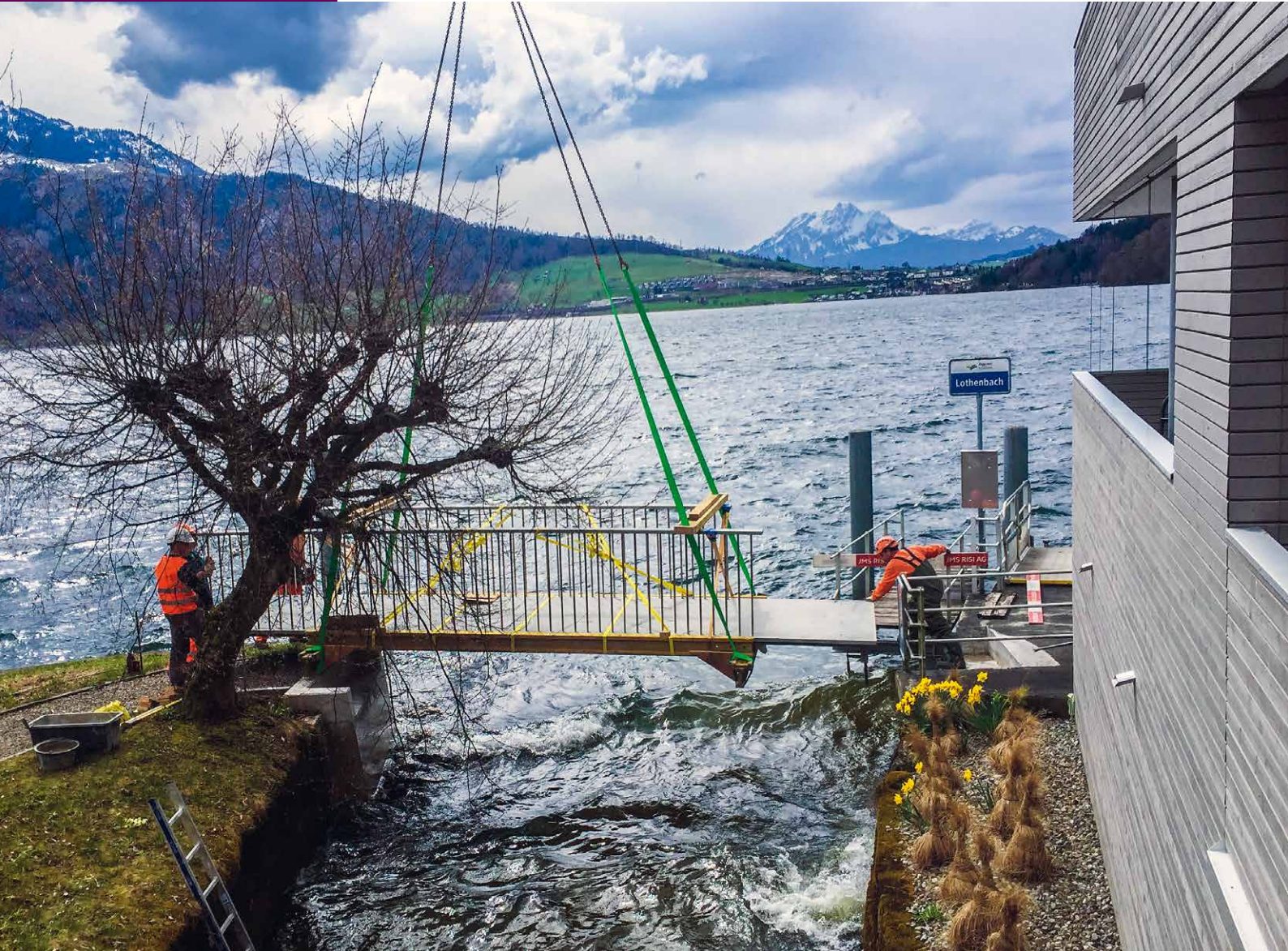


# Beton- und Stahlbetonbau



## Hybridbrücken aus CPC-Platten und Carbonhalbträgern

Christian Lowiner, Josef Kurath, Antje Sydow, Basil Wietlisbach

## Bridge to the Future und Verbindungssteg Campus A – ein Weg in die Zukunft für den Betonbau

Christian Lowiner, Michèle Bühler, Josef Kurath

(aus: Ernst & Sohn Special 2022 · Spezialfälle und Sonderlösungen)



# Hybridbrücken aus CPC-Platten und Carbonhalbträgern

Bereits heute wird weltweit pro Jahr mehr Sand und Schotter verbaut als durch natürliche Erosionsprozesse entsteht [1]. Aufgrund der fortlaufenden Urbanisierung soll sich zudem die jährliche Abbaumenge von Sand, Schotter und Eisenerz zwischen 2011 und 2060 mehr als verdoppeln [2]. Diesen rückläufigen Ressourcenvorkommen und der globalen Klimaerwärmung soll mit neuen Bauweisen entgegengewirkt werden. CPC – carbon prestressed concrete – ist eine solch neuartige Bauweise in Beton. Die konventionelle Stahlbewehrung wird durch fein verteilte, stark vorgespannte Carbondrähte ersetzt, welche endlos und mehrlagig in beide Hauptrichtungen in der Platte eingebaut sind. Beim neu entwickelten Kleinbrückensystem „CPC-CARBO“ wird die CPC-Fahrbahnplatte mit einem Carbonhalbträger ergänzt, welcher unter der Platte liegt und mit dieser über eine vermörtelte Verzahnung verbunden ist. Die so definierte Hybridbrücke ist sehr leicht und trotzdem enorm dauerhaft und robust. Die ohne Stahlteile auskommende Brücke vereinfacht auch die Widerlager wesentlich. Gegenüber einer vergleichbaren Brücke aus Stahlbeton wird mit dieser neuen Bauweise die Arbeitszeit vor Ort stark reduziert und vom Wetter praktisch unabhängig gemacht. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der Verbrauch von nicht nachwachsenden Rohstoffen werden wesentlich verkleinert. Der vorliegende Bericht beschreibt eine von bisher drei in der Schweiz gebauten und auf diese Weise konzipierten Kleinbrücken.

**Stichworte** Carbon Prestressed Concrete; CPC; Hybridbrücke; Innovation; experimentelle Untersuchungen; Hochleistungsbaustoffe

## 1 Einleitung

CPC – carbon prestressed concrete – ist eine Alternative zum konventionell verwendeten Stahlbeton, wobei die Stahlbewehrung durch vorgespannte Carbonfasern ersetzt wird. Dank der viel höheren Zugfestigkeit von Carbon gegenüber gebräuchlichem Baustahl, dem Wegfall der ansonsten notwendigen Bewehrungsüberdeckung und der Vorspannung der Carbonfaser können äußerst schlanke Tragkonstruktionen realisiert werden [3–5]. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde 2012 die CPC AG gegründet, welche industriell großformatige CPC-Platten herstellt. 2016 wurde mittels dieser Platten erstmalig ein eigenständiges Brückentragwerk erstellt. Bezogen auf die Nutzfläche war dieses ca. viermal leichter als eine vergleichbare Brücke aus konventionellem Stahlbeton [6]. Die effiziente Nutzung des Betons in dieser neuen Bauweise ist im Hinblick auf das rückgängige Ressourcenvorkommen von Sand, Schotter [1] und Eisenerz sowie die erwartete Verdoppelung der Abbaumenge bis 2060 [2] interessant. Um

## Hybrid bridges made of CPC-slabs and carbon half-beams

Already today, more sand and gravel is used in the construction sector worldwide per year than is created by natural erosion processes [1]. In addition, due to ongoing urbanisation, the annual amount of sand, gravel and iron ore mined is expected to more than double between 2011 and 2060 [2]. These dwindling resources and global warming are to be counteracted by new construction methods. CPC – carbon prestressed concrete – is such a new construction method in concrete. The conventional steel reinforcement is replaced by finely distributed, highly prestressed carbon wires, which are installed endlessly and in several layers in both main directions in the slab. In the newly developed small bridge system “CPC-CARBO”, the CPC carriageway slab is supplemented with a carbon half-girder, which lies under the slab and is connected to it via a mortared interlocking. This hybrid bridge is very light and yet extremely durable and robust. The very robust bridge, which does not require any steel parts, also simplifies the abutments considerably. Compared to a comparable bridge made of reinforced concrete, this new construction method greatly reduces the working time on site and makes it practically independent of the weather. The CO<sub>2</sub> footprint and the consumption of non-renewable raw materials are significantly reduced. This report describes one of three small bridges built in Switzerland which were designed in this way.

**Keywords** carbon prestressed concrete; cpc; hybrid-bridge; innovation; experimental investigations; high-performance building materials

die benötigte Betonmenge noch weiter zu reduzieren, wurde das Baukonzept weiterentwickelt. Daraus entstand schlussendlich eine Hybridbrücke aus CPC-Platten und Carbonhalbträgern (CFK-Träger). Diese wurde bereits an drei Standorten in der Schweiz verbaut: Zug (2018), Turbenthal (2019) und Zürich Affoltern (2020).

Bei der entwickelten Hybridbrücke wird komplett auf Stahl verzichtet. Für die tragenden Verbindungen wird hydraulisch gebundener Mörtel verwendet. Ein Vorteil dieses ultraleichten und gegen Umwelteinwirkungen unempfindlichen Brückensystems ist, dass die Widerlager der Brücke stark vereinfacht werden können oder bei einem Ersatzneubau einer Brücke die bestehenden Widerlager trotz Erhöhung der Nutzlast nicht verstärkt werden müssen. Zudem wird die Arbeitszeit vor Ort minimiert, die Abhängigkeit von Umwelteinflüssen praktisch eliminiert und das Versetzen der Brücke vereinfacht. In der Folge wird die in Turbenthal realisierte Hybridbrücke vorgestellt (Bild 1).



**Bild 1** Unterseite der Brücke in Turbenthal  
Lower side of the bridge in Turbenthal (ZHAW)

## 2 Bemessungsgrundlagen

Die Brücke ist für eine Nutzung als Fußgänger- und Radwegbrücke bestimmt (gemäß SIA261:2014: nichtmotorisierter Verkehr [7]). In der Norm werden dafür zwei Lastmodelle berücksichtigt. Das erste berücksichtigt ein Menschengedränge mit einer gleichmäßig verteilten Belastung von 4 kN/m<sup>2</sup> (charakteristischer Wert). Das zweite erfasst die lokale Beanspruchung infolge von leichten Unterhaltsfahrzeugen und wird durch eine Einzellast mit einem charakteristischen Wert von 10 kN repräsentiert. Kennwerte der Baustoffe wurden soweit möglich der SIA-Norm für Betonbau [8] und den BÜV-Empfehlungen (Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen) [9] entnommen. Werte, welche aufgrund der neuartigen Konstruktion nicht in den Baunormen vorhanden sind, wurden anhand von Material- und Bauteilversuchen ermittelt. Anhand von Versuchen wurde schlussendlich auch bestätigt, dass die konzipierte Brücke die beiden Lastmodelle aufnehmen kann.

## 3 Bauwerk

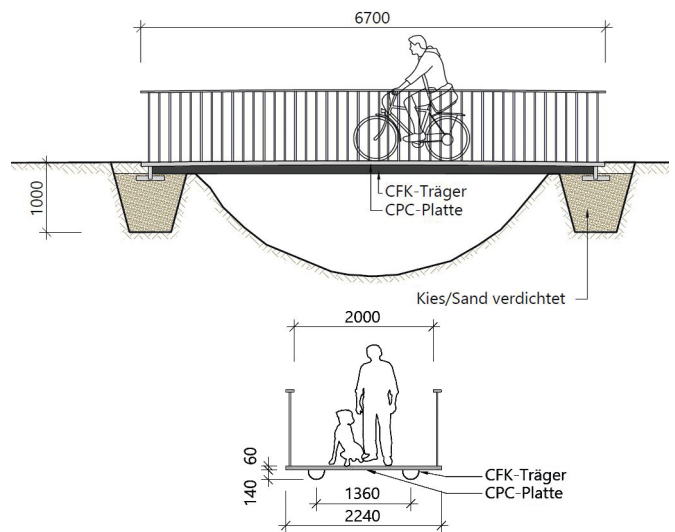
### 3.1 Übersicht

Das Brückendeck besteht aus einer großformatigen, 60 mm starken und achtlagig orthogonal bewehrten CPC-Platte, welche als Biegeplatte die Lasten aufnimmt und sie auf den Hybridträger, bestehend aus der Brückenplatte selbst und den darunterliegenden Carbonhalbträgern, weiterleitet. Die CPC-Brückenplatte und die Carbonhalbträger sind über eine Verzahnung miteinander verbunden. Die Auflager werden mit stehenden CPC-Platten als Querstege gebildet. Diese sind über Nuten mit dem Brückendeck verkrallt. Die Brückenplatte ist in der Mitte leicht überhöht. Die Widerlager bei der Brücke in Turbenthal bestehen aus einer frostsicheren Sand-/Kiespackung, welche bis auf die Frosttiefe reicht. Um eine gleichmäßige Lastverteilung sicherzustellen, ist an der Oberfläche der Sand-/Kiespackung ein CPC-Plattenstreifen eingebettet, auf welchem der Brückenquerträger aufliegt.

Die Oberfläche der Brücke wird direkt befahren. Dank der hohen Qualität des Betons ist für die vorhandenen

**Tab. 1** Kennwerte Brücke Turbenthal  
Characteristic values bridge in Turbenthal

	Abmessung
Länge	6,70 m
Breite	2,24 m
Lichte Breite	2,00 m
Lichte Höhe (OK Platte bis UK Träger)	0,20 m
Gewicht total	2,5 to 170 kg/m <sup>2</sup>
Gewicht der beiden CFK-Träger	46 kg
Oberfläche	gebürstet



**Bild 2** Längs- und Querschnitt der Hybridbrücke bei Turbenthal  
Longitudinal and coss section of the bridge in Turbenthal (ZHAW)

Beanspruchungen keine zusätzliche Verschleißschicht notwendig. Die Rutschfestigkeit der CPC-Platten wurde in unabhängigen Tests mit Klasse R12 für die Oberflächentypen schalungsglatt, gebürstet oder sandgestrahlt bestätigt. Die Kennwerte der Brücke in Turbenthal sind in Tab. 1 aufgeführt, ein Längs- und Querschnitt ist in Bild 2 ersichtlich.

