

CarboLight Bridge – eine ultraleichte Konstruktion aus kohlefaserverstärktem und infraleichtem Beton | CarboLight Bridge – an ultra-lightweight construction made of carbon reinforced and infra-lightweight concrete for the German Museum in Munich

- ▶ Marc Koschemann, Silke Scheerer
- ▶ Institut für Massivbau, TU Dresden

1 Einleitung

Der Demonstrator für das SPP 1542 sollte die Erkenntnisse der Teilprojekte „Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile“ und „Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungsbetonen“ aufgreifen und widerspiegeln. Zudem sollte ein Tragwerk verwendet werden, dessen Kraftfluss für jeden Betrachter deutlich erkennbar ist und dessen Erscheinung dem Prinzip *form follows force* folgt.

Da das Deutsche Museum in München im Zuge der Modernisierung zukunftsfähigen Innovationen mehr Raum bieten möchte, ergab sich die Möglichkeit, eine Ausstellungsbrücke in der Abteilung Brückenbau zu errichten. Das Deutsche Museum zählt zu den weltweit anerkanntesten Institutionen für Naturwissenschaft und Technik und gehört mit jährlich ca. 1,5 Millionen Besuchern zu den meistbesuchten Museen in Deutschland [1].

Für den Demonstrator steht ein ca. 9,5 m langer und ca. 2,0 m tiefer Bereich zwischen zwei Wänden zur Verfügung. Die Ausstellungsbrücke sollte in einer Höhe von ca. 3,50 m installiert werden, um diese sowohl von unten als auch von der in gleicher Höhe benachbarten Besucherbrücke von Jörg Schlaich [2] betrachten zu können.

1 Introduction

The demonstrator for SPP 1542 should take into account and reflect the findings of the SPP projects “Cross-section adaptation for bar-shaped compression components” and “Lightweight floor structures made of layered high-performance concretes”. In addition, a structure was to be designed where the flow of force is clearly recognisable to any observer from the external shape and whose design follows the principle of *form follows force*.

Since the Deutsches Museum in Munich wants to offer more space to future-oriented innovations in the course of modernisation, the opportunity came up to erect an exhibition bridge in the bridge construction department. The Deutsches Museum is one of the world’s most renowned institutions for natural science and technology and, with around 1.5 million visitors a year, one of the most visited museums in Germany [1].

An area approx. 9.5 m long and approx. 2.0 m deep between two walls was available for the demonstrator. The exhibition bridge was to be installed at a height of approx. 3.50 m so that it could be viewed from below as well as from the neighbouring visitor bridge by Jörg Schlaich [2] at the same height.

2 Entwurf, Planung, Berechnung

Obwohl die Brücke für Besucher nicht zugänglich ist, wurde mit dem Deutschen Museum vereinbart, sie für eine Nutzlast von mindestens $4 \times 1,0 \text{ kN}$ für mögliche Exponate auf der Brücke sowie eine Personenlast von einmal $1,5 \text{ kN}$ auszuliegen. Ausgehend von einem ersten Entwurf (Bild 1) wurde zunächst die Breite des Überbaus mit $1,20 \text{ m}$ festgelegt. Des Weiteren bestand der Wunsch nach einem möglichst flachen Bogenstich. Der anfänglich gewählte Höhenunterschied der Auflager von ca. 65 cm und eine daraus resultierende Stützenneigung von $12,5^\circ$ zur Horizontalen wurden im Zuge der weiteren Planung nicht wesentlich verändert. Anhand einer groben Vor-dimensionierung der Querschnitte wurden die zu erwartenden Auflagerkräfte ermittelt und die Lastweiterleitung in die Bestandskonstruktion durch den zuständigen Tragwerksplaner nachgewiesen. Zudem wurden die unteren und oberen Auflagerkonsolen bemessen und konstruiert.

Für die weitere Planung und Optimierung wurde ein vollparametrisiertes 3D-Modell der Brücke mit den Softwareprogrammen *Grasshopper* in Verbindung mit *Rhino* erstellt. Durch Programmierung einer Schnittstelle zu dem FEM-Programm *RFEM* war es im Sinne des *Building Information Modelling* zudem möglich, die Geometrie- und Materialdaten sowie Lasten aus *Grasshopper* quasi-simultan in ein FEM-Stabmodell zu überführen. Anhand der Geometriedaten wurden vereinfachte Querschnitte für ca. 50 Stababschnitte generiert, welche die gleiche Masse- und Steifigkeitsverteilung wie das 3D-Modell besaßen. Die berechneten Schnittgrößen wurden anschließend wieder in *Grasshopper* überführt und zur Berechnung von Spannungen und zur Nachweisführung verwendet. Auf Basis einer Variantenuntersuchung wurden die feldweise Aufteilung des Überbaus – $3,50 \text{ m}$ für das mittlere und jeweils $3,00 \text{ m}$ für die Randfelder – und die Länge der Stützen festgelegt.

Im Weiteren wurde die Knicksicherheit der ca. $3,0 \text{ m}$ langen Stützen untersucht. Dabei war zu beachten, dass diese neben der Normalkraftbeanspruchung auch Biegung infolge Eigengewicht

2 Design, planning, calculation

Although the bridge is not accessible for visitors, it was agreed with the client to design it for a live load of at least $4 \times 1.0 \text{ kN}$ for possible exhibition items on the bridge as well as a man load of once 1.5 kN . Based on a first draft (Fig. 1), the width of the superstructure was initially determined to be 1.20 m . Furthermore, there was a desire for the arch to be as flat as possible. The initially selected height difference of the supports of approx. 65 cm and a resulting column inclination of 12.5° to the horizontal was not changed significantly in the course of further planning. Based on a rough pre-dimensioning of the cross-sections, the expected support forces were determined and the load transmission into the existing structure was verified by the responsible structural engineer. In addition, the lower and upper support brackets were dimensioned and designed.

