



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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



30. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

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

9./10. MÄRZ 2020

© 2020 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, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Fehmarnsundbrücke, Zeichnung von Gerd Lohmer
Broschüre Rotary und die Kunst / Gerd Lohmer
(aus dem Privatarchiv von Bettina Lohmer)

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

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-625-1



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

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

Tagungsband

30. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

9. und 10. März 2020

Inhalt

Grußwort des Rektors	9
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen</i>	
Entwicklung des Instituts für Massivbau – Lehre und Forschung im Brückenbau an der TU Dresden	13
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Die neue Erhaltungsstrategie des Bundes – Planung und Bau von Brücken auf den Hauptverkehrsrouten	27
<i>MR Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Brücken aus bewehrtem UHPC (Stahl-UHFB)	33
<i>Prof. Dr. Eugen Brühwiler, dipl. Ing. ETH/SIA, IABSE</i>	
Nutzung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) im ASTRA – Rückblicke und Perspektiven	47
<i>Stéphane Cuennet, Guido Biaggio</i>	
Neufassung der Nachrechnungsrichtlinie für Massivbrücken	57
<i>Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger, Viviane Adam M.Sc., Dr.-Ing. Frederik Teworte, Dr.-Ing. Naceur Kerkeni</i>	
Historische Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz	71
<i>Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, Dipl.-Ing. Markus Köppel, Dipl.-Ing. Jens Müller</i>	
85 Jahre Autobahnbrückenbau – 30 Jahre Dresdner Brückenbausymposium	83
<i>Dipl.-Ing. Werner Buhl</i>	
Gerd Lohmer (1909–1981) Der Brückenarchitekt der Nachkriegszeit	101
<i>Prof. Cengiz Dicleli</i>	
Ersatzneubau der Rheinbrücke Leverkusen – Gesamtplanung des 8-streifigen Ausbaus der A1 zwischen Köln und Leverkusen	123
<i>Dipl.-Ing. (FH) Nicole Ritterbusch, Dr. sc. techn. Hans Grassl, Dominic Reyer, M.Sc.</i>	
Ein neuer Schritt im Großbrückenbau: Querverschub einer Verbundbrücke mit Pfeilern und Gründung bei der Talbrücke Rinsdorf im Zuge der A 45	139
<i>Dipl.-Ing. Roger Istel, Dipl.-Ing. Ralf Schubart</i>	
S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 – erstmaliger Einsatz von interner verbundloser Vorspannung bei der DB AG	149
<i>Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser, Dipl.-Ing. Angelika Schmid, Prof. Dr.-Ing. Christian Sodeikat</i>	
Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken durch Carbonbeton	165
<i>Dr.-Ing. Sergej Rempel, Dipl.-Ing. (FH) Eugen Kanschin</i>	
Robust, wirtschaftlich und schön – der Entwurf von integralen Brücken	177
<i>Dipl.-Ing. Andreas Keil</i>	
Neubau der Busbrücke über den Bahnhof in Zwolle	191
<i>Dr.-Ing. Gerhard Setzpfandt, Tristan Wolvekamp MSc, Dipl.-Des. Marion Kresken</i>	
Katastrophen vermeiden: Brückenmonitoring mit einem Netzwerk leistungsstarker dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensoren	207
<i>Dipl.-Ing. Ulrich Dähne</i>	
Brückenvielfalt in Süddeutschland und den Alpen – Bericht zur Brückenexkursion 2019	213
<i>Dipl.-Ing. Oliver Steinbock, Dipl.-Ing. Philipp Riegelmann</i>	
Chronik des Brückenbaus	227
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	

Brücken aus bewehrtem UHPC (Stahl-UHFB)

Prof. Dr. Eugen Brühwiler, dipl. Ing. ETH/SIA, IABSE
ETH Lausanne (EPFL), Schweiz

1 Einleitung

Seit jeher führen neuartige Baustoffe zu Fortschritten im Brückenbau. Ihre Anwendung beschränkt sich nicht einfach darauf, die herkömmlichen Baustoffe zu ersetzen. Vielmehr basiert die wirtschaftlich effiziente und qualitativ hochstehende Anwendung neuer Materialien auf einem kreativen Tragwerkskonzept sowie einem tiefen Verständnis ihrer Eigenschaften.

In den vergangenen vierzig Jahren wurden die Eigenschaften faserverstärkter, zementgebundener Baustoffe deutlich verbessert, woraus die heute sogenannten UHPC (Ultra-High Performance Concrete) entstanden sind. UHPC subsummiert eine Vielzahl von zementgebundenen Baustoffen, insbesondere auch verbesserte Betone ohne Fasern oder mit nur geringen Fasergehalten, die für die in diesem Aufsatz beschriebenen Anwendungen technisch ungenügend resp. in Bezug zur angebotenen, relativ bescheidenen Leistungsfähigkeit zu teuer sind.

Die qualitativ hochwertigsten UHPC weisen neben einer hohen Zugfestigkeit auch ein ausgeprägtes Verfestigungsverhalten auf. Dieser zementgebundene Faserverbund-Baustoff wird in der Schweiz als Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) bezeichnet und im Regelwerk SIA 2052 [1] definiert. Andere UHPC werden

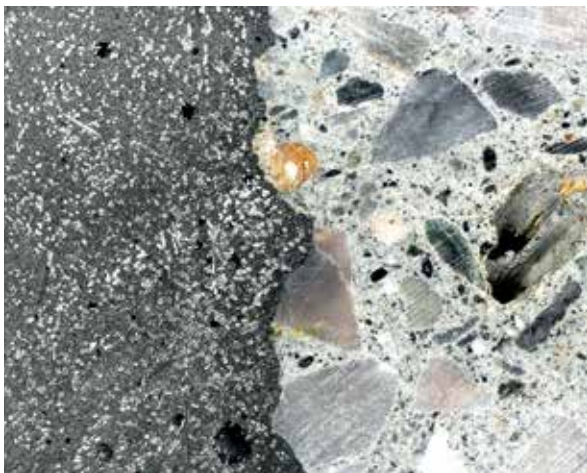


Bild 1 UHFB (links) und Beton (rechts): der Unterschied zwischen den beiden Baustoffen ist offensichtlich Foto: E. Brühwiler

in der Schweiz nur selten und für Bauwerksteile mit geringen Anforderungen verwendet. Entsprechend wird in diesem Aufsatz nur die Bezeichnung „UHFB“ verwendet. UHFB ist weder Stahl noch Beton, sondern ein neuartiger Baustoff (Bild 1) mit einer eigenständigen Bauweise.