### 3.2 CPC-Platte

Die CPC-Bauweise wurde von der Fachgruppe Faserverbundkunststoffe des Departements Architektur und Bauingenieurwesen an der ZHAW und der CPC AG Andelfingen in einem durch schweizerische Innovationsförderung unterstützten Forschungsprojekt entwickelt. Die für die Bauteile der Brücken verwendete CPC-Platte hat eine Stärke von 60 mm und ist achtlagig orthogonal, ausschließlich mit fein verteiltem, endlosem und vorgespanntem Carbon bewehrt.

Der eingesetzte Beton entspricht der Festigkeitsklasse C80/95 und ist frost-tausalzbeständig mit Klasse XF4. Die

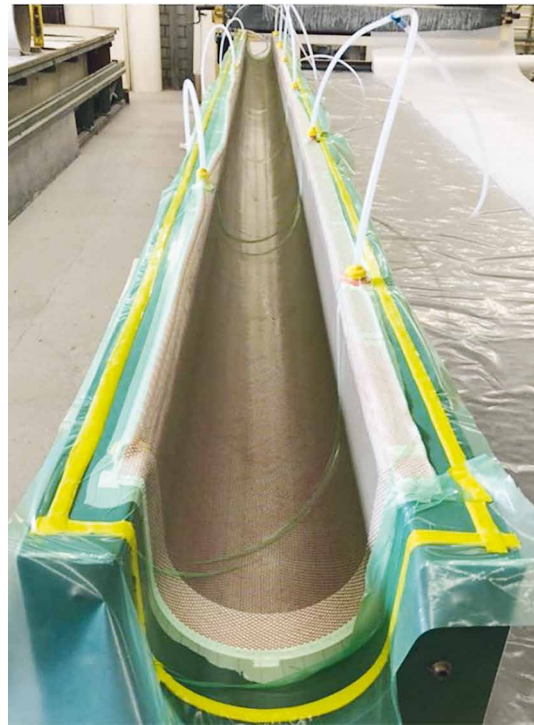
einzelnen Carbonbewehrungsfasern in der CPC-Platte haben eine Zugfestigkeit mit charakteristischem Wert von  $4450 \text{ N/mm}^2$ . Die Fasern sind in einem Raster von 15 mm sehr fein verteilt und benötigen nur kurze Verankerungslängen von ca. 40 mm. Eine lokale Bewehrungsschädigung durch Bohrungen oder an den Schnittkanten hat daher keinen globalen Einfluss. Die Bewehrung ist an den Schnittkanten quasi unsichtbar und dauerhaft frei von Verfärbungen und Korrosion. Die Bewehrung wird mit  $2000 \text{ N/mm}^2$  vorgespannt. Damit wird gewährleistet, dass die Platte unter Gebrauchslast rissfrei bleibt. Bei zu hohen Lasten auftretende Risse sind dank dem sehr guten Verbund zwischen Beton und Carbonbewehrung sehr fein verteilt und werden bei Lastreduktion wieder geschlossen.

Die üblicherweise erforderliche Bewehrungsüberdeckung der Stahlbewehrung von drei bis vier Zentimetern zum Schutz vor Korrosion ist für die Bewehrung in Carbon nicht erforderlich. Daher sind CPC-Platten bei gleicher Tragfähigkeit wie Stahlbeton wesentlich dünner und haben ein bis zu 80% geringeres Gewicht. Zudem erübrigt sich dank der orthogonal verlaufenden Bewehrung eine Querverstrebung der Längsträger, da die CPC-Platte als Scheibe funktioniert und die gesamte horizontale Lastverteilung übernehmen und in die Widerlager weiterleiten kann.

### 3.3 Carbonträger

Die Carbonträger wurden von der aXpel wernli composites AG in Hottwil im VARI-Infusionsverfahren (Vacuum Assisted Resin Moulding) erstellt. Bei diesem Verfahren werden die verschiedenen Faserhalbezeuge (Gewebe, Gelege, Matten) in der mit einem Gelcoat (Schutzschicht gegen Umwelteinflüsse) vorbereiteten Schalung gemäß den Vorgaben des Ingenieurs eingebaut. Um ein hochbelastbares Faserverbundprodukt zu erhalten, muss der Faservolumenanteil der erstellten Schichtung maximiert und Luft einschüsse sowie Harzansammlungen verhindert werden. Dazu wird das Textilpaket mit einer Vakuumfolie abgedeckt (Bild 3). Zwischen Vakuumfolie und Form wird ein Unterdruck erzeugt, wodurch die Faserhalbezeuge zusammengedrückt werden. In den vakuumierten Bereich wird das flüssige Harz eingelassen und härtet dort aus. Abschließend wird das ausgehärtete Bauteil entlang einer definierten Zeit-/Temperaturkurve bei bis zu  $140^\circ\text{C}$  gebacken. Dadurch kann das Bauteil auch bei lang anhaltenden Temperaturen bis  $80^\circ\text{C}$  tragend eingesetzt werden und erhält dank der erreichten optimalen Vernetzung des Harzes auch eine sehr hohe Zähigkeit und sehr gute Robustheit gegen Umwelteinflüsse.

Der Carbonfaservolumenanteil des Trägers beträgt ca. 50%. Die Wandstärke des Trägers und der Lagenaufbau variieren zwischen 4,1 mm und 8,6 mm. Als Witterungsschutz wurde der BÜFA®-VE-Gelcoat mit einer Stärke von 0,35 mm verwendet.



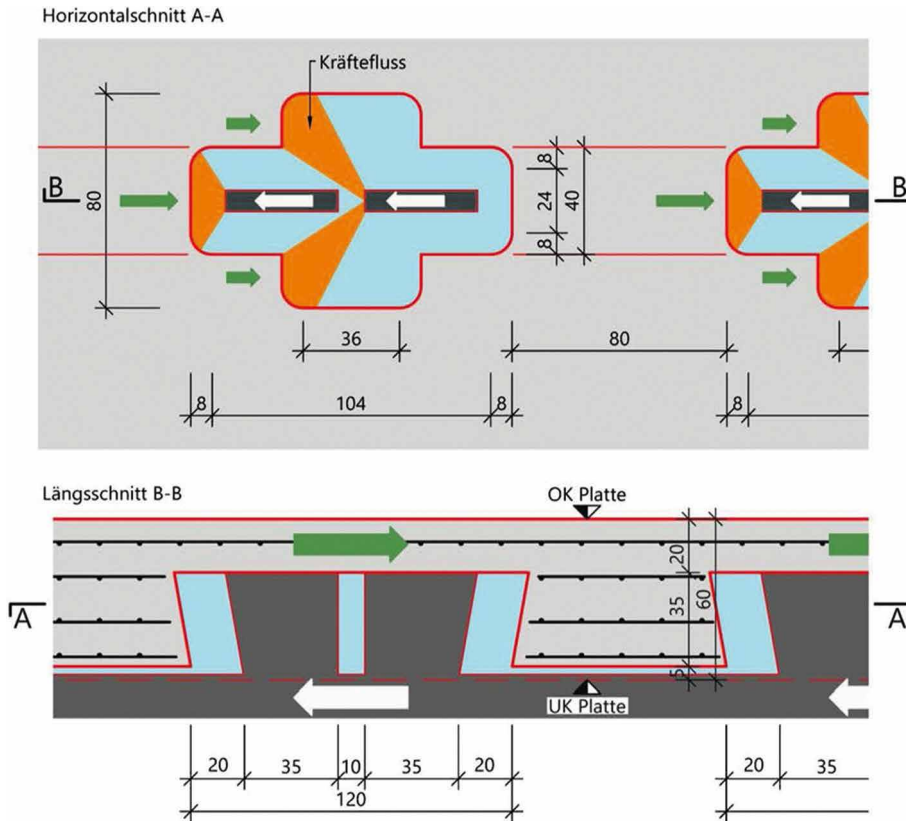
**Bild 3** Herstellung der CFK-Träger im VARI-Verfahren: die Faserhalbezeuge sind positioniert und Vakuum liegt an  
Production of the CFRP beams in the VARI process: the semi-finished fibre products are positioned and vacuum is applied (aXpel wernli composites AG)

### 3.4 Verzahnung

Um eine leichte, gegen Umwelteinflüsse möglichst widerstandsfähige Brücke zu realisieren, wurde beim Verbund zwischen der CPC-Platte und den CFK-Halbträgern komplett auf Stahlkomponenten verzichtet. Damit auch auf Klebstoffe verzichtet werden kann, welche normalerweise einen Arbeitsbereich bis ca.  $45^\circ\text{C}$  aufweisen, wurde eine spezielle Verzahnung zwischen der CPC-Platte und dem CFK-Träger ausgearbeitet (Bild 4). Diese wurde schlussendlich mit dem Mörtel „SikaGrout-311“ verfüllt. Die realisierte Verzahnung hat zwei Eigenheiten. Zum einen wird dank der schräg ausgebildeten Zähne des CFK-Halbträgers und der Vertiefungen in der CPC-Platte der vertikale Kraftverbund zwischen den zwei Bauteilen sichergestellt. Zum anderen erlauben die rundlichen Ausbuchtungen in der CPC-Platte, dass sich der Kraftfluss bei jeder Zacke aufzähnen kann. Somit erfolgt die longitudinale Kraftübertragung nicht über Reibungs-, sondern über reine Druckkräfte im Mörtel zwischen Platte und Carbonzahnflanke. Der longitudinale Kraftfluss im Bereich der Ausbuchtungen ist schematisch in Bild 4 dargestellt.

### 3.5 Auflager

Dank der verwendeten Materialien erübrigt sich die bei Stahl- oder Holzbauten notwendige Umlüftung der Auflager. Die Brückenenden können direkt im Erdreich verbaut werden. Zusammen mit der extrem leichten Bauwei-



**Bild 4** Verzahnung zwischen CPC-Platte und CFK-Träger  
Interlocking between CPC plate and CFRP beam (ZHAW)

se vereinfacht sich so das Widerlager im Vergleich zu konventionellen Brücken erheblich. Die Kraftübertragung von der Brücke ins Erdreich erfolgt über mehrere Elemente mit abnehmenden Materialeigenschaften: Die Carbonhalbträger und die CPC-Platte leiten über einen stehenden CPC-Quersteg die Auflagerkräfte auf einen CPC-Plattenstreifen. Die Querstege haben eine den CFK-Bohlen angepasste Aussparung und gegenüberliegend einen Überstand, welcher in eine Nut in den CPC-Auflagerstreifen hineingestellt wird (Bild 5). Die Vertiefung im CPC-Auflagerstreifen wird nachträglich mit Vergussmörtel verfüllt. Die Plattenstreifen verteilen die Auflagerkraft über ihre Standfläche und leiten sie flächig in die darunterliegende frostsichere Widerlagerpackung weiter. Über die Widerlagerpackung, welche bis auf die Frosttiefe reicht, werden die Kräfte breiter verteilt und gelangen schlussendlich in den Untergrund. Aufgrund der ähnlichen Fundationsweisen von Brücke und Zufahrtunterbau hat diese Bauweise den Vorteil, dass sich Brücke und Zufahrten ähnlich setzen. Dadurch ist meist, wie hier ausgeführt, kein Übergangselement wie beispielsweise eine Schlepplatte notwendig.

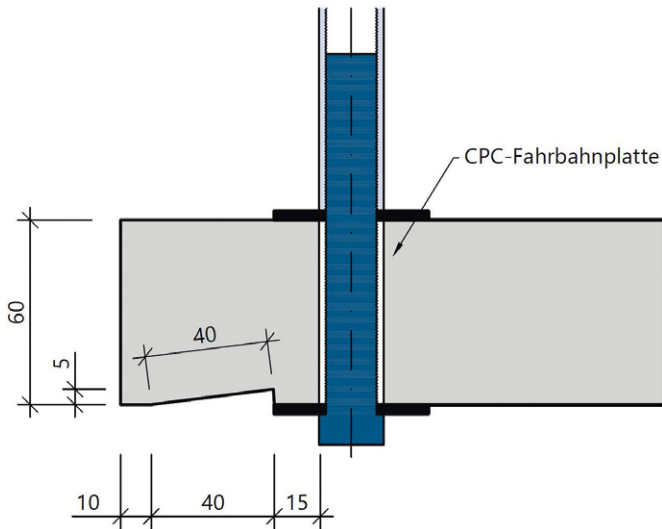
### 3.6 Geländer

Das Staketengeländer besteht aus gebürsteten Chromstahlrohren, welche ein Innengewinde aufweisen und unterseitig mit der Brückenplatte verschraubt sind. Als Handlauf wurde ein Streifen aus CPC-Platten mit einge-



**Bild 5** Quersteg, Auflagerplatte und verdichtete Sand-/Kiespackung  
Cross bar, support plate and compacted sand/gravel packing (CPC-AG)

klebten Bolzen auf die Staketten aufgesetzt und punktuell mit Madenschrauben fixiert. Die Verbindung zwischen Brückenplatte und Geländer wurde so dimensioniert, dass einerseits die notwendigen horizontalen Kräfte mit dem Geländer aufgenommen werden können und andererseits im Falle von Überlast das Geländer versagt, bevor die Brückenplatte im Einspannbereich beschädigt wird. So ist ein einfaches nachträgliches Auswechseln eines defekten Geländers gewährleistet.