For further planning and optimisation, a fully parameterised 3D model of the bridge was created with the software programmes *Grasshopper* in conjunction with *Rhino*. By programming an interface to the FEM programme *RFEM*, it was also possible to transfer the geometry and material data as well as loads from *Grasshopper* quasi-simultaneously into an FEM beam model in the sense of *building information modelling*. Using the geometry data, simplified cross-sections were generated for approx. 50 beam sections

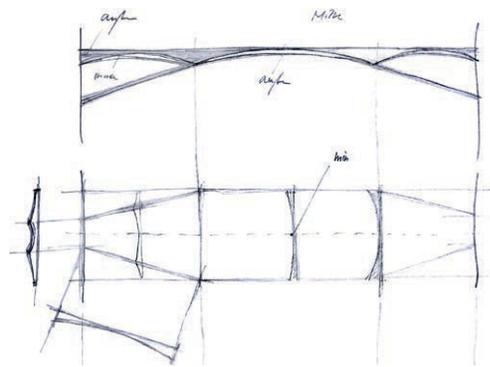


Bild 1: Erster Entwurf der Ausstellungsbrücke | Fig. 1: First sketch of the exhibition bridge | Source: Manfred Curbach

ausgesetzt sind. Entsprechend waren Verformungen inklusive Kriechen und damit Effekte aus Theorie II. Ordnung zu berücksichtigen. Da auch die Stützen möglichst schlank und materialeffizient mit einer Bauteilhöhe von lediglich 50 mm ausgebildet werden sollten, galt es, die Biegesteifigkeit mit einer geeigneten Querschnittsform zu erhöhen. Dafür wurde ein Kreissegmentquerschnitt mit einem Radius von 305 cm gewählt. Des Weiteren sollte verhindert werden, dass in den Stützen Zugspannungen größer $0,5 \cdot f_{ctk}$ auftreten. Ein Reißen des Querschnittes hätte einen Steifigkeitsabfall und damit unweigerlich ein Versagen zur Folge. Die Lösung dafür war eine leichte Überhöhung der Stützen in Längsrichtung. Die optimale Stichhöhe des Längsbogens von 15 mm wurde anhand von nichtlinearen Berechnungen nach Theorie II. Ordnung unter Zielsetzung eines überdrückten Querschnittes für alle Lastkombinationen bestimmt. Zur Minimierung von Rissen infolge von Schwinden wurde für die Stützen eine Oberflächenbewehrung an Unter- und Oberseite vorgesehen. Gewählt wurde das Carbondtextil SITgrid 040 (Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH).

Für den Überbau mit zweiachsig gekrümmter Unterseite war ein dreischichtiger Aufbau aus 20 mm dicken Carbonbetondeckschichten und einer Kernschicht aus Infralichtbeton (ILC, siehe z. B. [3]) mit einer Rohdichte von ca. 800 kg/m^3 vorgesehen. Er variiert in der Höhe zwischen 60 und 160 mm. In Längsrichtung folgen die zweiachsig gekrümmte Unterseite und damit die Querschnittshöhe dem Beanspruchungsverlauf aus Biegung. Folglich ergibt sich die maximale Höhe im Bereich der Stützpunkte und eine geringe an den Endauflagern und im Mittelfeld. Die Geometrie wurde durch mehrere Iterationsschritte unter Verwendung des 3D-Modells und anschließender Berechnung ermittelt. Zudem flossen Aspekte der Baubarkeit und Ästhetik ein.

Der Überbau wurde im Wesentlichen auf Biegung und Querkraft nachgewiesen. Vor allem aufgrund der dominierenden Krümmung in Querrichtung wurde für die Unterseite das einaxial orientierte Carbondtextil SITgrid 040 gewählt. Bei einer charakteristischen Garnzugfestigkeit

tions, which had the same mass and stiffness distribution as in the 3D model. The calculated internal forces and moments were then transferred back into Grasshopper and used for the calculation of stresses and for verification. On the basis of a variant study, the division of spans for the superstructure – 3.50 m for the middle field and 3.00 m for each of the edge fields – and the length of the supports were determined.

Furthermore, the buckling safety of the approx. 3.0 m long columns was investigated. It had to be considered that these are exposed to bending due to self-weight in addition to the normal force load. Accordingly, deformations including creep and thus effects from 2nd order theory had to be taken into account. As the supports were also to be designed as slim and material-efficiently as possible with a component height of only 50 mm, it was necessary to increase the bending stiffness with a suitable cross-sectional shape. For this purpose, a circular segment cross-section with a radius of 305 cm was chosen. Furthermore, tensile stresses greater than $0,5 \cdot f_{ctk}$ were to be prevented in the columns. A cracking of the cross-section would have resulted in a drop in stiffness and thus inevitably failure. The solution was a slight superelevation of the columns in the longitudinal direction. The optimum stitch height of the longitudinal arch of 15 mm was determined using non-linear calculations according to 2nd order theory. The goal was to achieve compression stresses over the whole cross-section for all load combinations. To minimise cracks due to shrinkage, surface reinforcement was provided for the columns on the bottom and top sides. The carbon textile SITgrid 040 (Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH) was chosen.

For the superstructure with a biaxially curved underside, a three-layer structure consisting of two 20 mm thick carbon reinforced concrete face layers and a core layer of infra lightweight concrete (ILC, see e.g. [3]) with a density of approx. 800 kg/m^3 was planned. It varies in height between 60 and 160 mm. In the longitudinal direction, the biaxially curved underside and thus the cross-section height follows the stress

von 2.200 N/mm² [4] verfügt das Textil über einen Bewehrungsquerschnitt von 141 mm²/m in Längs- und 28 mm²/m in Querrichtung, was die erforderliche Flexibilität der Bewehrungsmatte gewährleistet. Die obere, ebene Carbonbetonschicht wurde mit einer Lage solidian GRID Q95/Q95-CCE-38 bewehrt [5]. Dieses Textil weist eine höhere Eigensteifigkeit auf und bietet somit Vorteile beim lagegenauen Einbau in einer ebenen Fläche. Die rechnerische Tragfähigkeit konnte für beide Bewehrungslagen mit ausreichender Sicherheit erbracht werden.