Der Autor und sein Team an der ETH Lausanne (EPFL) forschen und entwickeln den neuartigen Baustoff UHFB seit 20 Jahren. Seit 15 Jahren wird er vorwiegend für die Verstärkung und Abdichtung von Brücken- und Hochbauplatten eingesetzt. Bisher wurden in der Schweiz mehr als 150 Anwendungen ausgeführt, die meisten für die Verbesserung von bestehenden Betonbauten.

In diesem Aufsatz werden zunächst die Eigenschaften von UHFB und Stahl-UHFB beschrieben, die für den entwerfenden Brückeningenieur wichtig sind. Dann werden das Regelwerk SIA 2052 UHFB [1] erwähnt und der Bau einer kurzen Bahnbrücke aus Stahl-UHFB beschrieben. Schließlich wird ein Ausblick auf weitere Brückenprojekte gegeben.

2 Eigenschaften von UHFB und Stahl-UHFB

UHFB besteht aus einer zementgebundenen Matrix aus reaktiven Feinstoffen (v. a. Zement) und harten Partikeln (Quarz) mit einer maximalen Größe von 1 mm. Diese Matrix wird durch schlanke Kurzfasern in hoher Dosierung verstärkt. Wegen des hohen Elastizitätsmoduls sind diese Fasern aus Stahl, 15 mm lang und 0,2 mm dick, und machen mindestens 3 % des Baustoffvolumens aus. Folgende Eigenschaften zeichnen UHFB aus:

- Dauerhaftigkeit: Die Packungsdichte der Komponenten ist infolge Optimierung der Partikelgrößen sehr hoch und der Wasserzementwert beträgt in der Regel 0,15. Deshalb wird das bei der Herstellung des UHFB zugegebene Wasser beim Erhärten vollständig für die Zementhydratation verbraucht. Damit kann kein eigentlicher Trocknungsvorgang stattfinden, bei dem – wie bei herkömmlichen Betonen – kommuni-

zierende Kapillarporen gebildet werden. Entsprechend kann kein Wassereintritt von außen in den UHFB erfolgen, womit Schädigungsmechanismen wie Stahlkorrosion oder chemische Reaktionen zwischen Baustoffkomponenten nicht auftreten können. UHFB ist auch wasserdicht unter Zugbeanspruchung bis 1 ‰ Dehnung, womit eine hohe Dauerhaftigkeit gewährleistet ist.

- **Verformungen:** Der Elastizitätsmodul von UHFB bleibt mit Werten zwischen 45 und 50 GPa vergleichsweise gering, weshalb beim Tragwerksentwurf in erster Linie Querschnitte mit hohen Trägheitsmomenten entwickelt werden müssen. Die Endverformungen aus Kriechen und Schwinden sind in einer ähnlichen Größenordnung wie für Beton, wobei bereits 2/3 des Schwindens innerhalb der ersten 30 Tage erfolgt. Es ist möglich, Kriech- und Schwindverformungen durch eine thermische Nachbehandlung der vorgefertigten Bauteile weitgehend zu eliminieren.
- **Drucktragverhalten:** UHFB verhält sich linear-elastisch bis etwa 80 % der Druckfestigkeit, wobei das nachfolgende nicht-lineare Verhalten wenig ausgeprägt ist. Die Druckfestigkeiten betragen 150 bis 200 MPa. Die begrenzte Verformbarkeit von UHFB wird bei der Bemessung mit einem entsprechenden Vorhaltemaß beaufschlagt.
- **Zugtragverhalten:** UHFB verhält sich elastisch bis zu einer Grenzspannung und danach verfestigend, bis die Zugfestigkeit erreicht wird. Dieses Zugtragverhalten

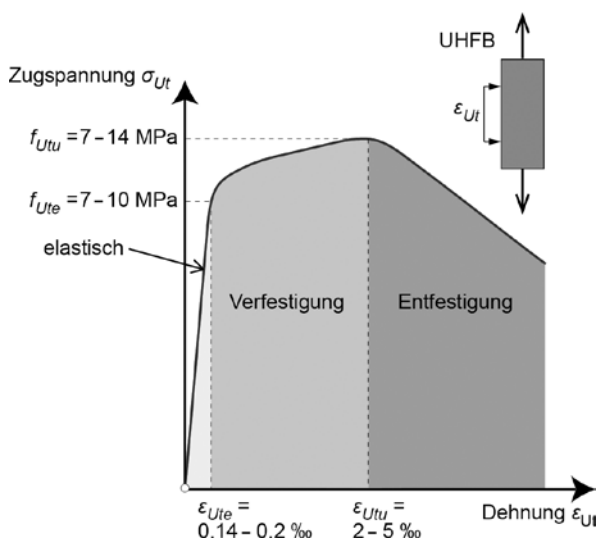


Bild 2 Zugtragverhalten von UHFB mit ausgeprägtem Verfestigungs- und Entfestigungsverhalten Grafik: MCS-EPFL

ähnelt demjenigen des Stahls, jedoch mit Dehnungs- und Festigkeitswerten, die um mindestens eine Größenordnung geringer sind (Bild 2). Ähnlich wie bei Stahl werden im Schweizer UHFB-Regelwerk SIA 2052 [1] die UHFB-Sorten über die Zugfestigkeitseigenschaften definiert.

- **Zugtragverhalten von Stahl-UHFB:** Um die Tragfähigkeit und Robustheit zusätzlich zu erhöhen, wird UHFB mit Betonstahl und Spannstahl bewehrt, die gezielt nur in der Haupttragrichtung eingelegt werden. In Anlehnung an den Begriff „Stahlbeton“ spricht man in diesem Fall von „Stahl-UHFB“. Die Kombination von UHFB mit Bewehrungsstäben aus Stahl ermöglicht eine effiziente Erhöhung der Tragfähigkeit von Bauteilen. Das Zugtragverhalten von Stahl-UHFB wird durch die Superposition des Zugtragverhaltens von UHFB und Betonstahl beschrieben. Stahl-UHFB bleibt im Gebrauchszustand homogen bei gleichbleibender Steifigkeit. Der maximale Tragwiderstand eines Bauteils wird erreicht, wenn sich der UHFB verfestigt und die Stahlbewehrung zu fließen beginnt.
- Die Ermüdungsdauerfestigkeit von UHFB und Stahl-UHFB liegt auf einem Beanspruchungsniveau, das etwa 50 % des statischen Tragwiderstands entspricht.

