



# 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

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

# Zugglieder aus Faserverbundwerkstoff im Brückenbau – Besonderheiten beim Einsatz von Netzwerkhängern aus Carbon

*Dipl.-Ing. Lorenz Haspel  
schlach bergermann partner, Stuttgart*

## 1 Einführung

Seit etwa 30 Jahren werden Kohlefaser-Verbundwerkstoffe (*Carbon Fiber Polymer Composites* – CFPC, im Weiteren „Carbon“) für die Ertüchtigung und nachträgliche Bauteilverstärkung von Stahlbetontragwerken eingesetzt. Trotz höherer Materialkosten ist die Verwendung dünner, aufgeklebter Carbonbänder durch die einfache Handhabung, das geringe Gewicht und die Korrosionsbeständigkeit sowohl in technischer wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht sehr erfolgreich, obwohl hierbei in vielen Fällen die hohe Zugfestigkeit der Fasern nicht voll ausgenutzt werden kann.

Auch für Zugglieder aus Carbon lagen bereits Mitte der 1990er Jahre wissenschaftliche Grundlagen vor und seitens der Industrie standen um die Jahrtausendwende verschiedene Verankerungssysteme für Carbonseile zur Verfügung. Trotzdem beschränkte sich deren Einsatz in den darauffolgenden Jahren auf wenige, meistens im Rahmen von Forschungsvorhaben geförderte Pilotprojekte.

Auf Basis der Beschaffungskosten in €/kN können sich Carbonseile gegenüber herkömmlichen Lösungen aus Stahl bislang nur dort behaupten, wo weitere Eigenschaften des Hochleistungsmaterials vorteilhaft genutzt werden können. Als Material für hoch beanspruchte Zugglieder zeichnet sich Carbon im Vergleich zu Stahl durch hohe Zugfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit und außergewöhnliche Betriebsfestigkeitseigenschaften aus. Dies erlaubt den Einsatz sehr schlanker Querschnitte beispielsweise für die stark beanspruchten Hänger von Netzwerkbogenbrücken. Bei der Stadtbrückenbrücke über die A8 bei Stuttgart wurden erstmals Zugglieder aus Carbon für diese Brückentyp verwen-

det und deren Eignung für hohe Zug- und Ermüdungsbelastung bestätigt. Darüber hinaus wurde erkennbar, dass die geringe Steifigkeit schlanker, hochfester Carbon-Zugglieder zu einem vorteilhaften Gesamttragverhalten des Netzwerkbogens führt und Materialeinsparungen im Tragwerk ermöglicht: Für den Ersatzneubau der zweigleisigen Eisenbahnbrücke über die Oder bei Küstrin konnte das Gesamtgewicht des Tragwerkes durch die Verwendung von Carbonhängern um rund ein Viertel verringert werden.

Besonderheiten im Umgang mit dem Hochleistungs-Faserverbundwerkstoff ergeben sich durch das spröde Materialverhalten, längenabhängige Bauteilsteifigkeiten und die Betrachtung von lokalen Biegeeffekten an den Verankerungen, welche in diesem Beitrag am Beispiel des Ersatzneubaus der Oderbrücke Küstrin diskutiert werden.

## 2 Zugglieder im Ingenieurbau

### 2.1 Hochfeste Zugglieder

Die Verfügbarkeit hochfester, auf Zug belastbarer Bauteile ist die Grundlage für alle weit gespannten, aufgelösten Tragwerke. Insbesondere an der Entwicklung der Brückentragwerke aus Stahl lässt sich deutlich ablesen, wie mit der Weiterentwicklung duktiler und hochfester

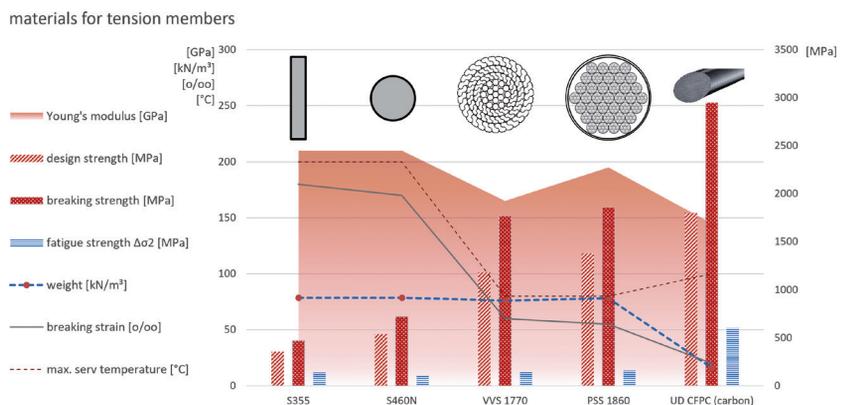


Bild 1 Materialeigenschaften von Stahlzuggliedern in Gegenüberstellung mit Carbon  
Quelle: schlach bergermann partner

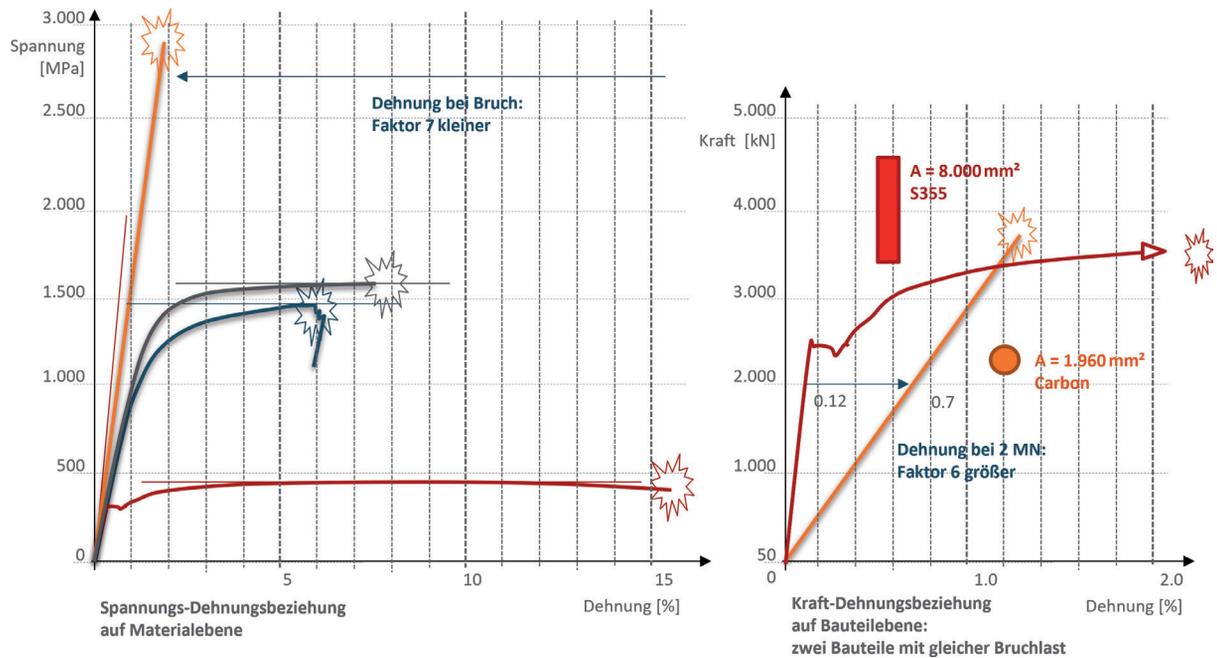


Bild 2 Materialeigenschaften im Vergleich;  
links: Spannungs-Dehnungsbeziehung von Stahlzuggliedern und Carbon – Bruchdehnung bei Carbon ca. 1/7 von Baustahl bzw. 1/3 von Spannstahl,  
rechts: Kraft-Dehnungsbeziehung von zwei Zuggliedern mit gleicher Bruchlast – Dehnung eines Baustahlquerschnittes auf Gebrauchslastniveau 6-mal kleiner als bei einem Carbonquerschnitt gleicher Bruchlast  
© schlaich bergemann partner

Stähle (vgl. Bild 1) auch die Spannweiten vergrößert werden konnten, und die Effizienz der Tragwerke gesteigert wurde.

Mit dem Einsatz von Faserverbundwerkstoffen eröffnen sich Möglichkeiten, mit nochmals deutlich geringerem Eigengewicht noch höhere Kräfte zu übertragen oder noch schlankere Zugelemente auszubilden. Die seit mehreren Jahrzehnten geführte Diskussion einer Brücke über die Meerenge von Gibraltar ist ein Beispiel für diese neuen Möglichkeiten – zeigt aber auch, dass bei noch leichteren Tragwerken auch neue Fragestellungen auftreten.

## 2.2 Materialeigenschaften von Carbon im Vergleich mit Stahl

In einer Gegenüberstellung mit Stahl in Form von gewalztem Flachstahl (S355) oder Rundstahl (S460N) sowie verseilten kaltgezogenen Rund- und Profildrähten oder Spannstahlilitzen zeichnet sich unidirektionaler Kohlefaser-verbundwerkstoff (UD – CFPC) durch folgende Merkmale ab: Mit Faserfestigkeiten um 5.000 MPa lassen sich Festigkeiten im unidirektionalen Laminat von 3.000 MPa erzielen. Mit einem Gewicht von rund 20 % im Vergleich zu Stahl liegt das Verhältnis von Bruchlast zu

Eigengewicht bei Carbon etwa um den Faktor 30 über dem eines Vollquerschnittes aus S355 bzw. um einen Faktor 7 über einem Parallellitzenbündel aus 1860-Spannstahlilitzen. Bei gleichem Querschnitt beträgt die axiale Steifigkeit je nach verwendetem Fasertyp rund 2/3 der Steifigkeit eines Stahl-Vollquerschnittes, etwas unter der Steifigkeit eines vollverschlossenen Seiles (VVS). Vergleicht man Querschnitte gleicher Bruchlast, ist die Steifigkeit von Carbon auf Gebrauchslastniveau lediglich 1/6 der eines Stahl-Vollquerschnittes aus S355.

Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich beim Materialverhalten auf hohem Lastniveau. Bei den heute eingesetzten gewalzten Stahlerzeugnissen zeigt sich bei Belastungen oberhalb der Streckgrenze ein ausgesprochen duktiles Materialverhalten. Die Traglast steigt bei gleichzeitig zunehmenden plastischen Dehnungen weiter an und fällt dann nach Erreichen der maximalen Traglast bis zum Versagen wieder leicht ab. Im Zugversuch werden Bruchdehnungen über 22 % erreicht. Auch für Zugglieder aus kaltverfestigten Spannstählen wird über die Anforderungen an die verwendbaren Stähle gewährleistet, dass vor dem Erreichen des Traglastniveaus eine plastische Dehnung in der Größenordnung von 5 % bis 8 % auftritt. Bei vollverschlossenen Seilen und Litzenbün-

delseilen kündigt sich ein Versagen meistens durch einzelne Drahtbrüche bzw. Litzenbrüche im Vorfeld an. Anders als bei Stahl zeigt sich bei Carbon ein vollständig linear-elastisches Materialverhalten bis zum Bruch (vgl. Bild 2).

Unidirektionale (UD) Carbonlamine weisen eine Temperaturdehnzahl nahe null auf. Diese besondere Eigenschaft ermöglichte den Einsatz für Maßnahmen, bei welchen eine temperaturunabhängige konstante Vorspannung benötigt wird. Für die Sanierung des historischen Dachstuhles der Gotischen Kirche St. Marien in Homburg/Etze wurde beispielsweise eine Verstärkung der horizontalen Aussteifung mit vorgespannten Carbonbändern ausgeführt [1]. Bleibende Dehnungen aus Kriechen oder Spannkraftverluste aus Relaxation beschränken sich bei unidirektionaler Beanspruchung auf die Umlagerung des Lastanteiles, welcher bei Erstbelastung auf die Matrix entfällt. Für die Fasern ergibt sich hieraus eine zusätzliche Beanspruchung von rund 1 %, wenn man davon ausgeht, dass sich die Last im Laufe der Zeit vollständig auf die Fasern umlagert. Vorspannkraftverluste können so bei geeigneter Ausbildung der Verankerung auf hohem Niveau über viele Jahre gleichbleibend erhalten werden [2]. Beanspruchungen quer zur Faser, wie sie bei UD-Strangschlaufen im Bereich der Verankerungen auftreten, führen zu einer Reduktion der Fasertragfähigkeit in Längsrichtung. Im Vergleich zu dem aus dem Seilbau bekannten Phänomen der „Kegelsetzung“ an der Verankerung von Vergusschulsen können die bleibenden Dehnungen aus Kriechen der Matrix im Bereich der Schlaufenverankerung in der Regel vernachlässigt werden.

### 2.3 Kein Seil wie das andere – unterschiedliche Einsatzgebiete hochfester Zugglieder

Unabhängig von der Art des Tragwerkes erfolgt bei der Bemessung von Zuggliedern aus Stahl eine Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und ein Nachweis der Betriebsfestigkeit. Zusätzlich zur axialen Beanspruchung des Zuggliedes können Verdrehungen an der Verankerung auftreten. Für geschweißte Konstruktionen können diese Zusatzbeanspruchungen bei der Bemessung berücksichtigt werden – für Zugstangen, Seile und Litzenbündel liegen hierfür keine konsistenten Bemessungsansätze vor.

Bauartbezogene Regelwerke stellen darüber hinaus Anforderungen hinsichtlich zulässiger

Verformungen des Gesamttragwerkes oder erforderlicher dynamischer Eigenschaften, welche in Ausnahmefällen auch für die Dimensionierung der Zugglieder maßgebend werden.

Eine Betrachtung verschiedener Zugglieder im jeweiligen Kontext zeigt, wie sich die Beanspruchungen im tatsächlichen Lebenszyklus unterscheiden. Nachfolgend werden typische Beanspruchungen für ein Schrägseil einer Schrägseilbrücke, ein Ringseil eines seilgestützten Stadionsdaches und ein Hänger einer Netzwerkbogenbrücke vorgestellt.

Nach dem Einbau wird das **Parallellitenseil einer Schrägseilbrücke** durch das Eigengewicht des Überbaus auf rund 33 % der Traglast vorgespannt. Aus Verkehrslasten schwankt die Seilkraft vorwiegend im Bereich zwischen 30 % und 40 % der Traglast und steigt in selteneren Fällen auf Werte um 45 %. Infolge des mit der Seilkraft variierenden Durchhanges und im Zusammenhang mit den Verformungen des Überbaus ergeben sich Differenzwinkel an den Seilverankerungen. Biegespannungen hieraus werden konstruktiv über die Ausbildung der Litzeneinläufe an der Verankerung reduziert, wodurch die Bemessungsnorm [3] eine höhere Ausnutzung der Zugtragfähigkeit erlaubt. Eine rechnerische Ermittlung der Anschlussrotationen wird daher für die Bemessung in der Regel nicht benötigt. Ermüdungswirksame Lastanteile der Verkehrslasten sind moderat und nicht bemessungsrelevant. Die Dimensionierung ergibt sich gegenwärtig in der Regel auf Grundlage der aktuell gültigen Beschränkung der Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS). In einigen Fällen bei flach geneigten Seilen in Feldmitte kann sich der Querschnitt auch infolge einer gewünschten Mindeststeifigkeit zur Begrenzung der Verformungen ergeben. Zur Vermeidung von winderregten Schwingungen sind Dämpfer an den Seileinläufen vorgesehen. Vorwiegend moderate Lasten und einige wenige hohe Lastzyklen charakterisieren den Lebenszyklus des Schrägseiles.

Das **Ringseil eines Speichenraddaches** wird im Zuge der Seilmontage auf eine Vorspannkraft von etwa 45 % der Traglast vorgespannt und baut im Laufe der ersten Betriebsjahre einen kleinen Teil der Vorspannung durch Seilkriechen ab. Durch Schnee und Wind ergeben sich Verformungen am Dachinnenrand von über einem Meter. Das Seilsystem ist damit in der Lage, die veränderten Lasten über eine Veränderung der Tragwerksgeometrie abzutragen, wobei die Seilkräfte im Ringseil selbst nur



Bild 3 Stadtbahnbrücke – Netzwerkbogen mit Hängern aus Carbon, Inbetriebnahme 2021

Quelle: sbp / Andreas Schnubel

um einige Prozent variieren. Die Einlaufwinkel der Seile an den Vergusshülsen der Seilkoppler bleiben dabei unverändert, sodass an den Seilverankerungen keine Biegeeffekte auftreten. Stattdessen ergeben sich an den Ringseilknoten entsprechende Abrolleeffekte aus Änderung der Seileinlaufwinkel. Im gesamten Lebenszyklus bewegt sich die Seilkraft nur in einem kleinen Korridor. Der gegenwärtig (noch) gültige Nachweis zur Begrenzung der Spannungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit [3] wird immer maßgebend. Bemessungsrelevant für das Ringseil ist darüber hinaus der Grenzzustand der Tragfähigkeit – ggf. unter Berücksichtigung eines maximalen Vorspanngrades. Der Lebenszyklus dieses Ringseiles wird im Wesentlichen durch ein dauerhaft hohes Vorspannniveau geprägt.

Ein **Hänger einer Eisenbahn-Netzwerkbogenbrücke** wird im Zuge der Montage auf ca. 15 % der Traglast vorgespannt. An beiden Enden liegt prinzipiell durch eine Bolzenverbindung eine gelenkige Lagerung vor. Infolge der Vorspannung wirkt diese jedoch sowohl um die Bolzenachse wie auch quer dazu, entsprechend einer Volleinspannung. Bei jeder Zugüberfahrt ergibt sich ein Belastungszyklus, wobei zunächst ein erheblicher Teil der Vorspannung abgebaut wird, anschließend das Lastniveau auf über 25 % der Bruchlast ansteigt und nach dem Verlassen des Zuges wieder auf das Niveau der Vorspannung im Eigengewichtszustand abfällt [4]. Zusätzlich treten

beim Vorbeifahren einzelner Achslasten am Hängeranschluss des jeweiligen Hängers weitere untergeordnete Lastwechsel auf, welche dem zuvor beschriebenen maßgebenden Lastzyklus überlagert werden. Gleichzeitig ergeben sich durch die Verformungen des Überbaus relativ zu den Hängerachsen Verkipnungen und Rotationen der Seilanschlüsse unter Last, welche infolge der biegesteifen Anschlüsse zu Biegespannungen an der Seilverankerung führen. Diese Effekte treten sowohl quer zur Hängerseilebene auf (Durchbiegung des Überbaus in Querrichtung) wie auch als Rotation in der Hängerseilebene (globale Verformung des Überbaus um die Querachse). Über den gesamten Lebenszyklus der Hänger folgt auf einen ermüdungswirksamen Belastungszyklus der nächste – jeweils gepaart mit lokalen Biegespannungen an der Seilverankerung. Das Auftreten von hohen Lasten ist systembedingt nur von kurzer Dauer und/oder nur bei außergewöhnlichen Ereignissen wie beim Hängerausfall zu erwarten. Bemessungsrelevant für den Querschnitt ist bei einem Zugglied aus Stahl der Ermüdungsnachweis unter Berücksichtigung der Einspannungseffekte an den Verankerungen. Eine andauernde Abfolge von hohen, ermüdungswirksamen Lastwechseln zusammen mit Rotationen an den Verankerungen prägen den Lebenszyklus der Netzwerkträger.

