



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.massivbau.tu-dresden.de



30. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM – ERGÄNZUNGSBAND 2021

**PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN**

8./9. MÄRZ 2021

WIR GESTALTEN AUTOBAHN



Leonhardt, Andrä und Partner
www.lap-consult.com

GESTALTUNGSHANDBUCH • MUSTERENTWÜRFE • AUSFÜHRUNGSPLANUNG

BAB A3, BW 400c
Foto: Hajo Dietz

© 2021 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
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Sabine Wellner
Layout: Ulrich van Stipriaan
Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Die 1950 fertiggestellte Gänstorbrücke in Ulm soll 2024 abgebrochen und durch einen Neubau ersetzt werden. (Foto: Dicleli, 2008)

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

SSN 1613-6934
ISBN 978-3-86780-664-0

Bemessung der Carbonbetonbrücke in Ottenhöfen

Prof. Dr.-Ing. Sergej Rempel¹, David Nigl M.Sc.², Jan Bielak M.Sc.³

1 Einführung

Die alte Behelfsbrücke über die Acher in Ottenhöfen konnte aufgrund der gravierenden Schäden wirtschaftlich nicht mehr instand gesetzt werden (Bild 1). Aus diesem Grund wurde das Ingenieurbüro R+S aus Achern mit der Planung einer neuen Brückenkonstruktion beauftragt. Bei dem Entwurf wurden besondere Anforderungen an die Tragfähigkeit, die Schlankheit, die Dauerhaftigkeit und die Wirtschaftlichkeit gestellt.

Die Wünsche des Bauherrn konnten mit einer hybriden Brückenkonstruktion erfüllt werden. Die eingesetzten Stahlträger und Carbonbetonplatten bilden zusammen eine optimale Tragkonstruktion. Während die Stahlträger den Lastabtrag in Längsrichtung gewährleisten, übernehmen die Platten den Lastabtrag in Querrichtung.

Durch den Einsatz der korrosionsresistenten Carbonbewehrung konnte die Plattenstärke auf 10 cm reduziert werden. Gleichzeitig konnte auf eine Abdichtung und Asphaltenschutzschicht verzichtet werden, wodurch mit einer Verringerung der Instandsetzungskosten zu rechnen ist [1]. Durch die zusätzlichen Einsparungen kann die im Vergleich zur Stahlbewehrung teurere Carbonbewehrung refinanziert werden.

Bei den bisher realisierten Carbonbetonbrücken waren aufwendige und kostenintensive

Tragfähigkeitsuntersuchungen notwendig, um die erforderliche Zustimmung im Einzelfall (ZiE) mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung (vBg) zu erhalten. Der Aufwand hierfür kann erheblich reduziert werden, wenn die Tragfähigkeiten mit Bemessungsmodellen nachgewiesen werden. Zusammen mit den eingesparten Aufwendungen für Abdichtung und Schutzschicht können so bereits zum Herstellzeitpunkt wirtschaftliche Brückenkonstruktionen entstehen, die sich beim Preis im Vergleich zur herkömmlichen Stahlbetonbrücke nicht unterscheiden.

Bei der hier vorgestellten Brücke in Ottenhöfen konnte erstmals vollständig auf experimentelle Untersuchungen im Vorfeld der Ausführung verzichtet und die Tragfähigkeit anhand von Bemessungsmodellen nachgewiesen werden. In diesem Beitrag werden die rechnerischen Nachweise für Carbonbetonbauteile vorgestellt.



Bild 1 Ansicht der alten Brücke in Ottenhöfen

Foto: Sergej Rempel

¹ Hochschule Augsburg

² Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

³ Institut für Massivbau, RWTH Aachen University

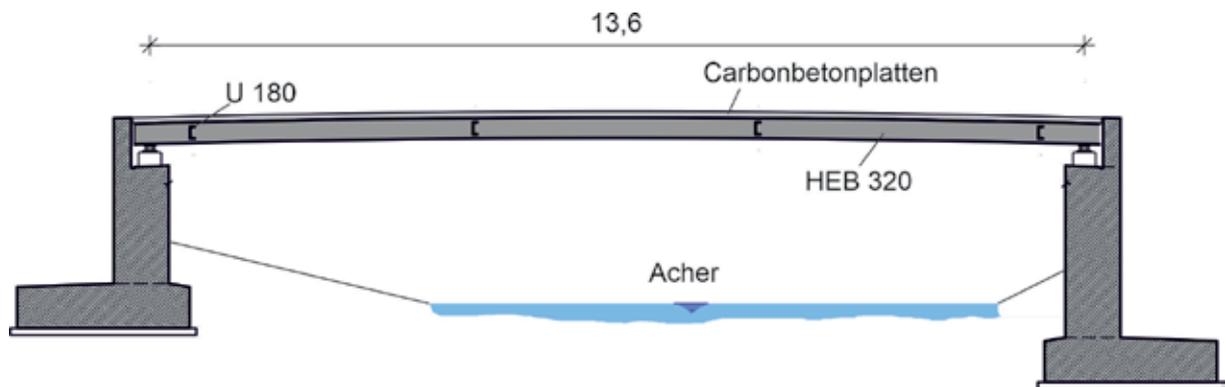


Bild 2 Längsschnitt der neuen Brücke in Ottenhöfen

Zeichnung: R+S Ingenieure

2 Bauwerksbeschreibung

Die Rad- und Fußgängerbrücke in Ottenhöfen hat eine Spannweite von 13,6 m, überquert den Fluss Acher (Bild 2) und kreuzt das Gewässer in einem Winkel von 100 gon. Der Brückenüberbau kann in zwei Einheiten aufgeteilt werden. Die erste Gruppe bilden vier Stahlträger vom Typ HEB 320 im Achsabstand 0,8 m, die in Längsrichtung der Brücke verlaufen. Die Profile haben eine leichte Überhöhung mit einem Stich von 0,1 m in der Mitte der Brücke. Zu Aussteifungszwecken sind an vier Stellen Querprofile vom Typ U 180 angeordnet (Bild 3).

Die zweite Gruppe bilden sieben Carbonbetonplatten, die auf den Stahlträgern zwängungsfrei auf Elastomereinstreifen aufgelagert sind. Zur Übertragung von Horizontalkräften infolge von Bremskräften sowie als Sicherung gegen Abheben wurden in jeder Platte an vier Punkten

Schraubverbindungen angeordnet. In den Carbonbetonplatten wurden dazu Hülsenanker als Einbauteile vorgesehen. Eine Verbundwirkung wurde nicht angesetzt, d. h. die Betonplatte wurde nicht als Druckgurt der Stahlträger aktiviert. In der Bemessung wurden die Stahlträger und der Carbonbetonüberbau separat behandelt.

