



**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

Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden

Dr.-Ing. Harald Michler¹, Dipl.-Ing. Stefan Burgard², Dipl.-Ing. Holger Kalbe³, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach¹

Vorab: Dieser Artikel basiert auf dem Entwurf für eine englischsprachige Veröffentlichung in der Zeitschrift CEND. Der Inhalt wurde für die Veröffentlichung in diesem Band überarbeitet und gekürzt.

1 Einleitung

1.1 Zum Projekt

Die 1971 errichtete Carolabrücke überführt mit einer Länge von ca. 375 m die Bundesstraße B 170 in Dresden über die Elbe. Der Brückenzug besteht aus drei Überbauten als Gerberträger mit Spannbetonhohlkästen. Die größte Stützweite beträgt im Stromfeld 110 m. Aktuell finden umfangreiche Sanierungsarbeiten an der Brücke statt. Dazu gehört auch eine Verbreiterung der Geh- und Radwege und damit der Kappen – eine Chance für den praktischen Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung.

Der Einsatz von nichtmetallischer Bewehrung in den Kappen der Carolabrücke hat eine besondere Relevanz für die gesamte Entwicklung im Bauen mit nichtmetallischen Bewehrungen und speziell im Projekt C³ – Carbon Concrete Composite [1]. Die im folgenden vorgestellte Anwendung dient dazu, die Vorzüge nichtmetallischer Bewehrungen im Bauwesen zu demonstrieren sowie Erfahrungen unter Praxisbedingungen zu sammeln – beides Aspekte, die die Etablierung dieser neuartigen Bewehrungssysteme unterstützen. Die Anwendung von nichtmetallischen Bewehrungen zur Verbesserung der Lebensdauer von Kappen ist neu. Beim Projekt Carolabrücke können parallel mehrere Systeme unter gleichartigen Bedingungen ihre Leistungsfähigkeit zeigen. Die Verarbeitung im „normalen“ Betrieb einer Stahlbetonbaustelle bietet eine ideale und öffentlichkeitswirksame Präsentation von Carbon- und Basaltbewehrungen.

1.2 Brückenkappen

Im Brückenbau stellt die Kappe eines der am stärksten beanspruchten Bauteile dar. Maßgebend sind die Umwelteinflüsse. Neben aggressiven Medien wie Salze und CO₂ wirken hauptsächlich thermische Beanspruchungen auf diese ein. Um den Frost-Tausalz-Widerstand zu erhöhen, werden dem Kappenbeton Mikroluftporen zugesetzt. Eine große Betondeckung soll die Stahlbetonbewehrung vor Korrosion schützen. In dieser dicken, unbewehrten Betonzone können sich Risse entwickeln, ohne unmittelbar durch eine Bewehrung gebremst zu werden. Will man in diesem Bereich die Rissbreite im Entstehungsprozess begrenzen, so ist zwingend eine nicht rostende Bewehrung erforderlich. Diesen Gedanken der optimalen Bewehrungsanordnung greift das vorgestellte Projekt auf. Innerhalb der Betondeckung, also oberflächennah, wird eine zusätzliche nichtmetallische Bewehrung verlegt, um die Rissbreiten geringer zu halten und damit gleichzeitig zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit beizutragen. Ein möglicher Ansatz ist, eine nicht rostende Bewehrung innerhalb der sonst erforderlichen Betondeckung von ca. 4,5 cm (+ Verschleißschicht) einzusetzen, da bei einem solchen Material eben kein Korrosionsrisiko besteht. Damit liegt diese Bewehrung zudem genau dort, wo die Risse im Bauteil entstehen. Durch die Anordnung einer entsprechend feinen Bewehrung soll es gelingen, das Rissbild dahingehend zu beeinflussen, dass die Rissbreiten minimiert werden. Dieser Ansatz sollte im Auftrag der Stadt Dresden näher untersucht werden.

Ein zweiter Schritt wäre, die Stahlbewehrung zumindest an der Oberfläche komplett durch eine nichtmetallische Bewehrung zu ersetzen und diese von vornherein optimierter, also näher an der Oberfläche, einzubauen. Dieser Gedanke wurde bei den Untersuchungen be-

¹ Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden

² Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG Dresden

³ SGL Brückenplanungs- und Brückenbausteuerung der Stadt Dresden

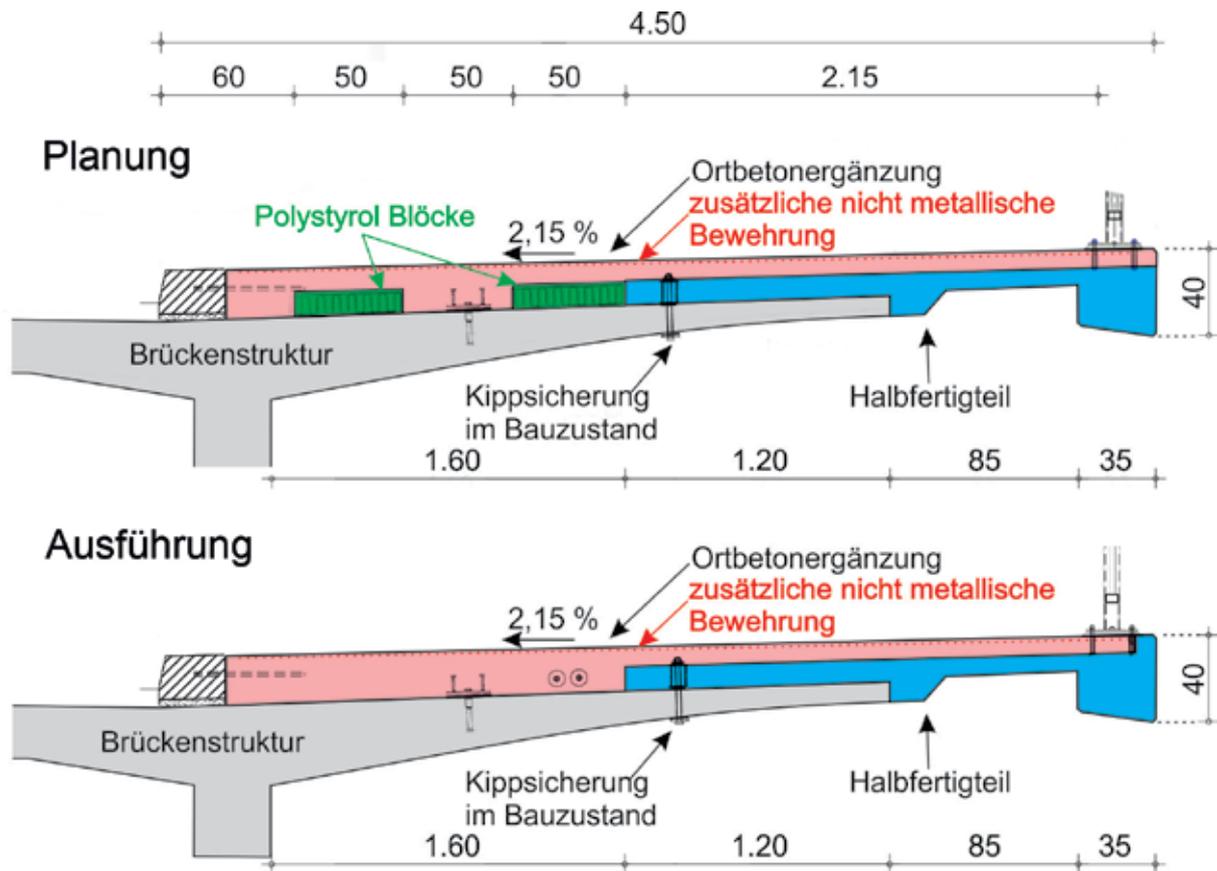


Bild 1 Verbreiterung der Kappen; oben: Variante mit Kanälen zur Gewichtseinsparung; unten: ausgeführte Variante der Kappe als Halbfertigteil
Grafik: Harald Michler

rücksichtigt, jedoch im Bauwerk noch nicht umgesetzt.