3 UHFB im konstruktiven Ingenieurbau

Die effiziente Anwendung neuartiger Baustoffe wie UHFB im konstruktiven Ingenieurbau basiert auf einem baustoffgerechten Tragwerkskonzept und beschränkt sich nicht auf den Ersatz traditioneller Baustoffe. Die Grundidee des Bauens mit UHFB besteht darin, hochleistungsfähige Komponenten der Stahlbetonbauweise, d. h. Zement, Betonstahl, Vorspannung und vielfältige Formbarkeit, sowie der Stahlbauweise, d. h. leichte, vorgefertigte Bauteile und schnelle Baumethoden, auszunutzen und möglichst effizient zu kombinieren.

Ähnlich wie Stahl ist UHFB ein veredelter Baustoff. UHFB-Tragwerke werden in Leichtbauweise entworfen und führen entsprechend zu präzisen Abmessungen, weshalb auf Plänen die Abmessungen in Millimeter angegeben werden. Bauteile aus UHFB sind oft aus flächigen Elementen, die als „Bleche“ bezeichnet werden können, zusammengesetzt und werden mit Rippen und Unterzügen ver- und aus-

gesteift. Übliche Bauteilstärken betragen 30 bis 100 mm, können aber auch dicker sein.

Die Bemessung von Tragwerken aus Stahl-UHFB ist einfacher als im Beton- und Stahlbau. Die Bauteildicken sind genügend groß, um Stabilitätsprobleme zu vermeiden. Die konstruktive Durchbildung ist vergleichsweise einfach. Es müssen keine Rissnachweise geführt werden, weil Stahl-UHFB im Gebrauchszustand nicht reißt. Der Einsatz der Vorspannung ist effizienter, da der hochfeste Spannstahl mit dem ebenfalls hochfesten UHFB kombiniert wird, was eine vereinfachte Spanngliedführung ermöglicht. Die Stahl-UHFB-Bauweise erfordert vom Ingenieur eine eigene Denkweise, die näher beim Stahlbau liegt und mit der Massivbau-Denkweise des Stahlbetonbauers nicht verträglich ist.

Das relativ geringe Eigengewicht von vorgefertigten UHFB-Bauteilen führt zu Vorteilen beim Transport und der Montage und ermöglicht einen schnellen Bauvorgang. Gleich wie Beton kann UHFB jedoch auch auf der Baustelle in einer Schalung gegossen werden und dies bei Kosten, die gegenüber dem Massivbau mit Beton nicht höher sind, denn die Abmessungen und Bauteildicken und damit das Baustoffvolumen sind wesentlich kleiner.

Entsprechend sind in der Regel die Baukosten für UHFB-Tragwerke nicht höher als für Tragwerke aus Stahlbeton, falls das UHFB-Tragwerk mindestens 3 Mal leichter ist als eine Stahlbetonkonstruktion, welche die gleiche Tragfunktion erfüllt.

Der Baustoff UHFB eröffnet neue Perspektiven und ressourcenschonende Anwendungen. Wegen seiner hohen mechanischen Festigkeit, Ermüdungsfestigkeit und Dauerhaftigkeit ist er insbesondere für stark beanspruchte Tragwerke wie Brücken besonders geeignet und wirtschaftlich.

4 Merkblatt SIA 2052

Nach der 1. UHFB-Anwendung in der Schweiz im Jahre 2004 zur Verbesserung der Morgebrücke [2] folgten einzelne Anwendungen bis etwa 2011, bei denen verschiedene UHFB-technologische Aspekte im Hinblick auf eine breite Anwendung systematisch weiterentwickelt und optimiert wurden. Ab 2013 erhöhte sich die Anzahl UHFB-Anwendungen, was den Bedarf für ein Regelwerk aufkommen ließ. Deshalb wurde eine Arbeitsgruppe des Schweizer Ingenieur-

und Architektenvereins (SIA) gebildet, die in 3 ½ Jahren das Merkblatt (MB) SIA 2052 „UHFB – Baustoff, Bemessung, Ausführung“ erarbeitete, das im März 2016 veröffentlicht wurde [1]. Das MB SIA 2052 ist ein Regelwerk, das die wesentlichen Aspekte der UHFB-Technologie in anwendungsfreundlicher Form knapp und klar regelt und somit die Bauherren, Planer und Ausführenden zielgerichtet unterstützt.

Entsprechend verstärkte die Einführung der SIA 2052 in der Schweizer Baupraxis den Trend zu einer stark zunehmenden Anzahl Anwendungen von heute über 150 UHFB-Anwendungen, die meisten für die Verbesserung (Instandsetzung und Verstärkung) bestehender Betonbrücken. Die Großanwendung zur Verstärkung der 2,1 km langen Chillon-Autobahnviadukte in den Jahren 2014/15 wurde weltweit wahrgenommen [3] und stellt den eigentlichen Durchbruch der UHFB-Bauweise dar.

Bei diesen Anwendungen wurde einzig UHFB mit einem ausgeprägten Verfestigungsverhalten unter Zugspannungen, d. h. mit einem Gehalt an Stahlfasern von mindestens 3 Vol.-%, eingesetzt. UHPC mit nur bis zu 2 Vol.-% Stahlfasern sind im Vergleich zur gebotenen Leistungsfähigkeit zu teuer und hätten die im Brückenbau üblichen Anforderungen nicht erfüllen können. Die UHFB-Technologie trägt somit zur Haupt- und Pflichtaufgabe des Bauwesens in der Schweiz bei, nämlich dem technisch effizienten und wirtschaftlichen Umgang mit der bestehenden Bausubstanz, insbesondere von Infrastrukturbauwerken wie Brücken. Über die letzten Jahre kam es in der Schweiz jedoch vereinzelt auch zum Bau neuer Brücken aus Stahl-UHFB, worauf sich dieser Aufsatz konzentriert. Der nachfolgend beschriebene Bau einer Bahnbrücke aus Stahl-UHFB ist erwähnenswert [4], da es sich um ein vergleichsweise hoch beanspruchtes Infrastrukturbauwerk handelt, das sich als ein wichtiges Referenzobjekt im Hinblick auf den Bau von Bahn- und Straßenbrücken aus Stahl-UHFB erweisen könnte.

