

29. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPORIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

11./12. MÄRZ 2019

© 2019 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 gesetz-
lich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Technische Universität Dresden

Institut für Massivbau

01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Beyer, Kurt: Südthailand. Zweibogige Betonbrücke im Bau, 1912/1913
Foto: SLUB Dresden / Deutsche Fotothek / Kurt Beyer

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

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-585-8

Tagungsband

29. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

11. und 12. März 2019

Inhalt

Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium	9
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen, Rektor der TU Dresden</i>	
Verleihung der Wackerbarth-Medaille	13
Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass	
der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen	14
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet	17
<i>Dr.-Ing. Silke Scheerer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau	25
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks –	
Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas	29
<i>Dipl.-Ing. Joern Seitz, Dipl.-Ing. (FH) Martin Pohl</i>	
Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau	47
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Dr.-Ing. David Sanio, Dr.-Ing. Steffen Schindler</i>	
Verkehrsinfrastruktur für Hamburg –	
Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen	59
<i>Dr.-Ing. Christoph Vater</i>	
Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung	
von neuen Verfahren im Brückenbau	73
<i>o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser, Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Eichwalder</i>	
Stahlverbund-Großbrücken mit obenliegender Fahrbahn	
als Querschnitte mit Teilstahlprofilen und Schrägstreben bzw. Konsolen	85
<i>Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dipl.-Ing. Gregor Gebert</i>	
Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik	101
<i>Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl-Eugen Kurrer</i>	
Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken –	
Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?	129
<i>Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer; Sebastian Gehrlein, M.Sc.; Nicholas Schramm, M.Sc.; Marcel Nowak, M.Sc.</i>	
Was tun, wenn Annahmen und Realität nicht zusammenpassen?	149
<i>Dr.-Ing. Hans-Gerd Lindlar, Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Lars Dietz, Dr.-Ing. Bastian Jung, M. Eng. Tarik Tiyma</i>	
Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile	
von Brücken- und Tunnelbauwerken	161
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch, Dr.-Ing., MBA und Eng. Marc Zintel, Dipl.-Ing., MBA Luzern Christian Linden</i>	
Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken	
mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton	173
<i>Dr.-Ing. Frank Jesse, Dipl.-Ing. Andreas Apitz, Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich</i>	
Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen	185
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
Chronik des Brückenbaus	197
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
Inserentenverzeichnis	207

Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton

Dr.-Ing. Frank Jesse¹, Dipl.-Ing. Andreas Apitz², Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich²

1 Motivation für Carbon im Brückenbau

Vorgespannter Carbonbeton, also Spannbeton mit Bewehrungen und Spanngliedern aus Carbon, ist eine vielversprechende Alternative für den Brückenbau, da Carbon nicht korrodiert. Über 2/3 der Bauwerksschäden an Betonbrücken sind auf Korrosion zurückzuführen [1]. Zur Lösung dieses volkswirtschaftlich bedeutsamen Problems wurden für herkömmliche Bauweisen Strategien entwickelt [2]. Alternativ kann die Schadensursache der Korrosion auch durch die Verwendung von Carbon eliminiert werden. Geringes Gewicht, hohe Festigkeit und sehr gute Ermüdungseigenschaften machen das Material interessant, besonders in Kombination mit Vorspannung. Die fehlende Duktilität erfordert besondere Überlegungen bei der Bemessung und beim Sicherheitskonzept. Wegen der hohen Querdruckempfindlichkeit sind neue Verankerungslösungen erforderlich. Die hohen Materialkosten müssen beachtet werden.

Die erste mit Carbon vorgespannte Brücke wurde bereits 1988 in Japan errichtet [3]. Die Bauweise der möglicherweise leichtesten vorgespannten Carbonbrücke der Welt für Fußgänger in Winterthur – aus 24–40 mm dünnen, mit dünnen Carbonfäden vorgespannten und miteinander verklebten Platten [4] – ist auf den Straßen- und Eisenbahnbrückenbau nicht übertragbar. Fraglich ist, ob die herkömmliche Art der Konstruktion von Spannbetonbrücken wirklich zu dem besonderen Eigenschaftsprofil von Carbon passt. Bereits 1993 warnte Burgoynes davor, Stahl einfach durch Carbon zu ersetzen [5]. Weltweit wurden seit Anfang der 1990er Jahre ungefähr 30 Betonbrücken mit Spanngliedern aus Carbon gebaut [6], die jedoch nahezu alle die herkömmlichen Konstruktionsarten aus dem Spannbetonbau aufweisen. Die bisher in Deutschland ausgeführten Carbonbetonbrücken sind entweder ohne Vorspannung ausgeführt [7] oder mit Stahlspanngliedern vorgespannt [8], [9].

Seit 2006 steht an der TU Berlin eine Spannbandbrücke mit 13 m Spannweite und nur 1 mm konstruktiver Höhe als Dauerversuch. Weitere Untersuchungen an der TU Berlin zur Verankerung von Carbonseilen sowie Ringseildächern und Seilnetzfassaden mit vorgespannten Carbonzuggliedern bestätigen, dass erst die Vorspannung Carbon wirklich erlaubt, sein Potential richtig auszuspielen [10]–[12]. Es war also nur folgerichtig, im Rahmen des C³-Projekts [13] vorgespannten Carbonbeton für ein neuartiges Brückensystem einzusetzen. Das Verbundprojekt C3-V4.2 wurde von folgenden Partnern bearbeitet: den Forschungseinrichtungen Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau der TU Berlin und Institut für Massivbau der TU Dresden, dem Ingenieurbüro schlaich bergermann partner, dem Spanngliedlieferanten DYWIDAG-Systems International (München), dem Carbonfaser- und Bewehrungshersteller SGL Carbon (Meitingen) und dem Bauunternehmen Hentschke Bau (Bautzen). Als Ergebnis liegt ein neuartiger Entwurf für integrale Brücken im Spannweitenbereich bis 50 m vor, der verbundlose Carbonspannglieder, thermisch umformbare schlaffe Carbonbewehrung und Halbfertigteile aus Hochleistungsbeton vereint. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über das Tragwerkskonzept und den aktuellen Entwicklungsstand.

2 Wirtschaftlichkeit

Carbon droht zwar zuerst mit Mehrkosten, schaltet aber Korrosionsprobleme – den Grund für die meisten Sanierungsmaßnahmen – an der Quelle aus. Spannungsrißkorrosion ist bei Carbon ebenfalls unbekannt.

Carbonbewehrungen sind derzeit tatsächlich noch teuer. Das hat mehrere Ursachen. Ein Faktor auf Seiten der Carbonfasern ist der energieaufwändige Herstellprozess, ein anderer der derzeit kleine Markt. „Vernünftige“ Preise lassen sich erst erwarten, wenn der Markt so groß ist, dass Produktionsanlagen mehrere

¹ Hentschke Bau GmbH, Bautzen

² Technische Universität Berlin, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau

rer Hersteller ausgelastet werden und echter Wettbewerb und Innovationen die Entwicklung sowohl technisch als auch wirtschaftlich vorantreiben. Klare Signale der öffentlichen Hand oder der Bahn als marktrelevante Bauherren werden als wichtiger Schritt eingeschätzt. Infrastrukturbauwerke sind bei Verwendung von Carbonbewehrungen teurer, haben aber einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen und liefern eine Rendite in Form langfristig zuverlässiger Bauwerke mit geringen Wartungs- und Instandhaltungskosten.