**Bild 6** Entwickelte Entwässerung für die Brücke in Turbenthal  
Developed drainage for the bridge in Turbenthal (ZHAW)

### 3.7 Entwässerung

Zur Sicherstellung der Entwässerung ist die Brücke in Längsrichtung in Feldmitte 30 mm überhöht. Dazu wurden die Carbonprofile an der Oberseite mit dieser leichten Krümmung geschnitten und die biegeweiche CPC-Platte passte sich dieser Krümmung an. In diesem Zustand wurden die beiden Bauteile kraftschlüssig über die Verzahnung verbunden und somit diese Krümmung der Platte konserviert. An der Unterseite des Brückendecks wurden werkseitig umlaufend Wassernasen eingefräst. Erfahrungen haben gezeigt, dass eine recht- oder dreieckige Wassernase gerne von Insekten und Kleintieren als Nistplatz benutzt wird (z. B. Spinnen). Dadurch wird die Aussparung örtlich mit der Zeit ausgefüllt und verliert ihre Funktion. Deshalb wurde bei dieser Brücke eine Wassernase mit einer Breite von 40 mm und einer maximalen Tiefe von 5 mm ausgebildet (Bild 5). Die geringe Vertiefung, kombiniert mit der geringen Steigung, macht die Wassernase für Insekten/Kleintiere uninteressant und verunmöglicht es dem Wasser, unter die Platte zu gelangen.

## 4 Versuche

### 4.1 Verbindungsversuche

#### 4.1.1 Vergussversuch für Verzahnung

Das Verbindungsdetail zwischen der CPC-Platte und dem CFK-Träger wurde vorgängig in einem Laborversuch geprüft. Dabei zeigte sich, dass nach dem Vergießen der beiden Elemente Probleme bezüglich des Fließverhaltens des Vergussmörtels auftraten. Um das Problem zu verstehen, wurden Vergussversuche mit unterschiedlichen Konfigurationen und Abmessungen der Fräsung durchgeführt. Die Resultate zeigten, dass das richtige Vornässen der Fräsung in der CPC-Platte und die Geometrie der

Fräsung von entscheidender Bedeutung für eine saubere Verbindung sind. Um eine vollständige Auffüllung der Fräsung mit dem Fließmörtel zu gewährleisten, ist das Wasser erst kurz vor dem Vergießen aus den Fräsungen zu entfernen.

#### 4.1.2 Scherversuch

Um Kennwerte für die Versagensmechanismen der Verzahnung zwischen der CPC-Platte und dem CFK-Träger unter Querkraft zu erhalten, wurden entsprechende Verbindungsversuche durchgeführt. Hierfür wurde die geplante Verzahnung mittels eines Stahlblechelements nachgebildet und auf Schub mit zunehmender Kraft belastet. Vor dem Test wurde die Kraft für mögliche Versagensmechanismen berechnet. Diese sind in Tab. 2 aufgeführt. Diesen Werten zufolge wurde ein Versagen des Mörtels auf Druck erwartet. Die Resultate zeigten, dass die Versagensbelastung bei den drei durchgeführten Versuchen zwischen 33 und 38 kN und somit um ein Vielfaches über dem berechneten Wert von 14,4 kN lag. Das Versagen lag nicht auf Seite der CPC-Platte, sondern auf Seite des Stahlnockens. Das Blech hat die Fließspannung auf Seite des Nockens erreicht, welcher auf Seite der Krafteinleitung liegt. Das Blech hat sich plastisch verformt (Bild 7). Dadurch wurde das Blech hinausgedrückt. Die gemessene, über die Nockenhöhe gemittelte Druckspannung im Mörtel betrug beim Versagen 185–205 N/mm<sup>2</sup>. Die Druckfestigkeit des Mörtels liegt bei ca. 80 N/mm<sup>2</sup>, die Würfeldruckfestigkeit des bei der CPC-Platte verwendeten Betons bei ca. 100 N/mm<sup>2</sup>. Die Versuche zeigten, wie die Druckfestigkeit des Mörtels/Betons dank der biaxial vorgespannten Carbonbewehrung in der CPC-Platte erhöht wird. Die gemessene Versagenskraft liegt wesentlich über der berechneten Kraft aufgrund des passiven biaxialen Spannungszustands der CPC-Platte.

### 4.2 Versuch verschraubter Geländeranschluss

Bei der Entwicklung des Geländers wurde darauf geachtet, dass bei einer Überbelastung zuerst die Staketten des Geländers die Fließspannung erreichen, bevor die Brü-

**Tab. 2** Berechnete Kraft verschiedener Versagemechanismen  
Calculated force of various failure mechanisms

Versagen des Mörtels auf Druck		14,4 [kN] **	100%
Versagen des Stahlblechs auf Schub	berechnet	34,3 – 64,8 kN*	238 – 450%
Versagen des Blechs auf Druck		30,6 – 57,6 kN*	212 – 400%
Versagen bei den Versuchen	gemessen 3 Versuche	33,0 – 38,0 kN	229 – 263%

\* je nach Versagensmechanismus

\*\* Datenblatt Sika-Grout-311; 28-Tage-Druckfestigkeit; ohne Berücksichtigung Teilflächenpressung

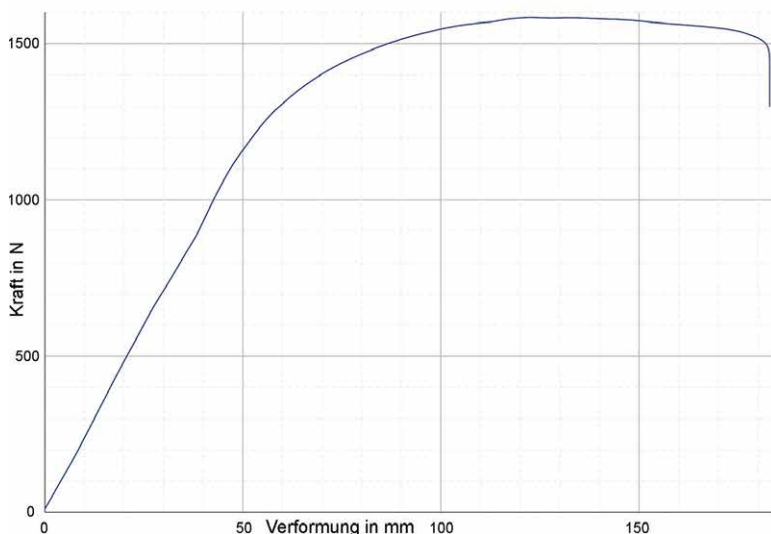
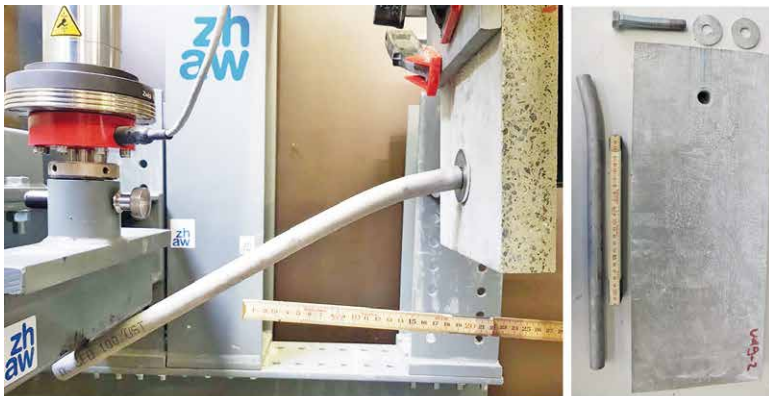


**Bild 7** Verbindungsversuch mit Plastifizierung des Stahlhockens und nachträglichen Abplatzungen im Beton  
 Connection test with plastification of the steel cam and subsequent spalling in the concrete (ZHAW)

ckenplatte im Einspannbereich beschädigt wird, und dass für die Befestigung nur normal erhältliche Katalogteile verwendet werden und das Geländer bei Beschädigung einfach und schnell ersetzt werden kann. Zwei Befestigungsarten wurden für das Geländer getestet. Bei Typ 1 bestand das eine Ende der Geländerstaketen aus einer Gewindestange. Dieses Ende wurde durch ein vorbereitetes Loch in der CPC-Bohle gesteckt und mittels einer

Mutter fixiert. Bei Typ 2 verfügten die Geländerstaketen über ein Innengewinde. Die Staketen wurden auf eine Unterlagsscheibe über ein vorbereitetes Loch in der CPC-Bohle gestellt und mittels einer Schraube von der Unterseite der CPC-Bohle her befestigt. Die Prüfkörper, bestehend aus einer CPC-Bohle und je ein oder zwei daran befestigten Staketen, wurden eingespannt und die Stakete mittels einer Druckfinne quer belastet. Die Probekörper wurden entweder kraftgeregelt (50 N/s) oder lagegeregelt (1 mm/s) belastet. Letzteres Vorgehen hatte den Vorteil, dass eine hohe Belastungsgeschwindigkeit nach dem Erreichen der Fließspannung der Staketen vermieden wurde. Bei allen Versuchen wurde ein Kraft-Wegdiagramm am Krafteinleitungspunkt kontinuierlich digital aufgezeichnet.

Beim Befestigungstyp 1 versagte die CPC-Bohle, bevor sich die Staketen plastisch verformten. Beim Befestigungstyp 2 wurde die Fließspannung der Staketen erreicht, bevor die CPC-Bohle Schaden nahm. Das Ergebnis eines Versuchs der Befestigungsart Typ 2 zusammen mit dem dazugehörigen Kraft-Wegdiagramm ist in Bild 8 ersichtlich. Dank der Versuche konnte auch ermittelt werden, wie tief die Schraube bei der zweiten Befestigungsart im Innengewinde der Stakete verschraubt werden muss, damit das in der SIA-Norm [7] vorgegebene Einspannmoment übernommen werden kann.



**Bild 8** Geränderversuch Typ 2: oben links: während Versuch; oben rechts: nach Versuch; unten: Kraft-Wegdiagramm  
 Railing test type 2: top left: during test; top right: after test; bottom: force-displacement diagram (ZHAW)



## 4.3 Großversuch Brücke

### 4.3.1 Konzept

Begleitend zur rechnerischen Auslegung der Lothenbachbrücke in Zug wurden auch Großversuche konzipiert. Dabei wurde das gesamte Zusammenwirken der einzelnen Elemente final getestet und das Verhalten der Brücke unter zwei Belastungssituationen experimentell überprüft. Die erste Belastungssituation hatte zum Ziel, die Tragsicherheit der Brücke gemäß Lastmodell experimentell zu überprüfen. Mittels der zweiten Belastungssituation wurde für die Verbindung zwischen CPC-Platte und CFK-Träger die maximal aufnehmbare Querkraft ermittelt. Mit den aus den Versuchen gewonnenen Informationen wurde in einem zweiten Schritt die Biegesteifigkeit der Brücke so festgelegt, dass für das Bauwerk auch die Durchbiegung und die Richtwerte für die Eigenfrequenz eingehalten werden.

Die Versuche wurden an einem repräsentativen Ersatzträger, bestehend aus einer 0,86 m breiten und 40 mm starken CPC-Platte und einem CFK-Halbträger, durchgeführt (Bild 9). Bei beiden Versuchen wurde der Träger in einem Vier-Punkt-Biegeversuch als einfacher Balken belastet. Die Krafteinleitung erfolgte über zwei 20 mm dicke Stahlplatten, welche eine Grundfläche von  $200 \times 300 \text{ mm}^2$  aufwiesen. Die Spannweite zwischen den zwei Auflagern betrug 4,44 m. Die Krafteinleitung erfolgte hydraulisch mit einem Druckzylinder. Um allfällige Verdrehungen messen zu können, wurde beidseitig in Trägermitte je ein Wegaufnehmer angebracht. Der Unterschied zwischen beiden Versuchen lag in der Distanz zwischen den Krafteinleitungspunkten. Im ersten Versuch wurde der Träger nur bis auf eine definierte Kraft belastet und nicht bis zum Bruch.

### 4.3.2 Versuch 1: Kombination von maximaler Querkraft und Moment gemäß Lastmodell

Die Distanz zwischen den zwei Krafteinleitungspunkten betrug bei diesem Versuch 900 mm. Der Versuch wurde so ausgelegt, dass bei einer Gesamtkraft von 47 kN im Träger gleichzeitig das maximale Biegemoment in Kombination mit der maximalen Querkraft gemäß Lastmodell auftritt (Bemessungswert). Bei der Brücke würden diese Maximalwerte nicht in Kombination auftreten. Der Träger zeigte bis zu einer Kraft von 100 kN ein linear elastisches Verhalten. Die Traglastreserve des Trägers für die Kombination von Querkraft und Moment liegt demzufolge gegenüber dem Lastmodell bei einem Faktor von über 2,1. Die rechnerisch erwartete Bruchlast lag bei minimal 80 kN (Versagen CFK-Halbträger auf Zug). Der Träger wurde nicht bis zum Bruch geprüft, damit er für weitere Untersuchungen zur Verfügung stand. Eine Verdrehung des Trägers hat trotz der sehr großen Biegeverformungen von  $L/50$  nicht stattgefunden.



