



31. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

07. UND 08. JUNI 2022

© 2022 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

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Technische Universität Dresden

Institut für Massivbau

01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Drackensteiner Hang (1936) – Foto: Martin Hahn, LAD

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

ISSN 1613-1169

ISBN 978-3-86780-709-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

Tagungsband

31. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens der TU Dresden e.V.

TUDIAS GmbH

07. und 08. Juni 2022

Inhalt

Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022!	7
Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung	11
Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig	13
<i>Gero Marzahn, Jörg Kranz, Dietmar Placzek, Thomas Oehler</i>	
Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele	27
<i>Günter Seidl, Victor Schmitt, Wojciech Lorenc</i>	
Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen–Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen	43
<i>Anton Braun</i>	
Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon	57
<i>Lorenz Haspel</i>	
Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben	75
<i>Jürgen Feix, Johannes Lechner</i>	
Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung	89
<i>Oliver Steinbock, Thomas Bösch</i>	
Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge	107
<i>Antti Karjalainen</i>	
Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg	121
<i>Michael Hascher, Sabine Kuban</i>	
smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft	139
<i>Marc Wenner, Steffen Marx, Markus Meyer-Westphal, Martin Herbrand, Christof Ullerich</i>	
Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen	151
<i>Dirk Proske, Herbert Friedl, Jean-Baptiste Payeur, Blaise Girardin</i>	
Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach	163
<i>Bernhard Schäpertöns, Daniel Schäfer, Werner Kuhnlein, Christoph Schultheiß</i>	
Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton	175
<i>Andreas Apitz, Frank Jesse, Mike Schlaich</i>	
Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht ...	191
<i>Frank Bauchspiess</i>	
Chronik des Brückenbaus	207
<i>Zusammengestellt von Sabine Wellner</i>	

Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton

Dr.-Ing. Andreas Apitz¹, Dr.-Ing. Frank Jesse², Prof. Dr. rer. nat. Mike Schlaich³

1 Einleitung

Eine Hauptaufgabe der Weltgemeinschaft in den kommenden Jahrzehnten ist der Kampf gegen die Erderwärmung [1]. Sie ist maßgebliche Ursache für die zunehmenden Umweltkatastrophen weltweit und sie wird zunehmend zum Treiber von Flucht und Migration [2], [3], was den Frieden und den Zusammenhalt der Gesellschaften wohlhabender Industrienationen wie Deutschland gefährdet. Das Bauen als großer Treiber der Umweltveränderung muss daher zwingend ökologischer werden. Wie in diesem Artikel gezeigt wird, hat vorgespannter Carbonbeton im Brückenbau hier ein enormes Zukunftspotential und ist bereits heute nachhaltiger als die konventionellen Bauweisen, wenn er werkstoffgerecht eingesetzt wird. Durch seine Verwendung sind nämlich sehr materialeffiziente, leichte und dauerhafte Brücken möglich.

Bei Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton (bzw. Carbonspannbeton) bestehen die Zug Elemente (Bewehrung und Spannglieder) aus carbon- oder kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK oder auch einfach als „Carbon“ bezeichnet, Bild 1). Für die Kunststoffmatrix eignen sich duro- und thermoplastische Polymere. Letztere ermöglichen Bewehrungen, die nach dem Erwärmen wieder umformbar sind. Carbonzugelemente werden üblicherweise in einem Strangziehverfahren hergestellt, bei dem Endlosfasern von einer Rolle gezogen und mit einer Matrix getränkt werden [4]. Carbon ist prädestiniert für den Spannbetonbau, denn es ist leicht, ermüdungsresistent, hochfest und vor allem: es rostet nicht. Als Zugelemente können Stäbe (Bild 2), Litzen (Bild 3), Lamellen oder Gelege (auch Textilien genannt) verwendet werden. Das Wirkprinzip von Carbonspannbeton unterscheidet sich nicht wesentlich vom konventionellen (Stahl-)Spannbeton.

Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton sind nicht neu. Seit der ersten Umsetzung im Jahr 1988 wurden weltweit bereits über 30 Betonbrücken gebaut, die in Längsrichtung mit Carbonspanngliedern vorgespannt wurden [5]–[7]. In anderen Ländern existieren bereits entsprechende Regelwerke zur Bemessung [8]–[13] und

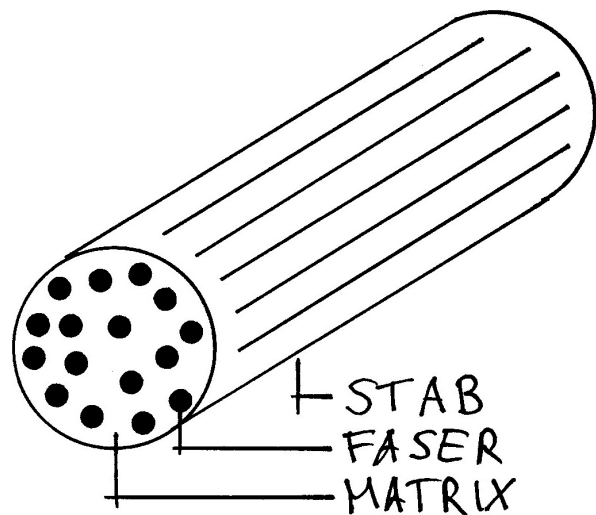


Bild 1 Grundsätzlicher Aufbau eines Carbonstabes
Grafik: [5]

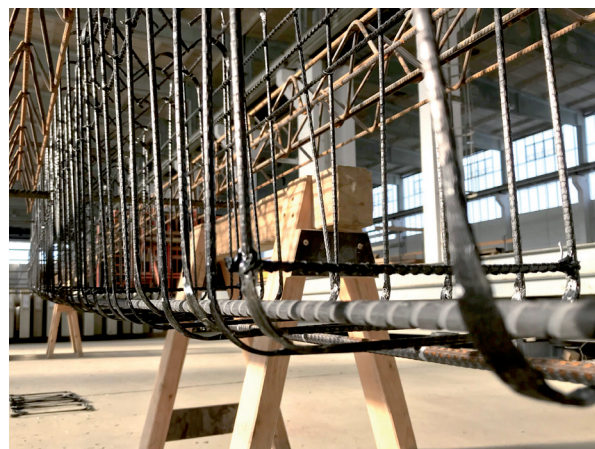


Bild 2 Bewehrungskorb aus Carbon
Foto: Frank Jesse, [5]

¹ Brückenköpfe GmbH

² Hentschke Bau GmbH

³ Technische Universität Berlin, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau



Bild 3 Carbonspannglied mit 12 Litzen und Vergusshülsen

Foto: Frank Jesse, [5]

in Deutschland werden sie derzeit entwickelt [5], [14]–[16]. Hierzulande wurden bis heute nur schlaff bewehrte Carbonbetonbrücken [17] und mit Stahl vorgespannte Carbonbetonbrücken umgesetzt [18], [19]. Eine erste Testbrücke aus vorgespanntem Carbonbeton steht in der Versuchshalle der Technischen Universität Berlin und wird dort derzeit untersucht [5], [16].

Trotz intensiver Forschung zu CFK-bewehrten Betonstrukturen in Deutschland in den vergangenen Jahren, der weltweiten Erfahrungen und des offensichtlichen Potentials konnte bisher noch keine Carbonspannbetonbrücke in Deutschland realisiert werden. Das liegt neben den hierzulande hohen bürokratischen Hürden auch an Vorbehalten der politischen Entscheidungsträger, insbesondere in Bezug auf die Nachhaltigkeit der neuen Bauweise. Die Autoren dieses Artikels möchten diesen Vorbehalten mit wissenschaftlichen Erkenntnissen entgegentreten.

Die Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken ruht laut Baumgärtner et al. [20] auf drei Säulen:

1. Ökologie, 2. soziokulturelle und funktionale Qualität und 3. Wirtschaftlichkeit. Auf das ökologische Potential wird in Abschnitt 2 mittels aktueller Erkenntnisse aus der weltweiten Forschung eingegangen. Für die zweite Säule muss besonders eine Frage beantwortet werden: Sind Brücken aus Carbonspannbeton sicher genug? Dieser Frage widmet sich Abschnitt 3. Wie man Brücken mit vorgespanntem Carbonbeton werkstoffgerecht entwirft und bemisst und dass diese Brücken bereits heute wirtschaftlich sind, wird in Abschnitt 4 gezeigt.

2 Ökologisches Potential

2.1 Rohstoff CO₂

Wir Menschen haben den Klimawandel durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe und die damit einhergehende Freisetzung des Treibhausgases CO₂ verursacht. Wir sind aber auch im Stande, den Klimawandel wieder umzukehren. Pflanzen machen es uns vor, da sie den Kohlen-



Bild 4 Zu Baumaterial umgewandelter Luft-Kohlenstoff eines Baumes

Foto: Andreas Apitz

stoff aus der Luft mit Hilfe der Sonnenenergie für sich als Energieträger und Baustoff nutzbar machen (Bild 4). Noch werden polymere Matrixsysteme und Carbonfasern vornehmlich aus Erdöl gewonnen. Das könnte sich aber schon bald ändern, denn beide Komponenten von CFK können entweder über den Umweg der Biomasse oder direkt aus Luft-Kohlenstoff mithilfe von Sonnenenergie hergestellt werden.