Vergleichsrechnungen zur Wirtschaftlichkeit zeigen, dass die Verwendung von Carbonbewehrung und -spanngliedern langfristig, d. h. auf die übliche Lebensdauer und übliche Instandhaltungsaufwendungen bezogen, wirtschaftlicher ist als die herkömmliche Bauweise mit Betonstahl, Spannstahl oder Baustahl (Stahlbau und Verbundbau), siehe bspw. [14]. Gleichwohl ist es aufgrund des hohen Materialpreises wirtschaftlich erstrebenswert, die hohe Leistungsfähigkeit der Carbonbewehrung durch eine geeignete Konstruktion und Bemessung auch weitgehend auszunutzen, d. h. im Wesentlichen durch die Kombination mit Vorspannung.

3 Vorspannung

3.1 Wenn Carbon, dann mit Vorspannung

Ingenieurbauwerke müssen hohe Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Das Ziel im Entwurf und in der Bemessung sollte die Erfüllung dieser Anforderungen bei möglichst geringem Materialeinsatz sein. Das heißt, dass die Materialien so effizient wie möglich ausgenutzt werden müssen.

Carbon ist zwar zugfester als Stahl (die charakteristische Zugfestigkeit liegt in dem Bereich von 1500–3000 MPa gegenüber 500...550 MPa für Betonstahl bzw. bis 1860 MPa für Spannstahl), jedoch auch weicher in Zugrichtung (der E-Modul liegt in dem Bereich von 100–160 GPa gegenüber 195...200 GPa bei Beton- und Spannstahl).

Die Anforderungen an die Tragfähigkeit können durch Carbonbewehrung praktisch mühe los erfüllt werden. Aufgrund der geringen Steifigkeit des Carbons werden bei schlaff bewehrten Carbonbetonkonstruktionen jedoch meist Gebrauchstauglichkeitskriterien (Verformungen, Risse) maßgebend für die Menge an

Bewehrung. Die hohe Festigkeit des Carbons wird dann im Grenzzustand der Tragfähigkeit nicht erreicht und das teure Material nicht ausgenutzt.

Eine denkbare, aber aus ästhetischer Sicht sowie wegen des Ressourcenverbrauchs nicht akzeptable Gegenmaßnahme wäre die Erhöhung der Bauteilhöhe bzw. Reduzierung der Bauteilschlankheit.

Abhilfe kann die Vorspannung schaffen. Die Zugglieder werden vorgedehnt und erreichen ein hohes Dehnungs- und Spannungsniveau bereits ohne zusätzliche Lasten. Die Festigkeit wird besser ausgenutzt, was letztendlich zu geringeren Bewehrungsgraden führt. Dadurch ergeben sich Vorteile wie bessere Ausführbarkeit oder geringere Querschnittsabmessungen, was zu Einsparungen bei Material und Gewicht führt.

Die Anwendung der Vorspannung ermöglicht die wirtschaftliche Ausnutzung hochfester Bewehrungen bei gleichzeitiger Erhöhung der Bauteilschlankheit, was seit Einführung des Spannbetons seit langem bewährte Praxis ist. Soll Bewehrung aus Carbon oder einer anderen Hochleistungsfaser verwendet werden, ist die Anwendung der Vorspanntechnik deshalb meist die einzige Möglichkeit, wirtschaftlich und ästhetisch vertretbar zu entwerfen und zu konstruieren.

3.2 Wahl der Vorspannart

Grundsätzlich besteht die Wahl zwischen drei Arten der Vorspannung: Vorspannung im sofortigen Verbund, Vorspannung mit nachträglichem Verbund oder Vorspannung ohne Verbund (intern oder extern).

1. Die *Vorspannung im sofortigen Verbund* ist die wirtschaftlichste Variante, schränkt aber den Gestaltungsspielraum ein und berührt wesentliche Fragen zur Sicherheitsphilosophie, z. B. die nach einem ausreichenden Ankündigungsverhalten. DIN EN 1992 [15] fordert eine ausreichende Versagensankündigung durch Verformungen und Rissbildung. Derzeit ist ungeklärt, welche Zusatzdehnung Spannelemente im Bruchzustand mindestens aufnehmen können müssen, damit vorgespannte Konstruktionen ein ausreichendes Ankündigungsverhalten aufweisen. Bei Spannstählen ist sichergestellt, dass materialseitig mindestens 25 % Zusatzdehnungen im Bruchzustand mög-

lich sind. Bei Carbon mit linear-elastischer Spannungs-Dehnungs-Beziehung ist ausgehend von der Grenzdehnung des Materials nur die Zusatzdehnung möglich, die durch die Vordehnung noch nicht in Anspruch genommen wurde. Einschlägige Regelwerke erlauben für Carbonspannglieder eine Vordehnung von 65 % der Bruchdehnung [16]–[18]. Das heißt von der Bruchdehnung des Carbons, die typisch etwa bei 15–18 % liegt, verbleiben nach Abzug der zulässigen Vordehnung noch 5–6 % im Bruchzustand, also ca. 1/4 der bei Spannstahl möglichen Bruchdehnung. Teilweise sehen die Sicherheitskonzepte vor, dass der Teilsicherheitsbeiwert im Bruchzustand auch auf die Grenzdehnung angewendet wird, z. B. [19]. Das bedeutet, dass einer Vordehnung von 65 % und einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,3 auf der Materialseite noch 1/10 der Grenzdehnung im Bruchzustand genutzt werden können. Aktuelle Untersuchungen der Autoren gehen der Frage nach, mit welcher Bemessungsphilosophie Carbonspannelemente bei sofortigem Verbund sinnvoll bemessen werden können.

2. Die *Vorspannung mit nachträglichem Verbund* weist aufgrund der variablen Spanngliedführung wesentlich größere Gestaltungsspielräume auf, bedarf aber aufwändiger Verankerungen. Die bei der Vorspannung im sofortigen Verbund angerissenen Fragen zum Ankündigungsverhalten im Bruchzustand bzw. zu einem geeigneten Bemessungskonzept sind aber prinzipiell ähnlich gelagert.
3. Die *Vorspannung ohne Verbund* hat aufgrund der variablen Spanngliedführung ebenso große Gestaltungsspielräume, zeigt aber aufgrund des fehlenden Verbundes hinsichtlich des Bruchzustandes keinen erhöhten Klärungsbedarf. Typischerweise konzentrieren sich bei der verbundlosen Vorspannung die Verformungen im Bruchzustand auf wenige sich öffnende Risse. Diese kann ein Carbonspannglied ohne Verbund bei praxisüblichen Bauteillängen problemlos aufnehmen, da sich die lokalen Rissöffnungen als Dehnung auf die gesamte Spanngliedlänge verteilen. Die Grenzdehnung der notwendigen schlaffen Zulagebewehrung ist so groß (15–18 %), dass die Verformungen im Bruchzustand ohne weitere Überlegungen als ausreichend bewertet werden können.