**Bild 9** Versuch 1: Vier-Punkt-Biegeversuch des gesamten Hybridträgers  
Experiment 1: Four-point bending test of the entire hybrid beam (ZHAW)

### 4.3.3 Versuch 2: Schubversagen

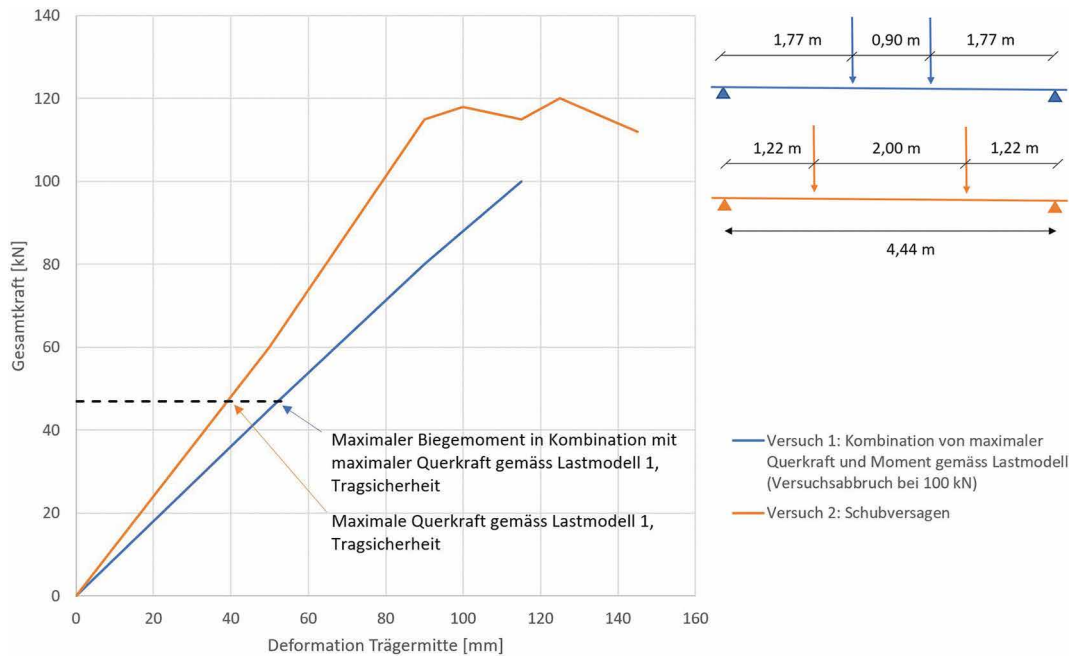
Der Träger von Versuch 1 wurde wiederverwendet. Die Distanz zwischen den zwei Krafteinleitungspunkten wurde auf 2 m erhöht. Ziel war es, ein Schubversagen bei den Nocken zu provozieren. Die Bruchkraft des Trägers lag bei 120 kN. Bis zu einer Last von 117 kN war ein linearer Verlauf im Kraft-Verformungsdiagramm ersichtlich (Bild 10). Die Traglastreserve des Trägers für die Querkraft gegenüber dem Lastmodell liegt somit bei einem Faktor von ca. 2,4. Eine Verdrehung des Trägers hat nicht stattgefunden. Das Versagen des Bauteils erfolgte wie erwartet durch das Abscheren der sechs ersten Zähne bei einem Auflager. Beim anderen Trägerende waren keine Beschädigungen zu sehen. Im Bereich des maximalen Moments blieb der CFK-Träger intakt und wies keine Beschädigungen auf.

### 4.3.4 Gebrauchstauglichkeit und Eigenfrequenz

Mittels der zwei oben beschriebenen Versuche konnte die Biegesteifigkeit  $EI$  des Versuchsträgers berechnet werden. Bei der Anwendung dieser Biegesteifigkeit für die Brücke zeigte sich bei der Berechnung der Durchbiegung, dass zur Einhaltung der Gebrauchstauglichkeit des häufigen Lastfalls gemäß SIA 261 die Biegesteifigkeit ca. um den Faktor 2,25 erhöht werden muss. Dies wurde bei der verbauten Brücke erreicht, indem die Wandstärke der Carbonträger verdoppelt und anstelle einer 40 mm starken CPC-Platte wie im Versuch eine 60 mm CPC-Platte verwendet wurde. Mit diesen Anpassungen wird auch der Richtwert für die Eigenfrequenz eingehalten.

## 5 Von den Einzelteilen zum Endprodukt

Außer den zwei CFK-Trägern wurde die gesamte Tragkonstruktion der Brücke aus einer standardisierten, 60 mm starken CPC-Platte ( $2,4 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ ) hergestellt (Bilder 11 und 12). Das durch die CPC AG industriell produzierte Halbprodukt wurde vollautomatisch gebürstet, Löcher für die Verschraubungen gebohrt und Fräsungen er-



**Bild 10** Kraft-Wegdiagramm Hybridträger bei den Versuchen 1 und 2  
Force-displacement diagram of the hybrid beam in experiments 1 and 2 (ZHAW)



**Bild 11** Tragkonstruktion der Hybridbrücke im 5-Achs-CNC-Bearbeitungszentrum  
Support structure of the hybrid bridge in the 5-axis CNC machining centre (CPC-AG)



**Bild 12** Zugeschnittene Querstege der Hybridbrücke  
Cut crossbars of the hybrid bridge (ZHAW)

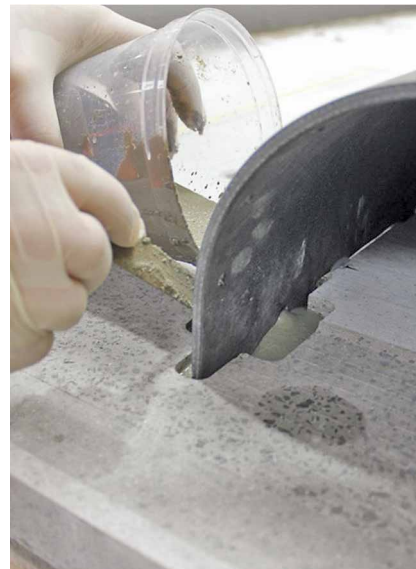
stellt. Dies erfolgte im 5-Achs-CNC-Bearbeitungszentrum, bei dem direkt CAD-Daten eingelesen werden können. Die Carbonträger wurden von der Firma aXpel wernli composites AG (Hottwil) einbaufertig geliefert. Mit 23 kg/Stück konnten sie einfach gehandhabt und mit der CPC-Platte verbaut werden (Bild 13). Die Brückenplatte wurde mit der späteren Fahrbahnseite nach unten auf in der Höhe präzise ausgerichtete Auflagerböcke gelegt. Die Platte erhielt dabei die gewünschte Überhöhung in Brückenmitte. Um die Verformung zu erreichen, genügte das Eigengewicht. Die Fräsungen in der Platte für das Vermörteln der Platte mit den Carbonträgern wurden vorgehäst. Anschließend wurden die Carbonträger in den Fräsungen positioniert. Das Wasser wurde aus den Fräsungen entfernt und die Fräsungen mit dem Mörtel ‚SikaGrout-311‘ vergossen (Bild 14). Die Querstege, die das Auflager bilden, wurden auf die Carbonträger gesteckt und die Spal-

ten zwischen Steg und Carbonträger mit Vergussmörtel verfüllt.

Für die Erstellung des Geländers wurde im Handlauf in jedes fünfte Loch ein Gewindestift eingeklebt. Diese sorgen für die vertikale Sicherung des Handlaufs. Die Staketten wurden positioniert und mit Schrauben brückenunterseitig verschraubt. Anschließend wurde der Handlauf auf den Staketten positioniert und mit Madenschrauben gesichert. Die fertige Brücke wurde komplett mit Geländer auf einem Tieflader zum Bauplatz geliefert. Mit einem leichten Mobilkran wurden zuerst die der Lastverteilung dienenden CPC-Plattenstreifen auf der vorbereiteten Widerlagerpackung platziert (Bild 15b). Anschließend wurde die gesamte Brücke passgenau eingesetzt und konnte so direkt an die Bauherrschaft übergeben werden (Bilder 15 und 16).



**Bild 13** Verbau der CFK-Bohlen (23 kg/Stk) mit dem Brückendeck  
Connection of the CFRP beams (23 kg/piece) with the bridge deck (CPC-AG)



**Bild 14** Verfüllen der Verzahnung zwischen CPC-Platte und CFK-Träger mit SikaGrout-311  
Filling the interlock between CPC slab and CFRP girder with SikaGrout-311 (ZHAW)

## 6 Vorteile des neuen Brückensystems

### 6.1 Vergleich

In der Folge wird am Beispiel der Situation in Turbenthal die entwickelte Hybridbrücke mit einer konventionellen Brücke mit Stahllängsträgern verglichen (Bild 17). Technische Aspekte der beiden Bauweisen werden aufgezeigt und die ökologischen Bilanzen der beiden Brückensysteme diskutiert.

### 6.2 Technische Aspekte

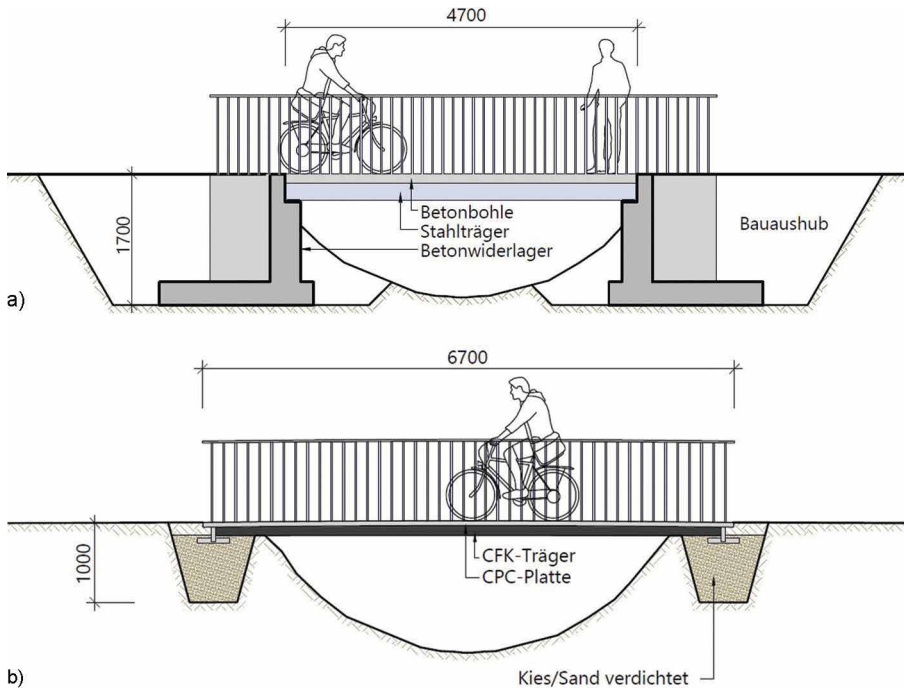
In Bild 17 sind die beiden Brückensysteme mit den damit verbundenen Terraineingriffen abgebildet. Wie darauf ersichtlich, hat die Hybridbrücke gegenüber der Stahlbetonbrücke verschiedene Vorteile: Da die Hybridbrücke



**Bild 15** Versetzarbeiten vor Ort: a) Erstellung Sand-/Kieskoffer; b) Versetzen Auflagerplatte; c) Versetzen der Brücke  
Work on site: a) creation of sand/gravel packing; b) positioning of support plate; c) positioning of bridge (ZHAW)



**Bild 16** Endprodukt der Brücke Turbenthal  
Finished bridge in Turbenthal (ZHAW)



**Bild 17** Schematische Darstellung zweier Brückensysteme für die Situation in Turbenthal: a) Konventionelle Brücke aus Stahlbeton und Stahllängsträgern; b) Hybridbrücke aus CPC-Platte und CFK-Träger  
 Schematic representation of two bridge systems for the situation in Turbenthal: a) Conventional bridge made of reinforced concrete and steel longitudinal beams; b) Hybrid bridge made of CPC slab and CFRP beams (ZHAW)

keine Stahlteile enthält, kann sie direkt ins Erdreich eingebaut werden. Dies ist bei der Brücke mit Stahllängsträgern nicht möglich, da die Auflager umlüftet sein müssen. Diese Eigenschaft zusammen mit ihrem erhöhten Gewicht führt dazu, dass große Widerlager notwendig sind. Für diese sind, wie in Bild 17 dargestellt, relativ große Terraineingriffe notwendig, um die Lasten gut zu verteilen und die vorgegebene Frosttiefe zu erreichen. Bei der Hybridbrücke hingegen reichen eine einfache Auflagerplatte und ein kleiner Aushub für die Kiespackung. Dieser Unterschied im Aushubvolumen verringert die Arbeitszeit vor Ort, reduziert das Risiko auf allfällige Werkleitungen zu treffen und verkleinert Anforderungen an die dafür benötigten Baumaschinen. Da vor Ort keine Betonarbeiten erforderlich sind, wird die Baustelle quasi wetterunabhängig. Zudem kann auf eine logistisch aufwendige und kostspielige Installation verzichtet werden.

## 6.3 Ökologische Aspekte

### 6.3.1 Erläuterung

In diesem Abschnitt wird für beide Brücken die CO<sub>2</sub>-Bilanz und der Ressourcenverbrauch von nicht nachwachsenden Rohstoffen analysiert. Beide Analysen enthalten zudem grobe Schätzwerte für eine zukünftige Hybridbrücke, bei welcher die heutigen (teilweise noch in der Entwicklung stehenden) Möglichkeiten für eine nachhaltige Carbonherstellung umgesetzt werden.

### 6.3.2 CO<sub>2</sub>-Bilanz

Die CFK-Träger der Hybridbrücke wurden im duroplastischen Fertigungsprozess hergestellt. Die Analyse des Treibhauspotenzials dieses Fertigungsprozesses zeigt, dass das CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Kilo Endprodukt stark von der verwendeten Energiequelle (Wasserkraft/Windkraft/Strommix), der Energieart (elektrisch/thermisch/Strommix), vom Produktionsgebiet (Nord-Mittelamerika/Europa/Asien/anderes) sowie von der Verschnittrate in der Produktion abhängt [10]. Für das Treibhauspotenzial dieses Produkts ist dementsprechend eine große Spannweite an Werten in der Literatur zu finden. Der in diesem Bericht verwendete Wert wurde den in [10] aufgeführten Werten gemäß Einschätzung der Autoren entnommen.

Für die Abschätzung des Treibhauspotenzials einer zukünftigen Hybridbrücke wurde angenommen, dass das Carbon dabei anstatt aus Erdöl aus nachwachsenden Rohstoffen wie Cellulose oder Lignin gewonnen wird. Dies ist heute bereits möglich und wird beispielsweise von der Firma Centrotherm in Deutschland angewandt [11]. Dank dem Rohstoff, der während des Wachstums CO<sub>2</sub> bindet, und einer energieeffizienten Herstellung soll dabei der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck reduziert werden. Durch die fortschreitende Technologie in der Herstellung kann der Fußabdruck noch weiter verkleinert werden. Die CO<sub>2</sub>-Bilanz der verschiedenen Baustoffe ist in Tab. 3 aufgelistet.