Essentiell war zudem der Fugennachweis an den Schichtgrenzen. Trotz der geringen Zugfestigkeit von Infraleichtbeton von ca. 0,7 N/mm² konnten auch die Verbundfugen im Innern des Querschnitts rechnerisch nachgewiesen werden. Günstig hierfür waren die vorgesehene raue Fugenausführung und die sehr große Verbundfläche.

Bild 2 zeigt ein Rendering der finalen Geometrie der Ausstellungsbrücke.



Bild 2: Visualisierung der Ausstellungsbrücke | **Fig. 2:** Visualisation of the exhibition bridge | Source: Iurii Vakaliuk

3 Planung und Herstellung der Halb-fertigteile

Begleitend zur statischen und gestalterischen Planung wurde ein Konzept zur Herstellung der Brücke im Deutschen Museum erarbeitet. Aufgrund der baulichen Situation vor Ort war der Einbau als vorgefertigte komplette Brücke nicht möglich. Auch waren weder der Einsatz von größeren Hebezeugen im Gebäudeinneren als auch eine reine Fertigung im Museum verbunden mit einer langen Herstellungszeit und den erforderli-

curve from bending. Consequently, the maximum height results on the inner supports and a low one at the end supports and in middle of the bridge. The geometry was determined through several iteration steps using the 3D model and subsequent calculation. Aspects of constructability and aesthetics were also taken into account.

The superstructure was mainly calculated for bending and shear force. The uniaxially oriented carbon textile SITgrid 040 was chosen for the underside, mainly because of the dominating curvature in the transverse direction. This textile has a reinforcement cross-section of 141 mm²/m in the longitudinal direction and 28 mm²/m in the transverse direction, which ensures the required flexibility of the reinforcement mesh. The characteristic yarn tensile strength is 2,200 N/mm² [4]. The upper, flat carbon reinforced concrete layer was reinforced with one sheet of solidian GRID Q95/Q95-CCE-38 [5]. This textile has a higher inherent stiffness and thus offers advantages for positionally accurate installation in plane sections. The calculated load-bearing capacity could be provided with sufficient certainty for both reinforcement layers.

It was also essential to verify the load-bearing capacity of the interface(joint) between the layers. Despite the low tensile strength of infra-lightweight concrete (ILC) of approx. 0.7 N/mm², the composite joints inside the cross-section could also be verified by calculation. The intended rough joint design and the very large bond area were favourable for this.

Fig. 2 shows a rendering of the final geometry of the exhibition bridge.

3 Planning and production of the semi-precast parts

Accompanying the static and architectural design, a concept for the erection of the bridge in the Deutsches Museum was developed. Due to the limited space available on site, it was not

chen Frischbetonmengen umsetzbar. Die Lösung war eine Teilfertigteilbauweise mit anschließender Ortbetonergänzung. Dafür wurde die untere Carbonbetonschicht des Überbaus in drei Segmente mit Längen von 2,93 m (Randfelder) und 3,65 m (Mittelfeld) aufgeteilt. Die beiden Stützen sollten komplett hergestellt werden. Bild 3 zeigt die vorzufertigenden Teile im Überblick.

Grundlage der Schalungsplanung war das 3D-Modell der Brücke. Die Fertigung der einzelnen Schalungsteile aus massiven Sperrholzplatten mittels 3D-Frästechnik erfolgte durch die Firma HICONFORM. Die Schaloberfläche wurde durch eine Schicht Spritzpachtel mit anschließenden Feinschliff und einem Finish aus PU-Lack hergestellt. Die Qualität der Schaloberfläche war zuvor mit Testflächen und verschiedenen Betonage-techniken erprobt worden.

Für die Erfüllung der hohen Anforderungen an Optik und Oberflächenbeschaffenheit für ein Exponat in einem Museum war ein selbstverdichtender Feinbeton zu entwerfen, welcher eine möglichst dichte und porenfreie Struktur besitzt, pump- und fließfähig ist und über einen Zeitraum von mindestens 30 min verarbeitbar bleibt. Zudem bestand der Wunsch nach einer möglichst dunklen Eigentönung, um gegenüber dem helleren Infralichtbeton einen starken Kontrast herzustellen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe der TU Dresden wurden

possible to install the bridge as a complete prefabricated structure. Neither the use of larger lifting equipment inside the building nor a full production in the museum combined with a long production time and the necessary fresh concrete quantities were feasible. The solution was a partially prefabricated construction method with subsequent in-situ concrete supplementation. For this, the lower carbon reinforced concrete layer of the superstructure was divided into three segments with lengths of 2.93 m (side spans) and 3.65 m (centre field). The two columns were to be completely fabricated. Fig. 3 shows an overview of the parts to be prefabricated.

The formwork planning was based on the 3D model of the demonstrator. The production of individual formwork parts from solid plywood panels using 3D milling technology was carried out by the HICONFORM company. The formwork surface was prepared by a layer of spray filler with subsequent fine sanding and a finish of PU lacquer. The quality of the formwork surface had previously been tested with test surfaces and various concreting techniques.