Zahlreiche Studien und geförderte Pilotprojekte haben die Eignung von Carbon in den vorgestellten und weiteren Anwendungsfällen

beleuchtet [4]–[9]. Naheliegender ist der kommerzielle Einsatz des Hochleistungswerkstoffes gegenwärtig dort, wo mit einem geringen Materialeinsatz ein möglichst großer Vorteil erzielt werden kann [10], [11]. Die Entscheidung, bei der Stadtbahnbrücke über die A8 bei Stuttgart (Bild 3) Zugglieder aus Carbon einzusetzen, wurde zunächst vor dem Aspekt der außergewöhnlich guten Ermüdungsfestigkeit und der daraus resultierenden möglichen Reduktion der Querschnitte getroffen. Darüber hinaus wurde erkennbar, dass die geringe Steifigkeit der schlanken Carbon-Zugglieder zu einem vorteilhaften Gesamttragverhalten des Netzwerkbogens, verbunden mit Materialeinsparungen, führt [10], [11].

Zusammengefasst sprechen somit neben der guten Dauerhaftigkeit insbesondere auch die ressourcenschonenden, CO<sub>2</sub>-sparenden Bauartigenschaften in der Errichtung für die wirtschaftliche Anwendungen in der Breite.

### 3 Hänger aus Carbon für die Oderbrücke Küstrin

Das Gestaltungskonzept für die Oderbrücke bei Küstrin (Bild 4 und Bild 5) geht aus einem Realisierungswettbewerb hervor, den Schüßler-Plan unter Mitwirkung von Knight Architects mit ihrem Siegerentwurf für sich entscheiden konnten: einem strahlend weißen eleganten Netzwerkbogen, der Polen und Deutschland auf Augenhöhe miteinander verbindet.

Das zur Ausführung kommende Tragwerk orientiert sich sehr nahe am Gestaltungskonzept des Wettbewerbsgewinners. Die technisch optimierte, von sbp geplante Alternativlösung verwendet jedoch ein Hängernetz aus Carbonzugelementen. Basierend auf den Erfahrungen bei der Stadtbahnbrücke in Stuttgart wurde die Eignung von Carbonhängern für die Oderbrücke Küstrin untersucht. Im Rahmen eines durch Herrn Prof. Hanswille be-

gleiteten, umfangreichen Gutachterverfahrens [12] und auf Basis von Bauteilversuchen erteilte das Eisenbahnbundesamt eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für die Umsetzung.

### 4 Sprödes Materialverhalten

Sprödes Materialverhalten mit plötzlichem, unangekündigtem Versagen ist bei Stahl im Zusammenhang mit großen Wanddicken, tiefen Temperaturen und unzureichender Stahlqualität bekannt. Auch bei Stahlguss kann beispielsweise im Zusammenhang mit ungünstigen Anteilen von Stickstoff und Aluminium in der Schmelze und einer ungünstigen Temperaturführung im Vergütungsprozess eine grobkörnige, extrem spröde Gefügestruktur entstehen, welche äußerlich unerkannt bleiben kann, aber bereits auf geringem Lastniveau zu einem schlagartigen Versagen ohne Vorankündigung führen kann (sog. *Rock-Candy*-Effekt).

Auch im Zusammenhang mit Ermüdungsversagen sind plötzlich auftretende Restbrüche bekannt, wenn ein fortschreitender



Bild 4 Oderbrücke Küstrin, gestalterischer Entwurf Schüßler-Plan Generalplanungsgesellschaft/Knight Architects; hier dargestellt: technische Alternativlösung mit Hängern aus Carbon nach dem Konzept von sbp © schlaich bergemann partner



Bild 5 Tragwerk der Oderbrücke Küstrin, Netzwerkbogen mit monolithisch angeschlossenen Seitenfeldern © schlaich bergemann partner

Ermüdungsrisso nicht bemerkt wurde. In den letzten Jahrzehnten wurden daher die Regelwerke zur Stahlsortenauswahl [13], bruchmechanische Nachweise [14] und umfangreiche Bemessungsregeln zur Betriebsfestigkeit [15] weiterentwickelt und fortgeschrieben. Beim Betonbau werden im Zusammenhang mit ultrahochfestem Beton und dem Versagensverhalten der Betondruckzone ebenfalls spröde Versagensmuster beobachtet.

Grundsätzlich besteht die Anforderung, plötzliches Versagen des Gesamttragwerkes mit ausreichender Zuverlässigkeit zu vermeiden. Von „gutmütigem“ Tragwerksverhalten kann gesprochen werden, wenn auch im Falle einer Überlastung des Tragwerkes und lokalem Ausfall von einzelnen Bauteilen Versagensmuster ausgeschlossen werden, welche reißverschlussartig zu einem weiterführenden Gesamtversagen führen (*progressive collapse*). Die Herangehensweise hierzu kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Auf Bauteilebene kann ein duktileres Verhalten mit plastischen Dehnungen Lastumlagerungen innerhalb des Bauteils ermöglichen. Auf Systemebene kann dies z. B. gewährleistet werden, wenn beim Versagen eines Bauteils alternative Lastpfade zur Verfügung stehen.

Für den Einsatz von Carbon als Zugglied muss auf Bauteilebene von plötzlichem sprödem Versagen ausgegangen werden. Die Frage, wie ein Einsatz solcher Bauteile in Übereinstimmung mit den Zuverlässigkeitsanforderungen und dem Sicherheitskonzept für wichtige Infrastrukturobjekte gelingen kann, muss daher in einem weiteren Kontext unter Betrachtung des Gesamttragverhaltens erfolgen, um zu zeigen, dass auf Systemebene ein redundantes Tragverhalten gewährleistet wird. Hierbei ist einerseits nachzuweisen, dass der Ausfall eines Zuggliedes nicht zur Überlastung weiterer Zugglieder führen kann (vgl. Abschnitt 5). Zudem ist eine Betrachtung des Systemtragverhaltens im Traglastbereich aufschlussreich. Wenn beispielsweise für das Quertragsystem und größere Abschnitte des Bogenzugbandes die plastische Traglast bereits deutlich überschritten ist, bevor die Traglast eines Hängers erreicht wird, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Systemtraglast vom gutmütigen Versagensverhalten eines fließenden Stahlhaupttragelementes charakterisiert wird. Berechnungen im Traglastbereich am Gesamtsystem sind aufgrund der zu berücksichtigenden geometrischen und materiellen Nichtlinearitäten rechenintensiv und aufwändig. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Qualität der

Modellbildung und Detailierung ab und ist vor dem Hintergrund unplanmäßiger Tragreserven und Überfestigkeiten der verwendeten Materialien zu interpretieren. Je realistischer das Versagensverhalten abgebildet werden kann, desto schlechter ist die Konvergenz rein statischer Analysen nahe der Traglast. Für die tägliche Praxis des Planers können daher nur vereinfachte Betrachtungen herangezogen werden. Weitreichende Untersuchungen zum duktilen Gesamttragverhalten von Tragstrukturen mit spröden Zuggliedern im wissenschaftlichen Rahmen und im Abgleich mit vereinfachten baustatischen Traglastbetrachtungen wären daher sehr wünschenswert.

## 5 Hängertausch und Hängerverlust

Im Kontext von Netzwerkbogenbrücken hat sich die Verwendung des Begriffes Hängerausfall im Zusammenhang mit einem vollständigen Abbau der Hängervorspannung und damit verbundenem Systemwechsel etabliert (vgl. Abschnitt 8). Gleichzeitig wird der Begriff oft auch für das plötzliche Versagen eines Hängers verwendet, welcher im Folgenden als „Hängerverlust“ bezeichnet werden soll und im Gegensatz zur planmäßigen Entnahme eines Hängers mit einem zusätzlichen dynamischen Lastanteil zu berücksichtigen ist.

Am Beispiel einer Schrägseilbrücke wird dies zunächst gegenübergestellt: Ein Seiltausch wird heutzutage üblicherweise als Bemessungslastfall im Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) mit angesetzt, um eine uneingeschränkte Nutzung auch während eines erforderlichen Austauschs einzelner Zugglieder zu gewährleisten, bevor die Nutzungsdauer des gesamten Bauwerkes erreicht ist. Sofern die Schrägseile nicht aus einzelnen Litzen bestehen und diese im Seilverbund einzeln getauscht werden können, ist hierfür vom Fehlen eines gesamten Zuggliedes auszugehen, was dann in der Regel den bemessungsrelevanten Zustand darstellt. Versagen eines einzelnen Zuggliedes unter Berücksichtigung der dynamischen Überhöhung ist grundsätzlich als außergewöhnlicher Lastfall (EXC) zu berücksichtigen.