Die CO<sub>2</sub>-Emission der in Turbenthal verbauten Hybridbrücke ist ca. zu 55 % geringer als diejenige einer konventionellen Brücke aus Stahlbeton. Dank fortschreitender

**Tab. 3** CO<sub>2</sub>-Bilanz pro Brückentyp mit Widerlager  
CO<sub>2</sub> balance per bridge type with abutment

	ca. CO <sub>2</sub> -Emission heute	Konventionelle Stahlbetonbrücke [t]	Hybridbrücke (CPC-Platte mit CFK-Träger) [t]	Zukünftige Hybridbrücke [t]
Stahl	1,4 [t CO <sub>2</sub> /t] [12] [13]	1,8	–	–
Carbon	22 [t CO <sub>2</sub> /t] [10]	–	1,1	0,2*
Beton C25/30	0,215 [t CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] [13]	1,5	–	–
Beton C80/95	0,394 [t CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ] [13]	–	0,4	0,4
<b>Summe</b>		<b>3,3</b>	<b>1,5</b>	<b>0,6</b>

\* grobe Abschätzung, Basismaterial Carbon z. B. Algen, Cellulose oder Lignin

**Tab. 4** Massenbilanz von nicht nachwachsenden Rohstoffen pro Brückentyp mit Widerlager  
Mass balance of non-renewable raw materials per bridge type with abutment

	Konventionelle Stahlbetonbrücke [t]	Hybridbrücke (CPC-Platte mit CFK-Träger) [t]	Zukünftige Hybridbrücke [t]
Kies/Sand	13,4	8,9	8,9
Zement	2,1	0,54	0,54*
Stahl	1,3	0	0
Carbon + Harz:			
CFK – Träger	0	0,046	0**
Carbonbewehrung	0	0,006	0**

\* zusätzlich mindestens teilweise Ersatz durch andere Materialien möglich

\*\* grobe Abschätzung

Technologien wird zudem abgeschätzt, dass für zukünftige Hybridbrücken die CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen mit einer vergleichbaren Brücke aus Stahlbeton um ca. 80% reduziert werden können.

### 6.3.3 Massenbilanz nicht nachwachsender Rohstoffe

Aufgrund der rückläufigen Ressourcenvorkommen von Sand, Schotter und Eisenerz [1, 2] ist es interessant, die Massenbilanz dieser nicht nachwachsenden Rohstoffe eines Bauwerks zu analysieren. Für die Abschätzung der Massenbilanz einer zukünftigen Hybridbrücke wurde angenommen, dass die Carbonfasern und das Harz aus synthetisch hergestelltem Treibstoff [14] oder nachwachsenden Rohstoffen [11] gewonnen werden. Die Massenbilanz der verschiedenen Rohstoffe pro Brückentyp ist in Tab. 4 dargestellt.

## 7 Zusammenfassung

Mit der Realisierung der Brücke, bestehend aus einer CPC-Platte und zwei CFK-Trägern, wurde in Turbenthal eine innovative Bautechnik verwendet. Diese zeichnet sich durch Vorteile in der Bauausführung sowie eine positiven Ökobilanz aus. Betreffend Ökobilanz und Ressourcenverbrauch besteht in Zukunft zusätzlich ein sehr großes Potenzial. Neue Brücken können mit diesem neuen System einfach und rasch vor Ort versetzt oder alte Brücken damit ersetzt werden. Die bestehenden Widerlager können dabei wiederverwendet werden und dank des geringen Eigengewichts der Hybridbrücke die Nutzlast sogar erhöht werden.

## Literatur

- [1] Peduzzi P. (2014) *Sand, rarer than one thinks* in: Environmental Development, pp. 208–218.
- [2] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Staff. *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences* in: OECD; 2019.
- [3] Kurath J. (2019) *Halbzeuge aus vorgespanntem Carbonbeton als tragende Bauteile* in: Structure, Jun 1–2, pp. 53–8.
- [4] Osman-Letelier J. P.; Hückler A.; Schlaich M. (2021) *Dünnwandige Fertigteile aus vorgespanntem Carbonbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 116. <https://doi.org/10.1002/best.202100019>
- [5] Kurath J. (2019) *Eine mögliche zukünftige Bauweise für den Hoch- und Brückenbau mit Carbonbeton* in: Swissplastic Innovation Lunch, Winterthur, 28. März.
- [6] Sydow A.; Kurath J.; Steiner P. (2019) *Extrem leichte Brücke aus vorgespanntem Carbonbeton: Fahrradbrücke über die Eulach in Winterthur/Schweiz aus vorgespanntem Carbonbeton* in: Beton- und Stahlbetonbau 114, H. 11, S. 869–876. <https://doi.org/10.1002/best.201800108>
- [7] Norm SIA 261 (2014) *Einwirkungen auf Tragwerke*. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- [8] Norm SIA 262 (2013) *Betonbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein.
- [9] BÜV-Empfehlung (2010) *Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen (TKB) – Entwurf, Bemessung und Konstruktion*.
- [10] Hohmann A. (2019) *Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen* [Dissertation]. Technische Universität München.
- [11] mm Maschinen Markt (2021) *Nachwachsende Carbonfasern sind günstiger als fossile Vorfahren* [online]. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/nachwachsende-carbonfasern-sind-guenstiger-als-fossile-vorfahren-a-932522/> [Zugriff am: 25.05.2021].
- [12] International Energy Agency (2021) *Iron and Steel Technology Roadmap – Direct CO<sub>2</sub> emissions in the iron and steel sector by scenario, 2019 – 2050* [online]. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap> [Zugriff am: 27.05.2021].
- [13] Prunell P. (2012) *Material nature versus structural nurture: the embodied carbon of fundamental structural elements* in: Environmental science & technology 46, no 3, pp. 454–61.
- [14] Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2021) *CO<sub>2</sub>-neutraler Treibstoff aus Luft und Sonnenlicht* [online]. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2019/06/mm-solare-mini-raffinerie.html> [Zugriff am: 06.05.2021].

## Autorin und Autoren



BSc ZFH in Bauingenieurwesen Christian Lowiner  
(Korrespondenzautor)  
lowi@zhaw.ch  
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Fachgruppe Faserverbundkunststoffe FVK  
Institut Konstruktives Entwerfen IKE  
Tössfeldstrasse 27  
8401 Winterthur, Schweiz



Prof. dipl. Bauing. ETH Josef Kurath  
krjo@zhaw.ch  
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Fachgruppe Faserverbundkunststoffe FVK  
Institut Konstruktives Entwerfen IKE  
Tössfeldstrasse 27  
8401 Winterthur, Schweiz



MSc. BEng. Antje Sydow  
sydo@zhaw.ch  
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Fachgruppe Faserverbundkunststoffe FVK  
Institut Konstruktives Entwerfen IKE  
Tössfeldstrasse 27  
8401 Winterthur, Schweiz

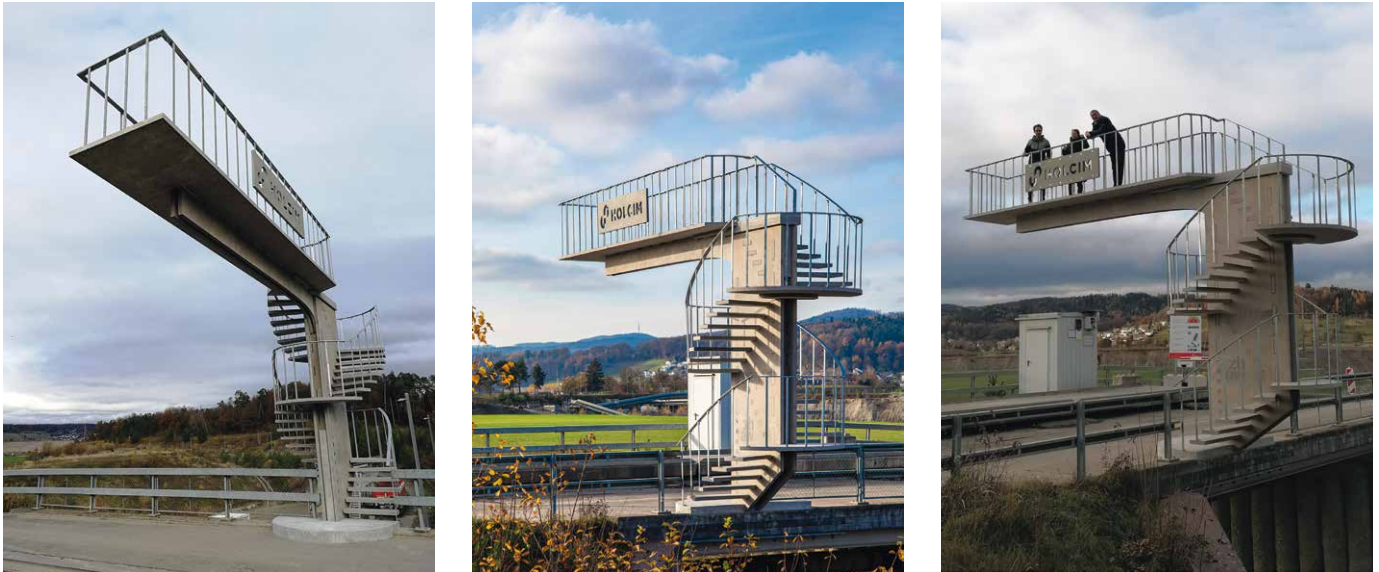


MSc EPFL Bauing. Basil Wietlisbach  
basil.wietlisbach@hispeed.ch  
CPC AG  
Niederfeldstrasse 5  
8450 Andelfingen, Schweiz

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Lowiner, C.; Kurath, J.; Sydow, A.; Wietlisbach, B. (2022) *Hybridbrücken aus CPC-Platten und Carbonhalbträgern*. Beton- und Stahlbetonbau 117, H. 2, S. 133–144. <https://doi.org/10.1002/best.202100066>

Christian Lowiner ■ Michèle Bühler ■ Josef Kurath



**Bild 1.** Die Bridge to the Future gilt als Meilenstein in der Geschichte der CPC-Bauweise – ihre Entwickler Micha Brunner (cpc AG; Produktion), Kerstin Wassmann (Holcim AG; klinkerfreier Beton) und Josef Kurath (ZHAW; CPC-Bauweise und Entwurf) genießen den Ausblick (Quelle: CPC AG)

## Bridge to the Future und Verbindungssteg Campus A – ein Weg in die Zukunft für den Betonbau

**CPC – carbon prestressed concrete – ist eine alternative Bauweise zum konventionell verwendeten Stahlbetonbau. Die Stahlbewehrung ist ersetzt durch mehrere Lagen stark vorgespannter Carbondrahtnetze. Dank der viel höheren Zugfestigkeit von Carbon gegenüber gebräuchlichem Baustahl, des Wegfalls der ansonsten notwendigen hohen Bewehrungsüberdeckung und der Vorspannung der Carbonfasern können äußerst schlanke Tragkonstruktionen realisiert werden. Gerade auch die Nachhaltigkeit von Betonbauten wird dadurch um Faktoren verbessert. Innerhalb einer größeren Forschungsarbeit wurden stahl- und klebefreie Verbindungen zwischen CPC-Platten entwickelt. Erst dank dieser neuartigen Verbindungstechnik konnten die zwei hier gezeigten Bauwerke in dieser Reduziert- und Einfachheit gebaut werden. Darum wird in diesem Bericht vertieft auch auf diese Verbindungstechnik eingegangen. Beim zweiten Bauwerk kam zudem eine komplett neue Betonklasse zur Anwendung.**

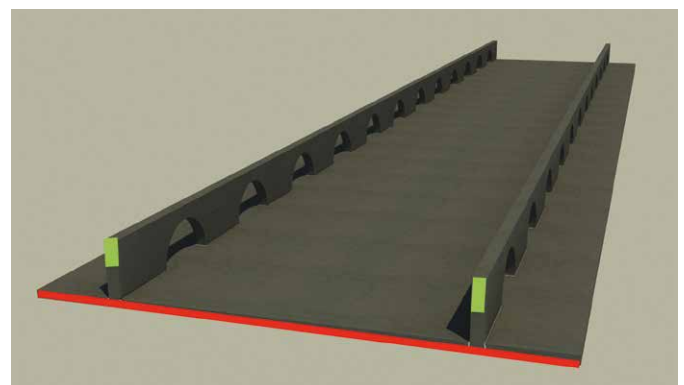
### Allgemein

Zurzeit liegt das Einsatzgebiet der CPC-Platten hauptsächlich bei sekundären Tragelementen. Bohlenbeläge bei Steganlagen oder Brücken, Balkonplatten und Treppentritte werden daraus gefertigt. 2016 konnte das erste eigenständige Gesamttragwerk, die „Leichteste Betonbrücke der Welt“ (Eulachbrücke Campus T in Winterthur, Schweiz) in CPC-Bauweise erstellt werden. Es zeigte sich, dass die Ökobilanz enorm gut war im Vergleich zu einer Stahlbetonbrücke. Die eingeklebten metallischen Anker in den Verbindungen zwischen den metallfreien CPC-Platten überzeugten aber noch nicht vollends. Um mit der CPC-Bauweise ganze Bauwerke vollständig metallfrei erstellen zu können, werden an der ZHAW zusammen mit der cpc AG im Rahmen eines durch die Innosuisse unterstützten

Forschungsprojekts Steckverbindungen entwickelt, welche ein überraschend hohes Tragvermögen aufweisen. Mit diesen Verbindungen soll in einer ersten Phase ein Modulbrückensystem für Fußgänger, Radfahrer und Unterhaltsfahrzeuge entwickelt werden, welches bis zu Spannweiten von über 16 m eingesetzt werden kann. Dabei kommt neben der Metallfreiheit auch dem ökologischen Fußabdruck eine zentrale Bedeutung zu.