Solange noch keine Regelungen zu den genannten Themen vorliegen, ist die verbundlo-

se Vorspannung hinsichtlich der Zulassungsfähigkeit die vielversprechendste Alternative. Sie ist die für den entwickelten Entwurf gewählte Vorspannart, auch da durch sie kraftflussorientierte und damit elegante Tragwerke entworfen werden können.

Die wegen des höheren Bedarfs an schlaffer Zulagebewehrung geringere Wirtschaftlichkeit der verbundlosen Vorspannung wird dabei in Deutschland seit Ende der 1990er Jahre aufgrund anderer Vorteile (Auswechselbarkeit der Spannglieder, Prüfbarkeit der Vorspannung) bewusst in Kauf genommen.

4 Bemessung

Obwohl Carbonbewehrung grundsätzlich andere mechanische Eigenschaften als Stahl hat (keine Plastizität, linear elastisches Verhalten), können die bekannten grundlegenden Prinzipien der Bemessung für Biegung, Querkraft, Rissbildung, Verformungen und andere angewendet werden. Materialspezifische Kennwerte und empirische Modellfaktoren müssen angepasst bzw. mittels geeigneter Versuche bestimmt werden. Es sind aber grundlegende Überlegungen zur Sicherheits- und Bemessungsphilosophie erforderlich [20], [21].

Für die Bemessung der Carbonbetonfertigteile wurden deshalb die Regeln der DIN EN 1992 [15] zu Grunde gelegt. Notwendige Anpassungen an Carbon wurden auf Basis existierender Regelwerke, bspw. der JSCE [16] und des ACI [22], [17] sowie aktueller Vorschläge vorgenommen, bspw. bezüglich des Sicherheitskonzepts [23]–[26] oder der Querkraftbemessung [24], [27]. Die Biegebemessung ist bei Verfügbarkeit elementarer Materialeigenschaften mit geeigneter Software bereits heute programmgesteuert möglich. Für die Rissbreitenbeschränkung wurde das Modell der DIN EN 1992 [15] verwendet.

Gesonderte Überlegungen bedürfen Bemessungs- und Konstruktionsregeln, die auf pragmatischen Festlegungen beruhen und weder auf belastbare mechanische Grundlagen bauen, noch einer experimentellen Überprüfung zugänglich sind. Dazu gehören beispielsweise die Regeln zur Oberflächenbewehrung.

Nicht alle offenen Fragen konnten im Rahmen des Vorhabens endgültig geklärt werden. In diesen Fällen sind die Bemessungsannahmen konservativ gewählt. Einem Teil der Fragen soll durch Belastungsversuche an ei-

nem 21 m großen Demonstrator nachgegangen werden. Die mit Stahl bewehrten Bereiche wurden ohne Einschränkungen nach den einschlägigen Regelwerken bemessen und durchkonstruiert.

5 Brückensystem

5.1 Aufgabenstellung, Entwurf und Tragwerkskonzept

Der Entwurf der Brücke wird wesentlich durch die drei folgenden Randbedingungen beeinflusst:

1. Die Verwendung von Halbfertigteilen, um den Einfluss der Bautätigkeit auf den Verkehr unter dem Überbau auf ein Minimum zu reduzieren. Die leichten feldlangen Fertigteile können innerhalb einer nächtlichen Sperrpause eingebaut werden.
2. Überbrückung der Gesamtspannweite ohne Mittelpfeiler, um das Unfallrisiko im Mittelpfeilerbereich zu minimieren, optimale Sichtverhältnisse für die Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten und im Instandsetzungsfall teure und als Unfallrisiko bekannte Mittelpfeilerbaustellen zu vermeiden.
3. Integrale Ausführung ohne Fugen und Lager, um eine besonders hohe Robustheit und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten.

Das zu überbrückende Lichtraumprofil von 36 m Breite und 4,70 m Höhe entspricht einer

sechsstreifigen Autobahn mit zwei Richtungsfahrbahnen (RQ36 nach RAS-Q 96). Damit das Lichtraumprofil auch während der Bauzeit nicht durch Baubehelfe eingeschränkt werden muss, wurde eine lichte Weite zwischen den Widerlagern von 39,50 m gewählt. Die Bilder 1 und 2 zeigen den Entwurf und die verwendeten Materialien. Der Überbau besteht aus fünf Halbfertigteilen mit 41 m Länge und einer Breite von 2,40 m, so dass mit dem 12 m breiten Überbau eine zweistreifige Landstraße überführt werden kann. Die fünf Halbfertigteile haben ein Gewicht von jeweils 65 t, so dass sie mit üblichen Schwertransportern angeliefert werden können.

Gründungen und Widerlager werden auf der Baustelle in Ortbeton hergestellt. Nach dem Auflegen der Halbfertigteile werden die Rahmeneckbewehrung ergänzt und die Rahmenecke betoniert. Anschließend werden die Bewehrung im Bereich der Fahrbahnplatte ergänzt und eine durchgehende Ortbetonfahrbahnplatte von 20 cm Dicke hergestellt, deren Gewicht bereits auf das Rahmensystem wirkt. Gleichermaßen gilt für die Hinterfüllung, die Fahrbahndecke und die Ausbaulasten, welche nach Aushärten des Ortbetons aufgebracht werden und bereits auf den Verbundquerschnitt wirken. Mit diesem zeitlichen Bauablauf stellen sich die Rahmeneck- und Feldmomente in der gewünschten Verteilung ein.

Die Ausführung der Gründung hängt von den örtlichen Baugrundverhältnissen ab. Die Gründungssteifigkeit muss auf die aufnehmbaren Rahmenmomente abgestimmt werden und