Neben dem Projektziel, die Rissbreiten zu minimieren und damit die Dauerhaftigkeit der Brückendecke zu vergrößern, kam bei der Carolabrücke hinzu, dass zur Herstellung der um 1,10 m verbreiterten, kombinierten Geh- und Radwege eine Bautechnologie unter Verwendung von Halbfertigteilen die einzige ökonomisch sinnvolle Variante darstellte (Bild 1). Nachteil dieser Bauweise ist, dass an den Fertigteilfugen und am Übergang zum reinen Ortbetonquerschnitt Unstetigkeiten entstehen, die eine erhöhte Rissneigung aufweisen. Auch hier sollte sich eine fein verteilte, nichtmetallische Bewehrung positiv auswirken.

Am Beispiel des Kappenquerschnittes für den verbreiterten Geh- und Radweg der Carolabrücke Dresden sollte dieses Vorgehen in der Praxis erprobt werden. Als Vorbereitung wurden ein Einbautest durchgeführt und die Beeinflussung der Rissentwicklung durch eine zusätzliche nichtmetallische Bewehrung im Labor versuchsstechnisch überprüft.

2 Zur Materialwahl

In einem Materialscreening wurden die verfügbaren nichtmetallischen Bewehrungen hinsichtlich ihrer Eignung bezüglich Grundmaterial, Geometrie, Verbund und Steifigkeit vergleichend bewertet. Natürlich musste auch das Betonieren der Kappe durch die nichtmetallische Bewehrung hindurch möglich sein, was in dem angesprochenen Einbauversuch im Maßstab 1:1 überprüft wurde. Im Ergebnis sollte eine Empfehlung für bis zu drei Bewehrungsmaterialien ausgesprochen werden, da im Projekt die Möglichkeit bestand, verschiedene Bewehrungen in unterschiedlichen Teilbereichen zu erproben.

Mögliche nichtmetallische Bewehrungen werden inzwischen von etlichen Anbietern geführt. Von den zu Projektbeginn verfügbaren Produkten lag lediglich für die ComBar-Serie der Firma Schöck eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt vor [2]. Als Ergebnis der Forschung im C³-Konsortium sind allerdings etliche Versuchswerte und Erfahrungen zu weiteren nichtmetallischen Bewehrungsmaterialien

en vorhanden. Folgende Produkte wurden im Rahmen des Screenings in Erwägung gezogen:

- ❑ Owens Corning Infrastructure Solutions, LLC, Toledo: Stäbe aus Glas- und Carbonfasern (Aslan™ – Glass Fiber Reinforced Polymer Rebar und Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars),
- ❑ Deutsche Basalt Stab GmbH, Stuttgart: Basaltstäbe (T4),
- ❑ Basalt Fibertec GmbH, Rohrbach (CH): Bewehrungsstäbe (Basalt),
- ❑ Hitexbau GmbH, Augsburg: Carbonfasergelege (HTC 21/21-40),
- ❑ Hubei Yulong Group Jinli New Materials Co., Ltd, Zhejiang (China): Bewehrungsstäbe, (Fiberglass FRP bolt, GFRP bar)
- ❑ Schöck Bauteile GmbH, Baden-Baden: Glasfaserstäbe (ComBar),
- ❑ solidian GmbH, Albstadt: Carbonfasergelege (solidian GRID Q71/71-CCE-51) und Carbonfaserstab (solidian REBAR Ø4-CCE oder solidian REBAR Ø6-CCE),
- ❑ thyssenkrupp Carbon Components, Kesselsdorf: Carbonfaserstab (Carbon4ReBAR),
- ❑ TOKYO ROPE MFG. Co., LTD, Tokyo (Japan): Carbonfaserstab (CFCC),
- ❑ Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH, Hof: Carbonfasergelege (SITGrid039 bzw. SITGrid040).

Folgende Aspekte flossen in die Bewertung ein:

Grundmaterial: Als Grundmaterialien für die Fasern kommen Glas, Basalt und Carbon in die engere Wahl. Die Materialien sind als Multifilamentbündel verfügbar, bestehend aus jeweils mehreren Tausend Endlosfilamenten, die mit einer Kunststoffmatrix zu einem leistungsfähigen Kompositmaterial verbunden werden. Carbon gilt in der Regel als alkalibeständiger als Glas oder Basalt. Zudem wird bei beiden Fasertypen ein gewisses Kriechen beobachtet. Im Kompositmaterial wird das Kriechen nichtmetallischer Bewehrungselemente aber weitgehend vom Matrixmaterial dominiert, sodass auch bei Carbonbewehrungen Kriechen auftreten könnte.

Geometrie: Die Betondeckung für den Bewehrungsstahl in den Kappen wird auf $c \geq 45$ mm

ausgelegt. Die nichtmetallische Bewehrung soll mit einer Betondeckung $c_{nm} > 15$ mm innerhalb von c verlegt werden, zuzüglich 5 mm Verschleißschicht. Für runde Stabbewehrungen ist in aktuellen Normentwürfen eine Betondeckung von mindestens dem zweifachen Stabdurchmesser bzw. dem einfachen Größtkorndurchmesser als Diskussionsgrundlage enthalten. Mit dem für den Kappenbeton der Carolabrücke vorgesehenen Größtkorn kann eine Betondeckung von 15 mm realisiert werden, der Stab-Außendurchmesser sollte somit 8 mm nicht übersteigen. Der Thyssen-Stab Carbon4ReBAR ist beispielweise aktuell nur mit einem Außendurchmesser von 10 mm lieferbar und damit zu dick. Der kleinste Glasstab Schöck-ComBar besitzt einen Nenndurchmesser von 8 mm und einen Außendurchmesser von 9 mm, was gerade an der gesetzten Grenze liegt. Für die Geometrie von Gelegen ist das Größtkorn maßgebend.

Verbund: Glatte Carbonstäbe sind nicht geeignet, genügend Verbundkraft je Längeneinheit zur Verfügung zu stellen, um für ein entsprechend fein verteiltes Rissbild sorgen zu können. In der Regel weisen für den Einsatz als Betonbewehrung vorgesehene Stäbe eine verbundverbessernd gestaltete Oberfläche auf. Hierzu werden unter anderem eingefräste Rillen (zum Beispiel Schöck- oder Thyssen-Stab), schraubenförmige Umwicklungen wie beim solidian-Stab oder eine Zahnstruktur wie beim Basaltstab verwendet, um nur einige zu nennen, siehe zum Beispiel [3]–[6].

Steifigkeit: Neben dem Verbundverhalten bestimmt die Steifigkeit der Bewehrung das Rissbild maßgebend. Der Erfahrungsschatz im Bauwesen basiert hierbei hauptsächlich auf dem Betonstahl mit einem E-Modul von ca. 210.000 MPa bis zur Fließgrenze. Örtliche Überbelastungen werden dann durch das Fließen abgebaut und ermöglichen das bekannte duktile Tragverhalten im Stahlbeton. Ein Fließen kann für keines der betrachteten nichtmetallischen Materialien beobachtet werden. Ein sprödes Versagen im Rissquerschnitt ist über die Bemessung oder über geeignet abnehmende Verbundeigenschaften sicher zu vermeiden. Im Rahmen der gewählten Bauaufgabe sollte die Steifigkeit den Wert von 200.000 MPa nicht deutlich unterschreiten. Carbon erfüllt diese Vorgabe in der Regel gut (siehe z. B. solidian GRID oder REBAR), Basaltfasern bewegen sich in der Nähe zu diesem Wert. Glas wiederum hat eine deutlich geringere Steifigkeit. Beim Schöck-Glasfaserstab ComBar wird bspw. ein E-Modul von

ca. 60.000 MPa angegeben. Glas hat hier also einen systembedingten Nachteil.

Kompatibilität: Eingesetzt wird die Bewehrung mit einem üblichen C25/30 LP (Kappenbeton). Eine Verarbeitung mit Betoneinbau von oben durch das mehrlagige Bewehrungsgitter hindurch muss sichergestellt sein. Eine als Mindestwert definierte notwendige Maschenweite von ca. 50 mm erwies sich später im Einbautest (siehe Abschnitt 3) als noch zu klein, um das Größtkorn von 16 mm im Wesentlichen ungehindert durchzulassen. Um dennoch eine möglichst fein verteilte Bewehrung zur Minimierung der Rissbreiten und Rissabstände einzubringen, wurde das größte baupraktische Raster mit 66,6 mm festgelegt.