Die Carbonbetonplatten haben eine konstante Höhe von 0,1 m und werden direkt befahren. Auf eine Schutzschicht konnte in diesem Fall verzichtet werden, da sie für die korrosionsresistente Carbonbewehrung nicht benötigt wird und der Beton den Anforderungen der Expositionsklasse XF4 genügt. Die Elemente haben eine Abmessung von 3 m × 2 m und sind mit je einer Lage solidian GRID Q142/142-CCE-38 auf Plattenoberseite und -unterseite bewehrt. Zusätzlich mussten an den langen Seiten jeder Platte in Brückenquerrichtung auf einer

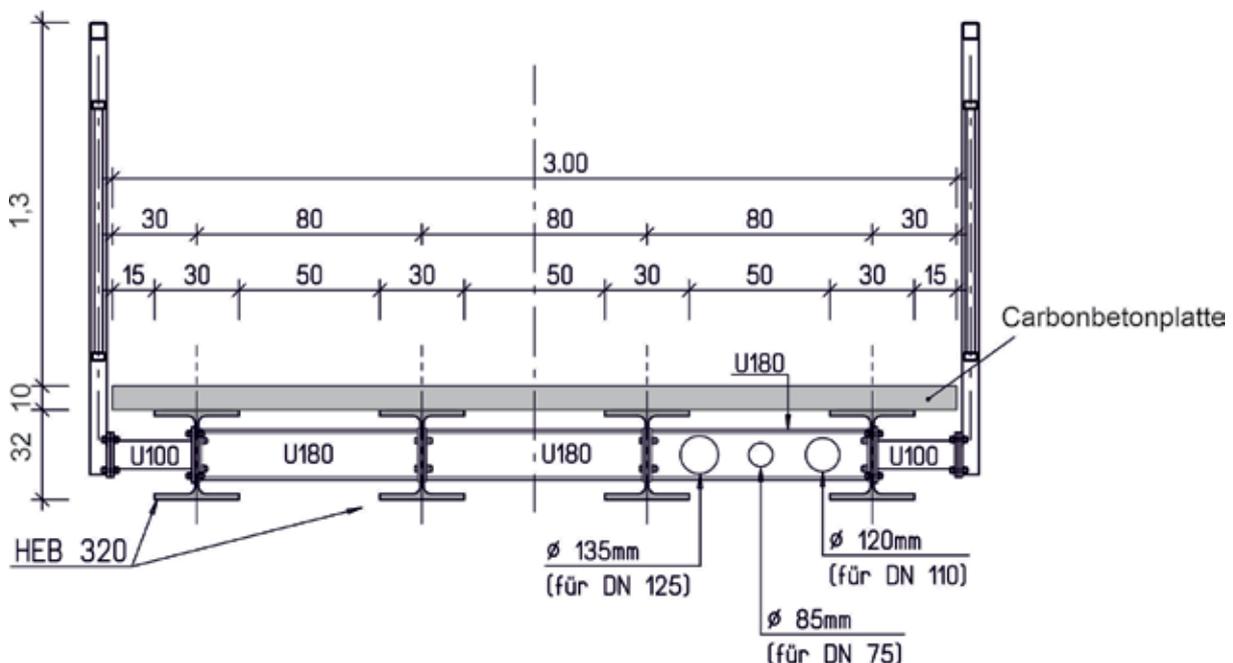


Bild 3 Querschnitt der Brücke

Zeichnung: R+S Ingenieure

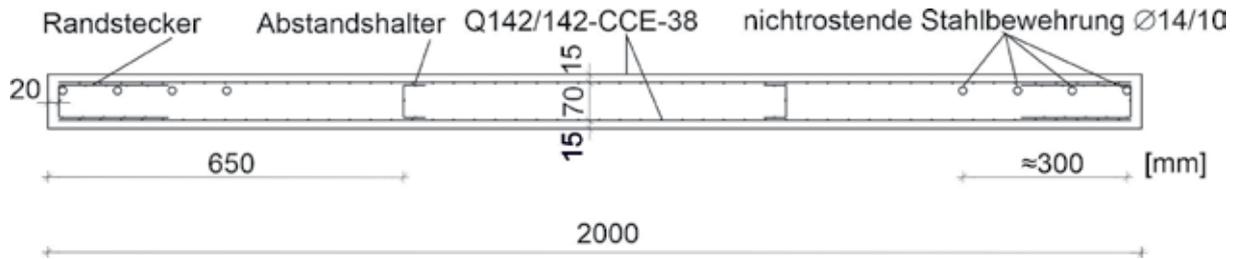


Bild 4 Querschnitt der Platte (Schnitt parallel zur Brückenlängsrichtung) Zeichnung: Sergej Rempel

Breite von 0,3 m je vier Bewehrungsstäbe aus nichtrostendem Stahl zum Nachweis der ausreichenden Querkrafttragfähigkeit angeordnet werden (s. Abschnitt 4.3).

Der Überbau wurde an den Enden auf zwei Kastenwiderlager positioniert. Diese wurden flach gegründet und mit einem Beton der Festigkeitsklasse C30/37 (mit Luftporenbildner) und einer herkömmlichen Stahlbewehrung ausgeführt. Die statische Bemessung erfolgte nach dem herkömmlichen Verfahren aus dem Eurocode 2 [2] und wird daher im Beitrag nicht weiter behandelt.

3 Materialien

3.1 Stahlträger

Die vier in Längsrichtung spannenden Träger sind Standardprofilenach DIN EN 10034:1994-03 [3] und konnten gemäß Eurocode 3 [4] bemessen werden.

3.2 Beton

Für die Carbonbetonplatten wurde ein Beton mit der Festigkeitsklasse C50/60 verwendet. Die Rezeptur wurde von der Firma Grötz Bau entwickelt und entspricht den Anforderungen des Eurocode 2 [2] bzw. der DIN EN 206 [5]. Das Größtkorn wurde im Hinblick auf die Maschenweite der Carbonbewehrung zu 8 mm gewählt. Aufgrund der korrosionsbeständigen Carbonbewehrung bestanden keine Anforderungen an einen Schutz der Bewehrung, womit die Expositionsklassen XC und XD entfallen konnten. Für den mechanischen Abtrieb war die Klasse XM1 ausreichend. Der maßgebende Fall für die Expositionsklasse war der Widerstand gegen Frost und Tausalz, wofür XF4 zwingend erforderlich war. Die Eigenschaften des Betons für die Bemessung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Da es sich um einen Normbeton handelte, konnten bei der Bemessung das Parabel-Rechteck-Diagramm für den Spannungs-Dehnungs-Verlauf aus dem Eurocode 2 [2] verwendet werden. Vereinfachende Alternativen hierzu wären der lineare Ansatz oder auch der eines rechteckigen Spannungsblocks, die eine geschlossene Lösung des Biegeproblems ermöglichen [6]. Es sei darauf hingewiesen, dass bei normalfesten Betonen und der Druckzone als maßgebendem Versagenskriterium der lineare Ansatz geringere Momentenwiderstände vorhersagt.