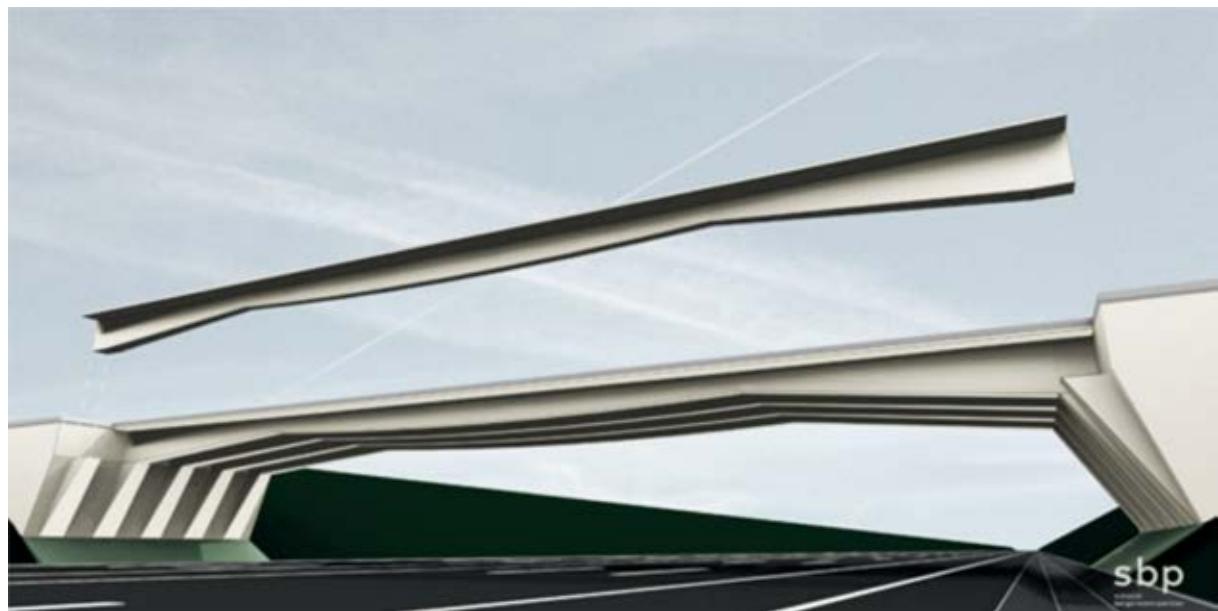


Bild 1 Visualisierung des entwickelten Brückensystems mit vorgespannten Halbfertigteilen aus Carbonbeton
Grafik: schlaich bergermann partner

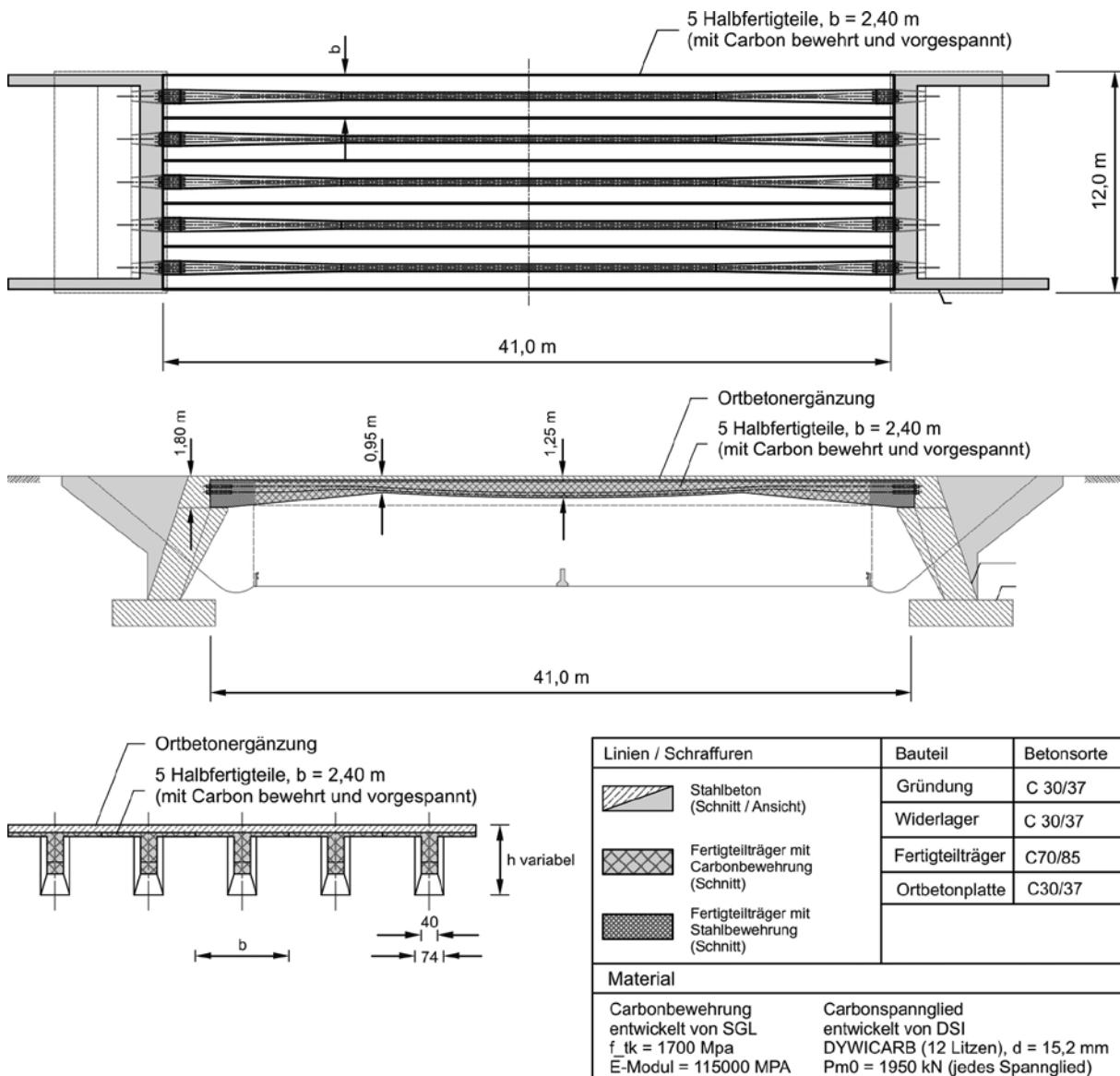


Bild 2 Draufsicht, Längs- und Querschnitt und Zuordnung der Materialien für das entwickelte Brücken-System
Zeichnungen: schlaich bergermann partner

umgekehrt. Die Nachgiebigkeit der Rahmenstiele ermöglicht die Aufnahme von Längenänderungen aus Temperatur, Schwinden und Kriechen.

Auffällig ist die besondere Form des Tragwerks. Üblicherweise sind Fertigteile parallel-gurtig. Voutungen sind meist im Bereich der Rahmenecken zu finden und ermöglichen im Gegenzug eine höhere Schlankheit in Feldmitte. Nach Wissen der Autoren wurde die hier gewählte Form erstmalig 1992 nach einem Entwurf von Jörg Schlaich [28] bei einer Überführung bei Kirchheim realisiert, siehe Bild 3. Bei der abgewandelten Form nach einem Entwurf von Michael Kleiser [29], Bild 3 unten, ist die Masseneinsparung und das Tragwerkskonzept auch deutlich erkennbar.

Bei Betrachtung des Momentenverlaufes am Rahmen ergeben sich drei charakteristische Punkte (Bild 4):

1. Momentenminimum in der Rahmenecke,
2. Momentennullpunkt etwa bei L/4,
3. Momentenmaximum in Feldmitte.

Die Anpassung der Querschnittshöhe am Momentenverlauf ermöglicht eine Materialeinsparung beim Beton und der erforderlichen Vorspannung und insgesamt eine sehr gleichmäßige Materialausnutzung. Insgesamt werden die Spannungsverläufe in Feldmitte günstig beeinflusst, so dass die Schlankheit in Feldmitte höher sein kann als bei herkömmli-



Bild 3 Beispiele materialoptimierter Überbauformen; von oben nach unten: An- und Untersicht der Überführung im Zuge der A3 in Wendlingen-Kircheim, Überführung A5 Ü20
 Grafiken: schlaich bergermann partner (oben u. mitte),
 © Dr. Michael Kleiser (unten)

cher Form der Voutung in den Rahmenecken. Für ausführlichere Erläuterungen auch zur Formgebung im Detail siehe [30].