Der Einsatz von „feineren“ Bewehrungsgittern wie SITGrid039 oder SITGrid040 (Referenzmaterialien aus dem Projekt C³ – Carbon Concrete Composite [1], [7]) scheitert an dieser Forderung. Bei Verwendung von Bewehrungsgittern mit geringerer lichter Maschenweite wäre nur ein nachträgliches Einrütteln der textilen Bewehrung in den Frischbeton als Bautechnologie anwendbar. Die Bahnen der textilen Bewehrung werden hierbei aufgelegt und mittels einer Rüttelplatte ca. 8–10 mm tief in den Beton eingearbeitet [2]. Abstandhalter und Fixierungen der nichtmetallischen Bewehrung wären nicht erforderlich. Beim Einrütteln findet ein entsprechendes Nachverdichten der oberen Betonbereiche statt, was sich im Allgemeinen positiv auf die Oberflächenqualität auswirkt, da damit ein dichteres Gefüge erzeugt wird. Bei Kappen ist dies aber kontraproduktiv zu der Verwendung von Luftporenbildnern (LP). Der Einsatz von engmaschigeren Textilien mit optimaler Lage für die Begrenzung von Oberflächenrissen scheint erfolgversprechend, weshalb dieses Verfahren bei der versuchs-technischen Überprüfung der Begrenzung der Rissbreiten mit betrachtet wird. Die weitreichenden Konsequenzen dieses Verfahrens bedürfen aber noch einer weitergehenden Analyse und Betrachtung, was den Projektrahmen überstieg. Für die aktuelle Bauaufgabe wurden folglich solche Materialien dann nicht verwendet.

Wertung: In die Wertung flossen zusätzlich zu den zuvor näher erläuterten Aspekten auch aktuelle Preise und Erfahrungen des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Dresden mit ein. In die engere Auswahl für den Einsatz bei der Brückenkappe kamen ein Geleuge und ein Stab auf Carbonfaserbasis (solidian GmbH) sowie ein Basaltstab (Deutsche Basalt

Stab GmbH); im Labor wurden zusätzlich Experimente mit zwei Carbonfasergelegen mit geringerer Maschenweite (Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH und ITM, TU Dresden) durchgeführt. Weiterführende Angaben zu den Materialien enthält Tabelle 1 in Abschnitt 4.

3 Großflächiger Einbauversuch

Ziel des Einbauversuches war es, die Technologie – d. h. die Verwendung eines regelkonformen Kappenbetons und dessen Einbau mittels Betonpumpe – einer ersten praktischen Erprobung zu unterziehen und eventuelle Schwachpunkte zu erkennen. Darauf aufbauend konnten bei der Ausführungsplanung für die Brücke die Erkenntnisse berücksichtigt werden.

Bei den neuen Kappen für die Carolabrücke werden Halbfertigteile mit einer Ortbetoner-gänzung mit einem Beton C25/30 LP und üblicher Betonstahlbewehrung \varnothing 10 mm, $s = 12,5$ cm kombiniert. Auf dieser Grundbewehrung wird die nichtmetallische Bewehrung verlegt. Auf der Testfläche bei der Firma Hentschke Bau wurden alle drei vorausgewählten Bewehrungsmaterialien fortlaufend eingebaut. Bild 2 zeigt einen Blick auf die eingebauten Bewehrungen. Bei jedem Material wurde ein Bewehrungsstoß ausgebildet und es wurden jeweils zwei Fertigteulfugen gekreuzt. Je nichtmetallischer Bewehrung wurde eine 4 m breite Fläche benötigt. Angemerkt sei, dass auf die zur Gewichtsreduzierung vorgesehenen Styrodurblöcke (siehe Bild 1, unten, und blaue Elemente in Bild 2, Mitte und links) dann später beim realen Bauwerk verzichtet wurde.

Die erforderliche Unterstützung der nichtmetallischen Bewehrung wurde mit Faserzementleisten bewerkstelligt, die auf der Stahlbewehrung auflagen (ebenfalls in Bild 2 zu sehen). Das Betonieren erfolgte mit einer Betonpumpe und üblichem Equipment von einem fahrbaren Wagen aus, um die Bewehrung beim Betonieren nicht betreten zu müssen. Die Flaschenrüttler hatten einen Durchmesser von 5 cm, um das Raster der nichtmetallischen Bewehrung durchdringen zu können. Im Nachgang wurde die Oberfläche mit einer Rüttelbohle abgezogen und ein Besenstrich aufgebracht.

Bei den Kappen sind verschiedene Einbausituationen zu realisieren (vgl. Bild 1): zum einen der flächige Einbau einer relativ dünnen Betonschicht oberhalb der Fertigteile (ca. 10 cm), zum anderen das Betonieren der relativ tiefen



Bild 2 Eingebaute Bewehrung, von links nach rechts: solidian REMAT-CCE-Ø4-10/10 – 100 × 100 mm; solidian GRID Q71/71-CCE-51 – 71 × 71 mm; Basalt T4 – 66 × 100 mm Fotos: Harald Michler

Plattenbereiche zwischen den Aussparungen. Untersucht wurden während und nach dem Einbauversuch:

- Das Einbauen der Bewehrungen inkl. erforderlichen Abstandhaltern und Unterstützungen,
- Das Verhalten der Bewehrung unter Baustellenbedingungen (z. B. Begehrbarkeit der Bewehrung),
- Betoneinbau und Verdichten,
- Das Verhalten der Konstruktion infolge Befahrens im Bereich der auskragenden Fertigteile (Belastung durch Baustellenfahrzeuge),
- Die Lagegenauigkeit der Bewehrung durch nachträgliches Aufsägen der Probefläche.

Interessant war auch die Zeit, die jeweils für das reine Betonieren benötigt wurde. Es ergaben sich ca. 20 Minuten für die Variante solidian REMAT, ca. 35 Minuten für das solidian GRID und ca. 12 Minuten bei Verwendung der Basaltstäbe T4.

Das Fazit aus dem Einbauversuch mit Fokus auf der nichtmetallischen Bewehrung lautet:

1. Die Faserbeton-Abstandhalter waren ungeeignet und werden durch nichtmetallische Stäbe ersetzt. Zum Fixieren sind Kabelbinde gut geeignet.

2. Das Betreten der nichtmetallischen Bewehrung ist möglich, sollte aber weitgehend vermieden werden. Es werden entsprechende Gehhilfen (Bohlen) empfohlen.
3. Der Betoneinbau durch die nichtmetallische Zusatzbewehrung hindurch ist möglich. Die benötigten dünnen Rüttelflaschen verzögern allerdings insgesamt das Arbeiten. Beim Verteilen des Betons stellt die nichtmetallische Bewehrung eine zusätzliche Behinderung dar, die den Beton am Verlaufen hindert. Größere Öffnungsweiten sind vorteilhaft.
4. Beim Betoneinbau verformt sich die nichtmetallische Bewehrung unter der Last des aufliegenden Betons. Beim Einrütteln des Betons wird diese Verformung für die steiferen Bewehrungen solidian REBAR und den Basaltstab teilweise zurückgenommen. Die Lagegenauigkeit muss durch einen geringeren Abstand der Unterstützungen verbessert werden.
5. Das Abziehen der Betonoberfläche mit einer Rüttelbohle wurde durch die nichtmetallische Bewehrung nicht beeinflusst. Für den Besenstrich muss die Betondeckung der nichtmetallischen Bewehrung mindestens dem Größtkorndurchmesser entsprechen, ansonsten werden die Körner herausgezogen und durchbrechen die Oberfläche.