A self-compacting fine concrete was to be designed to meet the high demands on visual appearance and surface quality for an exhibit in a museum. It had to have a dense and pore-free structure as possible, be pumpable and flow-



Bild 3: Überblick über die herzustellenden Carbonbeton-Halffertigteile | **Fig. 3:** Overview of the carbon reinforced concrete semi-precast parts to be manufactured | Source: Iurii Vakaliuk



Bild 4: Herstellung eines Überbau-Halffertigteils; von links oben nach rechts unten: Anpassung der Bewehrung an die angestrebte Geometrie, Einfüllen des Betons für die erste Feinbetonschicht, Modellieren der Oberseite der Carbonbetonschale, aufgeraute Oberfläche | **Fig. 4:** Production of a superstructure semi-precaster part; from top left to bottom right: adapting the reinforcement to the desired geometry, filling in the concrete for the first fine concrete layer, modelling the top of the carbon concrete shell, roughened surface | Source: Marc Koschemann

verschiedene Betonentwürfe hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Optik getestet. Der finale Feinbeton besitzt ein Größtkorn von 4 mm. Die hohe Dichtigkeit und dunkle Farbgebung wurde durch den Einsatz von Quarzsand, Mikrofüller und Mikrosilika erreicht.

Die unteren Carbonbetonschalen für den Überbau wurden liegend im Laminierverfahren betoniert (Bild 4). Dazu wurde zunächst die Hälfte des benötigten Betons über die Schalfläche gleichmäßig verteilt. Anschließend wurde das Carbonbelege in den frischen Beton gedrückt. Zur Wahrung der Betondeckung von ca. 10 mm wurden Abstandhalter des Typs DistTex eingesetzt [6], [7]. Anschließend wurde der restliche Beton eingebracht und die Geometrie der Oberseite mithilfe von Schablonen modelliert. Nach ca. 30 min Erhärtungszeit wurde die Oberseite mechanisch aufgeraut, um die Verbundwirkung zur Zwischenschicht aus Infraleichtbeton zu verbessern.

able and remain workable for at least 30 min. In addition, the fine-grained concrete had to be as dark as possible in order to create a strong contrast to the lighter-coloured ILC concrete. In cooperation with the Institute for Building Materials of TU Dresden, various concrete mix designs were tested with regard to workability and appearance. The final mixture has a maximum grain size of 4 mm. The high impermeability and dark colouring were achieved by using quartz sand, microfiller and microsilica.

The lower carbon reinforced concrete shells for the superstructure were concreted horizontally by laminating (Fig. 4). First, half of the required concrete was evenly distributed over the formwork surface. Then the carbon fabric was placed in the fresh concrete. To maintain the concrete cover of approx. 10 mm, DistTex spacers were used [6], [7]. The remaining concrete was then added and the geometry of the upper surface was modelled with the help of wooden stencils. After about 30 min of curing time, the surface

Da die Stützen im fertigen Zustand von allen Seiten betrachtet werden können, wurden diese stehend über eine Höhe von 3,0 m gegossen, was einen Betonierdruck von bis zu 80 kN/m² zur Folge hatte. Die Schalungsform wurde entsprechend versteift und die Fugen zwischen den einzelnen Schalenteilen mit Dichtmasse versehen. In Testbetonagen war zuvor erprobt worden, welche Konsistenz der Frischbeton haben sollte, damit der Beton das Carbondtextil vollständig umschließt und Luftporen vermieden werden. Zur Einbringung wurde eine Betonpumpe verwendet, wobei der Einfüllschlauch mit steigendem Beton aus der Schalung geführt wurde.

Das Ausschalen erfolgte in der Regel nach 7 bis 14 Tagen. Dafür, zum sicheren Transport und zur bauzeitlichen Unterstützung der filigranen Betonteile wurden hölzerne Unterstützungskonstruktionen entworfen und gefertigt. Die Holzkonstruktionen wurden umgekehrt auf die Betonteile gelegt und mit den Schalungen verspannt. Die verspannten Pakete wurden anschließend gewendet und die Schalung entfernt. Die Wendekonstruktionen wurden auch genutzt, um die Elemente in die richtige Lage zu bringen. Bild 5 zeigt die Unterseite eines Überbauteils.

4 Tragfähigkeitstests

Um die Tragfähigkeit des Sandwichaufbaus sowie der Gesamtkonstruktion experimentell zu testen, wurde die gesamte Brücke einmal als Prototyp im Otto-Mohr-Laboratorium (OML) der



Bild 5: Unterseite eines Carbonbeton-Halbfertigteils für ein Randfeld | **Fig. 5:** Underside of a carbon reinforced concrete semi-precast part for a side span | Source: Marc Koschemann

was mechanically roughened to improve the bond to the next layer of infra-lightweight concrete.

Since the columns can be viewed from all sides in their finished state, they were cast in upright position over a height of 3.0 m, which resulted in a concreting pressure of up to 80 kN/m². The formwork was stiffened accordingly and the joints between the individual formwork parts were provided with sealing compound. The consistency of the fresh concrete was tested beforehand in order to ensure that the concrete completely encloses the textile and to avoid air pores. A concrete pump was used for concreting.

The formwork was usually stripped after 7 to 14 days. For this purpose, for safe transport and support of the filigree concrete parts during construction, wooden support constructions were designed and manufactured. They were placed upside down on the concrete parts and braced with the formwork. The braced packages were then flipped over and the formwork removed. The turning constructions were also used to bring the elements into the right position. Fig. 5 shows the underside of a superstructure element.

4 Load-bearing tests

A prototype of the entire CarboLight Bridge was manufactured in the Otto Mohr Laboratory (OML) of the TU Dresden and loaded to failure to experimentally confirm the load-bearing capacity of the sandwich structure as well as the overall construction. In addition, a column and a separate side span element were tested. Furthermore, it was also possible to test the planned assembly procedure as well as the concreting of the intermediate and surface layers and to identify possible optimisation possibilities.

The column element was tested horizontally. Due to the very shallow inclination of the columns, they are subjected to bending due to

TU Dresden erstellt und bis zum Bruch belastet. Zudem wurden eine Stütze und ein separates Randfeld getestet. Durch die Realisierung des Prototyps konnten auch der geplante Montageablauf sowie die Betonagen der Zwischen- und der Deckschicht erprobt und eventuelle Optimierungsmöglichkeiten identifiziert werden.