Das entwickelte Tragwerkskonzept orientiert sich maßgeblich an der bewährten Bauweise mit Verbundfertigteilen, die in den vergange-

nen Jahren die Spannbetonfertigteilbauweise zunehmend verdrängt hat. Das Konzept ist durch den modularen Aufbau variabel hinsichtlich Belastung, Überbaubreite und Spannweite und an unterschiedlichste örtliche Gegebenheiten anpassbar.

5.2 Materialien

Die Materialauswahl fokussiert auf aktuell herstellbare und lieferbare Materialien und Komponenten und erfolgte auf der Grundlage der Exposition innerhalb des Tragwerks. Vor allem die Unterseite von Überführungsbaudenkmälern zeigt ein hohes Korrosionsrisiko [2]. Die Halbfertigteile sind deshalb mit Carbonbewehrung und Carbonspanngliedern geplant, um das Potential dieses Werkstoffs – hohe Schlankheit und Dauerhaftigkeit – optimal auszunutzen. Eine Ausnahme bilden die Verankerungsbereiche der Spannglieder, da derzeit am Markt noch keine geeigneten Bewehrungen zur Aufnahme der hohen Belastungen verfügbar sind. Die Verwendung von herkömmlicher Betonstahlbewehrung in den übrigen Bereichen ohne nennenswertes Korrosionsrisiko (Widerlager, Ortbetonergänzungen) trägt dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit Rechnung.

Der Einsatz von Carbonbewehrung ist auf Tragwerksbereiche begrenzt, die ein besonders hohes Korrosionsrisiko bergen bzw. deren Instandsetzung zu inakzeptablen Verkehrseinschränkungen in Kombination mit hohen Instandsetzungskosten führen. Die Oberseite des Tragwerks ist durch die klassische Abdichtung hinreichend geschützt.

5.3 Carbonspannglied

Das verbundlose Spannglied mit Kunststoffhüllrohr wurde von DSI für eine maximale Vorspannkraft von 2,9 MN entwickelt. Die 12 Litzen mit Nenndurchmesser 15,2 mm von Tokyo Rope ertragen eine garantierte

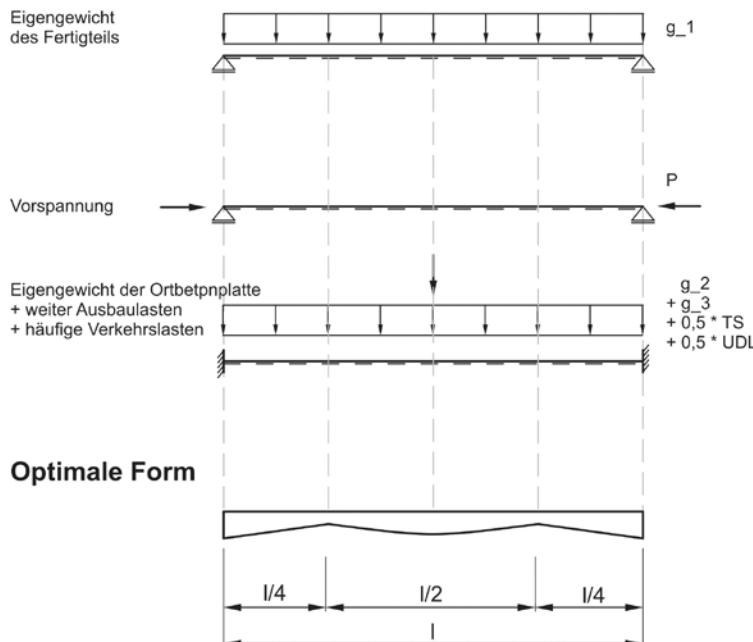
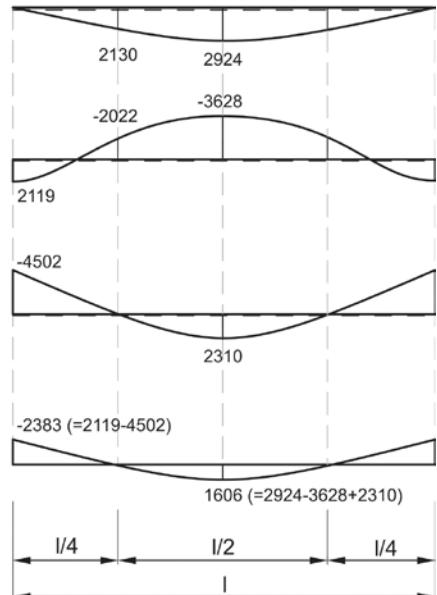
Statisches System und Lasten**Momente [kNm]**

Bild 4 Die Momentenverteilung als Ausgangspunkt für die Entwicklung der optimalen Querschnittsform in Haupttragrichtung
Grafik: Andreas Apitz

Bruchkraft von je 270 kN und 2,9 MN für das Spannglied. Die Litzen werden in speziellen Hülsen mit einem expansiven Verguss in den Ankerkörpern verankert (Bild 5). Die Spannkraft wird über eine hydraulische Spannpresse auf den Spannanker aufgebracht und über eine Gewindeplatte auf der Ankerplatte abgesetzt. Wesentliche Eignungsversuche wurden bereits an der TU Berlin, an der MPA Braunschweig und an der TU München mit

positivem Ergebnis durchgeführt. Das Design ist prinzipiell mit variabler Litzenanzahl adaptierbar.

5.4 Carbonbewehrung

Für die Biegelängsbewehrung bzw. Robustheitsbewehrung wurden Stäbe Ø10/8,5 mm (Außendurchmesser/Kerndurchmesser) des

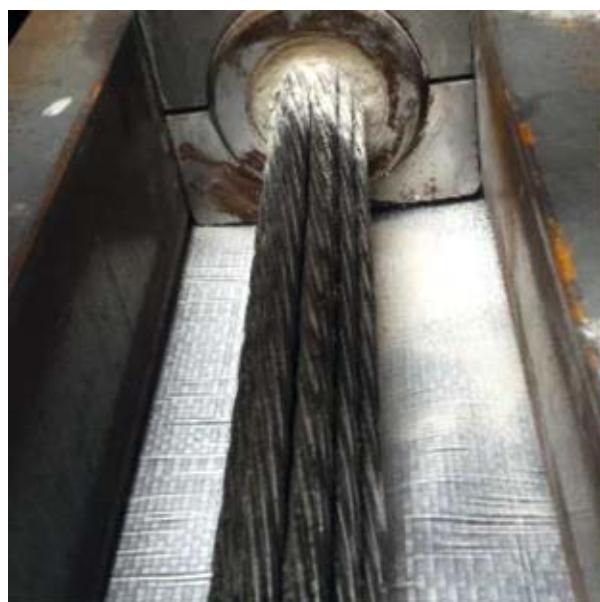


Bild 5 Verankerung des neu entwickelten Spanngliedes der DYWIDAG-Systems International (DSI)
Fotos: Johannes Berger