### Modulbrückensystem CPC-Optima

Um die Materialmasse im Vergleich zur „Leichtesten Betonbrücke der Welt“ weiter zu reduzieren, zeigte es sich, dass die CPC-Platte nicht nur als Biegeplatte für den Belag genutzt werden soll, welcher auf Längsträgern aufliegt, sondern auch als Längszuggurt für das Gesamttragwerk. In der Brückenplatte ist enorm viel Carbonbewehrung auch in Brückenlängsrichtung vorhanden, welche genutzt wer-



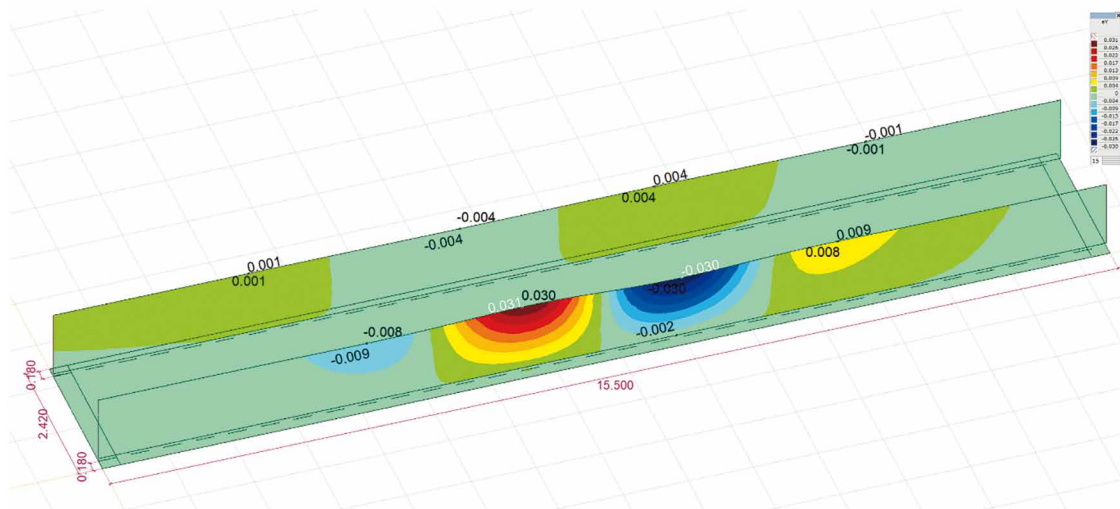
**Bild 2.** Modulbrückensystem CPC-Optima – die Brückenplatte ist der Zuggurt (rot), Druckgurt sind die Stegenden (grün) (Quelle: FG FVK ZHAW)

den kann. Enorm viel heißt  $200 \text{ g/m}^2$ . Aufgrund der Vorspannung der Platte durch die mehrlagigen, engmaschigen Carbonnetze kann die Platte auch im ungerissenen Zustand sehr hohe Zugkräfte aufnehmen und ist dadurch auf Zug belastet auch bei seltenen Lastfällen enorm steif. Die im Verbund wirkenden vertikalen Stege haben eine kleine Druckzone. Diese Weichheit wird durch die große Steifigkeit des Zuggurts im Gebrauchszustand kompensiert. Dank des kleinen Eigengewichts der Brücke und der hohen Festigkeit des C80/95-Betons genügt bereits die sehr kleine Druckzone einer 60 mm starken CPC60-4-4-Platte, um die notwendigen statischen Nachweise zu erfüllen.

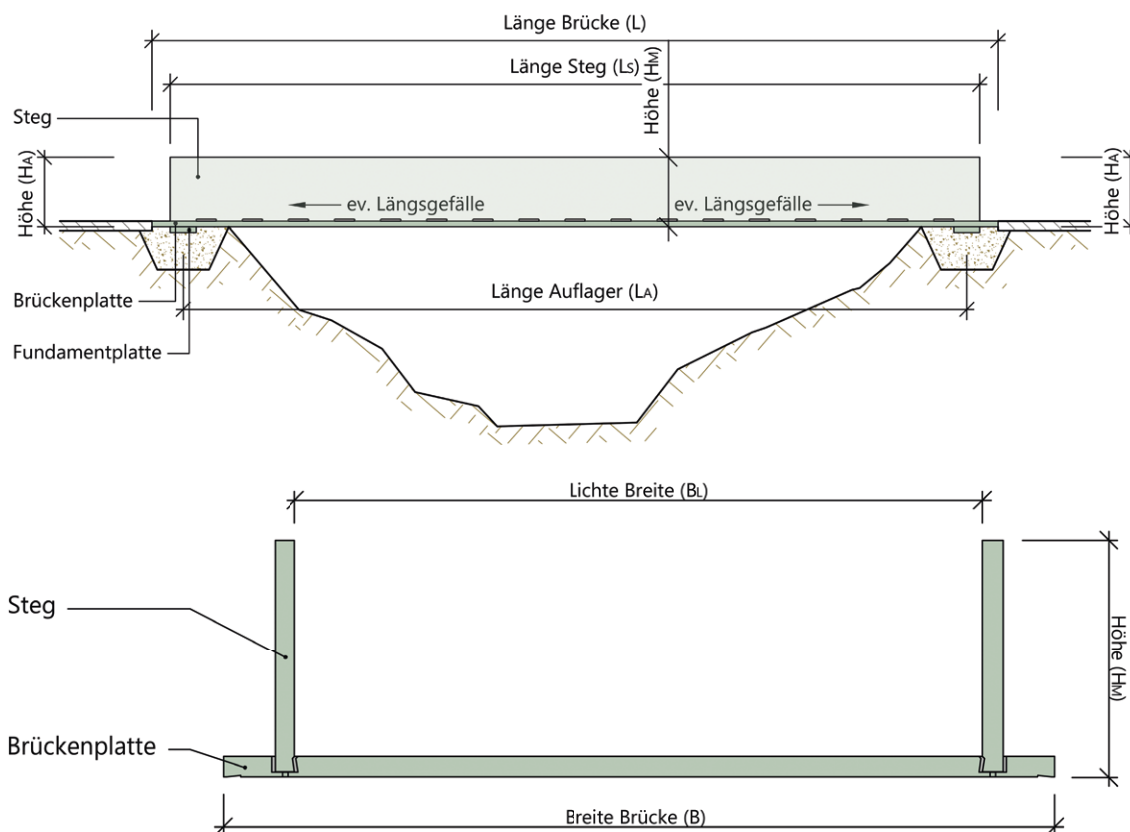
Die Bauteile sind für ein Bauwerk enorm schlank. Sie sind aber noch genügend dick, sodass es nicht zu Stabilitätsproblemen kommt.

### Kraftschlüssige Verbindung zwischen Steg und Brückenplatte

Dieses Tragwerk funktioniert nur, wenn die Verbindung zwischen Brückenplatte und den seitlichen Stegen die notwendigen Kräfte aufnehmen kann. Dies sind Längsschubkräfte, vertikale Zugkräfte aufgrund des Brückengewichts und der Verkehrslasten, Biegemomente und Querkräfte

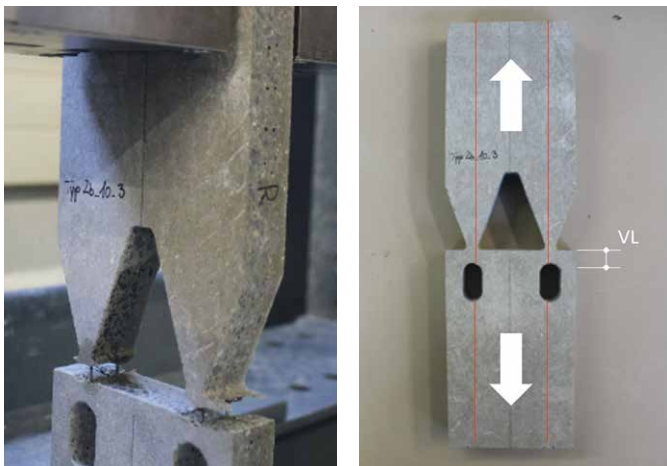
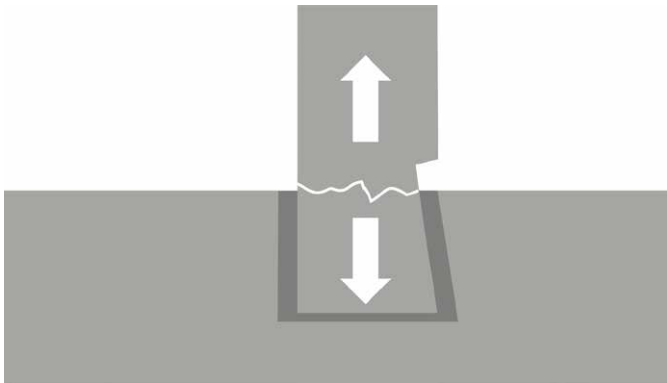
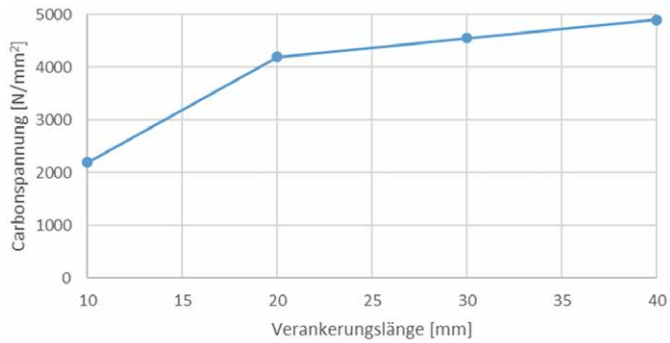


**Bild 3.** Stabilitätsberechnung Brücke: erste Knickform wird bei sechsfacher Traglast des maßgebenden Lastfalls erreicht (Quelle: SK&)



**Bild 4.** Brückensystem CPC-Optima – Längs- und Querschnitt; ersichtlich der kleine vorhandene Raum für die Verbindung zwischen Steg und Brückenplatte (Quelle: CPC AG)





**Bild 5.** Auszugsversuche der Carbonbewehrung; sehr kurze Verankerungslängen VL der Bewehrung (Quelle: FG FVK ZHAW)

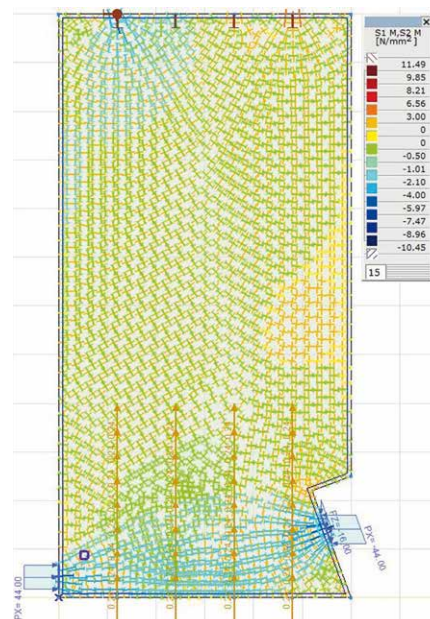
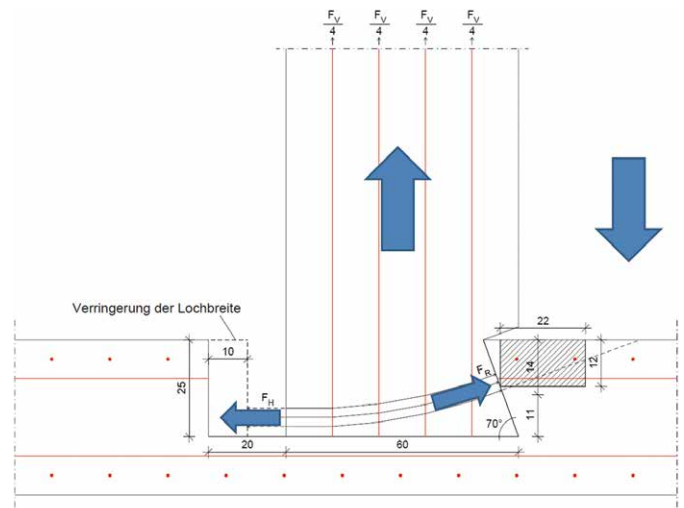
aus den Geländerlasten. Diese Lasten sind teilweise sehr hoch und der Platz für die Verbindung ist sehr klein. Weiter soll die Verbindung ohne Stahlteile auskommen und aufgrund der schlechten Hitzebeständigkeit auch auf Kleber verzichten.

Als Lösung konnte eine Steckverbindung gefunden werden, welche nur auf geometrischen Fräsungen an den CPC-Platten basiert. Die Steckverbindung wird nach dem Zusammenbau lediglich mit einem hydraulischen Mörtel vergossen. Sonst sind keine Hilfsmittel notwendig. Maßgebend ist dabei die sehr kurze Verankerungslänge, die die Carbonbewehrung in den CPC-Platten benötigt, um die Kräfte vom Carbondraht in den Beton zu leiten. In speziell entwickelten und durchgeführten Versuchsaufbauten konnte aufgezeigt werden, dass die Bewehrung bereits 10 mm ab Plattenkante auf Vorspannniveau und nach 40 mm auf Bruchniveau verankert ist. Diese sehr kurze Verankerungslänge ist notwendig, um ein Abreißen des eingesteckten und ausgemörtelten Nockens zu verhindern.

## Entwicklung der Verbindung

Mit theoretischen Tragwerksmodellen und verschiedenen Versuchsreihen wurde die Geometrie der Verbindung entwickelt, überprüft und optimiert. Beispielhaft wird hier das Tragvermögen der Verbindung anhand einer Versuchsreihe mit kombinierter Belastung aus vertikalem Zug und Biegung aufgezeigt. Der Versuch diente zur grundsätzlichen Untersuchung der Verankerung des Nockens in der Brückenplatte und der Tragfähigkeit des Nockens selbst.

In einem ersten Schritt wurde ein Druckgurtmodell entworfen und dieses mit Computersimulationen überprüft. Es zeigte sich, dass der Keilwinkel eine zentrale Rolle sowohl für die Zugkraft wie auch – zwar weniger eindeutig – für die Verankerung des Biegemoments ist. Bei zu kleinen Keilwinkeln wird eine Lage der Vertikalbewehrung durchschnitten, was zu einer wesentlichen Verminderung der Traglast führt. Bei zu großen Keilwinkeln werden die Spreizkräfte in der Brückenplatte zu groß und führen zu Rissen in der Brückenplatte. Dadurch wird die Aussparung in der Brückenplatte aufgespreizt und ein Ausziehen des Stegs könnte zum Versagen der Verbindung führen. Die Berechnungen zeigten, dass die größte Effizienz der Keilverbindung bei einem Winkel von ca. 80° liegt.