3.3 Carbonbewehrung

Für die Carbonbetonplatten wurde die epoxidharzgetränkte Carbonbewehrung solidian GRID Q142/142-CCE-38 verwendet. Es handelt sich hierbei um ein biaxiales, symmetrisches Gelege. Sie wurde in der oberen und der unteren Lage als flächige Bewehrung eingesetzt (Bild 4 und Bild 5). Als C-förmiges Bewehrungselement zur Randeinfassung und als Abstandhalter wurden dreidimensionale Profile verwendet, die aus dem gleichen Grundmaterial herstellerseitig vorgeformt wurden (Bild 4).

Für die Bemessung der Carbonbetonplatte wurde ein linear-elastisches Materialverhal-

Tabelle 1 Kennwerte des verwendeten Betons, nach [2]

Kennwert	Einheit	Wert
Druckfestigkeit	f_{cm}	[N/mm ²] 58
	f_{ck}	[N/mm ²] 50
	f_{cd}	[N/mm ²] 28,3
Zugfestigkeit	f_{ctm}	[N/mm ²] 4,1
E-Modul	E_{cm}	[N/mm ²] 37.000
Bruchdehnung	ϵ_{c2}	[‰] 2,0
	ϵ_{cu2}	[‰] 3,5

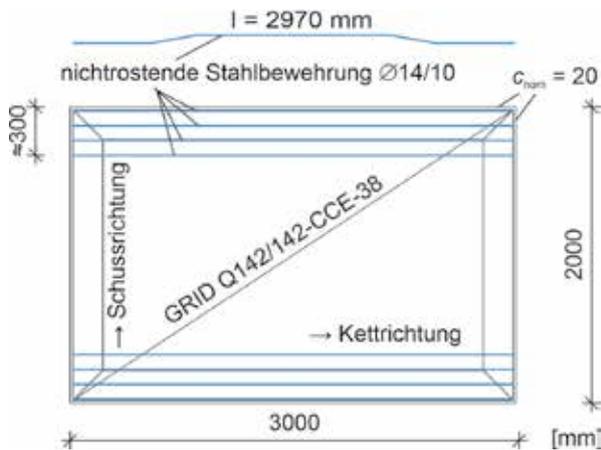


Bild 5 Auszug aus dem Bewehrungsplan der Carbonbetonplatten
Zeichnung: Sergej Rempel

ten für die Bewehrung angesetzt (Bild 6). Die Ermittlung der dafür benötigten Materialkennwerte Bruchspannung f_t , Bruchdehnung ϵ_t und E-Modul E_t erfolgt am standardisierten Faserstrangzugversuch [7]. Hierfür wird ein 160 mm langer Faserstrang aus einer Bewehrungsmatte herausgeschnitten und in einer Zugprüfmaschine bis zum Bruch belastet. Der ermittelte Mittelwert der Bruchspannung f_{tm} aus dem Versuch wird anschließend mit einem Effektivitätsfaktor α_{eff} auf die effektive Bruchspannung $f_{tm,eff}$ abgemindert. Mit der Reduzierung der Bruchspannung wird der Einfluss der Anzahl und der Prüflänge der Faserstränge berücksichtigt [7]. Die Umrechnung ist notwendig, da der einzelne Faserstrang aus dem standardisierten Zugversuch nicht auf das reale Bauteilverhalten übertragbar ist. Weitere Informationen dazu können [7] entnommen werden.

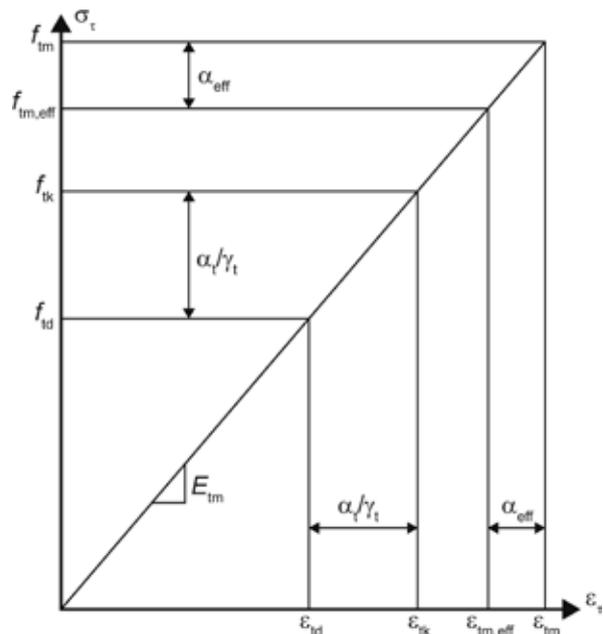


Bild 6 σ - ϵ -Linie der Bewehrung für die Querschnittsbemessung
Grafik aus [8]

Mit der effektiven mittleren Bruchspannung $f_{tm,eff}$ kann anschließend der charakteristische 5%-Quantilwert (Normalverteilung) der Bruchspannung f_{tk} ermittelt werden. Unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwertes γ_t und dem Abminderungsfaktor α_t darf abschließend der Bemessungswert f_{td} bestimmt werden (Tabelle 2). Der mittlere E-Modul E_{tm} , der im Faserstrangzugversuch ermittelt wird, wird für den Spannungs-Dehnungs-Verlauf im Bemessungszustand nicht abgemindert. Das hat zur Folge, dass die Bruchdehnung ϵ_t im charakteristischen Zustand ϵ_{tk} und im Bemessungszustand ϵ_{td} infolge des linearen Verlaufs mit den Hooke-

Tabelle 2 Kennwerte der verwendeten Bewehrung

Kennwert		Einheit	Kettrichtung	Schussrichtung
E-Modul	E_{tm}	[N/mm ²]	205.140	234.152
Bruchspannung	f_{tm}	[N/mm ²]	2.692	2.898
	$f_{tm,eff}$	[N/mm ²]	2.281	2.420
	f_{tk}	[N/mm ²]	2.000	2.106
	f_{td}	[N/mm ²]	1.538	1.620
Bemessungswert Dehnung	ϵ_{td}	[‰]	7,5	6,9
Achsabstand Faserstränge	A	[mm]	38	38
Faserstrangquerschnittsfläche	A_{FS}	[‰]	5,42	5,42
	a_{Matte}	[‰]	142	142

schen Gesetz ($\sigma = E \cdot \varepsilon$) berechnet werden kann.

Für den Teilsicherheitsbeiwert γ_t kann ein Wert von 1,3 angenommen werden, falls es sich um eine Biegebeanspruchung handelt. Weitere Details zum Teilsicherheitsbeiwert sind in [8] enthalten. Der Abminderungsfaktor α_t berücksichtigt weitere Einflüsse, wie z. B. den Dauerstand. Dieser kann bei einer epoxidharzgetränkten Carbonbewehrung zu 1,0 gesetzt werden [9]. Aber auch die Temperaturbeständigkeit sollte beachtet werden. Falls die Zugfestigkeit aus dem standardisierten Zugversuch bei einer Temperaturbeanspruchung von 80 °C nicht erreicht wird, sollte ein Reduktionsfaktor berücksichtigt werden. Dieser sollte von den Bewehrungsherstellern angegeben werden.