Biogene Polymere und auch Carbonfasern können beispielsweise aus Lignin gewonnen werden [22], [23]. Lignin ist ein in großen Mengen anfallendes Abfallprodukt aus der Papierherstellung und wird derzeit zum großen Teil der thermischen Verwertung zugeführt [23]. Neben dem Effekt der besseren Klimabilanz kann laut Souto et al. [23] der Herstellpreis von Carbonfasern um 35 % oder mehr gegenüber erdölbasierten Carbonfasern verringert werden.

Aber auch der direkte Weg ohne die Hilfe pflanzlicher Photosynthese ist möglich. Die Firma Covestro ersetzt beispielsweise schon heute bei der Herstellung von Schaumstoffen

für Matratzen und Polstermöbel einen Teil des Rohöls durch Luft-CO₂ [24].

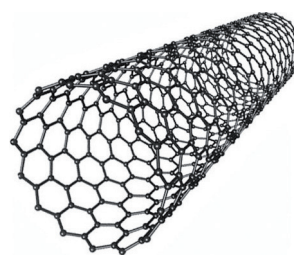


Bild 5 Kohlenstoff-nanoröhre

Grafik: [21]

Einen faszinierenden und womöglich sogar revolutionären Weg bestreiten Forscher aus den USA. Sie haben einen Weg gefunden, Luft-Kohlenstoff unter Energiezuführung in Kohlenstoffnanoröhren (Bild 5) mittels Elektrolyse umzuwandeln [25]. Diese Nanoröhren können dann in gebündelter Form zu Carbonfasern weiterverarbeitet werden [26].

Es ist also nicht unwahrscheinlich, dass wir ähnlich wie die Pflanzen in Zukunft allein mit Sonnenenergie und dem Kohlenstoff aus der Luft bauen werden. Der Kohlenstoff könnte dann in unseren Bauwerken gespeichert und somit der Atmosphäre dauerhaft entzogen werden.

2.2 Beton einsparen und grüner machen

Aufgrund der reduzierten Bewehrungsquerschnitte und weil geringere Betondeckungen erforderlich sind, lässt sich beim Einsatz von Carbonbewehrungen Beton einsparen. Somit sind leichte Fertigteile möglich, durch welche Baukosten und -zeit minimiert werden [27], [28]. Es sind dünnwandige Querschnitte realisierbar, wie man sie sonst eher nur aus dem Stahlbau kennt. Davon zeugen bereits gebaute textilbewehrte Trogbrücken [17], die auch in Segmentbauweise vorgespannt werden können [18], [19] (hier allerdings noch mit Stahlspanngliedern). Zukunftsweisend ist die Vorspannung von dünnwandigen Bauteilen mit Carbongelegen [29] oder -drähten [30], da einerseits die Festigkeit des Carbons optimal genutzt wird und andererseits der Betoneinsatz und das Gewicht minimiert werden.

Die Herstellung von Zement verursacht ca. 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen, fast dreimal so viel wie der Flugverkehr [31]. Das liegt vor allem am hohen Klinkeranteil im Zement, der benötigt wird, um ein alkalisches Milieu zu erzeugen und damit den Bewehrungsstahl vor Korrosion zu schützen. Dieser Anteil kann bei nichtrostender CFK-Bewehrung durch den Einsatz von Zementersatzstoffen reduziert werden [32], [33].

2.3 Dauerhaftigkeit

Eine dauerhafte Brücke ist nachhaltig, denn Belastungen aus Instandhaltung und Abriss für Mensch und Umwelt bleiben gering oder entstehen erst gar nicht. Die Dauerhaftigkeit von Carbonspannbetonbrücken stellt die 1988 an der japanischen Küste erbaute Shinmiya-Brücke eindrucksvoll unter Beweis. Sie besteht aus carbonvorgespannten Betonfertigteilen (Litzenspannglieder) und ersetzte eine Stahlspannbetonbrücke in gleicher Bauweise, die nach 20 Jahren Nutzung infolge der Meeressalzbelastung komplett korrodiert war (Bild 6,

links). Die neue Carbonspannbetonbrücke hingegen zeigte nach 20 Jahren keinerlei Abnutzung (Bild 6, Mitte und rechts, [34]). Im Zuge des Baus wurden zwei zusätzliche Carbonspannbetonträger hergestellt, welche neben der Brücke gelagert wurden und deren Tragfähigkeit im Jahr 1994 und im Jahr 2017 getestet wurde [35]. Beide Träger versagten in der Betondruckzone und verhielten sich bis zum Bruch nahezu identisch. Der 2017 getestete Träger wies eine um 6 % geringere Tragfähigkeit auf, was aufgrund der Versagensart wohl eher auf die Verwitterung des Betons oder auf statistische Abweichungen zurückzuführen ist als auf die Carbonlizen.

2.4 Recycling

Allgemeines Ziel beim Recyclen ist es, möglichst viel von der Qualität oder des Wertes eines Produktes zu erhalten, dabei möglichst wenig Energie aufzuwenden und die Umwelt möglichst wenig zu belasten. Das ist bei Stahl gut möglich, denn er kann eingeschmolzen und wieder in Form gebracht werden. Aus einem alten Bewehrungsstab entsteht ein neuer Bewehrungsstab mit gleicher Qualität (*closed-loop recycling*).

Für Carbonbewehrungen und -spannglieder ist solch ein vollständiges Recyclen derzeit noch nicht möglich, allerdings gibt es bereits gute Lösungen und die Forschung ist noch lange nicht abgeschlossen [37]. Zunächst einmal lässt sich feststellen, dass sich Carbonelemente mit konventionellem Geräteeinsatz wirtschaftlich vom Beton trennen lassen [38], [39]. Allerdings kommt es dadurch zwangsläufig zur Zerstückelung der eindimensionalen (1D-) Zuelemente, und damit auch der Endlosfasern.

Die CFK-Stücke können dann zu neuen CFK-Bauteilen weiterverarbeitet werden. Bei duroplastischen Kunststoffmatrizen lässt sich die Matrix mittels Pyrolyse thermisch zersetzen. Das dabei entstehende Gas wird abgefangen und als Energieträger für die Aufrechterhaltung des Prozesses genutzt [40]. Übrig bleiben nur die recycelten Carbonfasern (rCFs). Thermoplastische Matrizen hingegen können sogar mithilfe von Lösungsmitteln, Druck und Temperatur von den Fasern getrennt und dann in eingeschmolzener Form wiederverwendet werden [40]. Die CFK-Stücke mit Thermo-



Bild 6 Unterseite der alten Shinmiya-Brücke aus Stahlspannbeton nach 20 Jahren Nutzung (links); neue Brücke aus Carbonspannbeton nach 20 Jahren Nutzung (Mitte und rechts) Fotos: [36]

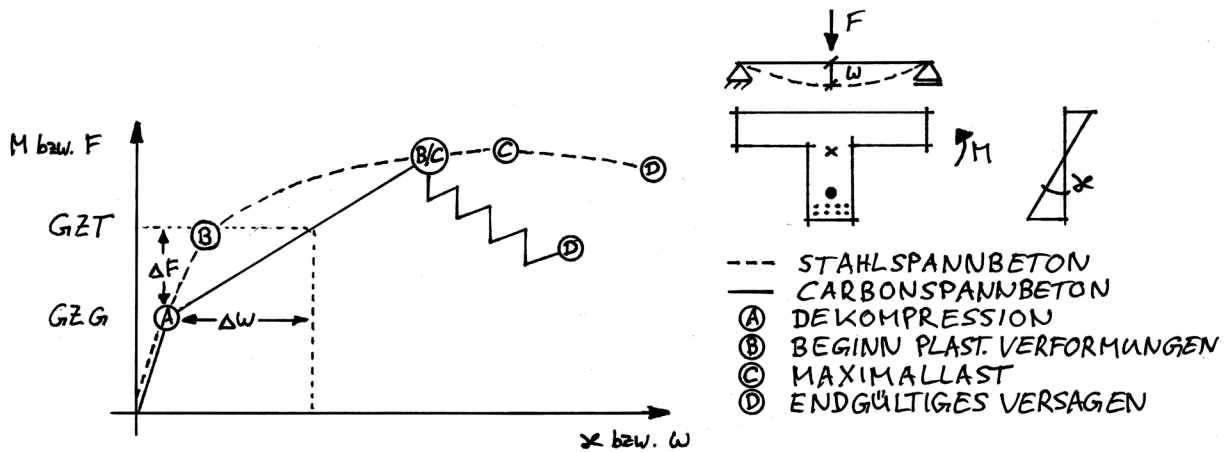


Bild 7 Trag- und Versagensverhalten von Plattenbalken aus Stahl- und Carbonspannbeton im Vergleich (schlaaffe Biegebewehrung im Steg unten aus mehreren Einzelstäben) Zeichnung: [5]

plastmatrix lassen sich aber auch als Ganzes einschmelzen und können dann für neue Bauteile wieder in Form gebracht werden [40].