5 Entwurf, Bemessung und Bau einer kurzen Bahnbrücke aus Stahl-UHFB

5.1 Einleitung und Zielsetzung

Bautechnikgeschichtlicher Kontext: Im Jahre 1897 wurde in der Schweiz die erste Bahnbrücke aus „Eisenbeton“ in Betrieb genommen [5]. Die Konstruktion wurde vom weltberühmten Eisenbetonpionier *François Hennebique* (1842–



Bild 3 Straßenunterführung „Creux-du-Mas“ (1897), erste Bahnbrücke in der Schweiz aus Eisenbeton; links Ansicht und rechts Detailaufnahme Fotos: E. Brühwiler (1996)

Unterwalden bei Sempach als vermutlich weltweit erste Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB auf einer Hauptlinie in Betrieb genommen (Bild 4).

Mit dem Bau einer kleinen Bahnbrücke aus Stahl-UHFB mit einer kurzen Spannweite von 6,0 m sollten grundlegende Erfahrungen bei der Bemessung und Ausführung, inklusive der Baukosten, sowie hinsichtlich künftiger Kosten beim Betrieb gemacht werden.

1921) für die Straßenunterführung „Creux-du-mas“ der zweigleisigen Bahnlinie bei Rolle im Kanton Waadt entworfen und gebaut (Bild 3). Der im Jahr 2001 ersetzte Brückenträger bestand aus einer Rippenplatte mit vier 20 cm schmalen und 50 cm hohen Unterzügen für eine Spannweite von 4,5 m. Diese Unterzüge enthielten einzelne Eisenstäbe mit großem Durchmesser und vertikale Blechstreifen als Querkraftbewehrung. Der damalige Eisenbeton verstand sich als Betonkonstruktion bestehend aus feinkörnigem Beton, dem einzig in zugbeanspruchten Zonen Stabbewehrung zugelegt wurde. Diese Konstruktionsweise kann als Vorläufer der in diesem Aufsatz behandelten UHFB-Bauweise verstanden werden.

Projektziele: Im Bahnbereich sind robuste und unterhaltsarme Tragkonstruktionen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit vorteilhaft. Mit UHFB steht ein Baustoff zur Verfügung, der sich dank seiner vergleichsweise hohen mechanischen Festigkeit und Dauerhaftigkeit für den Einsatz bei Infrastrukturbauwerken eignet. Am 11. November 2017 wurde die Straßenunterführung

5.2 Entwurf und Projektierung

Das ursprüngliche Bauwerk in der Bauweise Walzträger-in-Beton (WiB) war in einem schadhafte Zustand. Eine Variantenstudie für eine neue Brückenplatte führte zur Konstruktion aus Stahl-UHFB. Die Hauptgründe waren die Einhaltung der gegebenen strengen geometrischen Randbedingungen (begrenzte Konstruktionshöhe) ohne teure Gleisanpassungen, leicht geringere Baukosten für das Brückentragwerk im Vergleich zu Stahlbeton und eine höhere Wirtschaftlichkeit.

Tragwerkskonzept: Die Anforderungen an das Tragwerk waren eine möglichst geringe Trägerhöhe sowie die Herstellung möglichst leichter Bauteile aus Fertigbauteilen für einen schnellen Bauvorgang, um die Sperrzeiten der Bahnstrecke zu minimieren. Diese Anforderungen und die Umsetzung von Entwurfsregeln der UHFB-Bauweise führten zum Entwurf einer Konstruktion bestehend aus einer Rippenplatte und einem Randträger pro Gleis, also aus insgesamt vier Fertigbauteilen (Bild 5).



Bild 4 Straßenunterführung Unterwalden der Schweizer Bundesbahnen SBB (Juni 2018) Foto: E. Brühwiler



Bild 5 Randträger und Rippenplatte des Tragwerks aus bewehrtem UHFB Foto: E. Brühwiler