Das Stützelement wurde liegend getestet. Aufgrund der sehr flachen Neigung der Stützen unterliegen diese einer Biegebeanspruchung infolge Eigengewichts, welche mit einer entsprechenden Verformung einhergeht. Um diese zu bestimmen, wurde die Stütze über 6 Tage als Einfeldträger gelagert. In Stützenmitte stellte sich eine Durchbiegung von ca. 7 mm ein. Dieser Wert liegt oberhalb der errechneten Verformung, wird aber durch die Überhöhung in Längsrichtung von 15 mm kompensiert. Im anschließenden Vier-Punkt-Biegeversuch wurden ab einem Biegemoment von ca. 0,6 kNm erste Biegerisse beobachtet. Das Bruchmoment betrug ca. 7,5 kNm zu. Basierend auf der errechneten Stützennormalkraft von ca. 35 kN und dem Rissmoment reicht demnach eine Lastausmitte von weniger als 2 cm aus, um ein Stabilitätsversagen zu verursachen. Das Versuchsergebnis bestätigt die Vorgabe, dass die Stützen während des gesamten Herstellungsprozesses ungerissen bleiben müssen, um die Knicksicherheit zu gewährleisten.

Die Tragfähigkeit des ebenfalls unter Biegung getesteten Randfelds wurde durch das Versagen der Verbundfuge zwischen Kern- und Deckschicht infolge einer Auflast von knapp 30 kN bestimmt. Die Fugentragfähigkeit lag im Versuch bei 0,23 N/mm² und damit nur geringfügig unter der rechnerischen Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1 [8] (0,28 N/mm²).

Den Abschluss der experimentellen Untersuchungen bildeten Bau und Beprobung der Testbrücke. Die Errichtung des Prototyps erfolgte schrittweise (Bild 6) wie folgt:

- Verankerung behelfsmäßiger Stahlaulager im Hallenboden,

their own weight, which is accompanied by a corresponding deformations. To determine these, the column was stored as a single-span beam for 6 days. In the centre of the column, a deflection of approx. 7 mm was recorded. This value is above the calculated deformation, but is compensated by the longitudinal superelevation of 15 mm. In the subsequent four-point bending test, the first bending cracks were observed under a bending moment of ca. 0.6 kNm. The ultimate moment was approx. 7.5 kNm. Based on the calculated column normal force of about 35 kN and the cracking moment, a load eccentricity of less than 2 cm is therefore sufficient to cause a stability failure. The test result confirms the requirement that the columns must remain uncracked throughout the entire manufacturing process in order to ensure buckling safety.

The load-bearing capacity of the side span, which was also tested under bending, was determined by the failure of the bond joint between the core and the surface layer as a result of a superimposed load of almost 30 kN. The joint load-bearing capacity was 0.23 N/mm² in the test, which was thus only slightly below the calculated load-bearing capacity according to DIN EN 1992-1 [8] (0.28 N/mm²).

The experimental investigations were finished by the construction and testing of the prototype. It was erected step by step as follows (see Fig. 6):

- Anchoring of temporary steel supports in the lab's floor,
- Adjustment of the columns' inclination by means of mechanical jacks,
- Fine adjustment and compensation of slight irregularities with thin steel sheets,
- Inserting and aligning the centre section using a height-adjustable system that can be moved horizontally by roller rails,
- Joining of columns and middle superstructure semi-precast part by gluing,
- Assembly of the side parts of the superstructure,

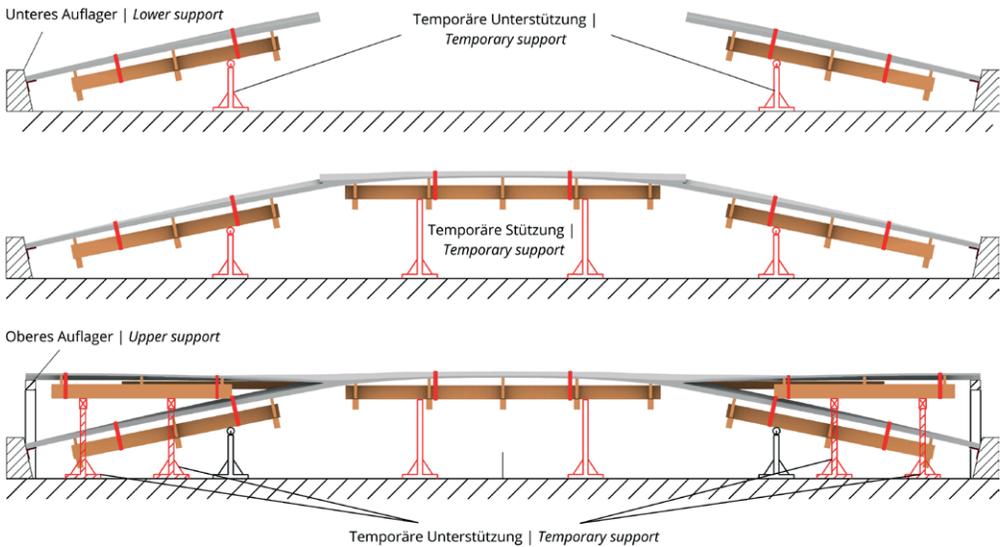


Bild 6: Schematische Darstellung der Montageschritte zur Errichtung der CarboLight-Brücke mit Hilfe der Unterstüztungsstruktur; die temporären Unterstüztungen waren dabei höhenverstellbar und horizontal verschieblich ausgeführt | **Fig. 6:** Schematic representation of the assembly steps for erecting the CarboLight bridge using the support structure; the temporary supports were height-adjustable and horizontally movable | Source: Marc Koschemann