Die Materialkennwerte für die eingesetzte Bewehrung der Brücke in Ottenhöfen sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Diese Eigenschaften sollten für die Bemessung von weiteren Carbonbetonbauteilen vom Bewehrungshersteller angegeben werden.

3.4 Nichtrostende Betonstahlbewehrung

An den beiden langen Seiten jeder Carbonbetonplatte wurden jeweils vier nichtrostende Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 14 mm auf einer Breite von 300 mm angeordnet (Bild 5). Die verwendete Bewehrung hat eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung mit der Nummer Z-1.4-153 [10]. Folglich konnte die Bemessung des bewehrten Querschnitts im Randbereich nach Eurocode 2 [2] erfolgen und wird daher in diesem Beitrag nicht näher erläutert.

3.5 Verbindungselemente

Für die Verbindung der Platte mit den außenliegenden Stahlträgern wurden Hülsenanker T-FIXX A4 M20x70 der Firma Halfen eingesetzt (Bild 7 und Bild 8). Als Toleranzausgleich in der Schnittstelle Stahlbau – Massivbau mussten übergroße Löcher vorgesehen werden. Der Obergurt des Stahlträgers und dahingehend die effektive Flanscbreite sollten nicht durch eine Bohrung geschwächt werden, weshalb zusätzliche seitliche Stahlaschen angeschweißt wurden. Insgesamt wurden dabei acht Anker je Platte verwendet (Bild 8). Die Bemessung der Hülsenanker erfolgte mit den Tragfähigkeitswerten der eu-

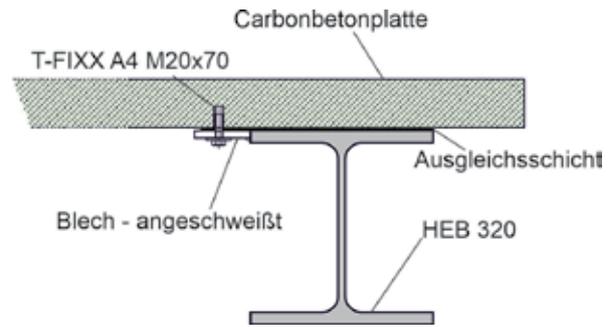


Bild 7 Detail des Ankeranschlusses
Zeichnung: R+S Ingenieure

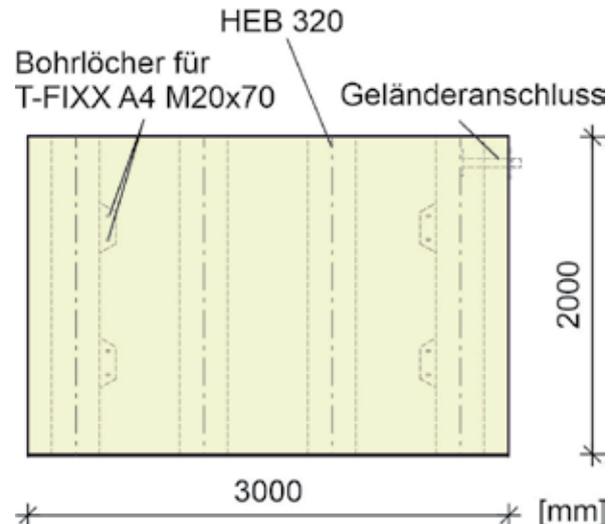


Bild 8 Positionen der Anschlüsse in der Platte
Zeichnung: R+S Ingenieure

ropäischen technischen Bewertung (ETA) mit der Nummer 13/0222 [11], wobei die Tragfähigkeit auf der sicheren Seite liegend für unbewehrten Beton angesetzt wurde.

4 Bemessung der Carbonbetonplatten

4.1 Einwirkungen und Ermittlung der Schnittgrößen

Die Haupttragrichtung der Carbonbetonplatten ist in Brückenquerrichtung. Das statische System ist ein Durchlaufträger mit drei Feldern und Kragarmen an den beiden Rändern. Die Spannweiten betragen 80 cm (s. Bild 3).

Für die Ermittlung der Schnittgrößen wurde neben dem Eigengewicht der Konstruktion auch eine vollflächige Nutzlast angesetzt. Letztere war für die Bemessung der Carbonbetonplatten jedoch von untergeordneter Bedeutung, da die Einzellasten aus dem Fahrzeugverkehr maßgebend waren.

Die Brücke dient als Notentlastung für die parallel zum Radweg verlaufende Landstraße, weshalb Einzellasten eines 16-t-LKW mit einer Radaufstandsfläche von $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ als Verkehrslast berücksichtigt werden mussten. Der lichte Raum zwischen den Geländern hat eine Breite von ca. 3 m und entspricht damit der Breite des 16-t-LKW. Demzufolge ist die Lastpositionierung beschränkt und lediglich variabel in Brückenlängsrichtung. Eine Lastvariation in Brückenquerrichtung geht zwangsläufig mit einer Kollision des 16-t-LKW mit der Geländerkonstruktion einher. Jener Havarie-Lastfall blieb daher unberücksichtigt.

Die geographische Lage der Gemeinde Ottenhöfen bedingt ein erhöhtes Schneeaufkommen in den Wintermonaten. Vor diesem Hintergrund wurde zusätzlich ein 12-t-Fahrzeug mit einer kleineren Radaufstandsfläche von $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ zur Schneeräumung berücksichtigt. Die Lastpositionierung erfolgte hierbei auf Grundlage des Eurocode 1, Teil 2 [12] für den außergewöhnlichen Lastfall einer unplanmäßigen Anwesenheit von Fahrzeugen auf der Brücke. Im Gegensatz zum 16-t-LKW ist die Breite des Dienstfahrzeugs reduziert und erfordert somit ein breiteres Spektrum möglicher Lastpositionen.

Sowohl für die Radaufstandsfläche des 16-t-LKW als auch des kleineren 12-t-Dienstfahrzeugs wurde eine beidseitige Lastverteilung unter einem Winkel von 45° bis zur Schwereachse der Carbonbetonplatte angenommen. Eine Ausnahme bildeten die Plattenränder im Bereich der Stoßfugen. Hier wurde lediglich eine einseitige Lastausbreitung in Plattenlängsrichtung berücksichtigt.