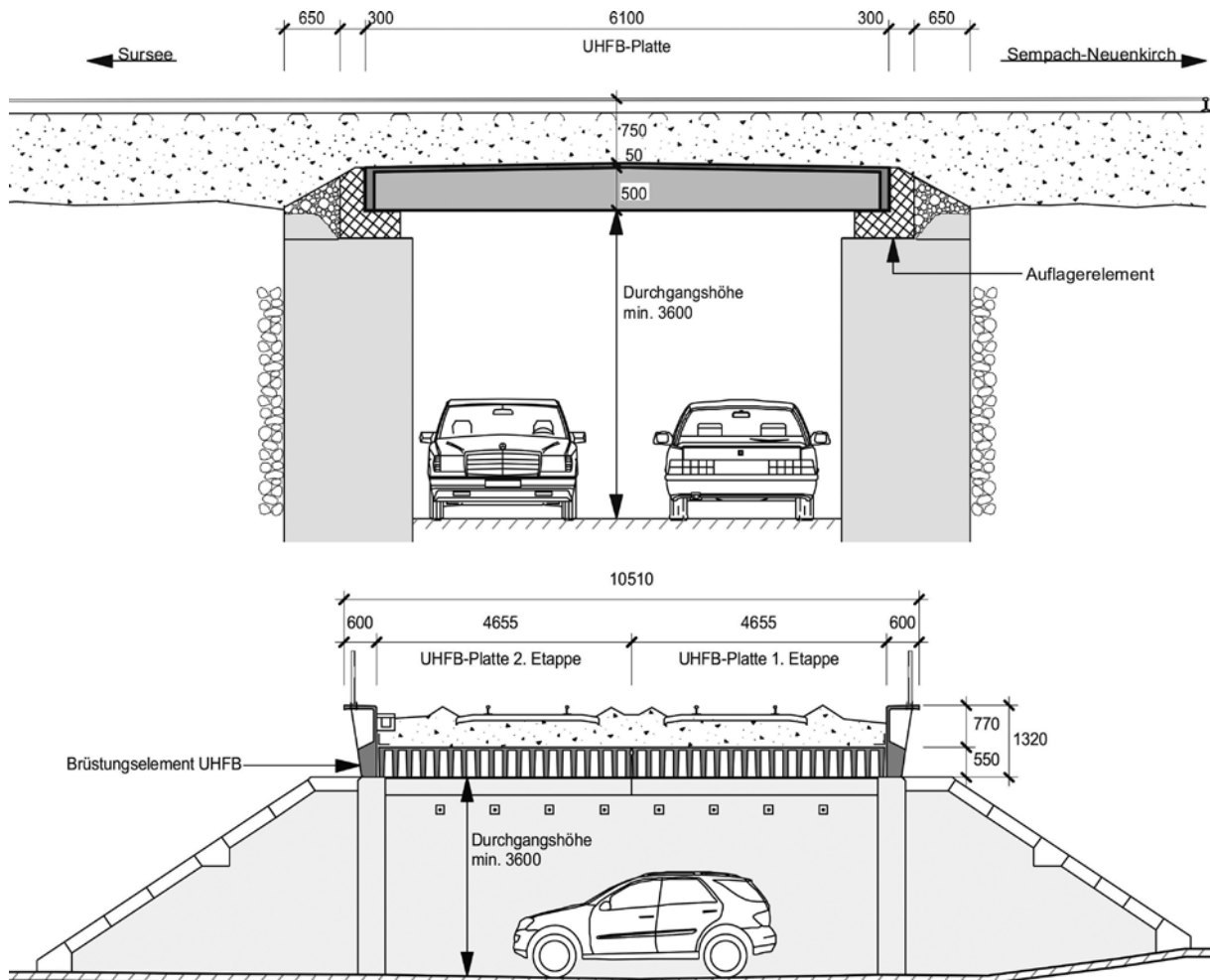


Bild 6 Ansicht und Querschnitt des Tragwerks aus bewehrtem UHFB (Abmessungen in mm)
Zeichnungen: KOST+PARTNER AG Ingenieure und Planer Luzern

Die Hennebique-Brücke „Creux-du-Mas“ diente als Inspiration für den Entwurf der UHFB-Rippenplatte. Die Abmessungen der Rippenplatte als einfacher Balken, d. h. die Plattenstärke als Druckgurt sowie der Abstand und die Dicke der Rippen wurden derart gewählt, dass (1) die für den Biegetragwiderstand erforderliche Betonstahlbewehrung mit einer Überdeckung von mindestens 15 mm eingelegt werden konnte, (2) genügend UHFB-Querschnitt vorhanden ist zur Aufnahme der Bemessungsquerkraft, um auf eine vertikale Betonstahlbewehrung im Auflagerbereich verzichten zu können, (3) über die gesamte Platten Spannweite keine Querschotten erforderlich waren und (4) im Plattenrandbereich die Entgleisungslasten aufgenommen werden konnten. Diese Entwurfsziele führten zu einer 50 mm starken, in Querrichtung bewehrten Fahrbahnplatte mit 80 mm breiten, längs in einem Abstand von 250 mm angeordneten Rippen der Platte (Bilder 6 und 7).

Der Randträger besteht aus einem massiven Randbalken im unteren Bereich zur Aufnah-

me der Anprallkräfte infolge der zu unterführenden Straßenfahrzeuge sowie dem monolithisch darauf aufgesetzten Randbord für das Schotterbett (Bild 8). Zudem sollte der Randträger in einer Form erscheinen, welche dem neuartigen Baustoff UHFB gerecht wird und ihn augenscheinlich macht (Bilder 4 und 9).

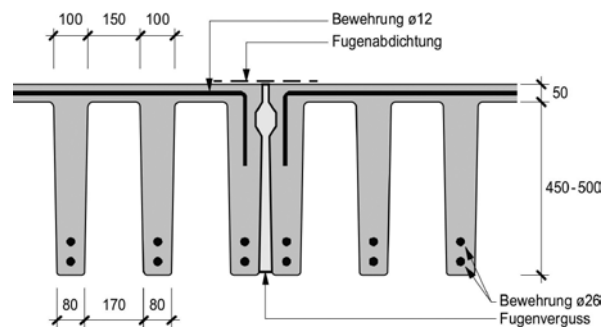


Bild 7 Detail der Rippenplatte aus bewehrtem UHFB (Abmessungen in mm)
Zeichnung: KOST+PARTNER AG Ingenieure und Planer Luzern

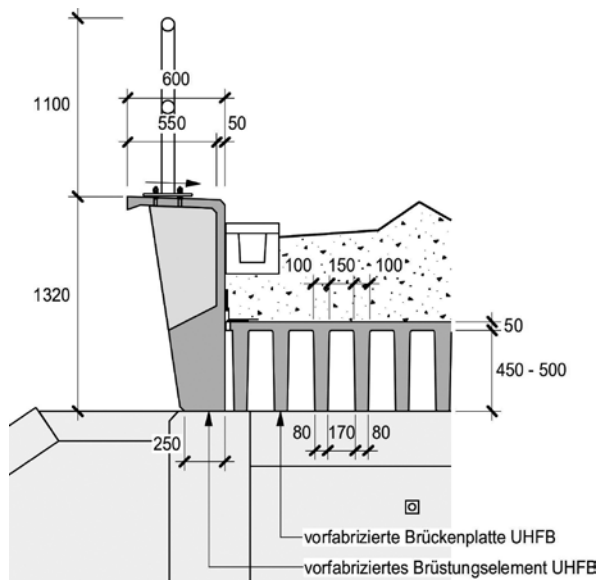


Bild 8 Querschnitt des Randträgers aus bewehrtem UHFB (Abmessungen in mm)
Zeichnung: KOST+PARTNER AG
Ingenieure und Planer Luzern



Bild 9 Seitenansicht des Randträgers aus bewehrtem UHFB
Foto: E. Brühwiler

Die Eigenschaften des UHFB und die Randbedingungen sprachen für eine Herstellung je einer Rippenplatte pro Gleis und zwei Randträger in Fertigteilbauweise. Aus statischen Gründen wurden die Rippenplatte und Randträger nicht monolithisch verbunden. Hingegen wurde die Längsfuge zwischen den beiden Rippenplatten ausgegossen und abdichtet.

5.3 Bemessung

Die Abmessungen der entworfenen Tragwerksteile wurden unter Anwendung der üblichen Tragwerksnormen betreffend die Bemessungsgrundlagen und Einwirkungen auf neue Tragwerke sowie des Merkblatt SIA 2052 [1] für die Festlegung der Anforderungen an den UHFB und die Berechnung der Tragwiderstände von Bauteilen aus Stahl-UHFB festgelegt. Die Ermittlung der rechnerischen Tragwiderstände der UHFB-Tragwerksteile bot keine nennenswerten Besonderheiten. Die Bemessung führte zu folgenden rechnerischen Ergebnissen und Erkenntnissen:

- Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit, d. h. die normative Anforderung an eine Durchbiegungsbegrenzung von $l/2.000 = 3$ mm unter Bahnlasten, war für die Bemessung maßgebend. Wegen seines verfestigenden Zugtragverhaltens bleibt der UHFB im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit rissfrei. Somit wird der gesamte Querschnitt zur Ermittlung der Trä-

gersteifigkeit mitgerechnet, wobei für den UHFB-Querschnittsanteil, der rechnerisch im Verfestigungsbereich beansprucht war, ein reduzierter Wert für den Elastizitätsmodul angesetzt wurde.