- Einstellung des Stützenwinkels mittels mechanischer Heber,
 - Feinjustierung und Ausgleich leichter Ungleichmäßigkeiten mit dünnen Stahlblechen,
 - Einsetzen und Ausrichten des Mittelteils unter Nutzung eines höhenverstellbaren und durch Rollschienen horizontal verschiebbaren Systems,
 - Verbinden von Stützen und Überbau-Halb fertigteil durch Kleben,
 - Montage der Randteile,
 - Befestigung und Ausrichtung der umlaufenden Randschalung für die anschließende Betonage mit ca. 580 l ILC, welcher in der Mischanlage des OML in zwei Chargen hergestellt und dessen Oberfläche nach dem Ansteifen aufgeraut wurde,
 - Montage der Randschalung und abschließende Betonage der Carbonbeton-Deckschicht,
 - Abdecken mit feuchten Tüchern als Schutz vor zu schneller Austrocknung.
- Fixing and alignment of the surrounding formwork for the subsequent concreting with approx. 580 l ILC, which was produced in two batches in the mixing plant of the OML and whose surface was roughened after stiffening,
 - Formwork modification and final concreting of the carbon reinforced concrete top layer,
 - Covering with damp cloths as protection against drying out too quickly.

After 28 days, the support structure was removed. The bridge had already been equipped with displacement transducers to record the deformation due to its own weight. After one day, four steel girders circa 100 kg each (this corresponds to the planned service load) were placed for three days, two in the centre span and one in each of the side spans. In the middle of the bridge, a deflection of approx. 30 mm was recorded. Therefore, a super-elevation of the superstructure and a possibility for subsequent compensation was planned for the exhibition bridge in the museum.

Nach 28 Tagen wurden die Unterstüztungsstruktur entfernt. Bereits zuvor war die Brücke mit Wegaufnehmern ausgestattet worden, um die Verformung infolge Eigengewichts aufzu-

For the load test, two tension rods were attached to each of the steel girders and an-

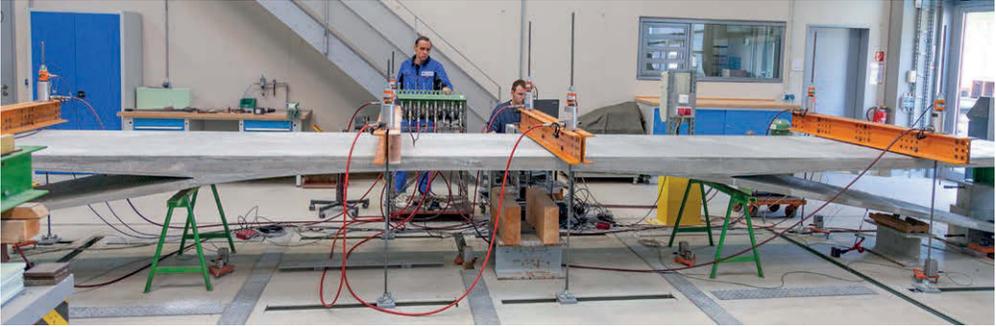


Bild 7: Biegeversuch am Prototyp | Fig. 7: Bending test on the prototype | Source: Stefan Gröschel

zeichnen. Nach einem Tag wurden für drei Tage vier Stahlträger von je knapp 100 kg Gewicht aufgelegt (dies entspricht der geplanten Gebrauchslast), zwei im Mittelfeld und je einer in den Randfeldern. In Brückenmitte stellten sich ca. 30 mm Durchbiegung ein, weshalb für die Ausstellungsbrücke im Museum eine Überhöhung des Überbaus und eine Möglichkeit des nachträglichen Ausgleichs eingeplant wurden.

Für die Belastungsprüfung wurden an den Stahlträgern je zwei Zugstangen befestigt und im Hallenboden verankert (Bild 7). Die Lastaufbringung erfolgte stufenweise mit hydraulischen Pressen. Es wurde eine Maximallast von ca. 14 kN je Achse erreicht, was in Summe, inklusive der Stahlträger, dem 2,8-Fachen des Eigengewichts entsprach. Das Versagen stellte sich durch schlagartig eintretende Risse in den Anschlussbereichen der Stützen ein. Die Klebefuge blieb intakt.

Während des Belastungstests wurden auch die beiden Stützen beobachtet. Bereits unter Eigengewicht und Gebrauchslast kam es infolge der Gesamtabenkung zu einer Neigungsänderung, die den inneren Spannungszustand beeinflusste. Zum Versagenszeitpunkt herrschten ca. 5 N/mm² Zug an der Oberseite und ca. 17,5 N/mm² Druck an der Unterseite des Bauteils, die Normalkraft betrug ca. 140 kN, was etwa dem 4-Fachen der geplanten Belastung entspricht.

An der Herstellung der Testbrücke wurden wichtige Erkenntnisse und Erfahrungen zu Betonkonsistenzen, Verarbeitungszeiten und Schalungs-

chored in the hall floor (Fig. 7). The load was applied stepwise with hydraulic presses. A maximum load of approx. 14 kN per axle was achieved, which in total, including the steel girders, corresponded to 2.8 times the dead weight. The failure occurred due to sudden cracks in the connection areas of the columns. The adhesive joint remained intact.

During the load test, the columns were also observed. Already under dead load and service load, a change in inclination occurred as a result of the overall lowering, which influenced the internal stress state. At the time of failure, there were circa 5 N/mm² tension on the upper side and approx. 17.5 N/mm² pressure on the underside of the component; the normal force loading was approx. 140 kN, which corresponds to about 4 times the planned load.