Die rCFs können durch nochmaliges Tränken zu flächigen (2D-) oder räumlichen (3D-) Faserverbundbauteilen für beispielsweise die Automobil- oder Flugzeugbranche verarbeitet werden [40], [41]. Das wird jetzt schon wirtschaftlich praktiziert, beispielsweise von der Firma CFK Valley Stade Recycling GmbH und der Firma WIPAG. WIPAG verwendet neben recycelten Fasern auch recycelten Thermoplastkunststoff.

Ähnlich wie bei Recyclingpapier mit Zellulosefasern lassen sich Faserverbundbauteile mit rCFs dann sehr oft recyceln. Nach jedem Recycling verringert sich jedoch die Qualität der Fasern und damit der Bauteile etwas. Aber auch 1D-Zug-elemente sind aus rCFs herstellbar. Dazu werden möglichst lange rCFs zu Garnen verwebt, welche anschließend getränkt werden [41].

3 Sicherheit – Versagensankündigung ist nicht gleich Duktilität!

Viele mit dem Stahl- oder Spannbeton vertraute Ingenieure setzen Versagensankündigung mit Duktilität gleich. „Wenn ein Bauteil duktil versagt, dann kündigt es sein Versagen gut an“ – so ein weit verbreitetes Dogma, dessen Ursprung in der bekannten Plastizität des Stahls liegt. Das ist jedoch falsch. Und das führt außerdem zu falschen Vorurteilen. Die Duktilität ist ein Maß für die Fähigkeit eines Werkstoffes oder Bauteils, sich vor dem Versagen plastisch, also irreversibel zu verformen. Die Versagensankündigung hingegen ist eine Anforderung an ein Bauteil oder Tragwerk. Eine gute Versagensankündigung wird bei bewehrten und/oder

vorgespannten Betonbauteilen über große Durchbiegungen, Krümmungen und eine starke Rissbildung vor dem Versagen erreicht. Ob diese Verformungen nun elastisch oder plastisch sind, hat eine untergeordnete Bedeutung [5], [16], [42].

Vergleichen wir dazu das typische Trag- und Versagensverhalten eines Einfeldträgers mit weggesteuerter Belastung aus Stahlspannbeton mit einem Träger aus Carbonspannbeton (Bild 7). Beide Träger erreichen die gleiche Tragfähigkeit und verhalten sich bis zur Dekompression (Punkt A) gleich. Nach der Dekompression verformt sich der Stahlspannbetonträger linear, bis die Stahlzugelemente ab Punkt B ihre Streckgrenze erreichen und anfangen zu fließen. Danach fließt die Bewehrung und die Verformungen nehmen stark zu, während die Last nur geringfügig zunimmt. In Punkt D ist die Betondruckzone so weit eingeschnürt, dass sie versagt.

Der Träger aus Carbonspannbeton verformt sich ebenfalls linear nach dem Erreichen der Dekompression, allerdings mit geringerer Steifigkeit. Der Grund ist das im Vergleich zu Stahl größere Verhältnis von Festigkeit zu Steifigkeit bei Carbon. So ist bei gleicher Tragfähigkeit wegen der höheren Festigkeit des Carbons weniger Steifigkeit im System. Da die Zugelemente sich bis zum Bruch linear-elastisch verhalten, fehlt der Fließbereich und das Versagen des Trägers beginnt mit dem Reißen des ersten Zugelementes (Punkt B = Punkt C). Nacheinander versagen nun die weiteren Zugelemente und die charakteristische Zickzacklinie entsteht.

In der Realität ist die auftretende Belastung üblicherweise analog zu einer kraftgesteuerten Versuchsdurchführung (z. B. Verkehr auf Brücken).

cke). Das endgültige Versagen beider Träger erfolgt daher sofort nach dem Erreichen der Maximallast (Punkt C) – und zwar unabhängig vom Werkstoff. Für die Versagensankündigung dienen also nur die Verformungen, Krümmungen und Risse vor dem Erreichen der Maximallast. Idealerweise sollte sich der Träger unter GZG-Lasten (im Bereich der Dekompression, Punkt A) möglichst wenig und unter GZT-Lasten möglichst stark durchbiegen (großer horizontaler Abstand Δw). Da die Verformungsbegrenzung im GZG bereits durch die Norm geregelt wird, bleiben nur noch die Verformungen (bzw. Risse oder Krümmungen) im GZT nachzuweisen [5], [16], [29]. Die zweite Komponente der Versagensankündigung ist ein genügender Sicherheitsabstand des Lastniveaus im GZG zum Lastniveau im GZT (vertikaler Abstand ΔF). Das wird in der Bemessung über Sicherheitsbeiwerte gewährleistet.

Grundsätzlich kann also festgehalten werden, dass mit nichtduktilen Zugelementen eine gute Versagensankündigung über Verformbarkeit möglich und nachweisbar ist. Ein Argument für duktile Bewehrungen wäre noch, dass durch bleibende plastische Verformungen in der Gegenwart kritische Belastungen aus der Vergangenheit erkannt werden könnten. Zum einen wäre dies durch das Reißen einzelner Zugelemente auch bei nichtduktiler Bewehrung theoretisch möglich. Zum anderen ist den Autoren kein solcher Fall aus der Praxis bekannt.

Es gibt Fälle, wo die Duktilität der Zugelemente förderlich ist. Beispielsweise bei Flussbrücken, deren Pfeiler sich aufgrund einer Unterspülung stark absenken. Das hat dann aber auch eher etwas mit Robustheit, als mit Versagensankündigung zu tun. Bei statisch unbestimmt gelagerten Brücken können durch das Plastifizieren von Tragwerksbereichen Zwangsschnittgrößen abgebaut oder Lastreserven durch Schnittgrößenumlagerungen aktiviert werden. So wird die Robustheit erhöht, welche ein Maß für die Resistenz gegenüber Überbelastungen aus Last oder Zwang ist [5]. Hierfür ist Duktilität erforderlich und Zugelemente aus Stahl sind daher ideal. Allerdings kann erstens auch die Duktilität des Betons durch eine Umschnürung der Druckzone aktiviert werden. Zweitens kann im Falle nichtduktiler Bewehrung eine Quasi-Duktilität durch das sukzessive Reißen einzelner Zugelemente erzeugt werden. Aussagekräftige Versuche zum Lastumlagerungsvermögen von statisch unbestimmt gelagerten Carbonspannbetonträgern finden sich in der Literatur jedoch noch selten [5], [43].

4 Wirtschaftlichkeit durch werkstoffgerechtes Entwerfen und Bemessen

Bereits 1993 warnte Prof. Chris Burgoyne von der University of Cambridge davor, den Stahl oder Spannbeton einfach zu kopieren: „*The temptation is to think of „replacing steel with new materials“, without, in many cases, going back to first principles.*“ [44]. Seine Befürchtungen scheinen sich zum Teil bewahrheitet zu haben, denn eine eigenständige und werkstoffgerechte Konstruktions- und Formsprache ist bei den bisher gebauten Carbonspannbetonbrücken kaum erkennbar [5]. Im Folgenden wird auf einige Aspekte des werkstoffgerechten Entwerfens und Bemessens eingegangen.

4.1 Materialpreise

Werkstoffgerechtigkeit und Wirtschaftlichkeit sind eng miteinander verknüpft, daher ist die Kenntnis der Materialpreise essenziell. In Bild 8 sind die Preise einiger Zugelemente aus Stahl und Carbon aufgetragen. Die Werte basieren auf recherchierten Daten und teilweise auf in [5] getroffenen Annahmen. Sie sind daher als Richtwerte zu verstehen, um die Preisverhältnisse zueinander sichtbar zu machen. Die Preise sind aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit auf die charakteristische Zugfestigkeit bezogen. Mit der Einheit €/ (MN · m) wird der Preis angegeben, der bei der Übertragung von einem Meganewton in einem Zugglied von einem Meter Länge entsteht. Während bei den Bewehrungen die Preise der reinen Zugelemente angegeben sind, gliedert sich der Preis bei der Vorspannung (Vorspannung gegen den erhärteten Beton) in die Bestandteile Zugelement, Verankerung, Hüllrohr und eventuelles

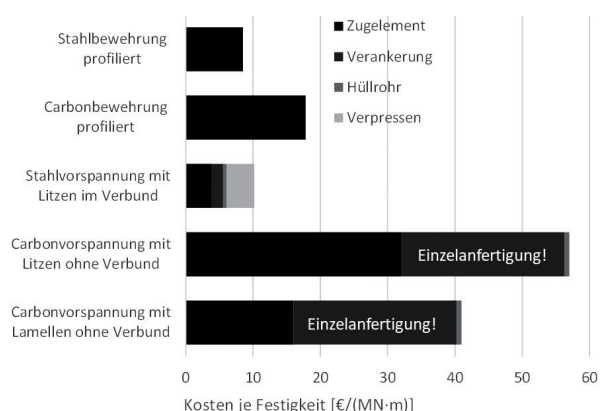


Bild 8 Preise von Bewehrungen und Spanngliedern bezogen auf die charakteristische Materialfestigkeit Grafik: in Anlehnung an [5]

Verpressen. Die meterbezogenen Kosten für die Verankerung wurden am Beispiel eines ca. 30 m langen Spannglieds ermittelt, welches eine Vorspannkraft von ca. 2,4 MN aufnehmen kann.