- Die maximale rechnerische Ermüdungsspannungsdifferenz der Betonstahlstäbe in den Rippen bleibt unter dem Bemessungswert von 108 MPa der Dauerfestigkeit für gerade Stäbe. Die maximale Druck- resp. Zugspannung infolge Ermüdung bleibt deutlich unter 50 % der statischen Festigkeiten. Im Grenzzustand der Ermüdungssicherheit ist der UHFB rechnerisch im Verfestigungsbereich beansprucht, und somit wurde die Ermüdungszugspannung entsprechend mit einem reduzierten Elastizitätsmodul berechnet.
- Der Grenzzustand der Tragsicherheit ist für die andauernde Bemessungssituation hinsichtlich des Biegetragwiderstands nicht maßgebend. Mit der gewählten Rippendicke konnte der Nachweis des Querkrafttragwiderstands ohne Einlage einer vertikalen Betonstahlbewehrung erbracht werden.
- Um die sehr hohen normativen Entgleisungslasten für die außergewöhnliche Bemessungssituation aufnehmen zu können, mussten die beiden äußersten Rippen des Plattenrandbereichs mit höherfestem Betonstahl mit einer normativen Fließgrenze von 700 MPa bewehrt werden.

- ❑ Zur Aufnahme der normativen Anprallkraft auf den Randträger war eine bedeutende Betonstahlbewehrung im unteren massiven Teil erforderlich. Diese Anprallkraft wird in die neue Auflagerbank und schließlich in die bestehende Widerlagerwand eingeleitet.
- ❑ Als Maßnahme zur Beherrschung der außergewöhnlichen Bemessungssituation „Brand“ wurden der UHFB-Mischung 2 kg/m³ Polypropylen-Fasern beigemischt, um den Abplatzwiderstand zu erhöhen.
- ❑ Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit sind dank des dauerhaften Baustoffs UHFB keine Maßnahmen wie z. B. ein Oberflächenschutz oder eine gewisse Bewehrungsüberdeckung erforderlich. Wegen der hohen Abriebfestigkeit des UHFB war zudem auf der Brückenplatte keine zusätzliche Schutzschicht erforderlich, zumal in der Schweiz bereits bei einigen Brückenplatten aus Stahlbeton diese Schutzschicht aus UHFB eingebaut wurde. Somit konnte unmittelbar nach dem Einbau der UHFB-Plattenelemente eingeschottert, der Gleiskörper erstellt und die Brücke dem Bahnbetrieb übergeben werden.

5.4 Prüfung des Bauprojekts

Die Bemessung des UHFB-Tragwerks und dessen dynamisches Verhalten wurden durch zwei Prüfengeure kontrolliert und bestätigt. Zudem wurden Vorversuche zum Nachweis des Tragverhaltens bis zum Bruch unter vorwiegender Biege- resp. Querkraftbeanspruchung durchgeführt. Dazu wurden zwei identische TT-Träger (Plattenstreifen mit zwei Rippen) hergestellt. Diese Vorversuche bestätigten die Bemessung, indem höhere Tragwiderstände gemessen wurden als die mit den Widerstandsmodellen gemäß SIA 2052 vorhergesagten Tragwiderstände [6, 7]. Diese Vorversuche ergaben zudem wertvolle Erkenntnisse bezüglich der effektiven Steifigkeit des Stahl-UHFB-Trägers, der konstruktiven Durchbildung und Bewehrungsführung im Auflagerbereich der Platte sowie dem Bau der UHFB-Elemente.

5.5 Bauausführung

Herstellung der UHFB-Fertigteile: Die Herstellung der im engen Abstand aneinander gereihten und leicht konisch geformten Rippen der beiden Plattenelemente verlangte eine Präzisions-

arbeit beim Bau der Schalung aus Holz und beim Verlegen der Betonstahlbewehrung. Die Verarbeitung der total 24 m³ UHFB zur Herstellung der vier Fertigteile im Elementwerk benötigte insgesamt 13 Stunden. Die Mischdauer von UHFB hängt von der Leistungsfähigkeit des Mixers und den Komponenten der verwendeten UHFB-Mischung ab. Im vorliegenden Fall war die Mischdauer mit 15 Minuten relativ lang. Die Beigabe der Polypropylen-Fasern als Zusatzstoff für die Gewährleistung der Brand-sicherheit erforderte diesen erwarteten, zusätzlichen Mischaufwand, bis die erforderliche Verarbeitbarkeit erreicht wurde. Der Einbau des selbstverdichtenden Frisch-UHFB in die Holzschalungen erfolgte problemlos.

Der Transport der UHFB-Fertigteile von der Fabrikationshalle zur Einbaustelle erfolgte wegen den großen Abmessungen der Fahrbahnplatte von 6,10 m Länge und 4,60 m Breite mit Sondertransporten.

Für den Ersatz der Brückenplatte wurde das Wochenende vom 11./12. November 2017 bereits drei Jahre vor Baubeginn festgelegt. Um den Bahnbetrieb möglichst wenig einzuschrän-



Bild 10 Versetzen der vorfabrizierten UHFB-Rippenplatte und des Randträgers (bei Zugdurchfahrt auf dem benachbarten Gleis) auf die Widerlager

Fotos: E. Brühwiler

ken, sah das Einbaukonzept vor, ein Gleis während 24 Stunden komplett zu sperren, um sämtliche Rückbau- und Montagearbeiten auszuführen (Bild 10). So konnte immer ein Gleis in Betrieb gehalten werden. Unmittelbar nach Abschluss der Arbeiten für das erste Gleis wurde die neue UHFB-Brückenplatte in Betrieb genommen, um sofort mit den analogen Arbeiten für das zweite Gleis beginnen zu können. Zur Sicherung des benachbarten Gleises wurde jeweils eine provisorische Schotterhalterung eingebaut.