Für die Anwendung von Carbonzuggliedern als Hänger beim Ersatzneubau der Oderbrücke Küstrin wurde im Zuge der Zustimmung im Einzelfall in Anlehnung an die Vorgehensweise in [16] festgelegt, dass der Ausfall zweier benachbart verankerter Hänger unter Verkehr nachzuweisen ist [12]. Hierdurch wird eine Erhöhung

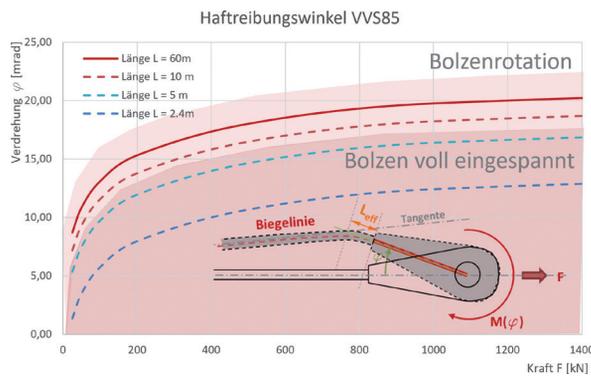


Bild 6 Bolzenverbindungen für Carbon-Zugglieder; links: Bolzenverbindung an einem oberen Radialseil im Dachtragwerk des Nationalstadions Warschau, rechts: Haftreibungsmoment an der Bolzenverbindung eines vollverschlossenen Seils VVS85

© sbp / Lorenz Haspel (links), schlauch bergermann partner (rechts)

der Robustheit des Tragwerkes erzielt und es wird damit ein gleichzeitiges Auftreten der Zustände Hängerentnahme wie auch Hängerverlust als Bemessungslastfall unter Betrieb (ULS) abgedeckt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass ein Hänger beispielsweise zum Zwecke der Inspektion ausgebaut ist und gleichzeitig ein zweiter Hänger ausfällt, wobei für diesen zweiten Hänger die Effekte aus dynamischer Lastüberhöhung durch plötzliches Versagen zu berücksichtigen sind. Zusätzlich war der Verlust von bis zu fünf Hängern als außergewöhnlicher Havarie-Lastfall (EXC) nachzuweisen [12]. Hierbei zeigt sich, dass sich die geringe axiale Steifigkeit der Carbonzugglieder günstig auf die Lastumlagerung zu den verbleibenden Hängern auswirkt: Durch die hohe Nachgiebigkeit der Zugglieder fällt die zusätzliche Belastung des am meisten betroffenen Hängers direkt neben den fehlenden Hängern geringer aus als bei Zuggliedern mit höherer Steifigkeit – die zusätzliche Beanspruchung wird damit auf mehrere verbleibende Hänger verteilt.

## 6 Seilbiegung an der Verankerung

### 6.1 Bolzen als Gelenk?

Bolzenverbindungen an den Verankerungen von Zuggliedern aus Stahl haben sich über Jahrzehnte als robuste Lösung bewährt (Bild 6) und werden bei der statischen Analyse üblicherweise als Gelenk idealisiert. Mit steigender Kraft im Zugglied nimmt die Reibung am Bolzen zu. Gleichzeitig werden steigende Verdrehwinkel benötigt, um das Haftreibungsmoment der Bolzenverbindung zu überwinden. Die hieraus resultierenden, lokalen Zusatzspannungen im Zugglied können für die Betrachtung im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Zuggliedern aus

Stahl in der Regel vernachlässigt werden. Bei wiederkehrenden Rotationen an der Verankerung unter Last ist jedoch deren Einfluss auf die Betriebsfestigkeit zu betrachten.

In Bild 6 ist exemplarisch für ein vollverschlossenes Seil mit  $D = 85 \text{ mm}$  und unter der Annahme eines Reibkoeffizienten von 0,22 der Haftreibungswinkel dargestellt. Neben der Last und der Seillänge hat die Länge des starren Seilkopfes einen Einfluss auf die Größe der rückstellenden Kräfte. Vereinfacht ist zu erkennen: Bei über 5 % der Seiltraglast und Verdrehungen der Verankerung um die Bolzenachse in der Größenordnung bis etwa 20 mrad ist von einer vollständigen Einspannung auszugehen. Je nach Ausführung der Materialpaarung und des Korrosionsschutzes der Bolzen und der Augenbleche im Kontaktbereich können sich die Bedingungen für das Haftreibungsmoment auch mit der Zeit verändern. Schmidmeier [17] erwähnt hier beispielsweise die Schwierigkeit eines dauerhaften Korrosionsschutzes bei Bolzenverbindungen von Seilköpfen im Salzsprühnebelbereich von Straßenbrücken. Andere selbstzentrierende Verankerungen, wie beispielsweise zylindrische Vergusschülsen mit sphärischen Scheiben, verhalten sich unter Last ebenfalls weitgehend wie eine Vollspannung. Für die meisten Anwendungen muss daher davon ausgegangen werden, dass der planmäßige Rotationsfreiheitsgrad primär zur Verfügung steht, um eine Ausrichtung des Seils im Zuge der Montage zu erlauben und dass während der Nutzungsdauer nicht mit einem Überwinden des Haftreibungsmoments zu rechnen ist. Sukzessive sind die Einflüsse aus Bewegungen der Seilverankerung selbst oder Auslenkungen des Seils aus der Achse bei entsprechender Größe und Häufigkeit unter dem Aspekt der Betriebsfestigkeit zu untersuchen.

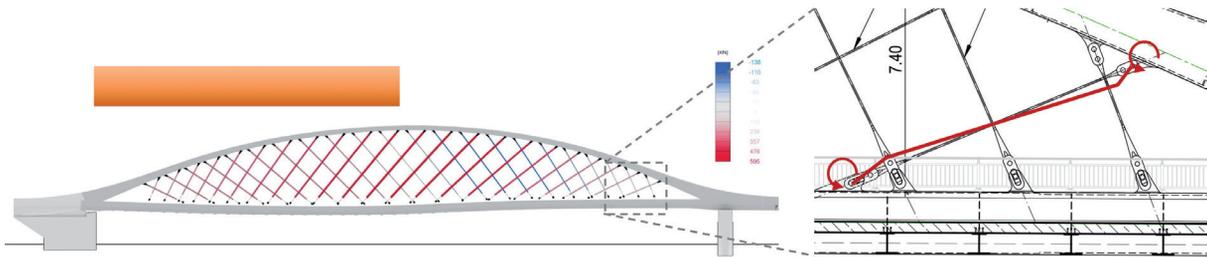


Bild 7 Verformung eines Netzwerk Bogens bei halbseitiger Last (orange) und Differenzkräfte in Netzwerkhängern infolge halbseitiger Belastung, rot = zusätzliche Zugkraft, blau = Abbau der Zugkraft (Druckkraft), Verformung überhöht dargestellt; rechts: resultierende Rotationen an den Hängeranschlüssen  
© schlaich bergemann partner

## 6.2 Festfrieren von Bolzenverbindungen auch bei Carbon

Auch bei Carbonstrangschlaufen tritt „Festfrieren“ der Bolzenverbindungen unter Last auf. Bei der Montage sind Vorkehrungen zu treffen, um eine ungünstige Ausrichtung der Bauteile zu vermeiden (vgl. Abschnitt 9) und im Zuge der Bemessung der Anschlüsse und der Zugglieder sind die zusätzlichen Biegebeanspruchungen mit zu berücksichtigen. Verformungen des Überbaus bei einseitiger Verkehrslast bewirken eine Verdrehung der Hängeranschlusslaschen um die Bolzenachse (vgl. Bild 7). Gleichzeitig erfolgt bei Zugüberfahrt eine Be- und Entlastung der Hänger. Um unkontrollierbare Rotationen der Anschlussbauteile auszuschließen, ist daher zu gewährleisten, dass auch bei minimaler Hängernormalkraft das Haftreibungsmoment nicht unterschritten wird.

## 6.3 Schiefstellung der Hängeranschlusslaschen

Zweischnittige Bolzenverbindungen können über eine unsymmetrische Pressungsverteilung entlang der Kontaktfläche Pin-Bohrung und ein Kräftepaar der beiden äußeren Laschen Momente quer zur Bolzenachse übertragen. Bei ausreichender Vorspannung kann die Kontaktfläche zwischen Bolzen und Bohrung jeweils als biegestarr angenommen werden. An den Laschenblechen und der Seilverankerung treten bei Momentenbeanspruchung quer zur Bolzenachse Verformungen auf. In Bild 8 ist eine Idealisierung des statischen Systems einer Hängerverankerung quer zur Bolzenachse dargestellt. Falls die Hängerkraft  $F$  nicht in der Ebene der Anschlusslasche wirkt, treten Zusatzbeanspruchungen im Anschluss auf.

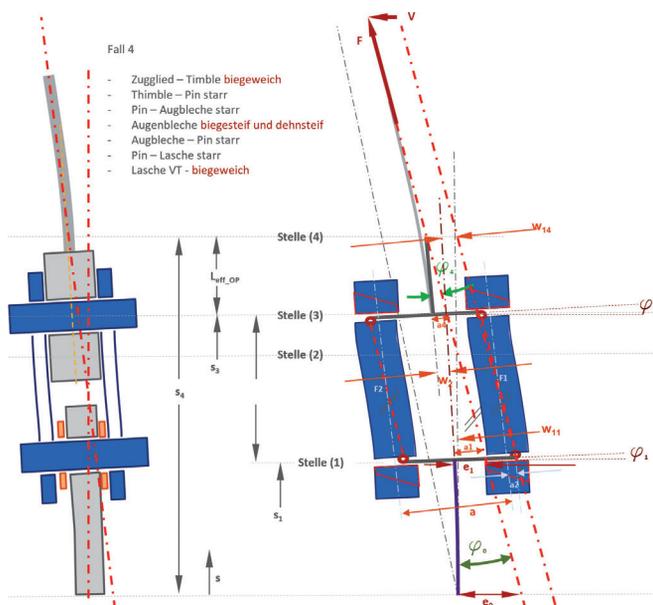


Bild 8 Idealisierung des statischen Systems einer Hängerverankerung quer zur Bolzenachse (links) und Hängeranschlüsse der Stadtbahnbrücke (rechts)

© HRA, sbp [12] (links), sbp / Andreas Schnubel (rechts)

Ursachen für eine Abweichung zwischen der Hängerrachse und der Anschlusslasche können vielfältig sein. Zulässige Schiefstellungen der Hängertasche im Zuge der Herstellung, Schweißverzug, Querversatz, Toleranzen der Bohrachse, zulässige Herstellungstoleranzen des geschweißten Hohlkastens, geometrische Abweichung zwischen der Bogenebene und der Achse des Versteifungsträgers infolge einer Gradienten des Überbaus, Verformungen des Quertragssystems des Überbaus infolge Last (Bild 9), ggf. Kriechen und Schwinden aus Verbundwirkung in Querrichtung sowie das Spiel der Laschen- und Bolzenverbindungen können zu einer Winkelabweichung oder zu einem seitlichen Versatz zwischen der Hängerkraft und dem Schwerpunkt der Hängeraschlusslasche führen. Für die Anschlussdetails sind die hieraus resultierenden Einflüsse insbesondere auf die Betriebsfestigkeit von Bedeutung.