Insgesamt war der Einbauversuch erfolgreich, was die spätere Lagekontrolle der nichtmetallischen Zulagebewehrung bestätigte (nähere Ausführung

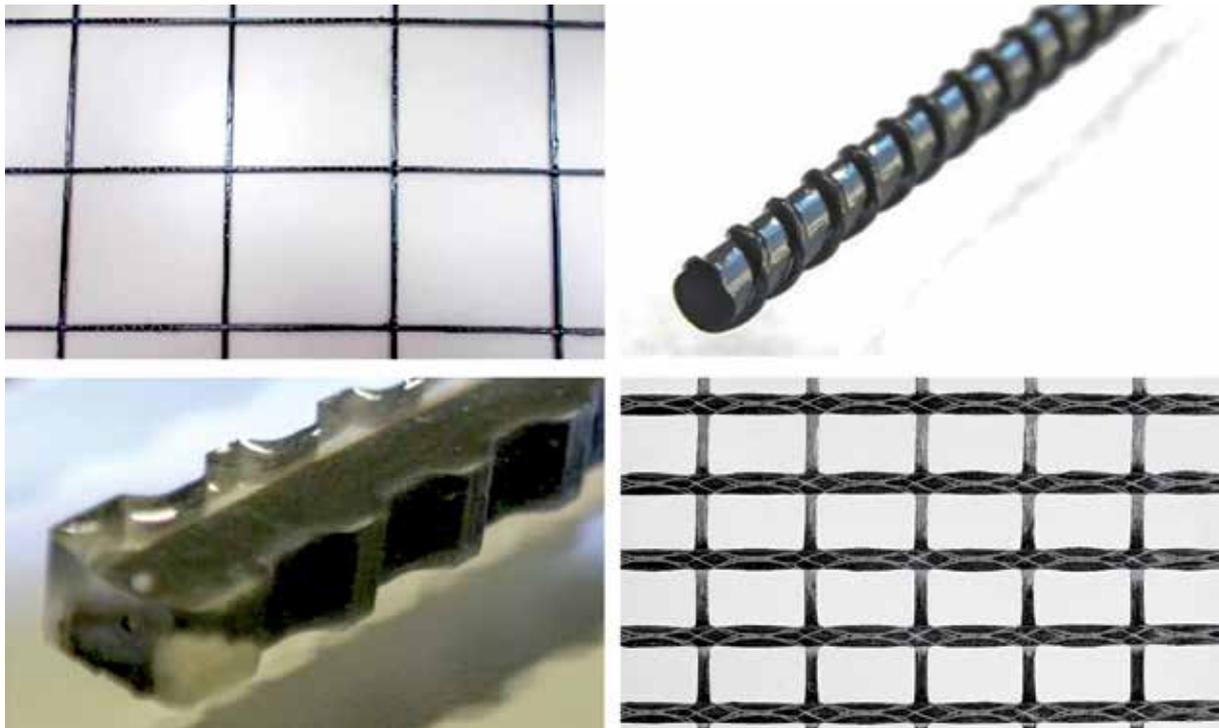


Bild 3 Überblick der nichtmetallischen Zulagebewehrungen, von links oben nach rechts unten:
 B01 – solidian GRID Q71/71-CCE-51 (© solidian GmbH),
 B02 – solidian REBAR-Ø4-CCE (© solidian GmbH),
 B03 – Basaltstab LAP T4 (© Deutsche Basalt Stab GmbH),
 B05 – Prinzipfoto SITgrid040 und NWM5- 001-17-130 (© IMB der TU Dresden)

dazu enthält die Diplomarbeit von Fabian Schierack [8]). Für das solidian GRID wurden zu große Lageabweichungen festgestellt. Zusammen mit den erschwerten Bedingungen beim Betonieren infolge der geringen Maschenweite wird diese Variante folglich nicht für den Einsatz bei der Carolabrücke weiterverfolgt. Bei den stabförmigen Bewehrungen wurden ebenfalls Lageabweichungen festgestellt, weshalb für das reale Bauwerk das Unterstützungskonzept geändert wird.

Eine Einweisung in die speziellen Anforderungen und Gegebenheiten ermöglicht es jeder betonierenden Mannschaft, auch mit nichtmetallischer Bewehrung umzugehen. Bei der Festlegung der Betondeckung ist – neben dem Größtkorn – ein ausreichendes Vorhaltemaß für Einbautoleranzen der als Auflage dienenden Stahlbewehrung und der weicheren, Nichtmetallbewehrung vorzusehen.

4 Versuchstechnische Überprüfung der Rissweitenentwicklung

4.1 Herstellung der Probekörper

Die Probekörper für die Labortests wurden ebenfalls im Fertigteilwerk der Firma Hentsch-

ke Bau, direkt im Anschluss an die Herstellung der Testfläche, hergestellt. Je nichtmetallischer Bewehrung wurde ein Probekörper vorgesehen, zudem ergänzend ein Referenzkörper (Balken Nr. B04) ohne nichtmetallische Zulagen. In Tabelle 1 sind Informationen zu den Bewehrungen und Probekörpern zusammengefasst. Die Daten werden in Bild 3 ergänzt.

Die Stahlbetonbalken für die Labortests hatten alle einen Querschnitt von ca. 26 cm × 50 cm. Gleichbleibend ist ein Bewehrungskorb aus Betonstahl mit einer Längsbewehrung Ø 10. Die nichtmetallische Bewehrung wurde jeweils auf der Biegezugseite innerhalb der Betondeckung eingebaut, siehe Bild 4.

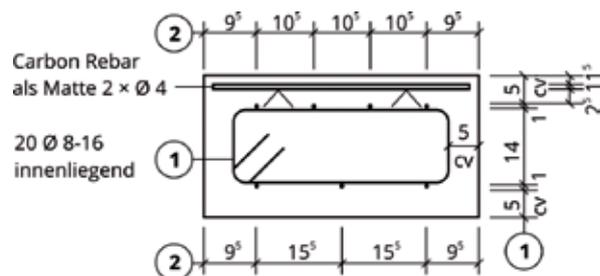


Bild 4 Querschnitt der Probekörper
 Zeichnung: LAP, modifiziert

Tabelle 1 Übersicht der Prüfkörper und Kennwerte der Bewehrungen

Probekörper Daten	B01 solidian GRID	B02 solidian REBAR	B03 Basaltstab T4	B05a NWM5-001- 17- 130	B05b SITgrid040
Handelsname (Hersteller)	GRID Q71/71- CCE-51 (solidian)	REBAR Ø 4- CCE (solidian)	LAP T4 (Deutsche Basalt Stab)	- (ITM der TU Dresden)	SITgrid040 (Wilhelm Kneitz)
Material Faserstrang	Carbon	Carbon	Basalt	Carbon	Carbon
Material Matrix (Hersteller)	Epoxidharz	Epoxidharz	Polyester- harz	Lefasol BT91001-1 (Lefatex)	CHT TRC VP A317 (CHT)
Achsabstand der Stränge in [mm]	71			12,7	12,7
Einzelstrang- querschnitts- fläche in [mm ²]	3,62	-	1,8	1,81	1,81
Strangquer- schnittsfläche in [mm ²]	3,62	12,6 (Stab)	7,2	1,81	1,81
Bewehrungsquer- schnittsfläche in [mm ² /m]	51	126 (Stab)	72	142	142
Char. Bruch- festigkeit [MPa] bezogen auf Faser- querschnittsfläche	3.200 längs 3.400 quer	2.300 (Stab)	1.950	ca. 2.750	ca. 3.000
E-Modul [MPa]	>200.000	159.000 (Stab)	85.000	ca. 221.000	ca. 210.000

Bild 5 zeigt das Betonieren exemplarisch. Die Abstandhalter waren hier dichter verlegt, um eine höhere Lagegenauigkeit im Vergleich zum Einbautest zu erreichen.

Die in den Labortests zusätzlich betrachteten Gelege (Bewehrungen B05a und b in Tabelle 1) wurden nachträglich von oben in die Balkenoberfläche eingerüttelt. Großmaßstäblich könnte dies durch den Einsatz eines Oberflächenrüttlers erfolgen.

In einem früheren Forschungsvorhaben [9] wurden mit einem derartigen System gute Ergebnisse erzielt, daran sollte angeknüpft werden, um eine alternative Methode der Kappenherstellung bereitstellen zu können. Der damals verfolgte Gedanke, eine Bewehrung möglichst nah an der Oberfläche einzubauen und damit Risse noch effektiver in ihrer Breite zu beschränken, wird bei den Kappen der Carolabrücke mit deutlich verbesserten Materialien umgesetzt.