Letztendlich erfolgte die Ermittlung der Schnittgrößen auf Basis einer Finite-Elemente-Simulation am Gesamtsystem. Das Gesamtsystem setzte sich dabei aus der Modellierung der Carbonbetonplatten und der Hauptlängs-

träger zusammen und umfasste somit die wesentlichen Tragelemente des Brückenüberbaus. Durch den Einbezug der Träger lag eine elastische Lagerung der Carbonbetonplatten vor. Diese Art der Modellbildung erlaubte es, das Plattentragverhalten möglichst realitätsgetreu nachzubilden.

4.2 Biegung

4.2.1 Allgemeiner Ablauf der Biegebemessung

Bei der Biegebemessung wird auf das Verfahren aus dem Stahlbetonbau zurückgegriffen [13]. Dabei kann entweder bei bekannter Bewehrungsmenge $A_{t,vorh}$ die Querschnittstragfähigkeit M_R oder bei einem einwirkenden Moment M_E die erforderliche Bewehrung $A_{t,erf}$ ermittelt werden [14]. Bei diesem Bemessungsverfahren werden folgende Annahmen getroffen:

- ❑ Die Dehnungen bleiben während der gesamten Belastung linear über die Querschnittshöhe verteilt.
- ❑ Die Zugfestigkeit des Betons wird nicht angesetzt. Somit müssen alle Zugkräfte von der Bewehrung abgetragen werden.
- ❑ Die Bewehrung und der Beton weisen vollkommenen Verbund auf.
- ❑ Für die Bemessung werden separat ermittelte Materialkennwerte für die textile Bewehrung und für den Beton verwendet.

Dieses Verfahren für die Biegebemessung darf für beliebige Querschnitte angewendet werden. Die Lösung wird dabei iterativ ermittelt und kann „händisch“ erfolgen. Hierfür

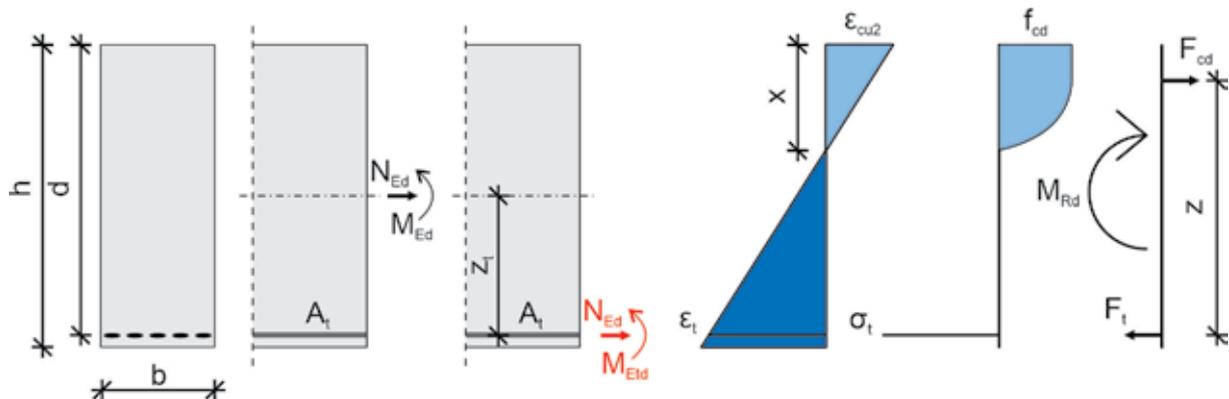


Bild 9 Ermittlung der Biegetragfähigkeit, Annahme: Betonversagen

Grafik: Sergej Rempel

sind u. a. die geometrischen Größen Breite b , Höhe h und statische Nutzhöhe d erforderlich (Bild 9).

Falls die Bewehrungsquerschnittsfläche $A_{t,vorh}$ bekannt ist und die Biegetragfähigkeit M_R gesucht wird, werden im ersten Schritt der Bemessung die Randdehnung des Betons ϵ_c und der textilen Bewehrung ϵ_t geschätzt (Bild 9). Bei einem Biegeversagen wird es entweder zum Überschreiten der Druckspannung des Betons oder zum Zugbruch der Bewehrung kommen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, entweder die Bruchdehnungen der Bewehrung ϵ_{td} oder des Betons ϵ_{cu2} einzusetzen (Bild 9). Mit den Materialgesetzen für die einzelnen Komponenten können mit den geschätzten Dehnungen die Spannungen für den Beton σ_c und das Textil σ_t berechnet werden (Abschnitt 3). Anschließend werden durch die Integration der Spannungen die Betondruckkraft F_c und die Textilzugkraft F_t bestimmt. Falls ein Gleichgewicht der beiden Kräfte $F_c = F_t$ vorliegt, können der innere Hebelarm z und anschließend der Biege widerstand M_R mit Gleichung (1) berechnet werden. Bei einem Ungleichgewicht der Kräfte muss ein erneuter Iterationsschritt durchgeführt werden, beginnend mit einer neuen Abschätzung der Dehnungsverteilung.

$$M_R = F_t \cdot z = A_{t,vorh} \cdot \sigma_t \cdot z \quad (1)$$

Alternativ kann auch der erforderliche Bewehrungsquerschnitt $A_{t,erf}$ ermittelt werden, falls das einwirkende Biegemoment M_E bekannt ist. Dabei unterscheidet sich das Vorgehen lediglich im letzten Schritt, indem nur die Integration für die Betondruckkraft F_c durchgeführt wird. Anschließend wird mit dem inneren Hebelarm z

die Biegetragfähigkeit M_R mit Gleichung (2) bestimmt und mit dem einwirkenden Moment M_E verglichen. Wenn das Gleichgewicht der Momente $M_R = M_E$ erreicht ist, wird mit Gleichung (3) der erforderliche Bewehrungsquerschnitt $A_{t,erf}$ berechnet. Bei einem Ungleichgewicht ist durch Neuschätzung der Dehnungsverteilung ein weiterer Iterationsschritt erforderlich.

$$M_R = F_c \cdot z \quad (2)$$

$$A_{t,erf} = M_E / (z \cdot \sigma_t) \quad (3)$$

4.2.2 Biegebemessung der Carbonbetonplatte

Bei der Biegebemessung der Carbonbetonplatte für die Brücke in Ottenhöfen wurde das Bemessungsverfahren eingesetzt, das in Abschnitt 4.2.1 beschrieben wurde. Bei dem iterativen Prozess wurde die Bruchdehnung der Bewehrung ϵ_{td} erreicht und es kam zu einem Zugbruchversagen (Bild 10). Mit der zugehörigen Bruchspannung $f_{td} = 1.538 \text{ N/mm}^2$ und der Bewehrungsquerschnittsfläche $a_t = 142 \text{ mm}^2/\text{m}$ konnte die Zugkraft zu $F_t = 217 \text{ kN/m}$ bestimmt werden. Da sich die horizontalen Kräfte $F_c = F_t$ im Gleichgewicht befunden haben, konnte die Biegetragfähigkeit m_{rd} mit dem inneren Hebelarm z berechnet werden, Gleichung (4).

$$m_{rd} = F_t \cdot z = 217 \text{ kN/m} \cdot 0,08 \text{ m} = 17,4 \text{ kNm/m} \quad (4)$$

Aufgrund der symmetrischen Bewehrungsanordnung ist die ermittelte Biegetragfähigkeit m_{rd} von $17,4 \text{ kNm/m}$ sowohl für einen Nachweis im Feld wie auch über der Stütze gültig. Das maßgebende einwirkende Biegemoment

m_{ed} betrug gemäß der Statik $11,9 \text{ kNm/m}$ und war somit geringer als die ermittelte Biegetragfähigkeit m_{rd} .