5.6 Baukosten

Die Gesamtbaukosten der Baumeisterarbeiten, d. h. ohne bahneigene Kosten und Planungsleistungen, betrugen rund 820.000 Schweizer Franken und liegen im gleichen Kostenrahmen wie ein herkömmliches Projekt in Stahlbetonbauweise in der Schweiz. Dabei entfiel der Hauptanteil der Kosten von je 20 % auf die Vorbereitungsarbeiten auf der Baustelle sowie den Neubau der Banketthalterung. Die Instandsetzung und Erneuerung



Bild 11 Struktur der UHFB-Rippenplatte mit Sensoren und eingelegtem Referenzbalken für die Durchbiegungsmessung Foto: E. Brühwiler

der Auflagerbank und Mauern der beiden Widerlager beanspruchten etwa 15 % der Kosten. Die Rückbauarbeiten und der Einbau der UHFB-Fertigteile betragen ebenfalls 15 % der Kosten.

Die Herstellung der UHFB-Fertigteile beanspruchte 15 % der Gesamtkosten, wobei die verbauten 24 m³ UHFB etwa die Hälfte ausmachten. Die Baustoffkosten für den UHFB machen somit einen unwesentlichen Anteil an den gesamten Projektkosten aus.

5.7 Monitoring des Tragverhaltens

Nach Inbetriebnahme wurde eine kontinuierliche, messtechnische Überwachung des Tragverhaltens der UHFB-Brückenplatte in Betrieb genommen (Bild 11).

Aus den bisher erfassten Messwerten über zwei Jahre kann abgeleitet werden, dass die in Wirklichkeit auftretenden, maximalen Beanspruchungen (betreffend Durchbiegung in Feldmitte, UHFB-Dehnungen und Beschleunigungen) im UHFB-Tragwerk um ein Mehrfaches kleiner sind als die Grenzzustände der rechnerisch nachgewiesenen Bemessungssituationen. Diese erwartete, sehr große Differenz zwischen den gemäß den Normen verlangten rechnerischen Werten und den effektiv auftretenden Werten ist vor allem auf das Normlastmodell für Bahnlasten zurückzuführen. Tatsächlich zeigt eine Plausibilitätskontrolle, dass das mit dem Normlastmodell berechnete maximale Biegemoment (charakteristischer Wert) mehr als 4,5 Mal größer ist als dasjenige eines Fahrzeugs mit einer Doppelachse der auf dieser Bahnlinie zugelassenen maximalen Achslast von 225 kN. Zudem gilt es zu beachten, dass bei kurzen Spannweiten die mittragende Wirkung des Gleis- und Schotterköpers beträchtlich ist und im vorliegenden Fall etwa 10 % beträgt.

Die Bahnbrücke ist wie erwartet wegen des unsinnig konservativen Bahnlastmodells der Normen sehr stark überbemessen.



Bild 12 Stahl-UHFB Fußgängerbrücke in Le Bouveret: die Gestaltung des Brückenträgers wird durch die länglichen Aussparungen im Steg dominiert, die eine Transparenz und ein Lichtspiel bewirken. Die Stege des U-förmigen Trogquerschnitts sind leicht nach außen geneigt, um die Raumwirkung auf der Brücke zu verbessern.

Foto: Sollertia SA

5.8 Weitere UHFB-Anwendungen für die Bahninfrastruktur

Das Potenzial für zukünftige Anwendungen von UHFB im Ingenieurbau der Bahninfrastruktur liegt beim Einsatz von standardisierten vorfabrizierten Brückenplatten, Schotterträgern auf Natursteinmauerwerk- und Stahlbrücken, Abdichtungen von Brückenplatten sowie vorfabrizierten Bauteilen wie Randbalken, Schwellen und Teilen der festen Fahrbahn. Ein weiteres Anwendungspotenzial liegt in vorgespannten Brückentragwerken mittlerer und großer Spannweiten. Entsprechende UHFB-Projekte, beispielsweise für ein 900 m langes Bahnviadukt aus vorgespanntem UHFB, sind momentan in der Schweiz in Planung oder Ausführung.

6 Zwei weitere Stahl-UHFB Brücken

Der Baustoff Stahl-UHFB wurde schon oft für den Bau von Fußgängerbrücken eingesetzt. Ein im Jahr 2018 in der Schweiz gebautes Objekt ist die Fußgängerbrücke in Le Bouveret (Bild 12) [8]. Der leicht gebogene 26,5 m weit gespannte, einfache Balken ist aus Fertigteilen in Segmentbauweise zusammengesetzt. Die Fertigteile wurden mit geradlinigen Vorspannkabeln in den Unter- und Obergurten zusammengespannt, sodass im Gebrauchszustand der U-Querschnitt unter Druckspannung



Bild 13 Gletschersandbrücke bei Grindelwald, Schweiz, eine Holz-UHF-Verbundbaubrücke

Foto: E. Brühwiler

steht. In Querrichtung ist der Querschnitt mit einzelnen Betonstahlstäben schlaff bewehrt. Der Stahl-UHF-Balken ist mit den Widerlagern monolithisch verbunden, um eine möglichst unterhaltsfreie Konstruktion zu erhalten.

Die Gletschersandbrücke wurde 2018 in der Bergregion oberhalb Grindelwald für Forst- und Landwirtschaftsverkehr sowie für einen Hauptwanderweg gebaut. Es handelt sich um die schweizweit erste Holz-UHF-Verbundbaubrücke (Bild 13) [9]. Die Verwendung von UHF (mit Betonstahlstäben in Querrichtung) in Verbindung mit gebogenen Brettschicht-Holzträgern brachte zahlreiche Vorteile der Leichtbauweise mit sich, die eine vereinfachte Baurealisierung in einem abgelegenen Gebiet ermöglichte. Der UHF überzeugte durch seine mechanischen Eigenschaften, die eine dünne Fahrbahnplatte ermöglichten, und durch seine Wasserundurchlässigkeit und Befahrbarkeit. Die UHF-Platte übernimmt neben der statischen Funktion auch die Funktion der Brückenabdichtung und der Fahrbahnoberfläche, die mit einer Splittkieseinstreuung versehen ist und ein natürliches Erscheinungsbild ergibt.

7 Folgerungen und Ausblick

Die Stahl-UHF-Bauweise beinhaltet die effiziente Kombination von Stahl und Zement als Grundidee. Die Stahl-UHF-Bauweise im Brückenbau mit einem aus vergleichsweise dünnen Platten und versteifenden Rippen zusammengesetzten Querschnitt ist vom Stahlbau inspiriert, setzt jedoch die Vorspanntechnologie und gegossene Verbindungen gezielt ein.