4.2 Prüfung

Die Prüfung erfolgte im 4-Punkt-Biegeversuch. Bild 6 zeigt den Versuchsaufbau und die Kameraanordnung für die Photogrammetrie zur Untersuchung der Rissweiten. Zusätzlich wurden auch induktive Wegaufnehmer (IWA) verwendet. Einen Eindruck von der Auswertung des Rissbildes anhand der Photogrammetriedaten zeigt Bild 7 für eine gegebene Laststufe. Die Rissweiten wurden an möglichst vielen Stellen ermittelt und dann statistisch ausgewertet.

4.3 Auswertung

Die Prüfkörper wurden belastet, bis die Stahlbewehrung vermutlich ins Fließen geriet, dann wurde entlastet. Dabei wurden die Risse und Rissbreiten beobachtet. Ziel war, die Rissbildung der Balken bei gleichartiger Beanspruchung gegenüberzustellen. In Bild 8 sind die Maschinenkraft-Durchbiegungs-Linien der sechs Prüf-



Bild 5 Herstellung der Balken, hier B03
Foto: Harald Michler

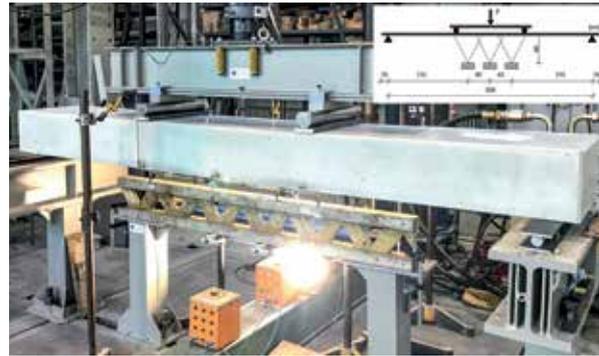


Bild 6 Versuchsaufbau
Foto: Philipp Riegelmann

körper dargestellt. Für den unverstärkten Körper B04 ist die stahlbetontypische Rissbildung deutlich erkennbar. Bei der Maximallast im Referenzkörper von 60 kN zeigen alle verstärkten Balken eine deutlich kleinere Durchbiegung.

Bild 9 verdeutlicht die Wirksamkeiten der zusätzlichen Bewehrungen für die mittleren Rissbreiten; Bild 10 stellt als Extremwertbetrachtung die maximalen Rissweiten je Probekörper und Laststufe dar, da für Bauteile in der Regel die maximalen Rissweiten maßgebend hinsichtlich möglicher Schädigungen sind. Deutlich zu erkennen ist, dass die in den Versuchen gemessenen Rissweiten durch alle oberflächennahen, nichtmetallischen Bewehrungen verbessert werden konnten.

Die größte Verbesserung lieferte das im Prüfkörper B05b verbaute Textil SITgrid040, welches eine Weiterentwicklung aus [9] ist. Bei

einer Kraft von 40 kN, bei der der Stahl im Referenzprüfkörper noch nicht ins Fließen gekommen ist, lag die durchschnittliche Rissweite bei etwa 0,05 mm. Im Vergleich dazu wurde beim Referenzprüfkörper B04 eine Rissweite von 0,33 mm gemessen.

Ferner ist eine deutliche Gruppenbildung erkennbar: zum einen die in der Betondeckung eingebauten Bewehrungen B01–B03, die die mittlere Rissbreite in etwa halbieren, zum anderen die nachträglich eingerüttelten Bewehrungen B05a und B05b, die nochmals eine Halbierung schaffen. Innerhalb der für das Bauvorhaben relevanten Gruppe B01–B03 gibt es nur geringe Unterschiede mit einem leichten Vorteil für den solidian REBAR.

Bei der Laststufe 40 kN erreichen beide solidian-Bewehrungen eine Rissbreite von ca. 0,12 mm und damit deutlich mehr als eine Halbierung der mittleren Rissbreite gegenüber

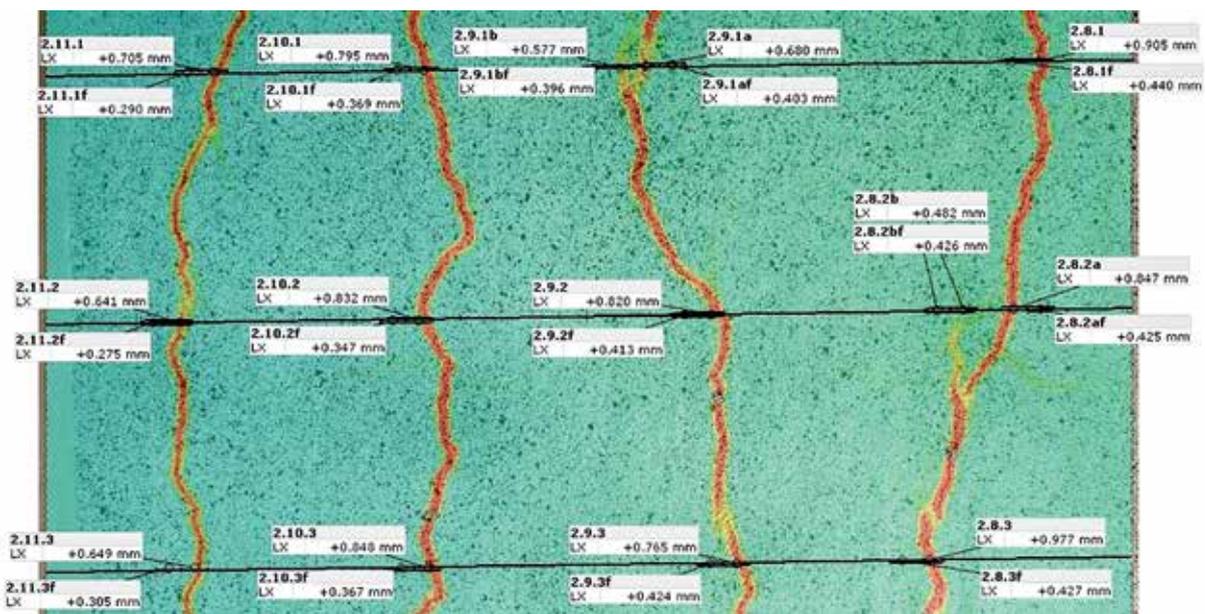


Bild 7 Beispielhafte Darstellung der Auswertung hinsichtlich der Rissweiten
Grafik: Auszug aus der GOM-Auswertung