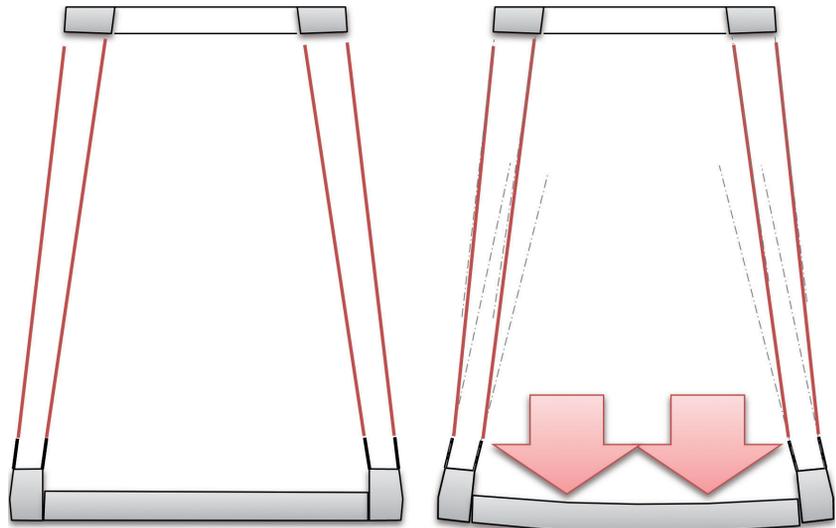


Bild 9 Schiefstellung der Hängeraschlusslaschen infolge Verkehrslast und Durchbiegung der Querträger

© schlaich bergemann partner

### 6.4 Sicherheitstheoretische Aspekte und Einflüsse aus Schiefstellung und Bolzenrotation

Beim Einsatz neuer Werkstoffe müssen die grundlegenden Sicherheitsanforderungen nach DIN EN 1990 [18] eingehalten werden. Im vorliegenden Fall wurde für die Hänger der Nachweis ausreichender Tragfähigkeit mit Hilfe einer versuchsgestützten Bemessung nach DIN EN 1990, Anhang D, Abschnitt 8 geführt. Grundlage des Nachweises bildete das in [12] hergeleitete analytische Berechnungsmodell,

mit dem die Einflüsse aus der Verdrehung an den Knoten, der Einfluss der Reibung und auch Dauerstandeffekte berücksichtigt werden konnten. Dieses Modell basiert auf einer Weiterentwicklung des in [19] vorgestellten Schlaufenmodells. Maßgebend für die Bemessung des Anschlusses ist dabei wegen der mehraxialen Beanspruchung immer der Schlaufenbereich.

Analytische Betrachtungen und FE-Berechnungen des Herstellers zeigen, dass der Einfluss infolge Bolzenschiefstellung nicht zu vernachlässigen ist. Im Zuge der 1:1-Bauteilversuche an Carbonzuggliedern für die Oderbrücke wurden eine Schiefstellung der Bolzenachse um 20 mrad berücksichtigt (Bild 10) sowie der Einfluss aus Festfrieren der Bolzen mit einem Fehlwinkel untersucht. Für die zulässige Normalkraft der Hänger wurden im Rahmen des ZiE-Gutachtens [12] Abminderungsfaktoren ermittelt, mit denen die Einflüsse der Anschlussverdrehungen sowie Effekte infolge Reibung erfasst werden können. Analytische Betrachtungen und FE-Berechnungen des Herstellers zeigen,

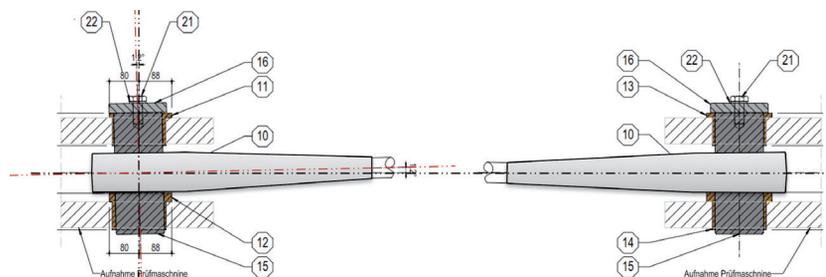


Bild 10 Versuchsaufbau für einen Zugversuch an Carbonstrangschlaufen mit einseitiger erzwungener Schiefstellung der Verankerung um 20 mrad

© schlaich bergemann partner

Analytische Betrachtungen und FE-Berechnungen des Herstellers zeigen, dass der Einfluss infolge Bolzenschiefstellung nicht zu vernachlässigen ist.

Historisch bedingt werden sowohl Zugversuche als auch Ermüdungsversuche an Stahlseilen nach wie vor ohne Imperfektion an der Verankerung durchgeführt. Mit der noch gültigen Ver-

sion des EC 3-1-11 [3] wurde ein Ansatz zur Berücksichtigung von Schiefstellungen bei Ermüdungsversuchen aufgenommen – dieser wird in der geplanten Neufassung jedoch voraussichtlich wieder entfallen. Ein Bemessungsansatz, um diesen in der Praxis vorhandenen Einfluss auf die Betriebsfestigkeit bei VVS zu berücksichtigen, geht auf Untersuchungen von Schmidmeier [17] (2015) zurück.

Bei Zuggliedern aus Carbon mit Schlaufenanschlüssen sind diese Vereinfachungen beim Nachweis der Ermüdung nicht zulässig. Auf der Grundlage der durchgeführten Versuche für die Oderbrücke Küstrin sowie unter Berücksichtigung von in der Literatur veröffentlichten Ermüdungsversuchen mit Schlaufenkonstruktionen wurde in [12] ein Nachweiskonzept für den Nachweis der Betriebsfestigkeit der Anschlüsse entwickelt. Grundlage bilden die Betriebslastenzüge nach DIN EN 1991-2 [20] und eine lineare Schadensakkumulationshypothese. Der Nachweis berücksichtigt neben den mehraxialen Beanspruchungszuständen im Anschlussbereich insbesondere die Oberspannungsabhängigkeit des Werkstoffes Carbon.

## 7 Längenabhängige Steifigkeit

Die Steifigkeit der Carbonzugglieder variiert abhängig von ihrer Länge. Durch die Aufspreizung und Umlenkung der Carbonfasern an der Verankerung liegt lokal eine geringere axiale Steifigkeit vor. Vereinfacht kann das über das Verhältnis der Länge der gedehnten Faser zur geometrischen Länge nachvollzogen werden (vgl. Bild 11). Im Bereich der freien Länge des Zuggliedes entspricht die Länge der Faser  $s_1$  nahezu der geometrischen Länge  $a_1$ . Fertigungsbedingte Welligkeiten der Fasern können hier zu einem Verhältnis  $a_1/s_1 < 1$  führen. Eine hohe

Fertigungsqualität unidirektionaler CFPC-Laminate kann man über eine Messung der Bauteilsteifigkeit auf freier Länge im Abgleich mit der unidirektionalen Fasersteifigkeit erkennen. Im Bereich der Aufspreizung und Umlenkung der Fasern liegt konstruktionsbedingt ein Verhältnis  $a_2/s_2 \approx 3/4$  vor. Dies reduziert die Steifigkeit kurzer Zugglieder um etwa 10 %.

Für die kürzeren Hänger führt der Effekt zu einer Reduktion der maximalen Hängerkräfte und trägt damit zur Vergleichmäßigung der Hängerkräfte bei. Bei der Modellbildung kann dieser Effekt durch eine Reihenschaltung von Federn unterschiedlicher Federsteifigkeit berücksichtigt werden (Bild 11).