Unerwartet gering ist der Preisunterschied zwischen Stahl- und Carbonbewehrung (Faktor 2,1). Demgegenüber ist der Unterschied zwischen der Stahl- und Carbonvorspannung sehr hoch (Verhältnis 4,0 bzw. 5,6). Das liegt unter anderem an den hohen Kosten für die Verankerung der Carbonspannglieder, die auf Schätzungen für Einzelanfertigung beruhen und bei serieller Produktion sehr viel geringer ausfallen dürften. Carbonlitzen sind aufgrund der zusätzlichen Kosten für die Herstellung der Profilierung (durch Verdrillung der Drähte) teurer als Carbonlamellen. Daher scheinen Lamellen für die verbundlose Vorspannung wirtschaftlicher zu sein, gleiche Verankerungskosten vorausgesetzt.

4.2 Vorspannarten

Grundsätzlich sind alle aus dem Stahlspannbeton bekannten Vorspannarten möglich. Allerdings sollte bei der Carbonvorspannung gegen den erhärteten Beton auf den Verbund verzichtet werden. Dies kann mithilfe von Bild 9 erläutert werden, in dem der Dehnungs- und Spannungszustand zweier vorgespannter Querschnitte unter Momentenbelastung im Versagenszustand dargestellt ist. Die Spannungsglieder beider Querschnitte sind bis zum maximal zulässigen Wert $\epsilon_{\text{sm}0}$ vorgedehnt.

Das im Verbund liegende Spannglied dehnt sich infolge zusätzlicher Belastungen (Verkehr usw.) im Riss mit und hat schon nach relativ geringen Zusatzdehnungen $\Delta\varepsilon$ seine Bruchdehnung erreicht (Bild 9, oben). Weiter kann sich der Querschnitt nicht krümmen, da Carbon im Gegensatz zu Stahl nicht fließt. Das Spannglied würde also bei weiterer Belastung sofort versagen. Als Folge ist die Bruchdehnung und damit die Bruchspannung σ_{rd} der darunterliegenden schlaffen Carbonbewehrung noch überhaupt nicht ausgenutzt. Um nun die erforderliche Zugkraft

zur Aufnahme des GZT-Momentes aufzubringen, muss unwirtschaftlich viel schlaffe Bewehrung eingelegt werden. Zudem kündigt der Querschnitt sein Versagen aufgrund der geringen Krümmung kaum an. Die Lösung könnte sein, das Spannglied nicht voll vorzudehnen. Allerdings muss dann ein größeres Spannglied eingelegt werden, um die erforderliche Vorspannkraft aufbringen zu können. Da die Carbonvorspannung aufgrund der Verankerungen teuer ist, führt das ebenfalls zur Unwirtschaftlichkeit [5].

Bei der Vorspannung ohne Verbund hingen verteilt werden die Dehnungen über die gesamte Spanngliedlänge. Infolge Zusatzlasten dehnt sich das Spannglied daher nur minimal. Der Querschnitt kann sich krümmen und die schlaffe Bewehrung kann voll aktiviert werden. Durch die große Querschnittskrümmung kann ebenfalls eine gute Versagensankündigung erreicht werden. Allerdings kann hier das Spannglied nicht bis zu seiner vollen Bemessungsfestigkeit ($> \sigma_{pm0}$) ausgenutzt werden, da es nur geringfügig Zusatzlasten aufnimmt. Die Auswirkung auf die Kosten ist allerdings gering (siehe [5]).

4.3 Optimaler Vorspanngrad bei der Vorspannung gegen den erhärteten Beton

Eine wichtige Rolle für das Festlegen der Spanngliedmenge bei Spannbetonbauteilen im Allgemeinen spielt der *Vorspanngrad* κ_p des Bauteils, der das Spannungsniveau in der vor-

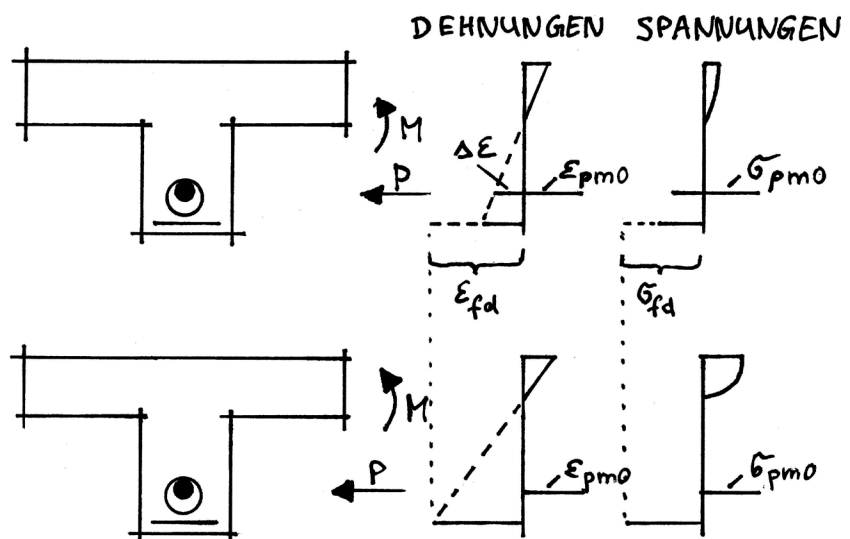


Bild 9 Dehnungs- und Spannungszustand zweier Querschnitte unter GZT-Momentenbelastung: Vorspannung im nachträglichen Verbund (oben) und Vorspannung ohne Verbund (unten) Zeichnung: [5]

gedrückten Zugzone beschreibt [45]. Der Vorspanngrad liegt üblicherweise zwischen 0 (keine Vorspannung) und 1 (volle Überdrückung unter der seltenen Kombination). Für Bauteile aus Stahlspannbeton wird ein Vorspanngrad gefordert, welcher zur Überdrückung der Zugspannungen aus ständigen Lasten und eines Teils der Verkehrslasten führt (Dekompressionsnachweis). Der Dekompressionsnachweis ist meistens maßgebend für die Höhe der Vorspannung und damit der erforderlichen Spannngliedmenge.

Bei Bauteilen aus Carbonspannbeton kann dieser Nachweis aufgrund des Korrosionswiderstands der Carbonzugelemente entfallen [5], [16]. Damit stellt sich die Frage nach dem optimalen Vorspanngrad hinsichtlich Funktionstüchtigkeit (= alle Nachweise eingehalten) und Wirtschaftlichkeit (= geringe Carbonmenge und -kosten). Die Frage ist nicht einfach zu beantworten, denn es müssen zum einen alle GZG- und GZT-Nachweise berücksichtigt werden. Zum anderen reicht die Betrachtung eines maßgebenden Querschnittes in Feldmitte nicht aus. Es muss die gesamte Trägerlänge einbezogen werden.

In [5] wurde daher eine Parameterstudie an einer 5-stegigen Plattenbalkenbrücke unter Straßenverkehr mit 30 m Spannweite durchgeführt. Es wurden unter anderem drei Varianten von interner Vorspannung gegen den erhärteten Beton untersucht:

- ❑ Referenz: Stahllitzen im Verbund und schlaffe Bewehrung aus Stahl,
- ❑ Variante 1: Carbonlitzen ohne Verbund und schlaffe Bewehrung aus Carbon,
- ❑ Variante 2: Carbonlamellen ohne Verbund und schlaffe Bewehrung aus Carbon.

Zunächst wurde festgestellt, dass bei den Carbonspannbetonvarianten in Feldmitte eher der Biegenachweis im GZT maßgebend wird und in Auflagernähe eher die GZG-Nachweise und die Robustheitsbewehrung.