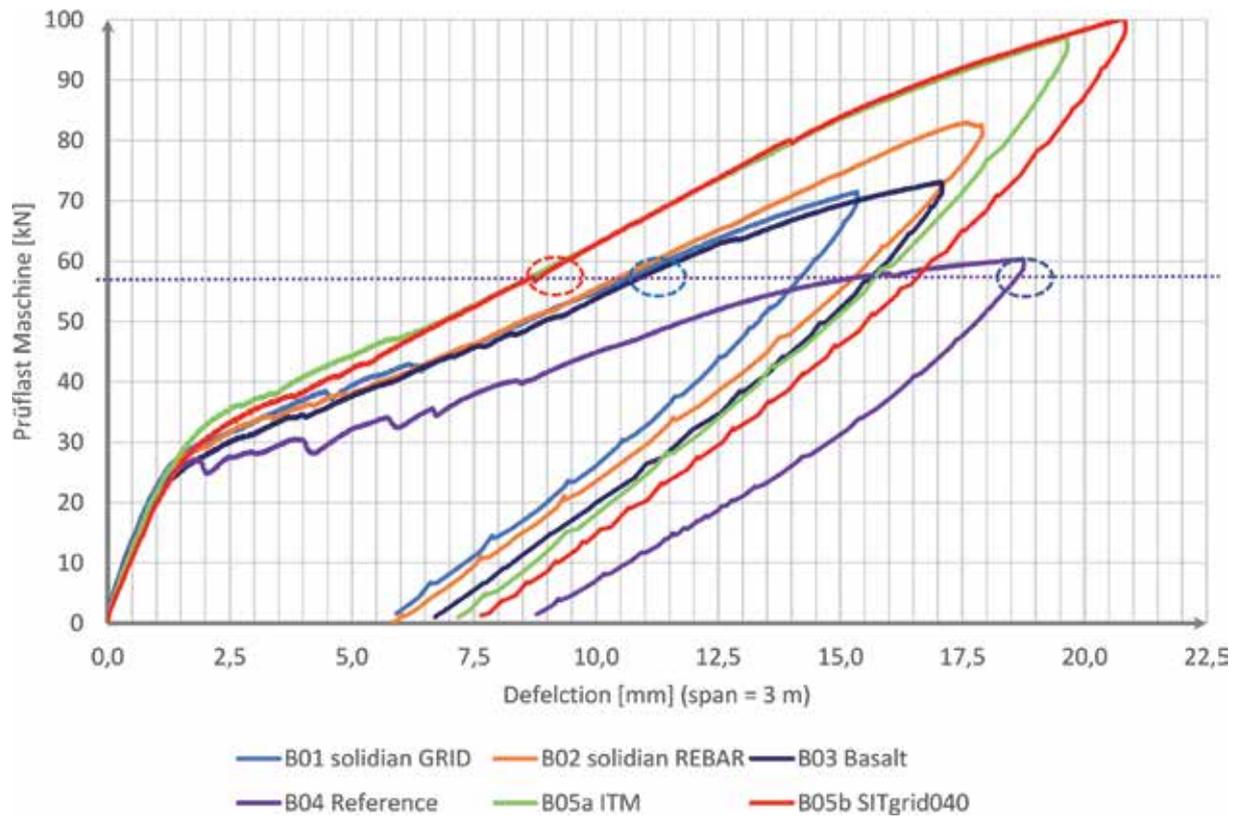


Bild 8 Vergleich der Mittendurchbiegung zur Prüflast

Grafik: Philipp Riegelmann und Harald Michler

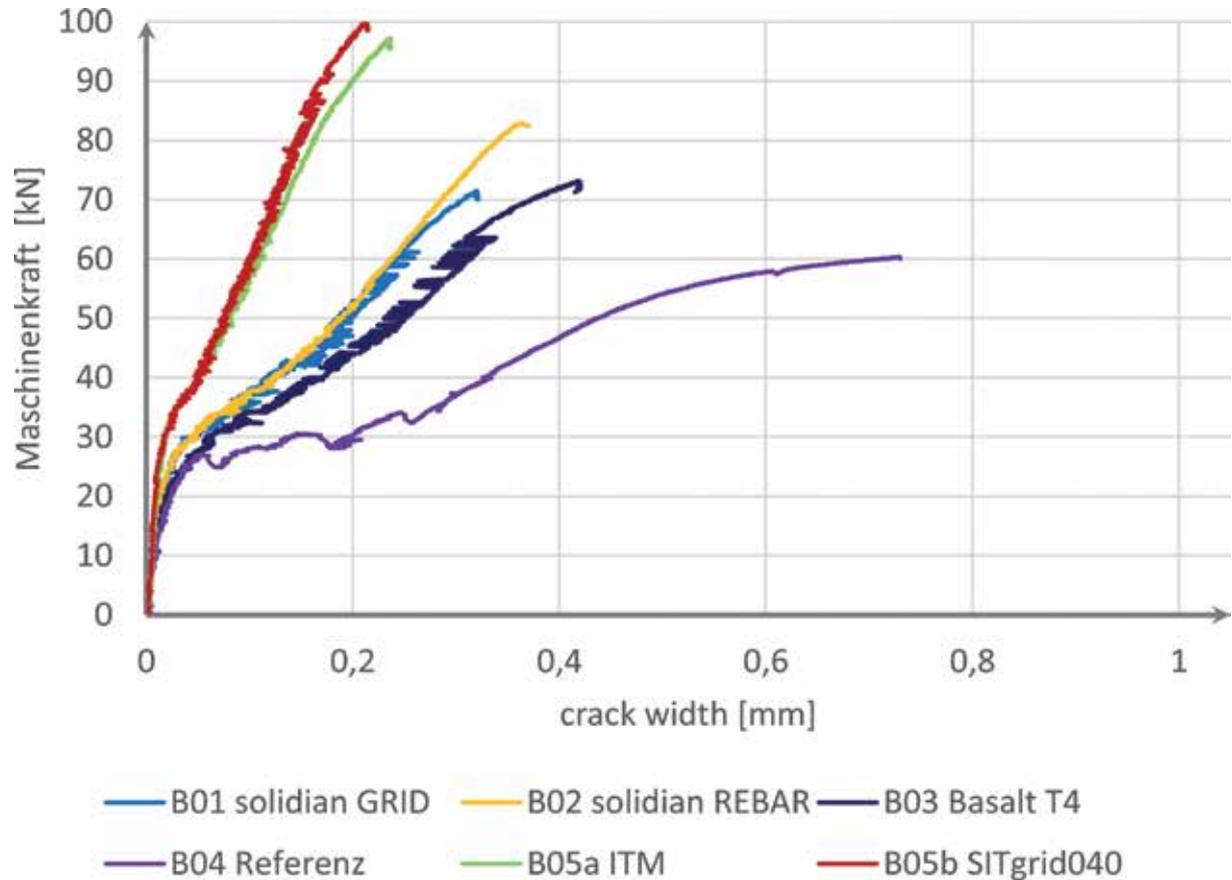


Bild 9 Vergleich der mittleren Rissweiten

Grafik: Philipp Riegelmann und Harald Michler

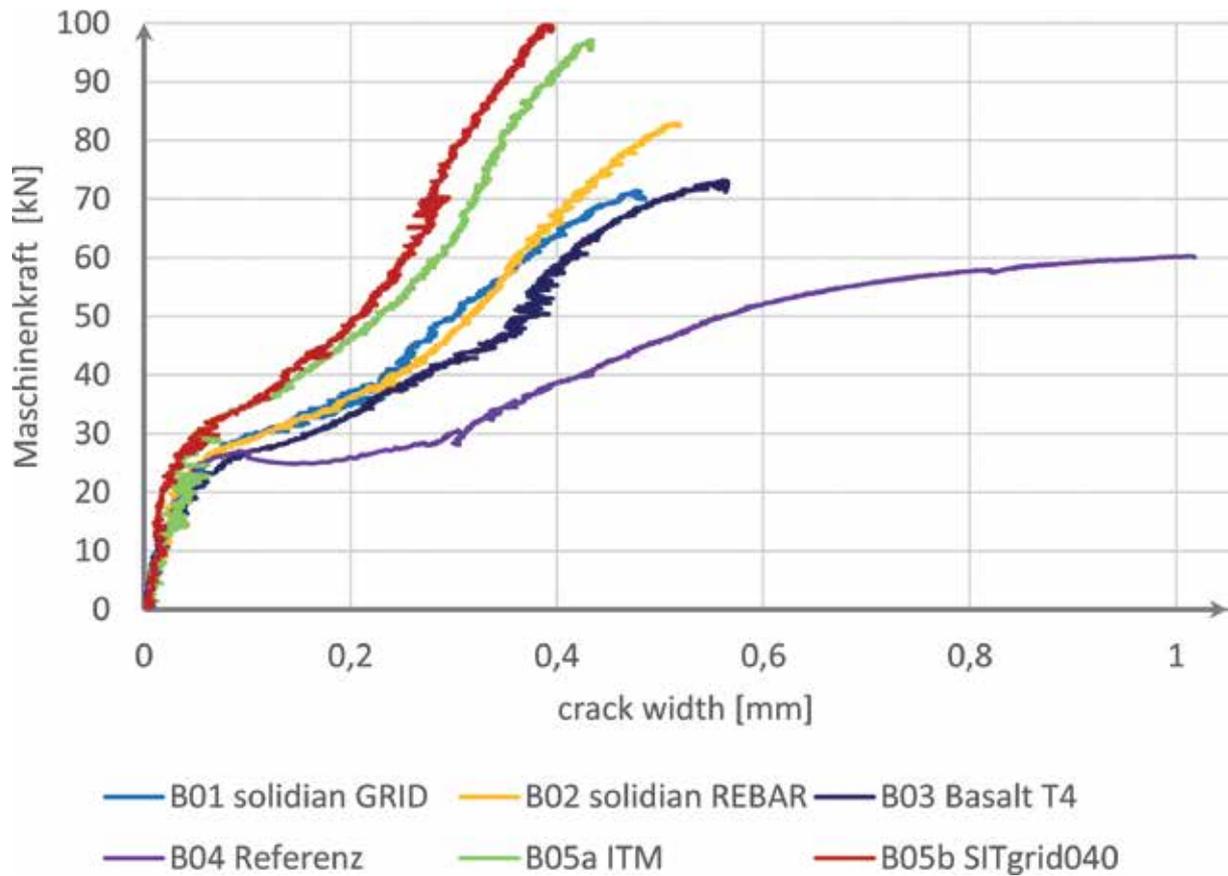


Bild 10 Vergleich der maximalen Rissweiten

Grafik: Philipp Riegelmann und Harald Michler

dem Referenzbalken B04. Die Basaltbewehrung B03 schneidet mit 0,16 mm geringfügig schlechter ab, halbiert aber auch noch die Rissbreite des Referenzbalkens. In der Praxis dürfte dies keinen erkennbaren Unterschied machen.

gegenüber der Bewehrung solidian GRID mit 71 mm²/m auf.

Beachtenswert ist, dass die beiden feinmaschigeren Gelege die Rissweiten im Ergebnis nochmals mehr als halbieren. Beide erreichen einen Wert von 0,05 mm und damit lediglich 15 % der Rissweite des Referenzbalkens. Allerdings weisen diese Bewehrungen mit ca. 140 mm²/m auch den doppelten Bewehrungsquerschnitt

Die Untersuchung der maximalen gemessenen Rissbreiten sollte sicherstellen, dass die mit den durchschnittlichen Rissweiten beobachteten Verbesserungen auch für die maximalen Rissbreiten zutreffend sind. Diese maximalen Rissweiten sind für die Dauerhaftigkeit von größerer Bedeutung. Das grundsätzliche Verhalten war hier vergleichbar. Detaillierter wäre eine Betrachtung von Rissklassen, was aber den Rahmen dieser Veröffentlichung

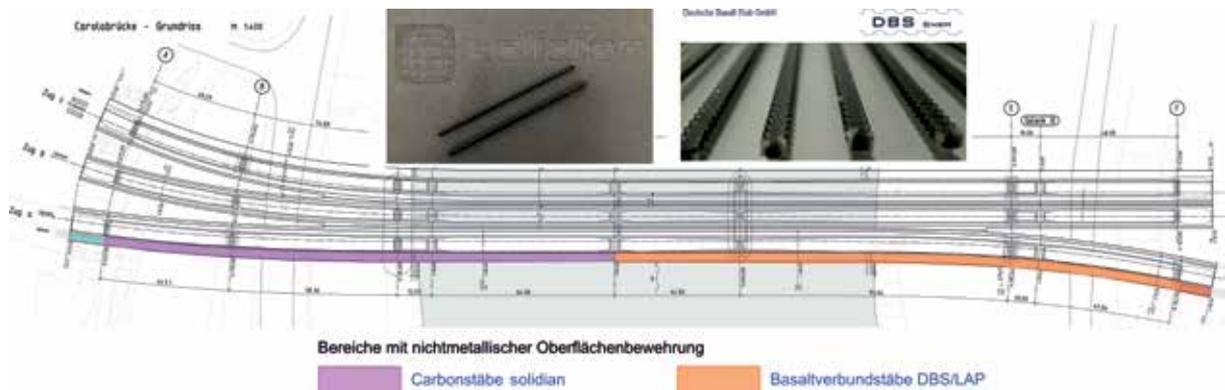


Bild 11 Aufteilung der nichtmetallischen Bewehrung

Grafik: LAP, modifiziert von Harald Michler



Bild 12 solidian REMAT fertig zum Einbau

Foto: Harald Michler

sprengen würde. Eine weiterführende Betrachtung zur Berechnung der Rissweiten ist in [8] enthalten und ist Gegenstand der laufenden Forschung.

5 Praxiserprobung auf der Carolabrücke

Der Einbau der Bewehrung auf der Carolabrücke wurde dann vom Planer – LAP – im Zuge der Ausführungsplanung und basierend auf den Erkenntnissen aus Einbauversuch, Labortests und Berechnungen durchgeführt. Das Material solidian GRID wurde dabei nicht berücksichtigt, sodass nur zwei Materialien im Praxistest zum Einsatz kommen, Bild 11. Im Zuge der Ausführungsplanung entfallen auch die Kanäle zur Leichterung der Kappen. Auf der Altstädter Seite werden die Stäbe von solidian verwendet, die als fertige Matten in voller Kappenbreite fertig angeliefert wurden, sodass kein Verschnitt entstand, Bild 12. Als Matten sind die Stäbe solidian REBAR unter dem Handelsnamen solidian REMAT erhältlich. Im Kreuzungspunkt der Stäbe waren maschinell eingebrachte Kunststoffverbindungen aus Spritzguss angeordnet. Auf der Neustädter Seite wurden die Basaltstäbe eingesetzt. Diese kamen ebenfalls als fertige Matten auf die Baustelle, die Stäbe mussten