## 8 Hängerausfall auf Druck

### 8.1 Anforderungen für die Gestaltung des Hängernetzes

In seiner Beschreibung des Tragverhaltens von Netzwerkhängern geht Per Tveit [21] davon aus, dass der Ausfall von Hängern für bestimmte Lastfälle in Kauf genommen wird. Auch Teich widmet 2005 diesem Thema ein Kapitel in [22] und zeigt, dass flach geneigte Hänger weniger leicht ausfallen, und erwähnt, dass durch Erhöhung des Eigengewichtes des Überbaus ein Ausfall verhindert werden kann. Geißler empfiehlt daher 2008 in [23] den Einsatz schwerer Fahrbahntafeln, also Verbund- oder Massivplatten, erwähnt dabei jedoch, dass die Erhöhung des Eigengewichtes immer auch mit negativen Auswirkungen wie z. B. einer Erhöhung der Normalkräfte in Bogen und Zugband verbunden ist, und verweist daher darauf, den Hängerausfall durch eine Veränderung der Hängergeometrie zu vermeiden, was wiederum zum Vorschlag flach geneigter Hän-

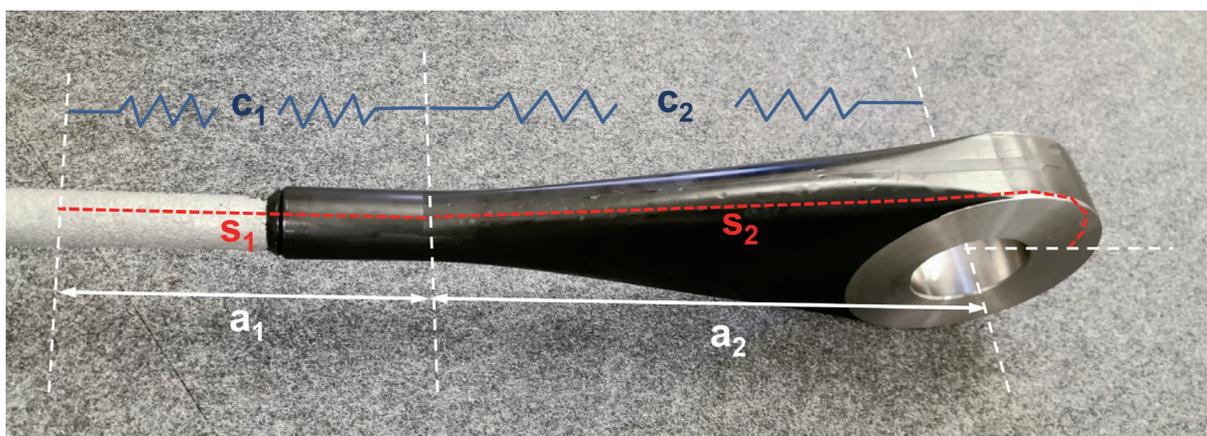


Bild 11 Längenabhängige Bauteilsteifigkeit – Modellbildung mittels Reihenschaltung zweier Querschnitte unterschiedlicher Längssteifigkeit © schlaich bergemann partner



Bild 12 Montagezustand eines Netzwerkbogens mit Bogenaussteifung im Bereich der temporären Auflager

© Mammoet

ger führt. Er verweist ebenfalls auf die damit in Kauf genommenen höheren Normalkräfte in den Hängern und das damit verbundene Erfordernis höherer Hängerquerschnitte und Anschlussdetails als Nachteil. Ebenfalls wird in diesem Zusammenhang der Durchhang langer flach geneigter Hänger und die damit verbundene abnehmende Steifigkeit beschrieben. In [24] wird ein Hängerausfall im ULS und in der seltenen Lastfallkombination im SLS als tolerierbar vorgeschlagen – für ermüdungsrelevante Beanspruchungen wird dies jedoch ausgeschlossen. 2010 erläutern Gauthier und Krontal in [24]: „Im Idealfall ist das Hängernetz so beschaffen, dass in keiner möglichen Lastkombination Druckkräfte in den Hängern auftreten, und zwar weder im Grenzzustand der Tragsicherheit (ULS) noch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS).“ Gauthier und Krontal erwähnen ferner, dass durch gezieltes Vorspannen einzelner Hänger ebenfalls ein Ausfall verhindert werden kann. Zur Vermeidung von Druckkräften wurden bei der EÜ B6 Halle/Saale sogar einzelne Hänger durch Normkraftgelenke zu Nullstäben geschaltet. Gauthier und Krontal kommen zu dem Schluss, dass diese Lösung technisch unbefriedigend ist und zukünftig ausgeschlossen werden sollte. In [4] wird ein Nachweis gegen Ausfall der Hänger im SLS

unter Berücksichtigung einer Variation des Eigengewichtes von  $\gamma_{g,inf} = 0,9$  vorgeschlagen. In der fortschreitenden fachlichen Diskussion ist mittlerweile eine klare Forderung nach einem Hängernetz ohne Hängerausfall erkennbar. Für die Oderbrücke Küstrin wurde festgelegt, dass einerseits der Hängerausfall im ULS auszuschließen und andererseits eine Mindestvorspannung im SLS zu gewährleisten ist [12]. Es ist davon auszugehen, dass gleichlautende Anforderungen auch für die Planung zukünftiger Netzwerkbogenbrücken gefordert werden. Diese Entwicklung gründet auf den Erfahrungen und Überlegungen im Zusammenhang mit eingeschweißten Zuggliedern aus Stahl, bei welchen im Falle von unplanmäßiger Belastung auf Druck mit seitlichem Ausweichen und damit zusammenhängend mit plastischen Verformungen an den Hängeranschlüssen zu rechnen ist.

## 8.2 Zugelemente in Montagezuständen

Um auch während der Montage Zustände mit Hängerdruckkräften zu vermeiden, werden bei Bogentragwerken häufig temporäre Druckstäbe als Aussteifung eingebaut (Bild 12).

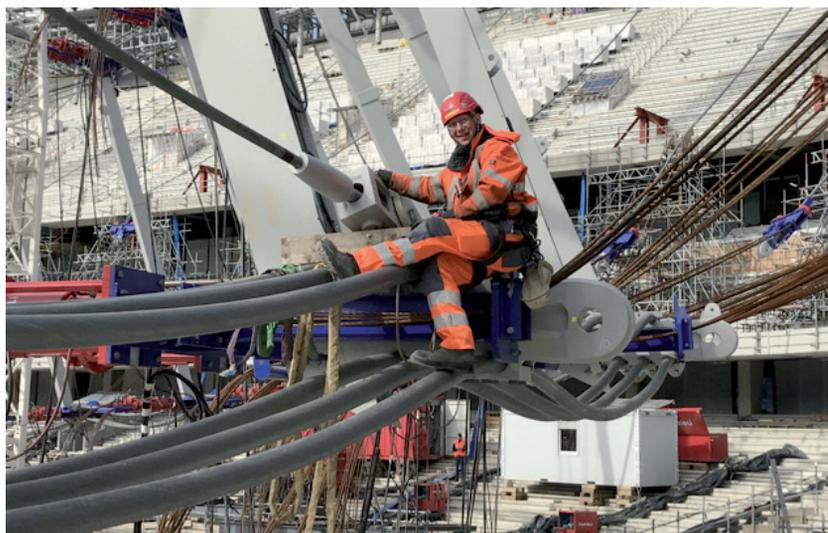


Bild 13 Seilmontage Dachtragwerk Neubau Stadion Tottenham/London – Durchhang bzw. Stauchung von vollverschlossenen Seilen im Bauzustand © sbp / Lorenz Haspel

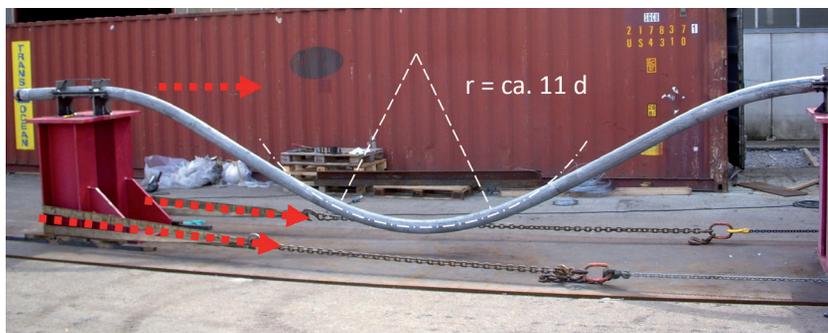


Bild 14 Seil-Druckversuch im Vorfeld der Seilmontage für das Dachtragwerk am Nationalstadion Warschau © Redaelli

Bei anderen Zugelementen können Zustände mit planmäßiger Verkürzung des lichten Abstandes der Anschlüsse im Zuge der Montage toleriert werden.

Im Zusammenhang mit der Montage von planmäßig vorgespannten Seiltragwerken sind beim Einsatz von vollverschlossenen Seilen Zwischenzustände mit großem Durchhang üblich (Bild 13). Wenn bei großen Seildurchmessern und geringer Systemlänge jedoch das Seileigengewicht nicht ausreicht, um einen entsprechenden Durchhang so einzustellen, dass im Seilquerschnitt nach wie vor überwiegend Zugkräfte herrschen, ist damit zu rechnen, dass sich der Seilverbund öffnet und einzelne Drähte aus dem Seilverbund heraustreten. Im Zusammenhang mit Druckbeanspruchung kann dies zu einem bleibenden Schaden an den betroffenen Drähten führen. Um dies sicher zu verhindern, wurde im Vorfeld der Seilmontage für das Dachtragwerk des Nationalstadions in Warschau ein etwas ungewöhnlicher

Seil-Druckversuch durchgeführt. Ein vollverschlossenes Seil mit Durchmesser 125 mm wurde beidseitig eingespannt. Anschließend wurde der Abstand der beiden Enden immer weiter verringert, um zu zeigen, bis zu welcher Stauchung der Drahtverbund stabil bleibt (Bild 14).

## 9 Montagekonzept der Oderbrücke Küstrin

Für die Oderbrücke Küstrin erfolgt wie bei vielen vorangegangenen Netzwerkbogen eine Vormontage des Bogentragwerkes in Seitenlage mit anschließendem Längsverschub in Endlage (Bild 15). Im Gegensatz zu bekannten Montageverfahren mit unverschieblicher Unterstützung des Bogentragwerkes in der Nähe der Kämpfer ist hier ein Verschub des vormontierten Bogens über Hilfsstützen und ortsfeste Verschublager vorgesehen, wobei ein Teil des monolithisch ange-

schlossenen Seitenfeldes als Vorbauschubel genutzt wird. In mehreren Verschubzuständen werden Lasten der Verschublager temporär im Bereich des Bogenfeldes in den Überbau eingeleitet. Für den Versteifungsträger und den Bogen sind solche Montagezustände bis zu einer gewissen Spannweite zwischen den temporären Verschublager ohne Verstärkungsmaßnahmen aufnehmbar. Daneben muss bei konventionellen Hängersystemen in der Regel auch im Bauzustand eine Belastung auf Druck ausgeschlossen werden.