Important findings and experience regarding concrete consistencies, processing times and formwork preparation were gathered during the fabrication and erection of the prototype. Even minor deviations in the manufacturing process can influence the quality of the concrete surface. In addition, various curing methods were tested in combination with different impregnation systems. By grinding the carbon concrete surfaces, for example, the thin, light hydrate layer can be removed, revealing the distinctive dark tint of the concrete. The effect was intensified by a colour-deepening impregnation with a low gloss level.

vorbereitung gesammelt. Bereits geringfügige Abweichungen im Herstellungsprozess können die Qualität der Betonoberflächen beeinflussen. Zudem wurden verschiedene Verfahren der Nachbehandlung in Kombination mit unterschiedlichen Imprägnierungssystemen erprobt. Durch einen Anschliff der Carbonbetonflächen kann bspw. die dünne, helle Hydratschicht entfernt werden, wodurch die markante dunkle Tönung des Betons zu Tage tritt. Verstärkt wurde der Effekt durch eine farbvertiefende Imprägnierung mit geringem Glanzgrad.

5 Herstellung und Errichtung der Ausstellungsbrücke

Für den Demonstrator im Museum wurden die fünf Halbfertigteile erneut betoniert und auf den Holzunterkonstruktionen zwischengelagert. Alle Sichtflächen der Segmente wurden maschinell geschliffen und anschließend imprägniert. Partiiell wurden Fehlstellen betonkosmetisch bearbeitet.

Auf den Unterkonstruktionen gesichert wurden die Einzelteile zusammen mit den Ausgangsstoffen für die obere Carbonbetonschicht und allen erforderlichen Hilfsmitteln zum Museum transportiert. Dort wurden die Segmente mittel mechanischen Hebezeugen auf eine ca. 2,5 m hohe Arbeitsplattform gehoben und gemäß Bild 6 im Bezug auf die vormontierten Auflagerkonsolen ausgerichtet und justiert. Die beiden Stöße zwischen Mittelteil und den Randfeldern wurden geklebt ausgeführt und zusätzlich mit einem übergreifenden Carbongelege in Feinbeton verstärkt. Nach der Montage der Randschalung wurde der von Heidelberger Beton aus München bereitgestellte Infralichtbeton händisch einge-

5 Fabrication and erection of the exhibition bridge

For the final CarboLight Bridge, the five semi-precast segments were concreted again and temporarily stored on the wooden substructures. All visible surfaces of the segments were machine grinded and then impregnated. Partial defects were treated with concrete cosmetics.

Secured on the substructures, the individual parts were transported to the museum together with the raw materials for the upper carbon reinforced concrete layer and all the necessary aids. There, the segments were lifted onto an approx. 2.5 m high working platform by means of mechanical hoists and aligned and adjusted in relation to the pre-assembled support brackets as shown in Fig. 6. The two joints between the middle section and the side parts were glued and additionally strengthened with overlapping carbon fabrics in fine concrete. After assembling the edge formwork, the ILC provided by Heidelberger Beton from Munich was placed by hand, and the surface was roughened. In contrast to the test bridge, the top layer was poured. For this purpose, the carbon fabric was placed on the core layer and the consistency of the fine concrete was adjusted accordingly on site. Finally, the surface was smoothed.

After 28 days, the supporting structure was removed. Remarkable was the small lowering in the third points of only 10 mm. Since the bridge will be loaded with exhibits later, an additional weight of approx. 320 kg was placed on it during the first 24 hours to anticipate deformations. In the following days, the demonstrator



Bild 8: Mit viel Liebe zum Detail erfolgte der Feinschliff | **Fig. 8:** The finishing touches were made with great attention to detail | Source: Ansgar Pudenz

bracht und die Oberfläche aufgeraut. Im Unterschied zur Testbrücke wurde die Deckschicht gegossen. Dazu wurden das Carbongelege auf der Zwischenschicht platziert und die Konsistenz des Feinbetons vor Ort entsprechend eingestellt. Abschließend wurde die Oberfläche geglättet.

Nach 28 d wurde die Unterstüzungskonstruktion entfernt. Bemerkenswert war die geringe Absenkung von lediglich 10 mm in den Drittelpunkten. Da die Brücke zu einem späteren Zeitpunkt mit Exponaten belastet wird, wurde in den ersten 24 h eine Zusatzgewicht von ca. 320 kg aufgelegt, um Verformungen infolge Last vorwegzunehmen. In den Folgetagen wurde der Demonstrator betonkosmetisch nachbehandelt (Bild 8). Dabei wurden die Stoßfugen zwischen den Elementen farblich angeglichen, Fehlstellen in den Seitenflächen beseitigt und die Schichtgrenzen zwischen dem Carbonbeton und dem Infralichtbeton aufgearbeitet. Die Deckschicht wurde grob angeschliffen, mit einer homogenisierenden Silikatlasur versehen und abschließend imprägniert.

Die 2,1 t leichte Demonstrationsbrücke (Bild 9) kann nach der geplanten Wiedereröffnung Mitte

was subjected to concrete cosmetic treatment (Fig. 8). The colour of the butt joints between the elements was adjusted, defects in the side surfaces were removed and the layer boundaries between the carbon reinforced concrete and the infra-light concrete were reworked. The top layer was roughly ground, given a homogenising silicate glaze and finally impregnated.

The Bridges and Hydraulic Engineering Section of the Deutsches Museum will be reopened in mid-2022. Then, the 2.1 t light CarboLight Bridge (Fig. 9) can be visited.

Acknowledgement

The project team at the Institute of Concrete Structures of TU Dresden would like to thank the German Research Foundation (DFG) for the funding within the framework of SPP 1542 and the Deutsches Museum Munich for the opportunity to show this unique construction in this setting and for the support during transport and assembly. In addition, we would like to thank the company HICONFORM for the form-



Bild 9: Formoptimierte CarboLight Bridge bereit für die Exponate | **Fig. 9:** Shape-optimised CarboLight Bridge ready for the exhibits | Source: Ansgar Pudenz

2022 in der Abteilung Brücken und Wasserbau des Deutschen Museums besichtigt werden.