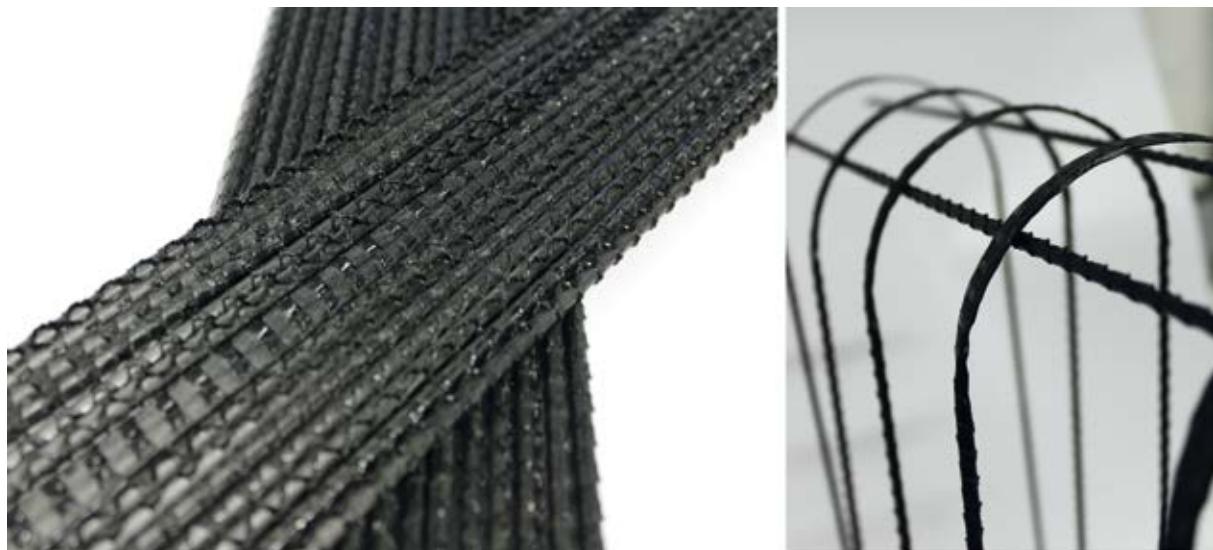


Bild 6 Beispiele für Carbonbewehrung mit thermoplastischer Matrix; links: gerade Stäbe, rechts: umgeformte Bewehrung
Fotos: SGL Carbon

Herstellers ThyssenKrupp gewählt (Bild 6, links). Die notwendigen Bewehrungsquerschnitte können mit textilen Carbonbewehrungen nicht erreicht werden.

Für die Oberflächenbewehrung könnte eine textile Bewehrung durchaus effizient eingesetzt werden. Da die Oberflächenbewehrung der Rissbreitenbeschränkung dient und filigrane textile Carbonbewehrungen nur eine geringe Betondeckung benötigen, ergeben sich aus der Bemessung Bewehrungsmengen, die teils sogar durch eine einlagige textile Bewehrung praxisgerecht abgedeckt werden können. Für die Oberflächenbewehrung und die Bügelbewehrung kommt hier jedoch ein spezieller Carbonbewehrungsstab des Vorhabenpartners SGL Carbon mit Thermoplastmatrix zum Einsatz. Praktisch alle marktüblichen Bewehrungsstäbe aus Faser-Kunststoffverbunden verwenden eine duromere Matrix (meist Epoxidharz). Duromere lassen sich nach dem Aushärten des Harzes nicht mehr umformen – die Formgebung muss vor dem Aushärten des Harzes erfolgen. Bei Verwendung geeigneter Thermoplaste als Matrix eröffnet sich hingegen die Möglichkeit, die Bewehrungselemente nachträglich – ggf. auch auf der Baustelle bzw. im Fertigteilwerk – umzuformen. Da der chemische Aushärteprozess bei Thermoplasten entfällt, ist das Herstellverfahren prinzipiell einfacher und ermöglicht eine höhere Anlagenproduktivität, was sich letztlich positiv auf die Kosten auswirkt.

Bei der nachträglichen Umformung muss das Problem des Längenausgleichs zwischen den Fasern auf der Krümmungsaußenseite und der

Krümmungsinnenseite beachtet werden. Bei im Vergleich zum Stabdurchmesser großem Krümmungsradius führen die Längenunterschiede zwischen Krümmungsaußenseite und -innenseite durch das frühere Versagen der stärker gedehnten Fasern auf der Krümmungsaußenseite zu einer ggf. akzeptablen Festigkeitsminderung. Bei üblichen Bewehrungsquerschnitten und Krümmungsradien des Ingenieurbaus ist der Festigkeitsabfall bei einer Umformung ohne besondere Maßnahmen nicht akzeptabel.

Als Lösung wurde eine gezielte Abflachung des Querschnitts im Krümmungsradius gewählt (rechts in Bild 6). Der umzuformende Stababschnitt wird über den Erweichungspunkt der Polymermatrix erwärmt und mittels geeignetem Werkzeug verformt. Durch die Verformbarkeit der erwärmten Matrix und die Kombination mit Längszug und Querdruck flacht der Querschnitt im Krümmungsbereich soweit ab, dass die verringerten Längenunterschiede der Krümmungsaußenseite und -innenseite zu einer akzeptablen Festigkeitsreduzierung führen. Durch die größere Querschnittsabmessung senkrecht zur Krümmungsebene wird zudem die Umlenkkraft auf eine größere Fläche verteilt. Das reduziert die Querdruckbeanspruchung sowohl auf die Fasern als auch den Beton, was sich positiv auf die im Krümmungsbereich übertragbaren Kräfte auswirkt.

Bei der geplanten Brücke werden die Bügel in der Druckzone über angeformte Endhaken verankert. Damit werden sehr kurze Verankerungslängen erreicht. Haken sind insbesondere dann ein geeignetes Verankerungselement,

wenn die Verankerung über eine Oberflächenprofilierung zu große Verankerungslängen nach sich zieht – wie bei Carbonbewehrung oft der Fall. Durch die thermoplastische Polymermatrix ist die Konfektionierung/Formgebung prinzipiell auch nach dem Ablängen bzw. beim Endverarbeiter möglich. Damit bleiben bewährte Wertschöpfungsketten erhalten (Stabhersteller → Biegebetrieb → Baubetrieb). Möglicher positiver Nebeneffekt dieses Verfahrens ist eine einfachere Durchdringung des Marktes.