Bild 10 links zeigt den Verlauf des benötigten Volumens der Zugelemente bezogen auf die gesamte Trägerlänge in Abhängigkeit des Vorspanngrades für die Variante 1. Natürlich steigt die graue Linie für das Spannngliedvolumen linear mit zunehmendem Vorspanngrad an. Die schwarze Linie kennzeichnet das Gesamtvolumen der Zugelemente (Bewehrung und Spannnglieder). Die Differenz zwischen schwarzer und grauer Linie kennzeichnet das Volumen der Bewehrung. Wie erwartet, muss bei niedrigen Vorspanngraden (= niedrige Spannngliedmenge) sehr viel Bewehrung eingelegt werden, um die Nachweise einzuhalten. Ab einem bestimmten niedrigen Vorspanngrad (hier bei ca. $\kappa_p = 0,25$) passt die erforderliche Bewehrung nicht mehr in den Querschnitt. Das Volumenoptimum, bei dem das geringste Gesamtvolumen der Zugelemente erforderlich ist, liegt bei $\kappa_p = 0,52$. Werden die Volumenwerte mit den Preisen aus Abschnitt 4.1 multipliziert, ändern sich die Kurvenverläufe, da die Spannnglieder wegen der Verankerung teurer als die Bewehrung sind (Bild 10, rechts). Das Kostenoptimum liegt daher weiter links ($\kappa_p = 0,25$).

Bei alleiniger Betrachtung der Materialkosten ist demnach möglichst wenig Vorspannung sinnvoll. Allerdings steigen mit hohen Bewehrungsmengen die Verlegekosten stark an, da die Herstellung des Bewehrungskorbes aufwändiger wird. Außerdem ist der Beton schwieriger einzubringen. Die in Bild 11 aufgeführten optimalen Vorspanngrade kennzeichnen daher die jeweiligen Mittelwerte zwischen Volumen- und Kostenoptimum. Der Vorspanngrad $\kappa_{p,ständig}$, welcher zur Überdrückung der ständigen Lasten führt, ist ebenfalls dargestellt. Die Referenz aus Stahlspannbeton liegt aufgrund der genannten Forderung aus dem Dekompressionsnachweis über $\kappa_{p,ständig}$. Die optimalen Vorspanngrade der Carbonspannbetonvarianten liegen unterhalb von $\kappa_{p,ständig}$. Es muss lediglich eine Vorspannkraft aufgebracht werden, welche 64 % bzw. 73 % der ständigen Lasten überdrückt. Damit sind die Vorspannkraften um 55 % bzw. 49 % geringer als bei der Stahlspannbetonreferenz.

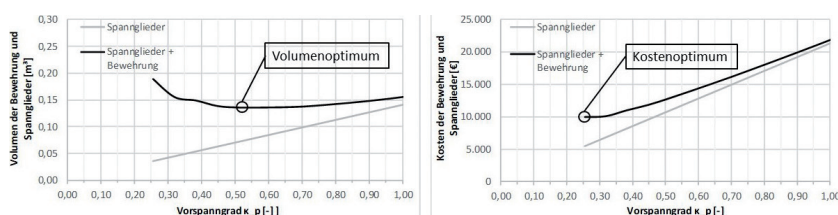


Bild 10 Volumen (links) und Kosten (rechts) der Zugelemente in Abhängigkeit des Vorspanngrades bei Variante 1 Grafik: [5]

Die Gesamtkosten der Zugelemente für diese optimalen Vorspanngrade (Bild 12) sind bei der Carbonvorspannung mit Lamellen (Variante 2) um 23 % geringer als jene für die Litzen (Variante 1). Gegenüber der Stahlspannbetonreferenz

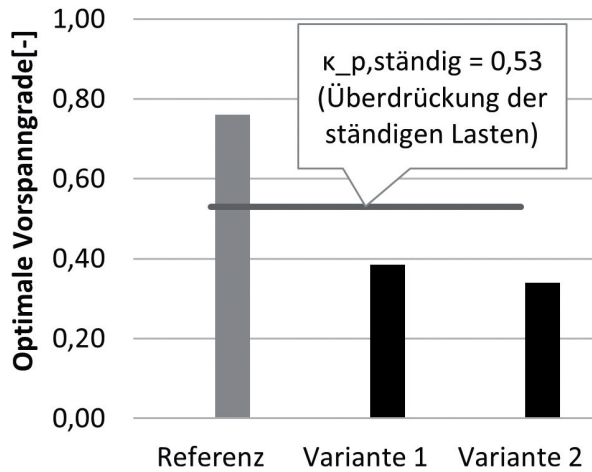


Bild 11 Optimale Vorspanngrade

Grafik: [5]

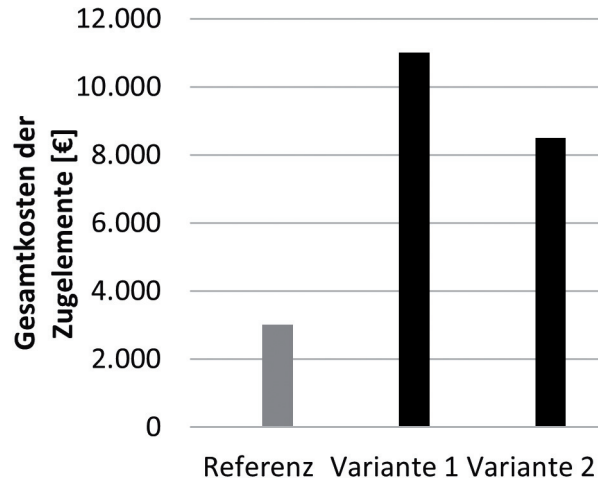


Bild 12 Gesamtkosten der Zuelemente Grafik: [5]

entstehen 2,8- bzw. 3,7-fach höhere Kosten. Zukünftige Preissenkungen bei den Carbonzuelementen (z. B. durch serielle Fertigung der Verankerungen, Abschnitt 4.1, oder einen geringeren Faserpreis bei Nutzung von Lignin als Ausgangsrohstoff, Abschnitt 2.1) sind hier nicht berücksichtigt. Aktuell sind die reinen Materialkosten der Carbonzuelemente also selbst bei optimaler Einstellung der Vorspannung vergleichsweise hoch. Allerdings ist diese Kostenposition klein im Vergleich zu den Gesamtkosten einer Brücke. Zudem werden die Mehrkosten durch die erhöhte Dauerhaftigkeit mehr als ausgeglichen (Abschnitt 4.5).

4.4 Carbonbeton-Stahlbeton-Verbundbauweise (CSV-Bauweise)

4.4.1 Entwurfskonzept für eine Autobahnüberführung

Wir haben gesehen, dass der Einsatz von Carbonzuelementen trotz optimaler Bemessung teuer ist. Carbon sollte daher sparsam eingesetzt werden, nämlich nur dort, wo es aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften und seiner Korrosionsbeständigkeit den größten Mehrwert bringt. Andere Tragwerkstei-

le können konventionell mit günstigem Stahl bewehrt werden. Solch eine Carbonbeton-Stahlbeton-Verbundbauweise (CSV-Bauweise) ermöglicht bei moderaten Erstellungskosten minimale Instandhaltungskosten. Das wird im Folgenden anhand zweier Beispielenentwürfe in CSV-Bauweise gezeigt, deren Wirtschaftlichkeit anschließend mit einer VFT-Brücke (VFT: Verbund-Fertigteile-Träger) ins Verhältnis gesetzt wird (Abschnitt 4.5).

Als Entwurfsaufgabe dient die Straßenüberführung über eine sechsstreifige Autobahn mit zwei Richtungsfahrbahnen (Lichttraumprofil 36 m breit und 4,70 m hoch). Das den beiden CSV-Entwürfen zugrunde liegende Konzept ist in Bild 13 dargestellt. Eine Autobahnüberführung wird im Winter insbesondere im Bereich der Widerlager und an der Unterseite des Überbaus durch Tausalznebel belastet, was bei den konventionellen Bauweisen zu Korrosionsschäden führt. Die Widerlager lassen sich relativ einfach vom Seitenstreifen aus inspizieren oder instand setzen, ohne dass der Autobahnverkehr eingeschränkt werden muss. Anders die Unterseite des Überbaus, denn hier muss bei Instandsetzungsmaßnahmen zwangsläufig der Autobahnverkehr eingeschränkt werden

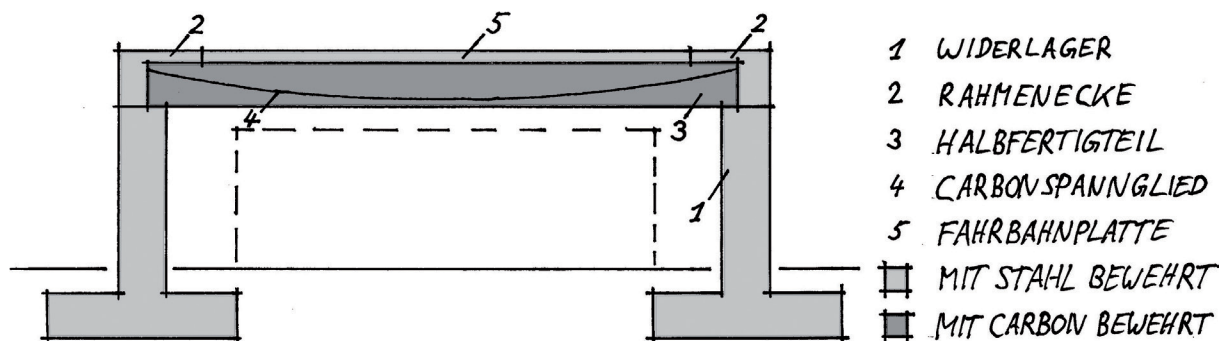


Bild 13 Entwurfskonzept

Grafik: [5]

– das ist teuer für Gesellschaft und Umwelt. Aus diesem Grund wird nur in diesem Bereich vorgespannter Carbonbeton verwendet, und zwar in Form von Halbfertigteilen, um Bauzeit und -kosten zu minimieren. Die Halbfertigteile werden auf zuvor hergestellte Stahlbetonwiderlager abgesetzt. Anschließend wird die Stahlbetonrahmenecke betoniert und so eine Einspannung erzeugt. Das Gewicht der danach betonierten Ort betonplatte aus Stahlbeton wirkt nun bereits auf ein Rahmensystem, wodurch der Überbau schlank bleibt (geringere Feldmomente). Bei direktem Kontakt von Carbon zu herkömmlichem Bewehrungsstahl sowie Zugang von Luft und Wasser kann es gegebenenfalls zu Korrosion kommen. Das kann, falls erforderlich, durch Maßnahmen wie Abisolieren oder bereichsweises Verwenden von korrosionsfreiem Stahl verhindert werden.