hier allerdings vor dem Einbau noch händisch mit Kabelbindern zu Matten verbunden werden.

Die Kappen wurden in üblicher Art ausgebildet. Halbfertigteile überragen den Kragarm und erlaubten die Herstellung ohne aufwändige Schalung. Die mit Anschlussbewehrung versehenen Halbfertigteile wurden auf dem Konstruktionsbeton ausgerichtet und fixiert anschließend die herausragende Anschlussbewehrung mit der Ortbetonbewehrung ergänzt. Der Bewehrungseinbau erfolgte durch eine Bewehrungskolonne wie im Brückenbau üblich. Eine besondere Herausforderung stellte bei diesem Bestandsbauwerk die Herstellung einer Sollgradienten für den Gehweg dar, wodurch die Stärke der Kappen nicht unerheblich schwankte. Um die Bewehrung für die Dauerhaftigkeit des Bauwerks zu optimieren, wurde die Oberkante der Stahlbetonkappenbewehrung relativ genau an der Sollgradienten ausgerichtet, sodass die Betondeckung über der Stahlbetonkappenbewehrung konstant und die Lage der nichtmetallischen Bewehrung einheitlich war. Hierzu wurde der Bewehrungskorb der Stahlbetonkappenbewehrung mit Abstandshaltern variabler Dicke auf dem Konstruktionsbeton aufgelagert. Dies geschah im Nachgang zu den Stahlbetonbeweh-



Bild 13 Verlegte Basaltbewehrung – Basalt T4

Foto: Harald Michler

rungsarbeiten durch Spezialisten der Firma Hentschke Bau.

Ab dem 19. August 2020 erfolgte die Kappenbetonage mit der Basaltbewehrung beginnend abschnittsweise vom Neustädter Ufer. Die Basaltstäbe wurden in einem Raster von 66,6 mm in Längsrichtung verlegt, in Querrichtung der Brücke wurden die Stäbe mit einem Abstand von 10 cm verlegt. Die vorgefertigten Matten aus Basaltstäben konnten hierbei einfach an entsprechenden Beweh-

rungeisen fixiert bzw. Stahlbetonstäbe als Abstandshalter zugelegt werden. Das Fixieren wurde wiederum mit Kabelbindern vorgenommen. Bild 13 zeigt einen Ausschnitt der verlegten Basaltbewehrung. Das Betonieren der Kappen mit solidian-Bewehrung startete am 3. September 2020. Um eine elektrisch leitende Verbindung zwischen der Stahlbetonbewehrung und der Carbonbewehrung zu unterbinden (siehe beispielsweise [10]), wurden die Carbonmatten auf diagonal verlegten Basaltstäben als Abstandhalter



Bild 14 Verlegte Carbonbewehrung – solidian REMAT

Foto: Harald Michler



Bild 15 Betonierplattformen und Rüttelbohle

Foto: Harald Michler

verlegt, siehe Bild 14. Da auch die Befestigung der Geländerpfosten mit nachträglich gesetzten Verbundankern erfolgte, ist auch an dieser Stelle kein elektrischer Kontakt zwischen den verschiedenen, leitenden Materialien vorhanden.