Wegen seiner hohen Festigkeit und Dauerhaftigkeit ist Stahl-UHF insbesondere für stark beanspruchte Brücken geeignet. Zudem ermöglicht Stahl-UHF eine einfache Bemessung und Ausführung bei beschleunigtem Bauvorgang, wobei die Baukosten die Größenordnung der traditionellen Bauweisen nicht übersteigen. Der Baustoff UHF eröffnet neue Perspektiven und ressourcenschonende Anwendungen, da UHF-Tragwerke relativ leicht sind, d. h. pro Baustoffvolumeneinheit wird relativ viel Nutzlast aufgenommen, und gegenüber der Stahlbetonbauweise wird für die gleiche Tragfunktion deutlich weniger Zement und etwa die gleiche Stahlmenge verbraucht.

Ein großes Entwicklungspotenzial des UHFB besteht im Verbund mit Stahl oder Holz.

Ein weiteres Entwicklungspotential besteht in der Kombination von UHFB (mit Dehnungsverfestigung) und Carbonbewehrung. Der so gewonnene Baustoff Carbon-UHFB könnte – gegenüber Carbonbeton – zu einer entscheidenden Verbesserung des Tragverhaltens von entsprechenden Tragwerken im Gebrauchszustand führen.

Literatur

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (Hrsg.): Merkblatt SIA 2052 UHFB – Baustoffe, Bemessung, Ausführung. Zürich, 2016
- [2] Brühwiler, E.; Denarié, E.; Putallaz, J.-C.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit ultrahochleistungsfähigem Faserfeinkornbeton (UHFB). *Beton- und Stahlbetonbau* 100 (2005) 8, S. 822–827
- [3] Brühwiler, E.; Bastien-Masse, M.; Mühlberg, H.; Houriet, B.; Fleury, B.; Cuennet, S.; Schär, P.; Boudry, F.; Maurer, M.: Design of the strengthening of the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC. In: IABSE (International Association of Bridge and Structural Engineering) Zürich Switzerland (Hrsg.): *Proc. of IABSE Conf.*, 23.–25.9.2015 in Genf (Schweiz), 2015, S. 1171–1178
- [4] Brühwiler, E.; Friedl, H.; Rupp, C.; Escher, H.: Bau einer Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB – Weltweit erste Bahnbrücke aus UHFB auf einer Hauptlinie. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019) 5, S. 337–345
- [5] Conzett, J.; Reber, J.-J.; Weidmann, R.: Ein Einblick in die Geschichte der SBB-Brücken. In: SBB-Fachstelle für Denkmalpflege; Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte GSK (Hrsg.): *Schweizer Bahnbrücken – Architektur- und Technikgeschichte der Eisenbahnen in der Schweiz*, Bd. 5, Scheidegger & Spiess, 2013, S. 13–31
- [6] Borkowski, G.; Thoma, K.; Brühwiler, E.; Rupp, C.: Experimentelle Validierung einer Plattenbalken-Bahnbrücke aus bewehrtem UHFB. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 6, S. 320–328
- [7] Pan, R.; Brühwiler, E.; Shen, X.: Nonlinear numerical analysis of R-UHPFRC railway Π -beams. In: Caijun Shi, Hunan University Changsha China (Hrsg.): *Proc. of the 1st Int. Conf. on UHPC Materials and Structures (UHPC2016-China)*, 27.–30.10.2016 in Changsha (China), 2016, S. 519–527
- [8] Teixeira, R.; Laurencet, P.; Brühwiler, E.: Passerelle intégrale en CFUP au Bouveret. In: Brühwiler, E.; Oesterlee, C.; Redaelli, D. (Hrsg.): *Proc. of 3ème Journée d'étude BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT – concevoir, dimensionner, construire | 3. Fachtagung ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON – entwerfen, bemessen, bauen*, 24.10.2019 in Fribourg (Schweiz), 2019, S. 169–178 – <https://www.heia-fr.ch/media/mk115m0a/tagungsband-uhfb-2019.pdf> (geprüft am 3.12.2019)
- [9] Berchtold, M.-A.; Hemmi, A.; Lauber, G.: Neubau Gletschersandbrücke in Grindelwald. In: Brühwiler, E.; Oesterlee, C.; Redaelli, D. (Hrsg.): *Proc. of 3ème Journée d'étude BÉTON FIBRÉ ULTRA-PERFORMANT – concevoir, dimensionner, construire | 3. Fachtagung ULTRA-HOCHLEISTUNGS-FASERBETON – entwerfen, bemessen, bauen*, 24.10.2019 in Fribourg (Schweiz), 2019, S. 145–150 – <https://www.heia-fr.ch/media/mk115m0a/tagungsband-uhfb-2019.pdf> (geprüft am 3.12.2019)

-
- 9 Grußwort des Rektors
 - 13 Entwicklung des Instituts für Massivbau –
Lehre und Forschung im Brückenbau an der TU Dresden
 - 27 Die neue Erhaltungsstrategie des Bundes –
Planung und Bau von Brücken auf den Hauptverkehrsrouten
 - 33 Brücken aus bewehrtem UHPC (Stahl-UHFB)
 - 47 Nutzung von Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) im ASTRA –
Rückblicke und Perspektiven
 - 57 Neufassung der Nachrechnungsrichtlinie für Massivbrücken
 - 71 Historische Eisenbahnbrücken – Denkmale im Netz
 - 83 85 Jahre Autobahnbrückenbau – 30 Jahre Dresdner Brückenbausymposium
 - 101 Gerd Lohmer (1909–1981) – Der Brückenarchitekt der Nachkriegszeit
 - 123 Ersatzneubau der Rheinbrücke Leverkusen – Gesamtplanung
des 8-streifigen Ausbaus der A1 zwischen Köln und Leverkusen
 - 139 Ein neuer Schritt im Großbrückenbau: Querverschub einer Verbundbrücke mit Pfeilern
und Gründung bei der Talbrücke Rinsdorf im Zuge der A 45
 - 149 S-Bahn-Querung im neuen Stuttgarter Tiefbahnhof S21 –
erstmaliger Einsatz von interner verbundloser Vorspannung bei der DB AG
 - 165 Reduzierte Bauzeit bei Ersatzneubauten von Straßenbrücken durch Carbonbeton
 - 177 Robust, wirtschaftlich und schön – der Entwurf von integralen Brücken
 - 191 Neubau der Busbrücke über den Bahnhof in Zwolle
 - 207 Katastrophen vermeiden: Brückenmonitoring mit einem Netzwerk
leistungsstarker dreiachsiger MEMS-Beschleunigungssensoren
 - 213 Brückenvielfalt in Süddeutschland und den Alpen – Bericht zur Brückenexkursion 2019
 - 227 Chronik des Brückenbaus