4.4.2 Entwurf CSV-1 (Litzenspannglieder)

Die an den Momentenverlauf angepassten, 41 m langen Halbfertigteile aus hochfestem Carbonbeton sind jeweils mit vier verbundlosen und intern verlaufenden Carbonspanngliedern vorgespannt (siehe Bild 14 und [5], [27], [46]). Ein Spannglied besteht aus 12 Carbonlitzen, welche mittels Vergusshülsen und Anker Mutter verankert werden und insgesamt eine Spannkraft von 2,4 MN aufbringen können.

Mit dem Bau eines insgesamt 24 m langen, mit einem Spannglied vorgespannten Demonstrators wurde die Umsetzbarkeit des Brückensystems bereits unter Beweis gestellt (Bild 15, [5]). Das Trag- und Versagensverhalten wird derzeit an der Technischen Universität Berlin untersucht.

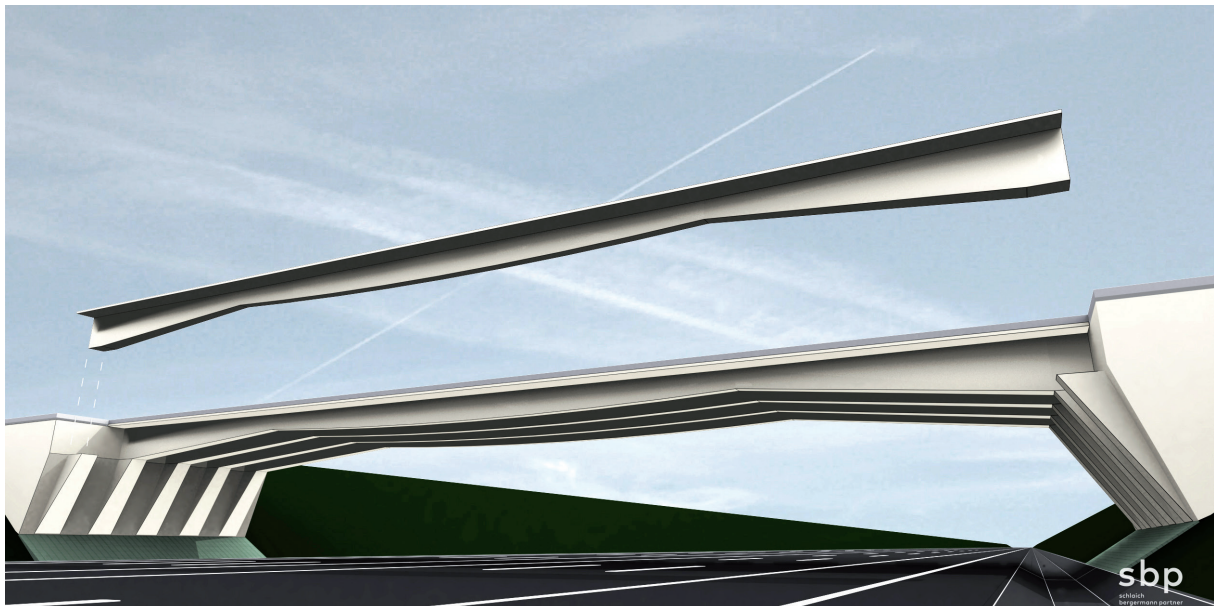


Bild 14 Entwurf CSV-1

Quelle: schlaich bergmann partner, [46]



Bild 15 Halbfertigteil aus Carbonspannbeton (links) und fertiger Demonstrator (rechts)

Fotos: Frank Jesse (links) und Alex Hückler (rechts)

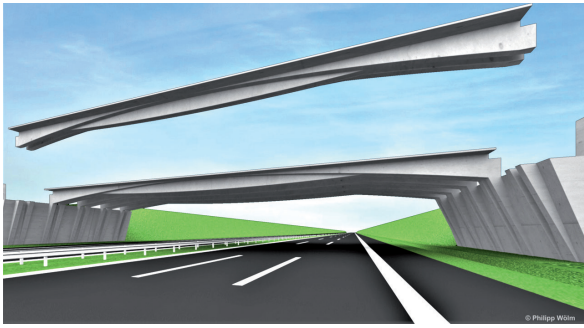


Bild 16 Entwurf CSV-2 Quelle: Philipp Wölm, [48]

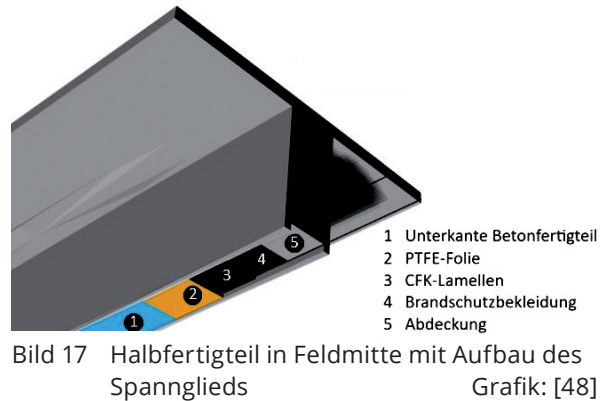


Bild 17 Halbfertigteil in Feldmitte mit Aufbau des Spannglieds Grafik: [48]

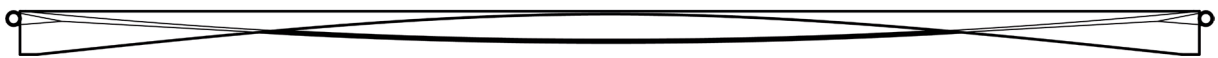


Bild 18 Ansicht Halbfertigteil mit Spanngliedverlauf sowie vereinfacht und vergrößert dargestellter Schlaufenverankerung Grafik: [5]

4.4.3 Entwurf CSV-2 (Lamellenspannglieder)

Es wurde in Abschnitt 4.3 gezeigt, dass Lamellen gegenüber Litzen für die Carbonvorspannung ohne Verbund kostengünstiger sind. Carbonlamellen werden schon seit Jahren wirtschaftlich bei der Instandsetzung von Brücken eingesetzt [5], [47]. Sie lassen sich aufgrund ihrer Form werkstoffgerecht über Umlenkung verankern und effektiv unterhalb des Querschnitts als externe Vorspannung anordnen. Letzteres ist besonders werkstoffgerecht, da die Korrosionsbeständigkeit ausgenutzt wird. Der damit vergrößerte Hebelarm führt zu geringerer Vorspannkraft und damit geringerer Spanngliedmenge. Das hat einen deutlichen positiven Effekt auf die Gesamtkosten (siehe Abschnitt 4.5).

Die hier verwendeten Halbfertigteile haben in der Ansicht die gleiche Grundform wie der Entwurf CSV-1, allerdings aufgelöst in zwei Stütz- und einem Feldbogen (Bild 16 und Bild 18). Die starke Formdynamik mit ablesbarem Kraft-

fluss führt zu einem gestalterisch hochwertigen Bauwerk. Das Lamellenspannglied verläuft unterhalb des Feldbogens entlang eines Teflonbandes (um Reibung zu vermeiden) und wird durch eine Brandschutzverkleidung und eine Abdeckung geschützt (Bild 17). Die Schlaufenverankerung am Ende der Fertigteile kann mit Spannpressen, Spannstuhl und entsprechenden Verankerungskörpern gespannt werden (weitere Infos zum Entwurf und zur Verankerung siehe [5], [48]).