Danksagung

Das Projektteam dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung im Rahmen des SPP 1542 und dem Deutschen Museum München für die Möglichkeit, diese einzigartige Konstruktion in diesem Rahmen zu zeigen und für die Unterstützung bei Transport und Montage. Zudem danken wir der Firma HICON-FORM für den Schalungsbau, der Heidelberger Beton GmbH für die Bereitstellung des ILC und dem Institut für Baustoffe der TU Dresden für die Unterstützung bei der Betonoptimierung. Bei unseren Kolleg:innen des Otto-Mohr-Labors bedanken wir uns für die Begleitung des gesamten Projekts, beginnend mit der Vorbereitung der Schalung, über Herstellung und Prüfung von Probekörpern und Elementen verschiedener Dimensionen einschließlich der Herstellung der endgültigen Fertigteile bis zur Unterstützung bei der Fertigstellung der Brücke in München.

work construction, Heidelberger Beton GmbH for providing the ILC, the Institute for Building Materials of TU Dresden for their support in optimising the concrete mixtures, and the team of the Otto Mohr Laboratory (TU Dresden) for accompanying the project, starting with the preparation of the formwork, the production and testing of specimens and elements of various dimensions including the manufacturing of the final pre-cast parts, and the assistance in completing the bridge in Munich.

Literatur | References

- [1] Wikipediaeintrag zum Deutschen Museum München: https://de.wikipedia.org/wiki/Deutsches_Museum.
- [2] Bühler, D.; Schlaich, J.; Göppert, K; Justiz, S.; Kupfer, H.; Nather, F.; Kreuzinger, H.; Albrecht, G.; Siebert, G.: Die Brücke im Raum – Besucherbrücke Deutsches Museum, Stahl-Informations-Zentrum, Deutsches Museum, VEGLA Vereinigte Glaswerke GmbH (Hrsg.), Dokumentation 539 (1999), Düsseldorf
- [3] Schlaich, M.; Hückler, A.; Lösch, C.: Infraleichtbeton (ILC). In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2021, Kap. 10, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2021, S. 907–952 – DOI: 10.1002/9783433610206.ch10
- [4] Wilhelm Kneitz Solutions in Textile GmbH (Hrsg.): Datenblatt SITgrid040KI. Ausgabe 03/2020
- [5] solidian (Hrsg.): Technisches Datenblatt solidian GRID Q95/95-CCE-38. Ausgabe 26.07.2017
- [6] Schladitz, F.; Walther, T.: DistTEX – für Textilbeton. TUDALIT Magazin (2013) 9, S. 13 – Tagungsband zur 5. Anwendertagung Textilbeton, 24./25.09.2013 in Friedrichshafen – online: <http://tudalit.de/aktuelles/tudalit-magazin/>
- [7] Übersicht DistTEX-System: <https://www.disttex.com/> (abgerufen am 06.01.2022)
- [8] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.

Alle Internetquellen wurden am 01.03.2022 geprüft. | All internet sources were proofed on 01.03.2022.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Demonstrator für die Teilprojekte Curbach im SPP 1542

Demonstrator for the subprojects Curbach in SPP 1542

Ausführung Execution:	TU Dresden
Beteiligte SPP-Projekte Participating SPP projects:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Curbach (1D): Querschnittsadaption für stabförmige Druckbauteile Cross sectional adaption for rod-shaped elements in compression ■ Curbach (2D): Leichte Deckentragwerke aus geschichteten Hochleistungs-betonen Lightweight ceiling structures made of layered high-performance concrete
Team Team:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Marc Koschemann (Projektingenieur Project engineer), Iurii Vakaliuk (Tragwerksplaner Structural engineer), Manfred Curbach (Entwurf und Projektleitung Design and project leader), Stefan Göschel (fotografische Begleitung photographic support); alle Institut für Massivbau all from Institute of Concrete Structures, TU Dresden ■ Kolleg:innen des Otto-Mohr-Laboratoriums, v. a. Colleagues of the Otto Mohr Laboratory, above all: Rainer Belger, Jens Hohensee, Mario Polke-Schmincke (Herstellung Manufacturing), Heiko Wachtel, Michael Liebe (Messtechnik Measurement technology), Torsten Hampel, Tino Jähnke, Maik Patricny, Andreas Thieme, Bernd Wehner (Versuchsvorbereitung und -durchführung Preparing and carrying out the laboratory tests), Sabine Wellner (Dokumentation Documentation) ■ Phillip Eckstein, Philipp Göbel (studentische Hilfskräfte student assistants)
Förderung Funding:	<ul style="list-style-type: none"> ■ Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ■ Deutsches Museum München ■ Institut für Massivbau der TU Dresden
Zeitraum Period:	02/2018–05/2021
Partner und Unterstützer Partners and supporters:	<ul style="list-style-type: none"> ■ HICONFORM – Freitaler Modellwerkstätten eG (Fertigung der Holzschalung Manufacturing wooden formwork) ■ Heidelberger Beton GmbH, München (ILC) ■ Institut für Baustoffe der TU Dresden (Rezeptur Feinbeton) Institute for Building Materials of the TU Dresden (recipe fine concrete) ■ Lehrstuhl für Massivbau der TU München (logistische Unterstützung) Chair of Concrete and Masonry Structures, TU of Munich (logistical support)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Koschemann, M.; Curbach, M.; Scheydt, J.: Leicht Bauen mit Beton – Vom Entwurf zur Realisierung einer Brücke aus Carbon- und Infraleichtbeton | Concrete light – A bridge made of carbon reinforced and infra-lightweight concrete. Beitrag zu den Ulmer Betontagen 2022, 21.–23.06.2022 in Neu-Ulm, zur Publikation angenommen | Contribution to the Ulmer Betontage 2022, 21.–23.06.2022 in Neu-Ulm, accepted for publication
- Koschemann, M.; Vakaliuk, I.; Curbach, M.: An ultra-light carbon concrete bridge: from design to realisation. Beitrag eingereicht zum | Contribution submitted to the: fib Congress 2022, 12.–16.06.2022 in Oslo