Im Zuge der Produktionskontrolle wurden indirekt auch Untersuchungen zur Biegetragfähigkeit durchgeführt. Die dort ermittelte Biegetragfähigkeit von $m_{rd,exp} = 18,5 \text{ kNm/m}$ lag etwas oberhalb der theoretisch berechneten Tragfähigkeit. Somit konnte gegenüber der Bauaufsicht die Tauglichkeit des theoretischen Modells bestätigt werden.

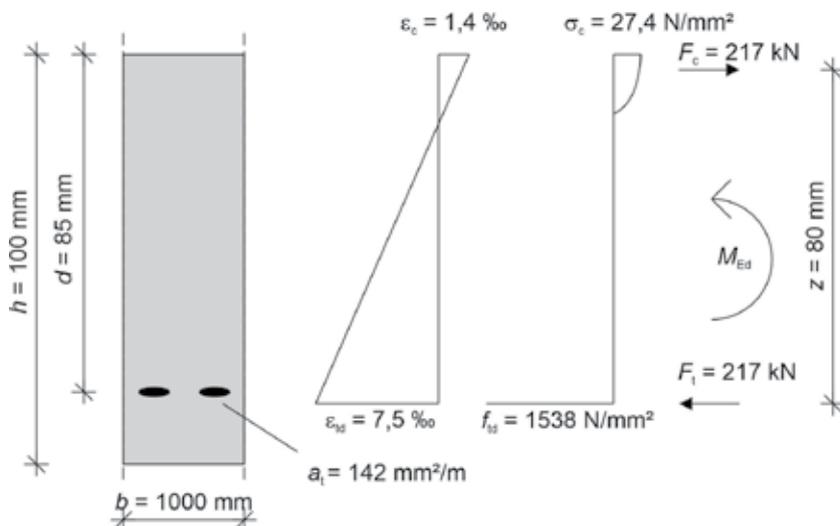


Bild 10 Ermittlung der Biegetragfähigkeit der Carbonbetonplatte

Grafik: Sergej Rempel

4.3 Querkraft

Der Querkraftnachweis für carbonbewehrte Betonbauteile mit und ohne Querkraftbewehrung war in Deutschland bei Planung und Ausführung der Brücke nicht in einer Richtlinie oder Norm geregelt. Es existieren allerdings Ingenieurmodelle für Betonbauteile mit Faserverbundkunststoffen (FVK), z. B. [15], und in internationalen Normen auch Bemessungsmodelle, z. B. [16]–[18], die für dünne Carbonbetonplatten mit textiler FVK-Bewehrung übernommen oder adaptiert werden können. Im vorliegenden Fall wurde das Bemessungsmodell, welches vom Technical Committee 250 SC2 (Working Group 1/Task Group 4 – Shear) für den Entwurf des neuen Eurocode 2 für Stahlbeton vorgeschlagen wurde, für FVK-Bauteile adaptiert. Die ursprünglichen Formeln wurden aus der *Critical Shear Crack Theory* (z. B. [19], [20]) vereinfacht und enthalten in der Grundform den Elastizitätsmodul der Bewehrung als Variable. Dies ermöglicht die Übertragung auf andere Bewehrungstypen wie CFVK. Es sei darauf hingewiesen, dass die verwendeten Formeln einen Zwischenstand (Draft 3) zum Zeitpunkt der Planung der Brücke darstellen.

Die für die Bemessung der Brücke verwendete Grundformel ist in [21] angegeben. Der Vorfaktor des Modells wurde anhand einer Datenbank des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen auf Mittelwertniveau der Materialeigenschaften (E-Modul, Betonfestigkeit) kalibriert, die seinerzeit 61 Versuche an Einfeldträgern mit ähnlichen Querschnittsgeometrien mit textiler FVK-Bewehrung und Querkraftversagen aufwies. Der Unterschied zum Vorfaktor im Stahlbetonbau von 0,6 betrug lediglich 9 %. Unter Annahme einer Normalverteilung für den Quotienten aus experimenteller und theoretischer Bruchlast wurde mittels der Standardabweichung der Versuchsdatenbank das charakteristische Niveau des Modells als 5%-Quantil festgelegt. Um vom charakteristischen Niveau auf das Mittelwertniveau umzurechnen, wurde schlussendlich ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 basierend auf früheren Versuchsergebnissen in Rücksprache mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde festgelegt. Das Modell kann den Einfluss der Schubslankheit für effektive Schubspannweiten a_{cs} zwischen dem Ein- bis Vierfachen der statischen Nutzhöhe günstig berücksichtigen und ist auch für Durchlaufsysteme tauglich. Die Datenbasis für die Kalibrierung des Vorfaktors lag etwa in dieser Bandbreite. Es sei darauf hingewiesen, dass das Modell mit dem projektspezifisch kalibrierten Vorfaktor für größere Schubslankheiten,

die bei hochzugfesten Bewehrungen auftreten können, ggf. unsichere Ergebnisse liefern würde. Der maßgebende Bemessungsschnitt lag im Abstand d zum Anschnitt des oberen Flansches des Stahlträgers. Das im Bauwerk vorhandene Momenten-Querkraft-Verhältnis im kritischen Lastfall, welches auf Basis der FE-Berechnung im Abstand d zum Auflager ermittelt wurde, lag bei ca. 1,0 und unterschied sich damit nur geringfügig von dem einer Einzellastbeanspruchung bei Einfeldträgern. Insgesamt ergab sich ein rechnerischer Querkraftwiderstand auf Bemessungsniveau im Abstand d von 33 kN/m.