Üblicherweise wird für eine derartige Lasteinleitung neben dem Bogenkämpfer daher eine temporäre Aussteifung zwischen Überbau und Bogen erforderlich (vgl. Bild 12), um eine unplanmäßige Hängerbeanspruchung auf Druck zu vermeiden.

Wird auf eine temporäre Aussteifung verzichtet, ergeben sich Zwischenzustände, bei welchen sich der lichte Abstand der Hängeran-

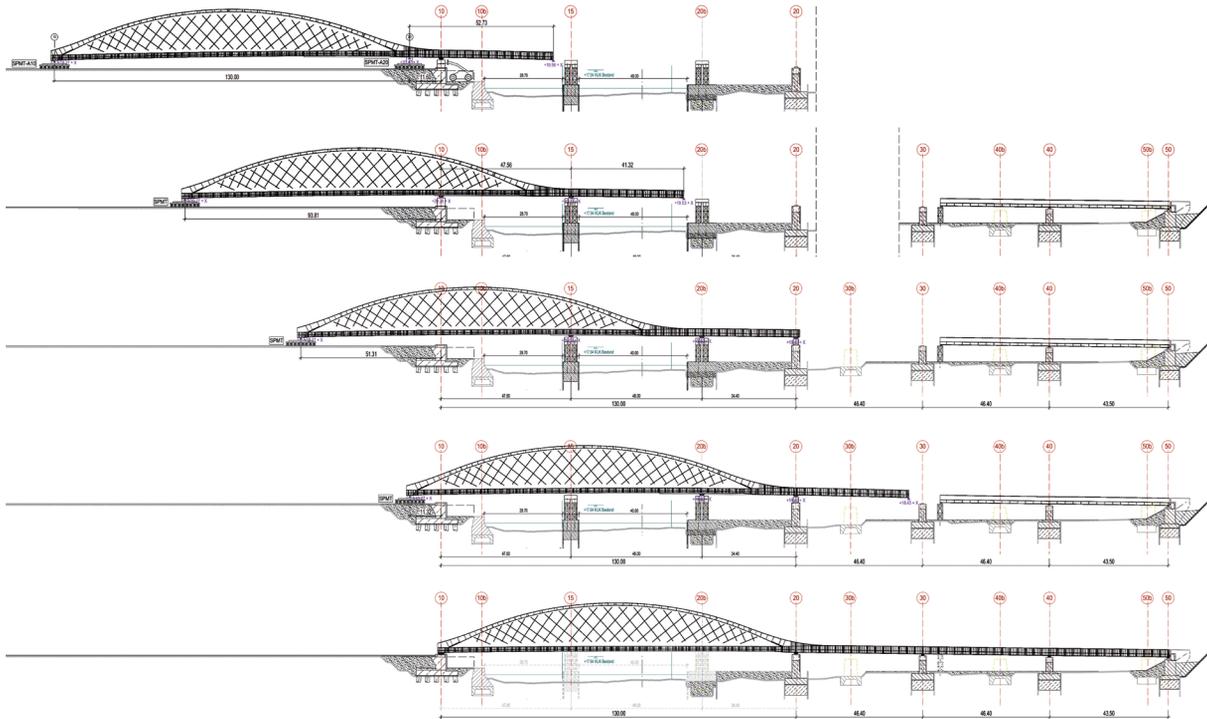


Bild 15 Einschub der Oderbrücke bei Küstrin – Montagezustände

© schlaich bergemann partner

schlusspunkte zwischen dem Bogen und dem Überbau deutlich verkürzt und zahlreiche Hänger auf Druck ausfallen. Die Hängerschlüsse der Carbonzugglieder bei der Oderbrücke bilden mit den Anschlusslaschen eine Gelenkkette. Bei einer Verkürzung des lichten Abstandes der Anschlussbolzen kann sich die Gelenkkette planmäßig auslenken. Ungewollte Druckkräfte können dadurch ausgeschlossen werden. Um dieses Verhalten im Vorfeld zu prüfen, wurde ein Entlastungsversuch durchgeführt (Bild 16), wobei das Verhalten des Hängersystems bei mehrmaligem Entlasten und Wiederbelasten nachvollzogen wurde. Auf Grund der Reibung an den Bolzenverbindungen richten sich die einzelnen Bauteile bei der Wiederbelastung nicht selbstständig in der Hängerschaft aus. Ab einem bestimmten

Lastniveau übersteigt das Haftreibungsmoment an den Bolzen die Rückstellkräfte nach Theorie II. Ordnung, so dass die Bolzen mit einem verbleibenden Fehlwinkel „einfrieren“ (vgl. Abschnitt 6.1). Die Anschlusslaschen müssen daher im Nachgang nochmals in der Hängerschaft ausgerichtet werden.

## 10 Life Cycle Assessment

In einer vergleichenden Analyse des ökologischen Fußabdruckes wurden Tragwerkslösungen mit Flachstahlhängern und Carbonhängern gegenübergestellt [25]. Carbon hat aufgrund seines hohen Energieverbrauches in der Herstellung einen aktuell (noch) sehr ungünstigen ökologischen Fußabdruck. Am Hän-



Bild 16 Hänger-Entlastungsversuch im Vorfeld zum Verschieben des Netzwerkbogens der Oderbrücke bei Küstrin

© sbp / Lorenz Haspel

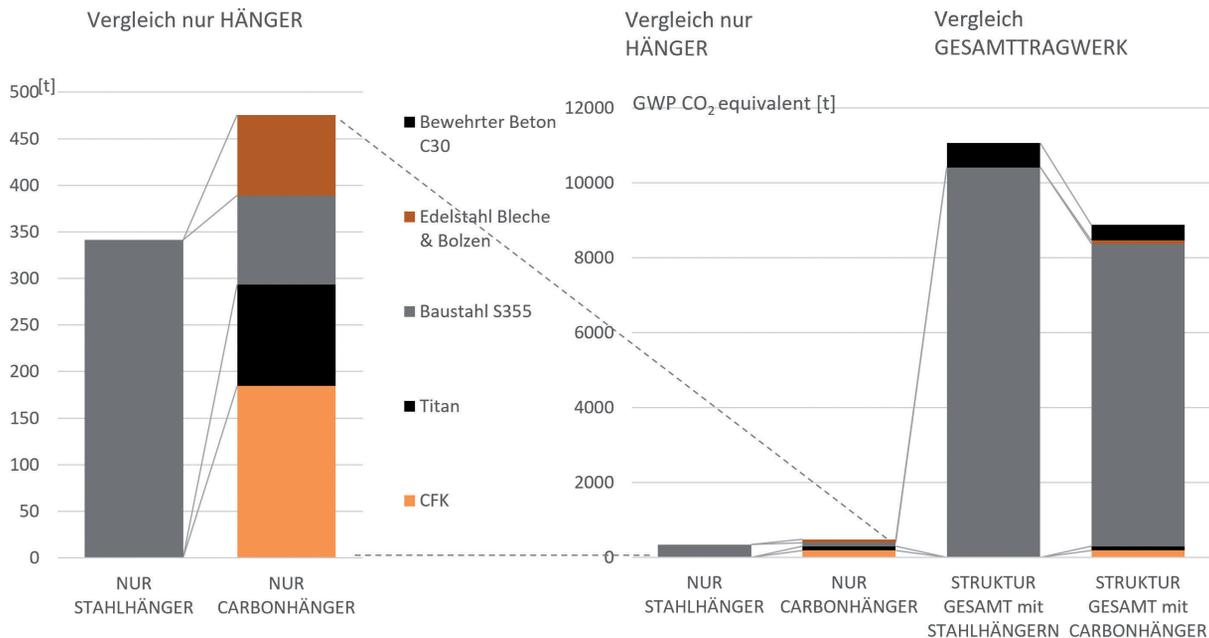


Bild 17 Oderbrücke Küstrin – vergleichende Betrachtung des ökologischen Fußabdruckes  
© schlaich bergemann partner/Urs Meier, Empa

geranschluss werden zudem mehrere Bauteile aus Titan und verschiedenen Edelstählen eingesetzt.

Betrachtet man lediglich die beiden Hängersysteme isoliert, ergibt sich auf Basis der aktuellen Datengrundlage [26], [27] für das System mit Carbonhängern ein rund 30 % schlechteres ökologisches Ergebnis. Der Anteil der Hänger am Gesamttragwerk ist jedoch gering. In der Betrachtung der Gesamttonnagen ist eine deutliche Einsparung an Beton im Überbau erkennbar, welche darauf zurückzuführen ist, dass im Falle der Carbonhänger-Lösung auf Ballastbeton verzichtet werden kann. Die Reduktion des Eigengewichtes im Überbau schlägt sich zudem in einer Reduktion der Stahltonnagen in Bogen und Versteifungsträger nieder. Im direkten Vergleich ergibt sich insgesamt eine Reduktion des ökologischen Fußabdruckes von 20 %. Auch wenn die Aussagekraft von Life-Cycle-Analysen kritisch im Kontext zu werten ist, lässt sich allein in der beobachteten Verringerung des Tragwerkeigengewichtes von insgesamt 25 % unschwer die Tragweite der Einsparungen erkennen. Sekundäre Effekte wie mögliche Einsparungen in Unterbauten und Gründungen sind dabei noch nicht berücksichtigt.

## 11 Ausblick

„Haben kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Brückenbau eine Zukunft?“, überschrieb Prof. Urs Meier seinen Vortrag zum 19. Dresdner

Brückenbausymposium 2009 und schließt seinen Vortrag mit einem Zitat von Mark Twain (1835–1910): „In zwanzig Jahren wirst Du mehr über die Dinge traurig sein, die Du nicht gemacht hast, als über Dinge, die Du gemacht hast.“

Heute, 16 Jahre später, sind die Hürden für eine erfolgreiche Einführung neuer Technologien nicht kleiner geworden: Neben technischer Reife und wirtschaftlichem Vorteil haben neue Lösungen nur dann eine gute Chance, wenn sie einen Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes leisten.

