötzlichen Versagens infolge eines unbemerkten Spannstahlausfalls, kann durch die Applikation einer Verstärkungsmaßnahme verhindert werden. An Brückenträgern aus einem Brückenrückbau ergab sich die Möglichkeit experimentelle Untersuchungen durchzuführen. Die Träger wurden zunächst gezielt geschädigt, anschließend mit Carbonbeton verstärkt und das Tragverhalten in Hinblick auf die Kriterien Rissbildung unter Gebrauchslasten (Ankündigungsverhalten) sowie die erzielbare Restsicherheit (Tragsicherheit) bewertet.

Die Ergebnisse und Berechnungsansätze wurden für die praktische Anwendung in einem Bemessungsbeispiel zusammengetragen. Mit der vorliegenden Arbeit wurden somit die Grundlagen geschaffen Verstärkungsmaßnahmen mit Carbonbeton im Brückenbau bemessen zu können.

## Abstract

In the field of bridge construction and civil engineering, textile reinforced concrete as a strengthening method has been used in a few separate cases [Ehlig et al. 2012], whereas in the field of building construction, several projects have already been recently completed. The restriction to building constructions was due on the one hand to the material properties of the reinforcement materials available on the market, and on the other hand due to unresolved questions regarding its load-bearing behavior. The requirements for the reinforcement components, when used as strengthening material under outdoor conditions, are higher than those for indoor applications. Recent research projects have led to new developments of textile reinforcement (e. g. carbon reinforcements in the research project C<sup>3</sup> - Carbon Concrete Composite), which can be used in bridge construction due to their temperature resistance. In contrast to the building constructions, bridges are subjected to cycling loads and are thus exposed to high fatigue stresses. This thesis deals with the special aspects of the bridge inventory in Germany with a focus on strengthening methods with carbon reinforced concrete.

In the first step, the aim was to identify common deficiencies of existing concrete bridges. Both an increased utilization requirements and an ageing bridge inventory with structural weaknesses inevitably result in the need to increase the bending load capacity. In connection with increasing traffic loads and volumes, the fatigue stress of the superstructure must be mentioned, which affects reinforced and pre-stressed concrete bridges, too. Cracked coupling joints, but in particular the problem of stress corrosion cracking of historical pre-stressing steels, is a special type of damage observed in pre-stressed concrete construction. In this context, a comparison between established strengthening methods for concrete bridges and the strengthening with carbon concrete was discussed. To investigate the application of carbon reinforced concrete as a strengthening method, aspects of the material properties were first compiled based on current research projects and specifically supplemented by own test series.

The focus of the thesis was on the investigation of the load-bearing behavior of reinforced and pre-stressed concrete structures. At the beginning of the thesis, studies on the load-bearing behavior of strengthened reinforced structures were already available. However, there were only a few findings on the load-bearing behavior under service load level. Post-strengthened components are mixed-reinforced elements. While the different bond behavior between the reinforcement material in the existing concrete component and the subsequently applied reinforcement layer are of minor importance in the failure state, they have a significant effect on the load-bearing behavior in the service state. In pre-stressed concrete constructions, the bond differences are taken into account via the redistribution factor  $\eta$ , which results in a correction of the tensile force components for different bond stiffnesses and bending. Initial approaches on strengthening with textile-reinforced concrete structures were formulated by [Weiland 2009], which were taken up again and investigated experimentally in the context of the present thesis. Specifically, various 4-point bending tests were performed on carbon concrete reinforced steel and pre-stressed concrete slabs. For the reinforced concrete slabs, both ribbed and plain reinforcing steel was used, whereas the pre-stressed components were reinforced with strands in immediate bond. The investigation aimed to determine the size of the tensile forces in the metallic reinforcement elements over the length of the structure and to record them using fibre-optic measuring systems to validate the relieving effect for the existing concrete structure as a result of the subsequent reinforcement carbon concrete layer. In addition, it was possible to derive a design approach for the ultimate limit state for pre-stressed concrete structures subsequently strengthened with textile concrete.

The widespread problem in Germany of reinforcing structures with pre-stressing steel susceptible to stress corrosion cracking was also dealt with in the course of the thesis. The risk of a sudden failure due to an unnoticed pre-stressing steel breakage can be prevented by applying a carbon-reinforced strengthening. Experimental investigations were also carried out on bridge girders from a deconstruction project. The girders were first intentionally damaged, then reinforced with carbon concrete and the load-bearing behavior was evaluated regarding the criteria of cracking under service loads (crack before failure) and the achievable residual safety (load-bearing safety).

The results obtained were summarized in a design example for practical application. By using the present general calculation recommendations, the basis was created for designing the strengthening of bridges with carbon reinforced concrete.