Die maximale Querkrafteinwirkung infolge der Radeinzellasten des unplanmäßigen Fahrzeuges ergab sich an den langen Plattenrändern. Da kein Lastübertrag mittels Schubdollen o. ä. von einer in die nächste Platte vorgesehen war, kommt es hier zu einer Lastkonzentration im Bemessungsschnitt. Eine günstige Wirkung der auflagnahen Einzellast konnte mangels experimenteller Untersuchungen nicht angesetzt werden. Der rechnerische Querkraftwiderstand der Carbonbetonplatte reichte nicht aus, um die Tragfähigkeit nachzuweisen. Darüber hinaus konnte zu diesem Zeitpunkt der potenziell positive Einfluss der Durchlaufwirkung der Platte noch nicht in Ansatz gebracht werden, da die bisherigen Querkraftversuche ausschließlich an Einfeldsystemen durchgeführt wurden [22]. Um eine schnelle Umsetzung der Brücke ohne aufwändige experimentelle Untersuchungen im Vorfeld zu gewährleisten, entschied sich der Bauherr nach Absprache von Planer, Gutachter und Bauaufsicht für ein hybrides Bewehrungskonzept. Die Carbonbetonplatten wurden dazu im fugennahen Bereich mit einer Zulagebewehrung aus nichtrostender Betonstahlbewehrung nachgewiesen und hergestellt. Der rechnerische Nachweis der Querkrafttragfähigkeit erfolgte in diesem Bereich auf Basis des Eurocode 2 [2] und unter Einbezug der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der nichtrostenden Bewehrungsstäbe Z-1.4-153 [10]. Unter der Prämisse, dass sich ein jeder Biegeschubriss aus einem vorherigen Biegeriss entwickelt, wurde die Bewehrungsführung der nichtrostenden Stabstähle dem Verlauf des Biegemoments angepasst und von der unteren in die obere Lage gekröpft, s. a. Bild 5. Wegen der hohen Bruchdehnung der Carbonbewehrung konnte ein vorzeitiges Versagen der Carbonfaserstränge im kritischen Schubriss ausgeschlossen werden. Die Verträglichkeit der Dehnungen ist bei einer hybriden Bewehrung in jeder Bemessungssituation zu gewährleisten, selbst wenn die Carbonbewehrung rechnerisch nicht angesetzt wird,

um einen ungewollten Bruch der Faserstränge mit Betonabplatzung zu vermeiden.

Durch die obere Bauaufsichtsbehörde wurde in der Zustimmung im Einzelfall mit vorhabenbezogener Bauartgenehmigung eine Produktionskontrolle angeordnet, um die Einhaltung der in den theoretischen Nachweisen angenommenen Materialkennwerte und Toleranzen sowie die Tauglichkeit der verwendeten Modelle zu überprüfen. Es wurden Versuche an insgesamt sechs carbonbewehrten Plattenstreifen mit Durchlaufwirkung durchgeführt. Der Fokus der Untersuchung lag hier auf der Querkrafttragfähigkeit; die Biegetragfähigkeit und die Verankerung wurden indirekt mit behandelt. Die Probekörper bildeten das Tragverhalten des Durchlaufsystems als Einfeldträger mit Kragarmbelastung statisch bestimmt nach. Die Querschnittshöhe und Bewehrungsmenge entsprachen dem realen Bauteil im Mittelbereich der Platte, d. h. die Randbereiche mit Zulagebewehrung wurden nicht untersucht. Die Rissbilder wie auch die Tragfähigkeiten waren bei allen Probekörpern vergleichbar. Die Versuche am Durchlaufsystem haben allerdings gezeigt, dass der Querkraftwiderstand im Vergleich zum Einzelsystem und im Vergleich zur Vorhersage auf Mittelwertniveau signifikant höher war. Im vorliegenden Durchlaufsystem konnte sich aufgrund des spezifischen Verhältnisses von Stütz- zu Feldmoment von 1 : 2 sowie der geometrischen Randbedingungen ein Druckbogen ausbilden, der einen direkten Lastabtrag ermöglichte und damit den Querkraftwiderstand steigerte. Hätten die Versuchsergebnisse bereits vor der Erteilung der ZiE/vBg vorgelegen, hätte u. U. auf die Anordnung von Zulagebewehrung verzichtet werden können [22].



Bild 11 Bewehrungskorb

4.4 Endverankerung

Der Nachweis der Endverankerung der Carbonbewehrung in Haupttragrichtung der Platten, d. h. in Brückenquerrichtung, war im vorliegenden Fall wegen der breiten Obergurte und der kurzen, seitlich überstehenden Kragarme unkritisch. Für die Beurteilung gegenüber der Bauaufsicht wurden theoretische Vergleichsrechnungen auf Basis der Untersuchungen in [23] durchgeführt. Hierfür wurden die vorhandene Querschnittsfläche der Biegezugbewehrung, die rechnerische Zugfestigkeit des Betons und die vorhandene Betondeckung von 15 mm mit Ergebnissen aus vorangegangenen experimentellen Untersuchungen am Institut für Massivbau der RWTH Aachen mit diesem Bewehrungsmaterial in Relation gesetzt. Die umlaufend vorhandene Randeinfassung ist darüber hinaus mit der Biegelängsbewehrung gestoßen und trägt konstruktiv zur Endverankerung bei.

In den Querkraftversuchen im Rahmen der Produktionskontrolle wurde ein Auflagerüberstand vergleichbar zum realen Bauwerk gewählt. Hierdurch konnte die Annahme der wirksamen Endverankerung im Kurzzeitversuch schließlich gegenüber der Bauaufsicht final bestätigt werden. Für diesen Typ Bewehrung ist der Formschluss mit Spaltrissbildung als Versagensmechanismus des Verbundes maßgebend. Hierbei ist der Beton auf der Widerstandsseite die maßgebende Komponente, weshalb – wie auch im Stahlbetonbau – keine Abminderung des Verbundes infolge Dauerstand angesetzt wurde.

5 Herstellung und Ausführung

Der Bewehrungskorb wurde bei der Firma solidian GmbH gemäß dem Bewehrungsplan vollständig vorgefertigt. Zum Bewehrungskorb gehörten neben der oberen und unteren flächigen Lage auch die C-förmigen Abstandhalter und Randeinfassungen aus solidian GRID Q142/142-CCE-38 sowie die nichtrostenden Bewehrungsstäbe in den Randbereichen (Bild 11).

Die Bewehrung wurde mit einer Betondeckung von 15 mm sowohl oben als

Foto: Sergej Rempel



Bild 12 Betonage

Foto: Sergej Rempel

auch unten eingebaut. Die zulässige Einbautoleranz betrug 4 mm und durfte in 9 von 10 Fällen nicht überschritten werden.

Die Bewehrungskorb konnte aufgrund des geringen Gewichts von zwei Personen in die Schalung gelegt werden, in der bereits die Hülseanker vorher positioniert worden waren (Bild 12). Im nächsten Schritt wurde der fließfähige Beton eingebracht, der nur noch minimal verdichtet werden musste. Hierfür wurden dünne Rüttelflaschen (\varnothing 25 mm) eingesetzt.

Abschließend wurden die Carbonbetonplatten zur Baustelle transportiert, dort auf den Stahlträgern ausgerichtet und verschraubt. Neben der Befestigung des Geländers waren keine weiteren Arbeiten notwendig und die Brücke konnte für den Verkehr freigegeben werden.