**Bild 6.** Druckgurtmodell und FE-Simulation bei Keilwinkel 70° (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)

## Versuche und Auswertung

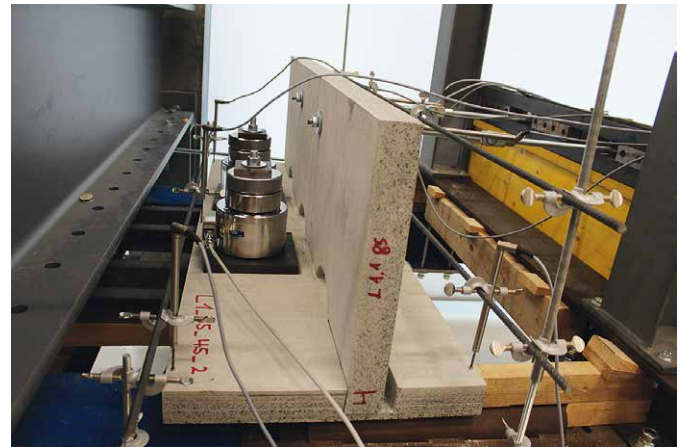
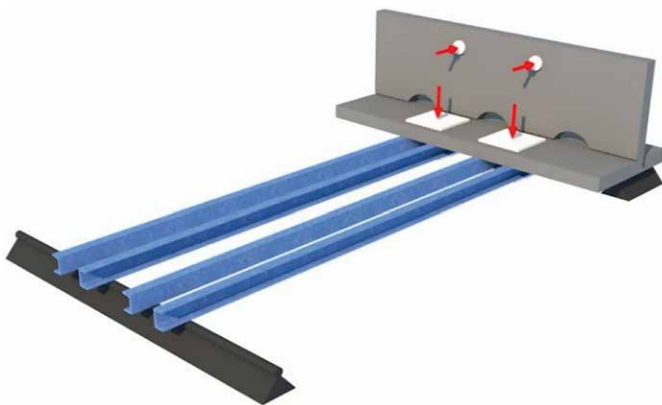
Es wurde eine Probekörpergeometrie von 1,40 m Länge und 0,50 m Breite gewählt. Auf der Länge von 1,40 m befinden sich insgesamt vier Nocken, vergossen wurden jedoch nur die beiden mittleren. Dies bewirkt, dass die Kraftübertragung nur über diese beiden mittleren Verbindungen stattfindet. Seitlich ist der Probekörper jeweils im Bereich des Stegs vertikal gelagert. Im Steg und in der Platte wurden für die Lasteinleitung je zwei Löcher gebohrt.

Der Ablauf der Kraftaufbringung verlief zunächst bei allen Versuchen nach demselben Schema. Als Erstes erfolgt die Aufbringung der Vertikallast auf 4,28 kN je Punktlast. Dies entspricht einer Flächenlast von 4 kN/m<sup>2</sup> plus Eigenlast der Brückenplatte. Nach Erreichen der Last wurde zudem die Horizontallast bis zu einer Einwirkung von  $qk = 0,8$  kN/m (Geländerlast) aufgebracht. Umgerechnet auf den Versuch entspricht dies pro Punktlast 1,55 kN. Danach folgt die Laststeigerung auf  $qk = 1,6$  kN/m (pro Punktlast 3,09 kN) und schließlich bis zum Lastfall Menschengedränge mit einer horizontalen Linienlast von  $qk = 3,0$  kN/m. Dies entspricht einer Punktlast von je 5,8 kN. Falls bis zu diesem Zeitpunkt noch kein Versagen eingetreten ist, wurde entweder die Vertikal- oder die Horizontalkraft bis zum Bruch gesteigert.

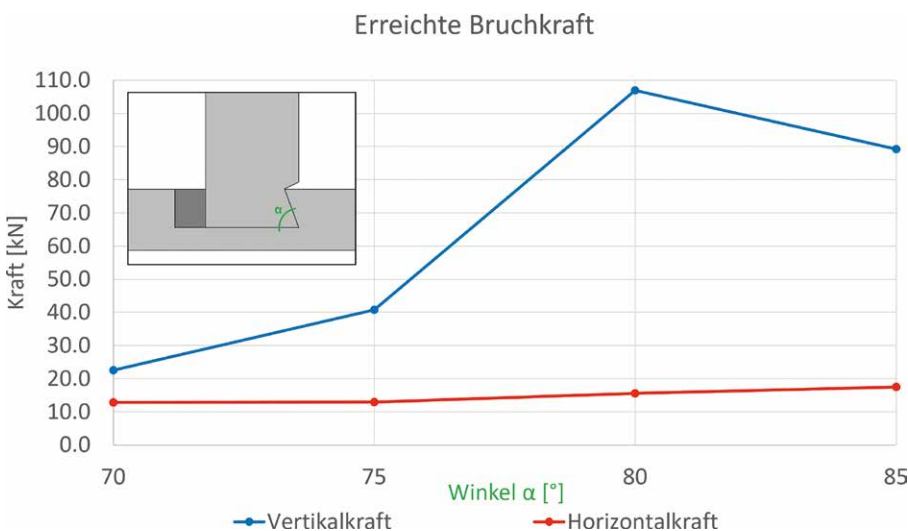
Die Berechnungen zeigten, dass die größte Effizienz der Keilverbindung bei einem Winkel von ca. 80° liegt. Um dies zu prüfen, wurden Versuche mit Winkeln von 70°, 75°, 80° und 85° für die Keilverbindung untersucht. Der Winkel von 80° als effektivste Keilneigung konnte mit den Versuchen bestätigt werden (Bild 8).

Durch die Versuche konnte aufgezeigt werden, dass die anfängliche Unsicherheit bezüglich des Ausreißen der Nocken infolge einer hohen Punktlast (Unterhaltsfahrzeug) unbegründet ist. Würde man das erreichte Traglastniveau eines Nockens (Vertikallast) auf die gesamte Brücke umrechnen, ergäbe sich eine fiktive Flächennutzlast von über 100 kN/m<sup>2</sup>. Dies liegt weit über dem Biegetragvermögen der gesamten Brücke. Bezüglich des Versagens der Stegelemente durch die angesetzte Geländerkraft konnte der Erwartungswert bestätigt werden. Dieser entspricht exakt dem Biegetragvermögen der CPC-Platten.

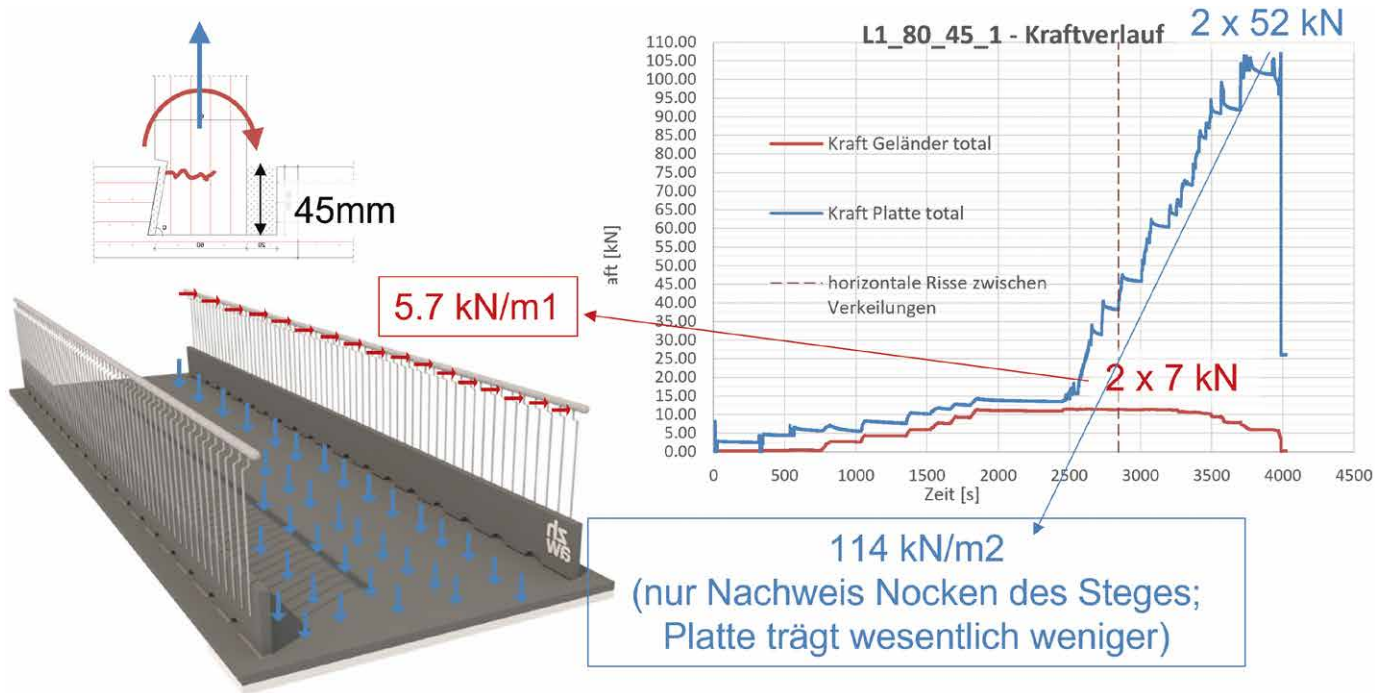
Die eigentliche Verbindung versagt nicht. Die Carbonbewehrung versagt oberhalb der Verbindung auf Zug. Die Risse infolge der horizontalen Spreizkräfte traten wie erwartet auf. Die Risse führten zu einer Verbreiterung der Ausnehmung in der Platte, aber bei keinem Versuch zu einem verfrühten Ausziehen der Verbindung aus der Platte. Interessant war, dass beim größten Keilwinkel von 85° der Betondruckgurt am unteren Ende des Nockens auf Druck versagte.



**Bild 7.** Versuchsaufbau für kombinierte Belastungsversuche Vertikal- und Horizontalkraft zur Überprüfung der Nockentragfähigkeit (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)



**Bild 8.** Versagenskraft bei kombinierter Belastung auf Zug und Biegung – in Blau Laststeigerung Vertikalkraft und in Rot Laststeigerung Horizontalkraft bis zum Bruch (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)



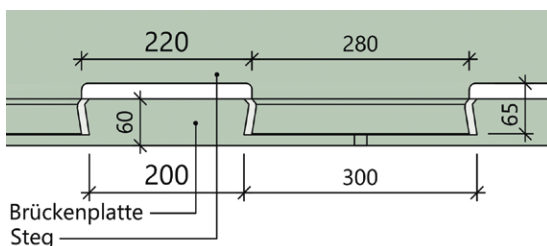
**Bild 9.** Steigerung der vertikalen Last bis zum Bruch bei gleichzeitigem Biegemoment infolge Geländerlast bei optimalem Keilwinkel von 80° (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)



**Bild 10.** Biegeversagen des Stegs oberhalb der Verbindung auf Höhe der Biegetragfähigkeit der Platte (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)



**Bild 11.** Querdruckversagen des Betons resp. Versagen des Druckgurts im untersten Bereich des Nockens bei einem Keilwinkel von 85° – die zugrunde gelegte Theorie stimmt gut mit den gemessenen Werten überein (Quelle: Masterarbeit Michèle Bühler)



**Bild 12.** Resultierende Verbindungsgeometrie CPC-Kappa<sub>Pat.pend</sub> für die Optima-Brücke (Quelle: CPC AG)

### Anwendungsbeispiel Verbindungssteg Campus A

Zum Jahreswechsel 2020 konnte der Studiengang Bauingenieurwesen der ZHAW im Neubaugebäude 142, welches direkt neben dem Gebäude G189/191 (Studiengang Architektur) auf dem ehemaligen Sulzer-Areal erstellt wurde, einziehen. Um den angehenden Bauingenieur:innen eine direkte Verbindung zur Cafeteria ins Gebäude G189 zu

ermöglichen, wurde auf ca. 12 m Höhe ein Verbindungssteg geplant und ausgeführt.

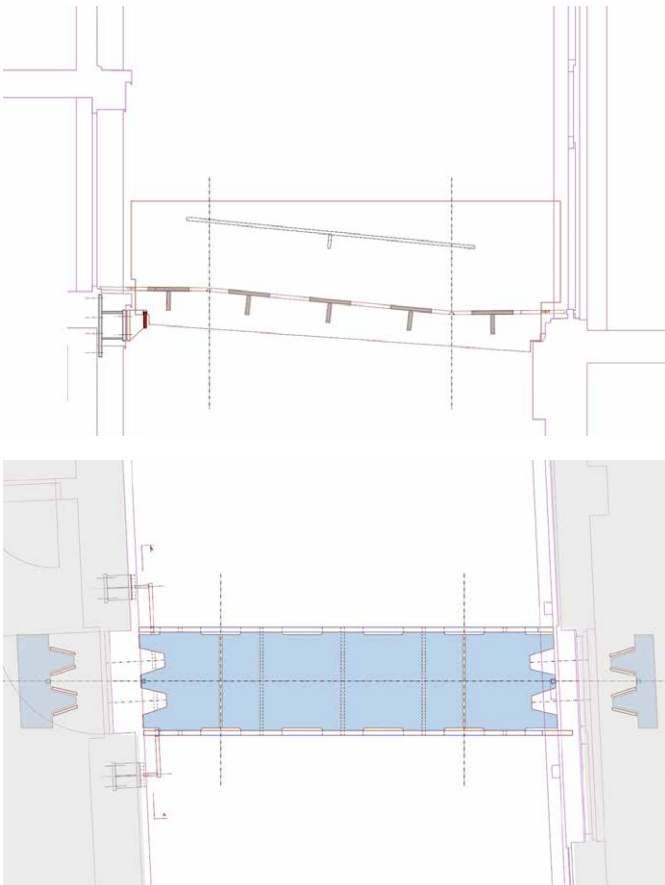
Für die Brücke wurde die CPC-Bauweise angewendet. Das Haupttragwerk bilden zwei stehende, 60 mm dicke CPC60-4-4-Scheiben mit je vier Lagen Carbonbewehrung orthogonal zueinander. Dies entspricht knapp 400 g Carbon/m<sup>2</sup>. Die stehenden Scheiben weisen Ausfräsungen für die dreiteilige Brückenplatte und die unter der Brücken-