4.5 Quantifizierung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit

In Bild 19 sind die Investitionskosten der CSV-Entwürfe im Vergleich zu einem Referenzbauwerk in VFT-Bauweise dargestellt (Kosten CSV-Entwürfe aus [5]; Kosten für die VFT-Brücke aus [49]). Erstaunlicherweise sind die CSV-Entwürfe lediglich 2 % bzw. 8 % teurer als die VFT-Referenz. Dabei ist der Entwurf CSV-2 aufgrund der geringeren Kosten für die Lamellenvorspannung und der effektiven Spanngliedanordnung unterhalb des Querschnitts um 5 % günstiger als der Entwurf CSV-1.

Um die Wirtschaftlichkeit im Sinne der Nachhaltigkeit zu bewerten, sind die Kosten für Herstellung, Nutzung und Abriss zu betrachten, wobei diese Kosten nochmal in Lebenszykluskosten und externe Kosten unterteilt werden. Lebenszykluskosten sind direkt einer Maßnahme zuordenbare Kosten, beispielsweise für die Erneuerung des Korrosionsschutzes einer VFT-Brücke. Externe Kosten entstehen für die gesamte Volkswirtschaft und für die Umwelt, insbesondere durch die Nutzung. Bei der Kor-

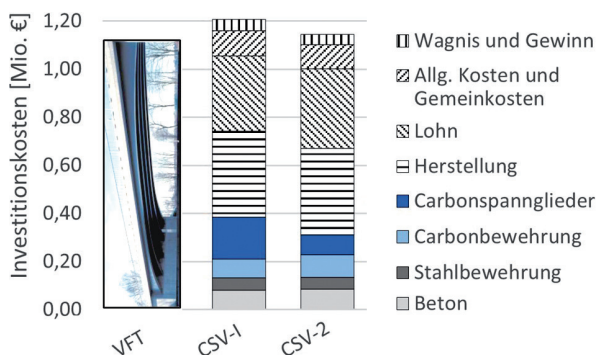


Bild 19 Investitionskosten der CSV-Entwürfe im Vergleich zu einer VFT-Referenzbrücke Grafik: [5]

rosionsschutzerneuerung einer VFT-Brücke beispielsweise wird die Kapazität der Autobahn unter der Brücke eingeschränkt (Baustellenverkehr). Die Nutzer müssen bremsen und wieder anfahren, was zusätzlich Zeit und Treibstoff kostet. Für eine wirtschaftliche Instandhaltungsstrategie muss der Korrosionsschutz der VFT-Träger zweimal in 100 Jahren erneuert werden [49]. Laut Zinke [49] entstehen bei einer VFT-Brücke über eine Autobahn mit mittlerem Verkehrsaufkommen (70.000 Kfz/Tag) externe Kosten in Höhe von 1,02 Mio. € innerhalb der Nutzung von 100 Jahren – allein für die Instandhaltung der Widerlager und der Überbauunterseite. Der überwiegende Teil davon wird durch die Korrosionsschutzerneuerung verursacht.

Die Überbauunterseite der CSV-Brücken ist hingegen nach derzeitigem Wissensstand 100 Jahre wartungsfrei. Folglich dürften sich die anfänglich geringen Mehrkosten für die Herstellung schon zum Zeitpunkt der ersten Korrosionsschutzerneuerung nach ca. 33 Jahren mehr als amortisiert haben.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz von vorgespanntem Carbonbeton ermöglicht Brücken, die sicher, dauerhaft und wartungsarm sind, davon zeugen weltweite Praxisbeispiele bereits seit über 30 Jahren. Darüber hinaus sind diese Brücken wirtschaftlich, wenn sie werkstoffgerecht entworfen und bemessen werden.

Dazu sollte beispielweise bei der Vorspannung gegen den erhärteten Beton aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und für eine gute Versagensankündigung auf den Verbund verzichtet werden. Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit von Carbon entfällt der Dekompressionsnachweis und größere Rissbreiten sind zulässig, weshalb lediglich halb so große Vorspannkräfte wie im Stahlspannbeton erforderlich und wirtschaftlich sind. Carbonlamellen eignen sich gut als Spannglieder, da sie günstig sind und effektiv unterhalb des Querschnitts angeordnet werden können. Da Carbon teuer ist, sollte es nur dort eingesetzt werden, wo es aufgrund seiner Materialeigenschaften den meisten Nutzen bringt. Die restlichen Tragwerksteile können konventionell mit günstigem Stahl bewehrt werden. Mit dieser Philosophie konzipierte Carbonbeton-Stahlbeton-Verbundbrücken (CSV-Brücken) können bereits heute mit den Standardbauweisen wirtschaftlich konkurrieren, wobei zukünftige Preissenkungen bei der sich entwickelnden Bauweise noch gar nicht einbezogen sind.

Im Hinblick auf die Bekämpfung des Klimawandels wird und muss der Fokus bei der Bewertung von Brücken stärker auf die Ökologie gelegt werden. Vorgespannter Carbonbeton hat dahingehend ein enormes Potential und wird aus diesem Grund vermutlich im 21. Jahrhundert zur bestimmenden Bauweise des Brückenbaus. Neben der hohen Dauerhaftigkeit und der damit einhergehenden Wartungsfreiheit führt der Einsatz von Carbon zu einer Minimierung des Betonverbrauchs und einer Verringerung des klimaschädlichen Klinkeranteils im Zement. Leichte Brücken mit dünnwandigen Querschnitten sind möglich, wie man sie eigentlich nur aus dem Stahlbau kennt. Der eingesetzte Beton ist dann noch ökologisch, da bei nichtrostender Bewehrung weniger klimaschädlicher Klinker benötigt wird. Das CFK-Recycling ist bereits heute möglich und sogar wirtschaftlich. In Zukunft können Carbonelemente voraussichtlich wirtschaftlich mithilfe von Sonnenenergie aus Luft-CO₂ hergestellt werden. Die Technologien dazu stehen bereit und werden mit Hochdruck weiterentwickelt.

Wir bauen seit ca. 240 Jahren Brücken mit Eisen oder Stahl und seit ca. 140 Jahren auch mit Stahlspann- oder Stahlbeton. Aufgrund des technischen und digitalen Fortschritts und des immer stärker werdenden Klimawandels ist es unwahrscheinlich, dass dies im 21. Jahrhundert so bleiben wird. Vorgespannter Carbonbeton ist nachhaltig und ausreichend entwickelt. Wir müssen nun endlich auch in Deutschland anfangen, diese Bauweise in die Praxis zu bringen.

6 Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Förderung des C³-Projekts im Rahmen der Förderinitiative „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“, Verbundvorhaben C3-V4.2, sowie bei den Projektpartnern Hentschke Bau GmbH, Bautzen, schlaich bergemann partner sbp gmbh, Stuttgart, DYWIDAG-Systems International, Unterschleissheim, und SGL Carbon, Meitingen.

Literatur

- [1] Welzer, H.: Alles könnte anders sein. S. Fischer Verlag, 2019
- [2] Oxfam Deutschland e.V. (Hrsg.): Migration und Flucht durch Klimawandel. 2016 (letzter Zugriff: 25. Oktober 2021)