6 Zusammenfassung

Die hybride Brückenkonstruktion in Ottenhöfen ermöglicht eine wirtschaftliche Lösung, die nicht nur architektonisch ansprechend, sondern auch dauerhaft ist (Bild 13). Die schlanken Carbonbetonplatten benötigen keine schützen-

de polymere Abdichtung oder Asphaltzuschicht und werden somit die Instandhaltungskosten reduzieren. Trotz der Filigranität der Konstruktion konnte eine Tragfähigkeit für ein 16-t-Fahrzeug sichergestellt werden.

Eine Besonderheit der Brücke war das Vorgehen bei der Ermittlung der Biegetragfähigkeit. Bei den bisher realisierten Carbonbetonbrücken wurde die Tragfähigkeit experimentell ermittelt. Das führte zu höheren Kosten und einer Verzögerung der Fertigstellung. Bei diesem Projekt konnte sowohl die Biege- wie auch die Querkrafttragfähigkeit mit den vorhandenen Bemessungsmodellen ermittelt werden. Die abschließende Produktionskontrolle bestätigte die theoretischen Modelle.

Danksagung

Für die Realisierung der Hybridbrücke war eine gute Zusammenarbeit der Projektpartner notwendig. Die Generalplanung hat das Ingenieurbüro R+S, Achern, übernommen. Die statische Berechnung der Carbonbetonplatte wurde durch die Firma solidian GmbH, Albstadt, durchgeführt und von dem Ingenieurbüro Stech, Achern, geprüft. Das notwendige Gutachten für



Bild 13 Ansicht der fertiggestellten Brücke

Foto: R+S Ingenieure

die Tragfähigkeit wurde vom Institut für Massivbau der RWTH Aachen erstellt und die anschließende Erteilung der ZiE/vBg erfolgte durch das RP Tübingen. Die Herstellung der Carbonbetonplatten oblag der Firma Grötz Bau, Gaggenau, und die Montage die Firma Huber Bau, Ottenhöfen. Besonderer Dank geht an den Bauherrn, die Stadt Ottenhöfen, für die Möglichkeit dieses Bauwerk realisieren zu dürfen.

Literatur

- [1] Grace, N. F.; Jensen, E. A.; Eamon, C. D.; Shi, X.: Life-Cycle Cost Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Bridges. *ACI Structural Journal* 109 (2012) 5, S. 697–704
- [2] 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.
- [3] DIN EN 10034:1994-03: I- und H-Profil aus Baustahl; Grenzabmaße und Formtoleranzen; Deutsche Fassung EN 10034:1993.
- [4] DIN EN 1993-1-1:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005 + AC:2009.
- [5] DIN EN 206:2017-01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A1:2016.
- [6] Rempel, S.: Zur Zuverlässigkeit der Bemessung von biegebeanspruchten Betonbauteilen mit textiler Bewehrung. Diss., RWTH Aachen University, 2018
- [7] Rempel, S.; Ricker, M.: Ermittlung der Materialkennwerte der Bewehrung für die Bemessung von textilbewehrten Bauteilen. *Bauingenieur* 92 (2017), S. 280–288
- [8] Rempel, S.; Ricker, M.; Hegger, J.: Safety Concept for Textile-Reinforced Concrete Structures with Bending Load. *Applied Science* 10 (2020) 20, 7328 – DOI: 10.3390/app10207328
- [9] Spelter, A.; Bergmann, S.; Bielak, J.; Hegger, J.: Long-Term Durability of Carbon-Reinforced Concrete: An Overview and Experimental Investigations. *Applied Sciences* 9 (2019) 8, 1651 – DOI: 10.3390/app9081651
- [10] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-1.4-153: Nichtrostender, kaltverformter Betonstahl in Ringen B500B NR. Werkstoff 1.4571. 10.11.2017

- [11] ETA-13/0222: DEMU Hülsenanker T-FIXX der Firma Halfen. 04.12.2015
- [12] DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010.
- [13] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. 2. Aufl., Heidelberg: Springer Verlag, 2010
- [14] Rempel, S.; Kulas, C.: Biegetragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Bauingenieur 90 (2015) 6, S. 248–251
- [15] Kurth, M.: Zum Querkrafttragverhalten von Betonbauteilen mit Faserverbundkunststoff-Bewehrung. Diss., RWTH Aachen University, 2012
- [16] ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (USA), 2015
- [17] CSA S806-12:2017: Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers. Canadian Standards Association, Mississauga (Ontario, Kanada), 2012, reaffirmed 2017
- [18] Japan Society of Civil Engineers (JSCE): Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. Concrete Engineering Series 23, 1997
- [19] CEN/TC250/SC2 Project Team T1: Background documents to the final PT1 draft prEN 1992-1-1:2018.
- [20] Cavagnis, F.; Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A.: A mechanical model for failures in shear of members without transverse reinforcement based on development of a critical shear crack. Engineering Structures 157 2018, S. 300–315 – DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.12.004
- [21] Bielak, J.; Adam, V.; Hegger, J.; Classen, M.: Shear Capacity of Textile-Reinforced Concrete Slabs without Shear Reinforcement. Applied Sciences 9 (2019) 7, 1382 – DOI: 10.3390/app9071382
- [22] Bielak, J.; Will, N.; Hegger, J.: Zwei Praxisbeispiele zur Querkrafttragfähigkeit von Brückenplatten aus Textilbeton. Bautechnik 97 (2020) 7, S. 499–507
- [23] Bielak, J.; Spelter, A.; Will, N.; Claßen, M.: Verankerungsverhalten textiler Bewehrungen in dünnen Betonbauteilen. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018) 7, S. 515–524

www.sandstrahl-schuch.de

**SANDSTRAHL
SCHUCH**

• STAHL • BETON • STEIN



- Anwendung diverser Strahlverfahren
- Korrosions- und Brandschutz
- Betoninstandsetzung
- Abdichtung
- Fußbodensanierung
- Rissinjektion
- Bauteilverstärkung
- Steinreinigung & -instandsetzung
- Graffiti - Entfernung & -Schutz



02826 Görlitz • Holteistraße 10 • Tel. (03581) 8 38 38 • Fax (03581) 70 42 22
02788 Hirschfelde • Siliziumstr. 1/2 • Tel. (035843) 2 74 - 0 • Fax (035843) 2 74 - 44

5	Grußwort
7	Entwicklung des Instituts für Massivbau – wie geht es weiter?
11	Brücken aus Stahl-UHFB
19	„Denkmalschutz ist vom Tisch!“ – Denkmalpflege und Denkmalschutz im Ingenieurbau
37	Bemessung der Carbonbetonbrücke in Ottenhöfen
49	Stadtbahnbrücke über die A8 in Stuttgart – Eine integrale Netzwerkbogenbrücke mit Carbonhängern
63	Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden
79	Stadtbahnbrücke über die A8 in Stuttgart – Eine integrale Netzwerkbogenbrücke mit Carbonhängern
91	Chronik des Brückenbaus
111	Inserentenverzeichnis