**Bild 13.** Verbindungssteg Campus A (Quelle: Fachgruppe FVK ZHAW)

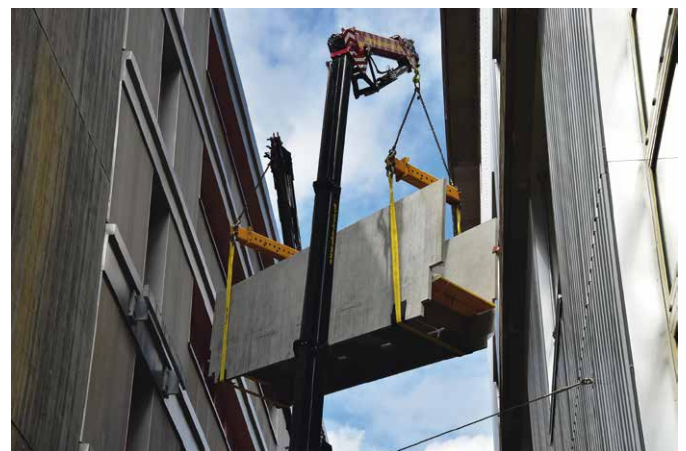


**Bild 15.** Zusammenbau der Brücke und Ausmörteln der Verbindungen (Quelle: CPC AG)



**Bild 14.** Längsschnitt und Grundriss mit den noch nicht gefügten Anschlussteilen für die Verlängerung der Brückenplatte in die Fassaden hinein (Quelle: Alexis Ringli, GadolaRingli Architekten)

platte quer verlaufenden Aussteifungsstege auf. Der Höhenunterschied von 50 cm zwischen den Geschossniveaus der beiden Gebäude wird mit der mittleren Brückenplatte ausgeglichen. Die Aussteifungsstege und Brückenplatten sind jeweils 40 mm dick (CPC40-2-2) und vertikal im Abstand von 10 mm zueinander gehalten. Im Verbindungsbereich entsteht dadurch zwischen allen drei Elementen eine durchgängige Fuge von 10 mm. Durch geschicktes Anordnen von Anfasungen der CPC-Platten im Verbindungsbereich und das Auffüllen des Spalts mit einem hydraulischen

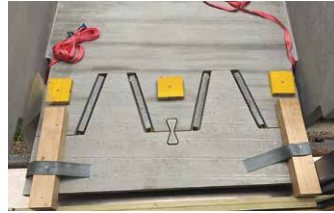


**Bild 16.** Eindrehen der Brücke; die Brückenplatte musste nachträglich in die Fassaden der Gebäude hinein auskragend verlängert werden (Quelle: CPC AG)

schon Mörtel kann eine kraftschlüssige Verbindung erzielt werden. Mittels Kleinversuchen wurde ein geeigneter Mörtel eruiert, welcher sowohl in horizontalen als auch in vertikalen Fugen gut zu handhaben war und die technischen Anforderungen erfüllt. Die Mörtelfuge wird durch die entwickelte Verbindung nur auf Druck belastet, die anfallenden Zugkräfte werden über die Carbonbewehrung in den CPC-Platten aufgenommen.

Da die Brücke in der Gasse eingeschwenkt werden musste, ist die Passerelle etwas kürzer als die lichte Breite der Gasse. In den Anschlussbereichen wurde die Brückenplatte wegen der einspringenden Fassaden beidseitig nachträglich verlängert. Um Querkräfte und Momente der Anschlussplatte in die Brückenplatte einzuleiten, wurden knochenförmige Verbindungselemente aus CPC-Platten in den Spalt zwischen Brücken- und Anschlussplatte eingesetzt und mit einem hydraulischen Mörtel vergossen. So konnte die Brückenplatte in der Ebene biegesteif verlängert werden.

Als Auflager für die Passerelle konnte beim Gebäude 189/191 die ehemalige Kranbahn genutzt werden. Beim Gebäude 142 wurden bereits beim Bau Anschlusspunkte in die Tragkonstruktion integriert, an welche das in Stahl ausgeführte Auflager vor dem Versetzen der Passerelle mit Schrauben montiert werden konnte. Um ein Verschieben



**Bild 17.** Nachträgliche Verlängerung der Brückenplatte in die Fassade hinein mit knochenförmigen Verbindungsstücken in CPC und nachträglicher Vermörtelung (Quelle: CPC AG)

der Brücke in Längs- und Querrichtung zu verhindern, wurden die stehenden CPC-Scheiben und das Stahlaufleger eingeschlitzt und ineinandergesteckt. Ein Verdrehen der Brücke wird über einen Anschlagpunkt auf Seite des Gebäudes G191 verhindert, Quer- und Längsausdehnungen infolge Temperatur sind frei möglich.

### Anwendungsbeispiel Bridge to the Future mit klinkerfreiem und ph-neutralem Beton

Das neueste Projekt, bei dem die Steckverbindungen angewendet wurden, ist ein weiterer Meilenstein in der Geschichte der CPC-Bauweise. In Zusammenarbeit mit der Fachgruppe FVK der ZHAW und Holcim (Schweiz) AG wurde für die Erstellung der CPC-Platten der von Holcim entwickelte Zement Locarbo verwendet. Es handelt sich dabei um einen klinkerfreien Zement, der nichtalkalisch ist. Gerade zum Brennen von Klinker bei einer Temperatur von ca. 1450 °C werden sehr große Energiemengen benötigt. Weltweit entfallen ca. 8 % der gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Zement an. Dieser Beton kann nicht mit Stahlbewehrung eingesetzt werden, da er nicht vor Korrosion schützt.

Bei der verwendeten Betonmischung wurde eine rezyklierte Gesteinskörnung verwendet. Diese wurde künstlich carbonatisiert, um CO<sub>2</sub> zu binden. So entsteht eine CO<sub>2</sub>-Senke und es kann ein zusätzlicher Beitrag für die CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Atmosphäre geleistet werden. Mit diesen Maßnahmen wurde es möglich, den CO<sub>2</sub>-Ausstoß beim Beton von 210 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> auf 138 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> zu reduzieren. Des Weiteren konnten dank der CPC-Technologie bis zu 75 % Materialersparnisse gegenüber konventioneller Bauweise erreicht werden.

Das komplette Bauwerk wurde im CAD als 3D-Modell geplant und konstruiert. Dadurch konnten eine Importdatei für das Statikprogramm sowie je eine für das CNC-Bearbeitungs- resp. Wasserstrahlschneidezentrum generiert werden.

Aus CPC-Großplatten wurden mit einem Wasserstrahlschneidezentrum und einem CNC-Bearbeitungszentrum die Bauteile ausgeschnitten. Beim Zusammenbau der ausgeschnittenen Platten zeigte es sich, dass die geforderte Toleranz von ± 1,5 mm bei allen Bauteilen eingehalten oder sogar noch übertroffen werden konnte.

Bis auf die Treppenstufen und deren Geländer wurde der Turm in zwei Teilen, dem Treppenturm und dem Krag-

arm, bereits im Werk vorfabriziert. Am gesamten Bauwerk wurden wiederum nur einfache Steckverbindungen, die mit Mörtel verfüllt wurden, eingesetzt. Der stehende Treppenturm besteht aus zwei 60 mm dicken CPC60-4-4-Scheiben mit quer dazu verlaufenden Stegen. Da diese Verbindung vorwiegend auf Schub beansprucht wird, wurde sie leicht modifiziert. Die Abschrägung (Keil) und somit der Kraftübertrag befindet sich nur auf der Leibungsseite des Nockens.

Die Bridge to the Future wurde auf einer Straßenbrücke montiert. Diese Brücke führt über zwei Gleise auf ein Kieswerkareal und dient als Zufahrt für Lkws, welche Innertstoffe zur Deponie liefern. Auf der Brücke befindet sich eine Lkw-Waage, um die Menge der Lieferung zu bestimmen. Dank der neuen Brücke, der Bridge to the Fu-



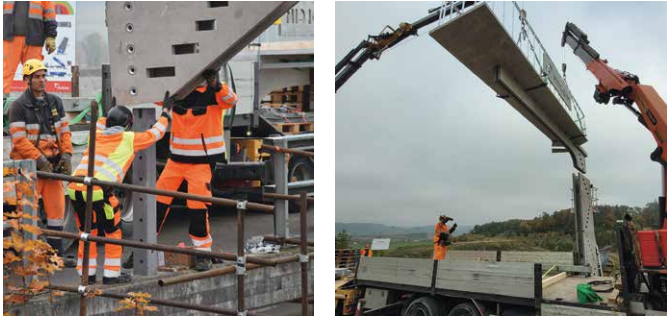
**Bild 18.** 3D-Modell im Statikprogramm importiert; dargestellt sind die Hauptspannungen in den CPC-Platten (Quelle: CPC AG)



**Bild 19.** Anlieferung Bauteile (Quelle: CPC AG)



**Bild 20.** Fügen Kragarm (Quelle: CPC AG)



**Bild 21.** Überstülpen des Turmelements auf den Verankerungspfahl, Montage des Kragelements und Setzen des Sicherungssteins (Quelle: CPC AG)

ture, kann die Lieferung nun unter Augenschein genommen und nach Bedarf probiert werden.

Zur Verankerung der neuen Kontrollbrücke wurde mit einer Kernbohrung ein Loch mit Durchmesser 200 mm in die Brückenkonsolle gebohrt, darin ein Stahlträger eingelassen, dieser unterseitig verschraubt und schließlich mit Mörtel vergossen. Der Brückenturm konnte anschließend über den Stahlträger gestülpt werden. Der Kragarm wurde zwischen die zwei Turmscheiben eingefahren und auf dem brückennahen Quersteg des Turms abgestellt. Nach dem Versetzen des Schlusssteins (sorgt als Bolzen für das Niederhalten des Kragarms) konnten die Krangurte sofort entfernt werden. Die Treppentritte, die Podeste und die Geländer



**Bild 22.** Fertiger Turm mit den eingesteckten Plattformen und Tritten (Quelle: Fachgruppe FVK ZHAW)

wurden im Anschluss mit normalen Hebebühnen montiert. Statisch funktionieren die Treppentritte, welche durch beide Turmscheiben gesteckt und vermörtelt sind, als Kragarme. Um die Treppentritte horizontal zu halten, wurde auch hier analog zur Passerelle die CPC-Kappa<sub>Pat.pend</sub>-Verbindung angewendet. Die Plattformen wurden 14 cm in die Turmscheiben eingesteckt.

### Ausblick

Diese zwei noch kleinen Bauwerke zeigen das eigentliche Potenzial der CPC-Bauweise auf. Sie zeigen, dass man spezielle Bauwerke sehr effizient in hoher Qualität erstellen kann, lassen aber auch erkennen, dass auch individuelle „gewöhnliche“ Bauwerke fast schon seriell, sehr effizient herstellbar sind. Die Grundidee der CPC-Bauweise ist, industriell hochwertige Platten zu produzieren, diese zu Elementen weiterzuverarbeiten, daraus große Bauwerksteile zu fertigen und diese auf dem Bauplatz in kürzester Zeit zu einem Bauwerk aufzurichten. Die meisten Bauwerke haben nicht diese große Komplexität auf so kleinem Raum wie die vorgestellten Bauwerke. Bei Hochbaudecken ist beispielsweise alles eben. Diese bestehen aus vielen gleichen Teilen und immer den gleichen Verbindungen. Nur Abmessungen, Form, Aussparungen und Spannweiten variieren. Es wird sich rechnen, spezielle Maschinen und automatisierte Prozesse eigens für solche Massenbauteile zu konstruieren. So können solche Decken effizient, in hoher Geschwindigkeit erstellt, geliefert und wetterunabhängig versetzt werden. Der Zeitraum von Bestellung bis Montage wird dank dieser Trockenbauweise für Betonbauten enorm kurz, die CO<sub>2</sub>- und Massenbilanz von Gebäuden massiv reduziert. Der Stahl- und der Holzbau haben es vorgemacht. Mit der CPC-Bauweise ist das für den Betonbau heute auch möglich.

#### Verbindungssteg Campus A

- Standort: Winterthur Schweiz
- Bauherr: Stiftung Abendrot
- Entwurf: Alexis Ringli – Ringli Gadola Architekten, Josef Kurath ZHAW
- Umsetzung: Micha Brunner cpc AG, Christian Lowiner ZHAW
- Statik: Michèle Bühler ZHAW, Mona Rusch – Staubli, Kurath & Partner AG

#### Bridge to the Future

- Standort: Hüntwangen Schweiz
- Bauherr: Holcim Schweiz AG
- Entwurf: Josef Kurath ZHAW
- Betontechnologie: Christian Lowiner ZHAW, Kerstin Wassmann Holcim Schweiz AG
- Umsetzung: Micha Brunner cpc AG
- Statik: Rebecca Lutz ZHAW, Mona Rusch – Staubli, Kurath & Partner AG

#### Autorin und Autoren

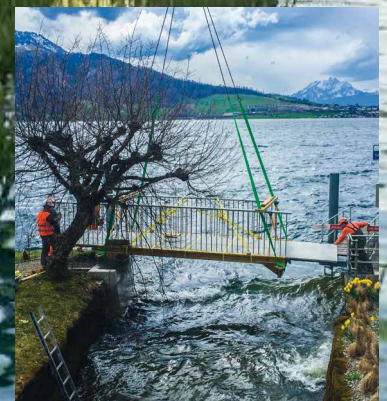
Christian Lowiner, BSc ZFH in Bauingenieurwesen  
 Michèle Bühler, MSc ZFH in Bauingenieurwesen  
 Prof. dipl. Bauing. ETH Josef Kurath  
 ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

www.zhaw.ch





CPC



Jetzt  
NEU mit  
abZ!

## CPC Modulbrücken: leicht und robust

Die filigranen und dennoch belastbaren Elemente eignen sich für zahlreiche Anwendungen im Bauwesen und im Landschaftsbau, Fuß- und Radwegbrücken sowie Brückenbeläge. Der Einsatz von CPC-Betonelementen ermöglicht je nach Konstruktion Material-Einsparungen von bis zu 80 Prozent und reduziert den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Bauteils um bis zu 75 Prozent.

Vorgespannter Carbonbeton. Filigran und hoch belastbar.



**Beratung und Kontakt:**  
**Andreas Borgstädt**  
**Mobil +49 151 238 76 944**  
**E-Mail: [andreas.borgstaedt@holcim.com](mailto:andreas.borgstaedt@holcim.com)**



Holcim