5.5 Beton

Grundsätzlich können Carbonbewehrungen mit allen üblichen Betonen verwendet werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass höhere Festigkeiten hilfreich sind, die großen Kräfte der hochfesten Bewehrungen aufzunehmen. Wenn die Bewehrung extrem langlebig ist, scheint es geboten, einen Beton zu wählen, der eine ähnliche Lebensdauer ohne wesentliche Instandsetzungsmaßnahmen erreicht. Hochleistungsbetone können eine sinnvolle Wahl sein, da die hohe Festigkeit und Gefügedichtigkeit einen höheren Widerstand gegenüber mechanischen Beanspruchungen, aber auch eindringenden schädlichen Medien (Taumittel, Feuchtigkeit) aufweisen.

Für das carbonbewehrte Halbfertigteil wurde eine Betonfestigkeitsklasse C80/95 gewählt. Diese Qualität ist in einem Fertigteilwerk aus üblichen und verfügbaren Ausgangsstoffen zielsicher herstellbar. Die hohe Druckfestigkeit ermöglicht eine hohe Schlankheit und Filigranität im Vergleich zu normalfestem Beton.

Für Widerlager und Ortbetonergänzungen wurden normalfeste Betone gewählt, da Hochleistungsbetone im Bereich der Widerlager und für die Ortbetonergänzung statisch nicht erforderlich sind, keine wesentlichen Vorteile hinsichtlich Dauerhaftigkeit erwarten lassen und unter den Verhältnissen einer Ortbetonbauweise zielsicherer verarbeitet werden können.

6 Ausführung

Die Herstellung würde analog bisher üblicher Halbfertigteilbauweisen erfolgen:

Nach Herstellung der Gründung wird das Widerlager bis zur Auflagerebene der Halbfertigteile fertiggestellt. Die Auflagerpunkte können im Interesse einer reibungslosen Montage mit

höhenmäßig exakt eingesetzten Montagehilfsauflagern ausgerüstet werden.

Parallel werden die Halbfertigteile unter den guten Bedingungen werkmaßiger Herstellung im Fertigteilwerk hergestellt und nach ausreichender Aushärtung in der Schalung vorgespannt. Optional ist auch eine Teilverspannung möglich. Der Spanngliedlieferant liefert Fertigspannglieder an das Fertigteilwerk und übernimmt das Aufbringen der vollen Vorspannkraft einschließlich Dehnwegkontrolle. Die Fertigteile liegen dann im Zwischenlager zur Auslieferung bereit.

Zur Montage werden die Fertigteile mit üblichen Schwertransporten angeliefert und per Mobildrehkran auf die vorbereiteten Montagehilfslager auf den Widerlagern aufgesetzt. Wie bei der VFT-Bauweise können notwendige Kappengerüste bzw. -schalungen, Entwässeungsleitungen etc. vormontiert werden. Nach dem Absetzen der Fertigteile erfolgt eine Lagesicherung durch Koppellaschen und geeignete Verspannungen auf der Widerlagerbank. D. h. die Montage kann erfahrungsgemäß innerhalb einer nächtlichen Sperrpause durchgeführt werden. Außerhalb der Sperrpause bestehen keine Einschränkungen des Verkehrsraumes. Die Fertigteile übernehmen im Bauzustand die Funktion der Schalung für die Ortbetonergänzung und das Traggerüst. Zusätzliche Baubehelfe für die Herstellung des Überbaus sind nicht notwendig.

Anschließend können die Bewehrung der Ortbetonergänzung der Fahrbahnplatte ohne Verkehrseinschränkungen eingebaut und die Ortbetonplatte ergänzt werden. In Abhängigkeit der gewählten statischen Auslegung werden die Rahmenecken vorbetoniert und der Bereich Fahrbahnplatte erst nach Aushärten der Rahmenecken. Durch diese Vorgehensweise lässt sich die Schnittgrößenverteilung innerhalb des Tragwerks steuern.

Nach Fertigstellung der Ortbetonergänzung folgen Versiegelung, Abdichtung, Kappen, Fahrbahnbelag, Markierung sowie weitere Bestandteile der Brückenausrüstung (Geländer, Schutzeinrichtungen, ...) und das Bauwerk ist bereit für die Inbetriebnahme.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Ergebnis einer sehr konstruktiven Zusammenarbeit der Partner ist ein baupraktisch zeitnah umsetzbares Brückensystem auf der

Basis von vorgespannten Halbfertigteilen aus verbundlos vorgespanntem Carbonbeton entstanden. Durch die integrale Bauweise ohne Lager und Fugen und die Materialauswahl ist das Bauwerk überdurchschnittlich schlank und dauerhaft.

Aktuell wird durch die Projektpartner ein 21 m langer Prototyp des Halbfertigteils hergestellt, bei dem alle entwickelten Materialien und Technologien verwendet werden (Spannglied, thermoplastische Carbonbewehrung, spezielles Bemessungskonzept für Carbonbeton). Der Prototyp des Halbfertigteils wird anschließend mit einer Ortbetonergänzung für die Rahmenecken und die Fahrbahnplatte im Labor der TU Berlin zu einer „Brücke“ komplettiert. Geplant ist, das Tragverhalten in verschiedenen Belastungssituationen ca. ein Jahr auf Gebrauchslastniveau zu untersuchen. Unter anderem sollen das Langzeitverhalten des Bauteils sowie des Spanngliedes und dessen Verankerung unter dynamischer Belastung studiert werden. Anschließend sollen Belastungsversuche bis zum Bruch Rückschlüsse auf die Eignung des verwendeten Bemessungskonzepts ermöglichen.

Das erarbeitete Tragwerkskonzept ist modular und in weiten Grenzen anpassbar, d. h. hinsichtlich Spannweite und Breite, aber auch hinsichtlich Belastung (Rad- und Fußwege, Straßenverkehr, Eisenbahnverkehr) und statischem System (integral, gelagert). Bis zur breiten Anwendung in der Praxis ist sicherlich noch eine gewisse Erprobungsphase erforderlich. Die Verfügbarkeit der Materialien und Bemessungsregeln ist gegeben, so dass für eine Umsetzung in der Praxis vor allem eine bauaufsichtliche Regelung herbeigeführt werden muss, anfangs ggf. über Zustimmungen im Einzelfall.

Danksagung

Die Arbeiten zu den vorgestellten Ergebnissen wurden im Rahmen des BMBF-Programms „Zwanzig 20 – Partnerschaft für Innovation“ als Vorhaben C3-V4.2 des Konsortiums „C³ – Carbon Concrete Composite“ gefördert, wofür die Autoren herzlich danken. Unser Dank gilt weiterhin den Projektpartnern SGL Carbon (Meitingen), schlaich bergermann partner, DY-WIDAG-Systems International (München) und dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden für die konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen des Forschungsprojektes. Die Autoren danken ThyssenKrupp

Carbon Components (Kesselsdorf) für die Beratung und Unterstützung mit geeigneten Materialien.