- [3] World Meteorological Organization (WMO; Hrsg.): WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019). WMO-No. 1267, Genf, 2021 – online: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21930#.Ye0qCN8xlhE
- [4] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. VDI-Buch, Berlin: Springer, 2007
- [5] Apitz, A.: Vorgespannter Carbonbeton im Brückenbau. Beitrag zum werkstoffgerechten Entwerfen und Bemessen. Diss., TU Berlin, 2020
- [6] Karbhari, V. M.: Use of Composite Materials in Civil Infrastructure in Japan. World Technology Evaluation Center (WTEC) Division of Loyola University Maryland, Baltimore, MD, USA, 1998
- [7] Ushijima, K.; Enomoto, T.; Kose, N.; Yamamoto, Y.: Field deployment of carbon-fiber-reinforced polymer in bridge applications. *PCI Journal* 61 (2016) 5
- [8] JSCE Research Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcing Materials (Hrsg.): CES23 – Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Japan, 1997
- [9] ISIS Canada Research Network (Hrsg.): Prestressing Concrete Structures with FRPs. Design manual No. 5, 2008
- [10] ACI Committee 440 (Hrsg.): Prestressing concrete structures with FRP tendons. ACI 440.4R-04, American Concrete Institute, Farmington Hills (Mich., USA), 2004, reapproved 2011
- [11] Canadian Standards Association (Hrsg.): S806-12: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. CSA standards, Mississauga (ON, Kanada), 2012, reaffirmed 2017
- [12] fib (Hrsg.): FRP reinforcement in RC structures. Technical report. *fib bulletin* 40 (2007), International Federation for Structural Concrete 40, Lausanne, 2007
- [13] Niewels, J.; Hegger, J.: Betonbauteile mit Bewehrung aus Faserverbundkunststoff (FVK). In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb., Hrsg.): DAfStb-Heft Nr. 582, Berlin [u.a.]: Beuth, 2010
- [14] Rempel, S.; Ricker, M.; Hegger, J.: Safety Concept for Textile-Reinforced Concrete Structures with Bending Load. *Applied Sciences* 10 (2020) 20, 7328
- [15] Kueres, S.: Analyse und Bemessung von Betonbalken mit vorgespannter CFK-Bewehrung. Diss., RWTH Aachen University, 2019
- [16] Schlaich, M., Apitz, A., Jesse, F.: Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton in: *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (2020) 9, S. 684–696
- [17] Rempel, S.; Kulas, C.; Will, N.; Bielak, J.: Extremely Light and Slender Precast Pedestrian-Bridge Made Out of Textile-Reinforced Concrete (TRC). In: *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Cham: Springer Int. Publ., 2018, S. 2530–2537
- [18] Curbach, M.; Graf, W.; Jesse, D.; Sickert, J.-U.; Weiland, S.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton. *Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007) 6, S. 342–352
- [19] Michler, H.: Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempten im Allgäu. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013) 5, S. 325–334
- [20] Baumgärtner, U.; Fischer, O.; Jungwirth, J.; Katz, C.; Lederer, W.; Putz, A.; Streit, W.; Willberg, U.; Wüst, W.: Ganzheitliche Beurteilung von Verkehrsinfrastrukturprojekten. *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (2012) 8, S. 510–523
- [21] Webseite The World of Nanoscience; Beitrag: Nanotube & Carbon Fiber Overview. 2021, <https://worldofnanoscience.weebly.com/nanotube--carbon-fiber-overview.html>. Letzter Zugriff: 25. Oktober 2021
- [22] Webseite TECNARO GmbH; Beitrag: TECNARO – The Biopolymer Company | ARBOBLEND® ARBOFILL® ARBOFORM®. 2021, <https://www.tecnaro.de/arboblend-arbofill-arboform/>. Letzter Zugriff 25. Oktober 2021.
- [23] Souto, F.; Calado, V.; Pereira, N.: Lignin-based carbon fiber: a current overview. *Mater. Res. Express* 5 (2018) 7, 72001
- [24] Webseite covestro; Beitrag: Volle Kraft voraus in Sachen Nachhaltigkeit. <https://www.covestro.de/de/nachhaltigkeit-und-innovation/nachhaltigkeit>. Letzter Zugriff 25. Oktober 2021
- [25] Ren, J.; Johnson, M.; Singhal, R.; Licht, S.: Transformation of the greenhouse gas CO₂ by molten electrolysis into a wide controlled selection of carbon nanotubes. *Journal of CO₂ Utilization* 18 (2017), S. 335–344
- [26] Zhang, S.; Ma, Y.; Suresh, L.; Hao, A.; Bick, M.; Tan, S. C.; Chen, J.: Carbon Nanotube Reinforced Strong Carbon Matrix Composites. *ACS Nano* 14 (2020) 8, S. 9282–9319
- [27] Jesse, F.; Apitz, A.; Schlaich, M.: Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem

- Carbonbeton. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 29. Dresdner Brückenbausymposium. 11./12.03.2019 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2019, S. 173–183
- [28] Rempel, S.; Nigl, D.; Bielak, J.: Bemessung der Carbonbetonbrücke in Ottenhöfen. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021, 09./10.03.2020 in Dresden (geplant, verlegt auf den 08./09.03.2021, digital), Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2021, S. 37–48
- [29] Osman-Letelier, J. P.; Hückler, A.; Schlaich, M.: Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (2021) 10, S. 786–797
- [30] Lowiner, C.; Kurath, J.; Sydow, A.; Wietlisbach, B.: Hybridbrücken aus CPC-Platten und Carbonhalbträgern. *Beton- und Stahlbetonbau* 117 (2021) 2, S. 133–144
- [31] Webseite marlowes (Online-Magazin): With or without you. <https://www.marlowes.de/with-or-without-you/>. Letzter Zugriff 25. Oktober 2021
- [32] Schneider, K.; Butler, M.; Mechtcherine, V.: Carbon Concrete Composites C³ – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 12, S. 784–794
- [33] Weil, M.; Buchwald, A.; Dombrowski-Daube, K.: Ökologische und ökonomische Analysen von Geopolymerbeton – Mischungen für Außenbauteil. *BFT International* (2011) 12
- [34] Enomoto, T.; Ushijima, K.: Use of CFCC Tendons and Reinforcements in concrete Structures for Durability. In: *Proc. of Asia-Pacific Conf. on FRP in Structures 2012*, Sapporo (Hokkaido, Japan), 2012, 8 S.
- [35] Nguyen, H. T.; Masuya, H.; Ha, T. M.; Fukada, S.; Hanaoka, D.; Kobayashi, K.; Koida, E.: Long-term Application of Carbon Fiber Composite Cable Tendon in the Prestressed Concrete Bridge-Shinmiya Bridge in Japan. *MATEC Web Conf.* 206 (2018), 02011
- [36] Yamamoto, Y.; Ushijima, K.: Field Application of Carbon Fiber Composite Cable Post-Tensioning System. 2015, https://www.post-tensioning.org/Portals/13/Files/PDFs/Events/Conventions/TechnicalSessions/2015/042715Yamamoto_Ushijima.pdf. Letzter Zugriff 15. November 2021
- [37] Startseite Projekt „Wir Recyceln Fasern Wir Recyceln Fasern“. 2021, <https://www.wir-recyceln-fasern.de/>. Letzter Zugriff 25. Oktober 2021
- [38] Kortmann, J.; Kopf, F.; Hillemann, L.; Jehle, P.: Recycling von Carbonbeton – Aufbereitung im großtechnischen Maßstab gelungen! *Bauingenieur* (2018) 11 – VDI-Jahresausgabe, S. 38–44
- [39] Kortmann, J.: Verfahrenstechnische Untersuchungen Zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton. Diss., TU Dresden, 2020
- [40] Pegoretti, A.: Towards sustainable structural composites: recycling of continuous-fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research* 4 (2021) 2, S. 105–115
- [41] Hengstermann, M.: Entwicklung von Hybridgarnen aus recycelten Carbonfasern und Polyamid 6-Fasern für thermoplastische Verbundbauteile mit hohem Leistungsvermögen. Diss., TU Dresden, 2021
- [42] Burgoyne, C. J.: Ductility and deformability in beams prestressed with FRP tendons. In: *FRP Composites in Civil Engineering – Proc. of the Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong (China), 2001, S. 15–25
- [43] Maissen, A.: Vorgespannter Beton – Spannglieder aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff im Vergleich mit Stahllitzen. *Statisch unbestimmte Systeme*. EMPA-Berichte, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, 1997
- [44] Burgoyne, C. J.: Should FRP be bonded to Concrete? In: *Proc. of ACI Spring Convention*, Vancouver (B.C., Kanada), 1993, S. 367
- [45] Rombach, G.: *Spannbetonbau*. Wiley VCH, 2010
- [46] Schlaich, M.; Apitz, A.; Goldack, A.: Form optimized CFRP reinforced and post-tensioned integral concrete bridge using precast girders. In: *40th IABSE Symp. – Tomorrow's Megastructures*, 19.–21.09.2018 in Nantes (Frankreich), 2018
- [47] Hwash, M.: Umgelenkte Lamellen aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff als freistehende Spannglieder im Konstruktiven Ingenieurbau. Diss., Universität Stuttgart, 2013
- [48] Wölm, P.: Optimierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung einer mit Carbonlamellen vorgespannten Spannbetonbrücke. Masterarbeit, TU Berlin, 2019
- [49] Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauelementen. Diss., Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016

- 7 Herzlich willkommen zum 31. Dresdner Brückenbausymposium 2022
- 11 Grußwort des Sächsischen Staatsministers für Regionalentwicklung
- 13 Brücken auf geokunststoffbewehrten Widerlagern – schnell, umweltgerecht und kostengünstig
- 27 Brücken mit Verbunddübelleisten – Entwurf, Bemessung und Ausführungsbeispiele
- 43 Die Filstalbrücken im Zuge der NBS Wendlingen-Ulm – Integrale Bauwerke mit besonderen statisch-konstruktiven Herausforderungen
- 57 Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzhängern aus Carbon
- 75 Verstärken von Bestandsstrukturen mittels Verbundankerschrauben
- 89 Verstärkung von Stahl- und Spannbetonbrücken mit Carbonbeton – Aktuelles aus Praxis und Forschung
- 107 Integration of FEM Analysis and Construction Geometry Management on the Example of the Thu Thiem 2 Cable Stayed Bridge
- 121 Brückendenkmalpflege – Erfahrungen aus Baden-Württemberg
- 139 smartBRIDGE Hamburg – die Brückeninstandhaltung der Zukunft
- 151 Risikobasiertes Anlagemanagement der Brücken der SBB – Methode und erste Anwendungserfahrungen
- 163 Die Schorgasttalbrücke – Herzstück der Ortsumgehung Untersteinach
- 175 Nachhaltige Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton
- 191 Fertigung und Montage der Chenab Railway Bridge in Indien – Ein Erfahrungsbericht
- 207 Chronik des Brückenbaus