Der Einsatz von Carbonhängern für den Ersatzneubau der zweigleisigen Oderbrücke Küstrin zeigt beispielhaft, wie die Materialeigenschaften eines Hochleistungswerkstoffes genutzt werden können, um das Gesamtgewicht des Tragwerkes zu reduzieren: Ressourcenschonung und CO<sub>2</sub>-Einsparung durch Leichtbau für schweren Eisenbahnverkehr. Hierbei spielt das Zusammenwirken der Carbonseile mit deren Anschlüssen und dem Gesamttragwerk eine wesentliche Rolle – bei der Dimensionierung, der Beurteilung des robusten Tragwerksverhaltens und schließlich auch bei der Montage.

Unter diesem Aspekt muss die Frage nach dem geeigneten Werkstoff neu gestellt werden: Statt zu fragen: „Welches Material ergibt das wirtschaftlichste Zugglied?“ muss gefragt werden: „Welche Materialeigenschaften führen im Zusammenwirken zu einem vorteilhaften Gesamttragwerk“.

## Dank

*„Alles Große in der Welt geschieht nur,  
wenn einer mehr tut als er muss.“*  
Klaus Landfried

Das gilt für die Zusammenarbeit in der Umsetzung der EÜ Oder bei Küstrin im Besonderen. Für die gute Zusammenarbeit und das Engagement der Verantwortlichen und Projektbeteiligten bedanke ich mich an dieser Stelle ausdrücklich.

## Kenndaten Oderbrücke Küstrin

Stützweiten: 130 m – 46,4 m – 46,4 m – 43,5 m  
 Bogenstich: 16 m  
 Länge Überbau: 266 m (gesamt)  
 Breite Überbau: 13 m  
 Brückenfläche: 2.917 m<sup>2</sup>  
 Längsgefälle: von 1,03 % bis –1,25 %  
 Lastmodell: LM71  $\alpha=1,21$ ; SW0  $\alpha=1,21$

## Beteiligte Oderbrücke Küstrin

|  |   |
|--|---|
| <b>Bauherr</b>   | Andreas Gollek, Veronika Gillig, Hartmut Schreiter /<br>DB Netz AG, Bestandsnetze Berlin  |
| <b>Gestaltungskonzept, Vorplanung</b>  | Burkhard Dierker (†), Rainer Krautschick / Schüßler-Plan, Berlin<br>mit Knight Architects, London                                 |
| <b>Gründung, Unterbauten, Verkehrsanlagen</b>  | Burckhart Engel, Ulrich Kubenz, Florian Möckel, Stephan Schulze /<br>Schüßler-Plan  |
| <b>Überbau</b>   | Lorenz Haspel, Povilas Ambrasas, Matthias Längle, Marion Macaudiere,<br>Lukas Hornberger, Shawn Johnson und Team / sbp, Stuttgart |
| <b>Bauteilversuche Carbonstrangschlaufen und Verankerungen</b>                       | Christoph Czaderski, Robert Widmann und Team / Empa, Dübendorf (CH);<br>Geert Schellenberg und Team / MPA, Stuttgart              |
| <b>Stellungnahmen zu Fragen der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit Carbon</b> | Prof. Urs Meier, Prof. Giovanni Terrasi / Empa, Dübendorf (CH)  |
| <b>Gutachter des Eisenbahnbundesamtes für die Erteilung der ZiE</b>                  | Prof. Dr.-Ing Gerhard Hanswille, HRA Ingenieurgesellschaft, Bochum  |
| <b>Prüfingenieur</b>   | Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dr. Matthias Mager, GMG Berlin /<br>Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dresden                       |
| <b>Geotechnik</b>  | Dr. Patrick Arnold / GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH,<br>Berlin   |
| <b>Geotechnischer Prüfer</b>   | Dr.-Ing. Lutz Vogt / BAUGRUND DRESDEN, Dresden  |
| <b>Bauunternehmen</b>  | Axel Bormann, Tino Groschischka, Daniel Junge und Team /<br>Sächsische Bau GmbH, Dresden  |
| <b>Carbonhänger</b>  | Andy Winistörfer, Valentin Bemetz, Arne Gülzow und Team /<br>Carbolink, Fehraltdorf (CH)  |

## Literatur

- [1] Huster, U.; Brönnimann, R.; Winistörfer, A.: Strengthening of a historical roof structure with CFRP-straps. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008), 22.–24.07.2008 in Zürich
- [2] Meier, U.; Brönnimann, R.; Anderegg, P.: in: Teng, J. G.; Dai, J. G. (Hrsg.): Proc. of the 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites in Civil Engineering (CICE) 2016, S. 1069–1074
- [3] DIN EN 1993-1-11:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl; Deutsche Fassung EN 1993-1-11: 2006 + AC:2009.
- [4] Haspel, L.: Netzwerkbogenbrücken mit Hängern aus Carbon. Stahlbau 88 (2019), H. 2, S. 153–159
- [5] Meier, U.: Carbon Viber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. Structural Engineering International (1992), H. 1, S. 7–12
- [6] Meier, H.; Meier, U.; Brönnimann, R.: Zwei CFK-Kabel für die Storchenbrücke. Schweiz. Ing. Archit. (1996), H. 114, S. 980–985

- [7] Meier, U.: Haben kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Brückenbau eine Zukunft? In: Stritzke, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 19. Dresdener Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 09./10.03.2009 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2007, S. 191–208
- [8] Schlaich, M.; Zwingmann, B.; Liu, Y.: Zugelemente aus CFK und ihre Verankerungen. *Bautechnik* 89 (2014), H. 12, S. 841–850
- [9] Schlaich, M.; Liu, Y.; Zwingmann, B.: Ringseildächer mit CFK-Zugelementen. *Bautechnik* 91 (2014), H. 10, S. 728–741
- [10] Haspel, L.: Bauen mit Zuggliedern aus Carbon. Tagungsband zur 14. Fachtagung Baustatik – Baupraxis, 2020, S. 25–42 – <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/10779>
- [11] Haspel, L.: Innovative Netzwerkbogen – Leichtbau auch für schweren Schienenverkehr – von der Stadtbahnbrücke in Stuttgart zur Oderbrücke. In: Wiederspahn, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 22. Symposium Brückenbau, 15./16.02.2022 in Leipzig, Wiesbaden: Verlagsgruppe Wiederspahn, 2022, S. 14–20
- [12] Hanswille, G.: Stellungnahme im Rahmen der ZiE für die Netzwerk-Bogenbrücke in Verbundbauweise mit Carbon-Hängern über die Oder bei Küstrin. im Auftrag des Eisenbahn-Bundesamtes, Aktenzeichen 2151-21izbib/163-2101#007-(112/20-ZiE), HRA Ingenieurgesellschaft, Bochum (2021), unveröffentlicht
- [13] DIN EN 1993-1-10:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung; Deutsche Fassung EN 1993-1-10:2005 + AC:2009.
- [14] Sedlacek, G.; Feldmann, M.; Kühn, B.; Tschickardt, D.; Höhler, S.; Müller, C.; Hensen, W.; Stranghöner, N.; Dahl, W.; Langenberg, P.; Münstermann, S.; Brozetti, J.; Raoul, J.; Pope, R.; Bijlaard, F.: COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES to EN 1993-1-10 “Material toughness and through thickness properties” and other toughness oriented rules in EN 1993. Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes, 2008.
- [15] DIN EN 1993-1-9:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [16] Geißler, K.: Bericht 10-01, Abschlussbericht-Studie zur Untersuchung der Auswirkungen von Anpralllasten auf Stabbogenbrücken. TU Berlin, Fakultät VI Bauen Planen Umwelt, Institut für Bauingenieurwesen, Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau, 2010
- [17] Schmidmeier, M.: Zur Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile unter Biegung – Grundlagenuntersuchungen über den Einsatz von Seilen in Stabbogenbrücken. Diss., TU München; u. a. veröffentlicht als Mitteilungen der Bundesanstalt für Wasserbau (2016), H. 102 – download unter [www.baw.de](http://www.baw.de)
- [18] DIN EN 1990:2021-10: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [19] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2. Aufl., Springer Verlag, 2007
- [20] DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010.
- [21] Tveit, P.: The Network Arch. 2015 – <https://home.uia.no/pert/index.php/Home> (accessed on 20.04.22; will be updated occasionally, as long as the author is active)
- [22] Teich, S.: Die Netzwerkbogenbrücke, ein überaus effizientes Brückentragwerk – Tragwirkung und Konstruktion. *Stahlbau* 74 (2005), H. 8, S. 596–605
- [23] Geißler, K.; Steinmann, U.; Graße, W.: Netzwerkbogenbrücken – Entwurf, Bemessung, Ausführung. *Stahlbau* 77 (2008), H. 3, S. 158–171
- [24] Gauthier, P.; Krontal, L.: Erfahrungen mit Netzwerkbogenbrücken im Eisenbahnbrückenbau. *Stahlbau* 79 (2010), H. 3, S. 199–208
- [25] Meier, U.; Winistörfer, A.; Haspel, L.: World’s First Large Bridge Fully Relying on Carbon Fiber Reinforced Polymer Hangers. *SAMPE Journal* 57 (2021) 1, S. 22–30
- [26] GRANTA CES (2019) EDUPACK: Epoxy/HS carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up.
- [27] GRANTA CES (2019) EDUPACK: Titanium, alpha-beta-alloy, Ti-6Al-4V, solution treated & aged.

- 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