Literatur

- [1] Schießl, P.; Mayer, T. F.: Lebensdauer-managementsystem – Teilprojekt A2. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schlussbericht zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Schriftenreihe des DAfStb, Heft 572, Berlin: Beuth, 2007, S. 49–100
- [2] Schießl-Pecka, A.; Willberg, U.; Müller, G.; Gehlen, C.: 100 Jahre Dauerhaftigkeit für Brücken- und Tunnelbauwerke. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 28. Dresdner Brückenbausymposium, 12.–13.3.2018 in Dresden, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2018, S. 157–167
- [3] Santoh, N.; Kimura, H.; Enomoto, T.; Kiuchi, T.; Kuzuba, Y.: Report on the use of CFCC in prestressed concrete bridge in Japan. In: Nanni, A.; Dolan, C. W. (Hrsg.): Proc. of Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures Int. Symp., 28.–31.3.1993 in Vancouver (Kanada), Michigan: Amercian Concrete Institute, SP-138, 1993, S. 895–911
- [4] Boschung, P.: Eine federleichte Betonbrücke. baublatt (2017) 20, S.14–18
- [5] Burgoyne, C. J.: Should FRP be bonded to Concrete? In: Nanni, A.; Dolan, C. W. (Hrsg.): Proc. of Fiber Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures Int. Symp., 28.–31.3.1993 in Vancouver (Kanada), Michigan: Amercian Concrete Institute, SP-138, 1993, S. 367–380
- [6] Apitz, A.: Suitability of CFRPs for Prestressing of Concrete Bridges. In: Int. Association for Bridge and Structural Engineering (Hrsg.): Proc. of 4th Young Engineers Colloquium, 31.3.2017 in Bochum, 2017, S. 20–21
- [7] Helbig, T.; Unterer, K.; Kulas, C.; Rempel, S.; Hegger, J.: Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) 10, S. 676–685 – DOI:10.1002/best.201600058
- [8] Michler, H.: Innovativ! Leicht! Formbar! Bewährt! – Textilbetonbrücke Rottachsteg Kempten im Allgäu. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013) 5, S. 325–334 – DOI: 10.1002/best.201300023
- [9] Kulas, C.; Goralski, C.: Die weltweit längste Textilbetonbrücke. Beton- und Stahlbe-

- tonbau 109 (2014) 11, S. 812–817 – DOI: 10.1002/best.201400066
- [10] Schlaich, M.; Bleicher, A.: Spannbandbrücke mit Kohlenstofffaser-Lamellen. Bautechnik 84 (2007) 5, 311–319 – DOI: 10.1002/bate.200710028
- [11] Schlaich, M.; Liu, Y.; Zwingmann, B.: Ringseildächer mit CFK-Zugelementen. Bautechnik 91 (2014) 10, 728–741 – DOI: 10.1002/bate.201400031
- [12] Schlaich, M.; Liu, Y.; Zwingmann, B.: Carbon Fibre Reinforced Polymer for Orthogonally Loaded Cable Net Structures. Structural Engineering International 25 (2015) 1, S. 34–42 – DOI: 10.2749/101686614X14043795570534
- [13] Homepage des Vorhabens C³ – Carbon Concrete Composite: <https://www.bauen-neu-denken.de/> [geprüft am 20.1.2019]
- [14] Grace, N. F.; Jensen, E. A.; Eamon, C. D.; Shi, X.: Life Cycle Cost Analysis of Carbon-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Bridge. ACI Structural Journal 109 (2012) 5, S. 697–704
- [15] DIN-EN-1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [16] Machida, A. (Hrsg.): Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials. JSCE Concrete Engineering, 1995
- [17] ACI Committee 440 (Hrsg.): Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons. American Concrete Institute, 2004, 35 S.
- [18] CAN/CSA-S6-06: Canadian Highway Bridge Design Code. Mississauga (Ontario, Kanada): Canadian Standards Association, 2011, 930 S.
- [19] Curbach, M.; Schladitz, F.; Weselek, J.; Zobel, R.: Eine Vision wird Realität: Der Betonbau der Zukunft ist nachhaltig, leicht, flexibel und formbar – dank Carbon. Prüfingenieur (2017) 51, S. 20–35
- [20] Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.: The fib perspective on FRP reinforcement in RC. In: Oehlers, D. J.; Griffith M. C.; Seracino, R. (Hrsg.): Proc. of the 9th Conf. on Fibre Reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-9), 13.–15.7.2009 in Sydney (Australien), Adelaide: University of Adelaide, 2009, 4 S. – Book of abstract and DVD
- [21] Pilakoutas, K.; Guadagnini, M.; Neocleous, K.; Matthys, S.: Design guidelines for FRP reinforced concrete structures. Structures and Buildings 164 (2011) SB4, S. 255–263 – DOI: 10.1680/stbu.2011.164.4.255
- [22] ACI Committee 440 (Hrsg.): Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. American Concrete Institute, 2006, 44 S.
- [23] International Federation for Structural Concrete (fib) (Hrsg.): FRP reinforcement in RC structures. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2007, 151 S.
- [24] Niewels, J.; Hegger, J.: Betonbauteile mit Bewehrungen aus Faserverbundkunststoff (VFK). In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. (DAfStb., Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb, Heft 582, Berlin: Beuth, 2010, 147 S.
- [25] Just, M.: Sicherheitskonzept für Textilbeton. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) S1, S. 42–46 – DOI: 10.1002/best.201400109
- [26] Häußler-Combe, U.; Weselek, J.; Jesse, F.: A Safety Concept for Non-Metallic Reinforcement for Concrete under Bending. ACI Structural Journal 116 (2019) 1, S. 151–160 – DOI: 10.14359/51710873
- [27] Oller, E.; Marí, A.; Bairán, J. M.; Cladera, A.: Shear design of reinforced concrete beams with FRP longitudinal and transverse reinforcement. Composites Part B: Engineering 74 (2015) S.104–122 – DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.031
- [28] Holgate, A.: The Art of Structural Engineering – The Work of Jörg Schlaich and his Team. Fellbach: Edition Axel Menges, 1997, hier: S. 178–179.
- [29] Kleiser, M.: Formentwicklung einfeldriger Rahmenüberführungen anhand statisch-konstruktiver Überlegungen. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017) 5, S. 272–281.
- [30] Schlaich, M.; Apitz, A.; Goldack, A.: Form optimized CFRP reinforced and post-tensioned integral concrete bridge using precast girders. In: Int. Association for Bridge and Structural Engineering (Hrsg.): Tomorrow's Megastuctures – Proc. of 40th IABSE Symp., 19.–21.9.2018 in Nantes (Frankreich), Red Hook, NY: Curran Association, 2018, S. S2-17-S2-24

-
-
- 9 Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium
- 13 Verleihung der Wackerbarth-Medaille
- 14 Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen
- 17 Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet
- 25 Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau
- 29 Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks – Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas
- 47 Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau
- 59 Verkehrsinfrastruktur für Hamburg – Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen
- 73 Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung von neuen Verfahren im Brückenbau
- 85 Stahlverbund-Großbrücken mit obenliegender Fahrbahn als Querschnitte mit Teilstahlprofilen und Schrägstreben bzw. Konsolen
- 101 Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik
- 129 Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken – Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?
- 149 Was tun, wenn Annahmen und Wirklichkeit nicht übereinstimmen?
- 161 Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken
- 173 Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton
- 185 Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen
- 197 Chronik des Brückenbaus
- 209 Inserentenverzeichnis