Für das Betonieren standen zwei verfahrbare Plattformen zur Verfügung, auf denen die betonierende Mannschaft Platz fand, Bild 15. Abgeschlossen wurde der Einbau des Betons, indem mit einer Rüttelbohle eine glatte Oberfläche über die gesamte Kappenbreite in einem Zug hergestellt wurde. Als Nacharbeiten wurden der Besenstrich aufgebracht und natürlich die erforderliche Abdeckung sowie Nachbehandlung des Betons vorgenommen. Insgesamt konnten die Arbeiten planmäßig abgeschlossen werden.

6 Zusammenfassung

Als Ergebnis der hier vorgestellten Versuche lässt sich sagen, dass eine zusätzliche Lage nichtmetallischer Bewehrung, die oberflächennah in den Betonquerschnitt eingebracht wird, zu einer deutlichen Reduzierung der zu erwartenden Rissweiten um gut die Hälfte führt. Die Handhabung im Betonierprozess beeinflusst allerdings die Materialauswahl maßgebend. Die erreichte Reduzierung der zu erwartenden Rissbreiten war für die untersuchten Materialien nahezu gleich, obgleich es Unterschiede im Material, im Materialeinsatz und Raster gab. Die Laborversuche zeigten aber auch, dass mit der Technologie des nachträglichen Einrüttelns der Carbonbewehrung in Form von feinen Textilbetongittern die zu erwartenden Rissbreiten nochmals halbiert werden können. Jedoch ist

zu beachten, dass hierbei deutlich mehr Fasermaterial in Form von Carbonfilamenten eingesetzt wird als beispielsweise beim Basaltstab, siehe Tabelle 1.

Der Einbau der Bewehrung auf einem knapp 380 m langen Brückenbauwerk funktionierte reibungslos, womit die Anwendbarkeit unter Beweis gestellt wurde. In dem Projekt Carolabrücke wurden verschiedene nichtmetallische Bewehrungen im praktischen Einsatz erprobt, das Bauteilverhalten kann nun im praktischen Gebrauch beurteilt und verglichen werden.

Danksagung

Besonderer Dank gebührt der Stadt Dresden, die bereit war, die auch maßgeblich in Dresden entwickelte Bauweise von Beton mit nichtmetallischer Bewehrung in einem vergleichenden Bauvorhaben einzusetzen. Besonderer Dank gilt der Abteilung Brücken- und Ingenieurbau, die sich hier für die Stadt Dresden an eine neue Aufgabe herangewagt hat, ebenso dem Team von LAP, denn das Umsetzen neuer Bauaufgaben bedarf doch an vielen Stellen besonderer Aufmerksamkeit und unkonventioneller Ideen. Desgleichen hat auch die ausführende Firma Hentschke Bau diese zusätzliche Herausforderung mit Bravour gemeistert und zudem im Planungsprozess wertvolle Beiträge geleistet. Dank gilt auch dem großen Engagement der Bewehrungshersteller solidian und DBS, die nicht nur Material geliefert haben, sondern sich auch in die Planung und das Einbaukonzept dieser neuartigen Bewehrung auf einer fast normalen Brückenbaustelle eingebracht haben.

Beteiligte

An der Planung und Durchführung waren folgende Partner beteiligt:

Initiator und Bauherr	Landeshauptstadt Dresden, Straßen- und Tiefbauamt, Abt. Brücken- und Ingenieurbau (Ansprechpartner: Herr Kalbe und Frau Göbel)
Planung Kappen und Testfläche sowie Bewehrungsmaterialien Basaltstab und Einbauplanung	Leonhardt, Andrä und Partner, Beratende Ingenieure VBI AG, Dresden (Ansprechpartner: Herr Burgard)
Bewehrungsmaterial Solidian und Einbauplanung	solidian GmbH, Albstadt (Ansprechpartner: Herr Seeger)
Bewehrungsmaterial Basaltstab und Einbauplanung	Deutsche Basalt Stab GmbH, Stuttgart
Herstellung der Probeflächen und Prüfkörper	Hentschke Bau GmbH Beton Fertigteilwerk, Bautzen (Ansprechpartner: Herr Jesse)
Wissenschaftliche Begleitung und Durchführung der Untersuchung der Rissbreitenentwicklung	Institut für Massivbau (Ansprechpartner: Herr Michler) sowie Otto-Mohr-Laboratorium der Technischen Universität Dresden

Literatur

- [1] Homepage des Projekts C³ – Carbon Concrete Composite: <https://www.bauen-neu-denken.de> (geprüft am 25.01.2021)
- [2] Z-1.6-238: Zulassung „Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff, Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm“. Geltungsdauer aktuell bis 01.01.2024
- [3] Schumann, A.; May, M.; Schladitz, F.; Scheerer, S.; Curbach, M.: Carbonstäbe im Bauwesen Teil 2: Verbundverhalten – Verbundversuche an unterschiedlichen Carbonstäben. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020), H. 12, S. 962–971 – DOI: 10.1002/best.202000047
- [4] Suppanz, F.; Kromoser, B.: Verbundverhalten subtraktiv bearbeiteter FCK-Stäbe in UHPC. Beton- und Stahlbetonbau 115 (2020), H. 7, S. 504–513
- [5] Pritschow, A.: Zum Verbundverhalten von CFK-Bewehrungsstäben in Bauteilen aus ultrahochfestem Beton. Diss., Universität Stuttgart, 2016
- [6] Preinstorfer, P.; Kromoser, B.; Kollegger, J.: Kategorisierung des Verbundverhaltens von Textilbeton. Bauingenieur 94 (2019), H. 11, S. 416–424 – DOI: 10.37544/0005-6650-2019-11-30
- [7] Panzer, J.: Referenztextil für das C³-Projekt – Kurzübersicht zum FuE-Projekt. online: https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/forschung/Forschungsfelder/TRC-C3/C3-vorhaben/copy2_of_C3-V1.5 (geprüft am 20.07.2020)
- [8] Schierack, F.: Verwendung nichtmetallischer Bewehrungen als rissbreitenbeschränkende Bewehrung in Brückenkappen. Diplomarbeit, HTW Dresden, 2020
- [9] Michler, H.; Wienke, B.; Butler, M.: Textile Carbon-Bewehrung bei wasserundurchlässigen Betonstrukturen. Forschungsbericht, Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden, Dresden, 2011
- [10] Triebert, J.; May, M.; Curbach, M.: Corrosion tests for hybrid construction with concrete, metal and carbon. In: C³ – Carbon Concrete Composite e. V.; TUDALIT e. V. (Hrsg.): Tagungsband der 12. Carbon- und Textilbetontage, 22./23.09.2020 (in Dresden und digital), 2020, S. 60–69

Korrosionsfrei bewehrt.

Schöck Combar®: Dauerhaft mit Glasfaserverbundwerkstoff.

Zuverlässig bewehrt seit 2008

Der von Schöck eigens entwickelte Glasfaserverbundwerkstoff Combar® ist der einzige nicht metallische Bewehrungsstab mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung des DIBt.
combar-de@schoeck.com

[www.schoeck.com/
de/combar](http://www.schoeck.com/de/combar)



CARBOCON

Der Marktführer bei Carbonbeton!

- Planer für Neubau und Verstärkung
- Gutachter/Berater für ZiE und Zulassungen
- Eigen-/Fremdüberwachung
- Produkt-/Prototypenentwicklung

Kontaktieren Sie uns!
Ihr CARBOCON – Team
www.carbocon.de



Instandsetzung Brücke Naila



Verstärkung Autobahnbrücke Nidda



Neubau Carbonbetonbrücke S11



Verstärkung Autobahnunterführung

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