

# Paulifurtbrücke – Entwurf, Planung und Ausführung einer UHPC-Schalenbrücke

Dieser Aufsatz beinhaltet die Beschreibung der Planung und der Ausführung einer trogförmigen Rahmenbrücke mit einer Spannweite von 32 m, deren Riegel durch vorgespannte UHPC-Elemente ausgeführt wurde. Beginnend mit der Entwurfsentscheidung bis zur fertigen Montage des Tragwerks sind die einzelnen Schritte in ihrem Ablauf beschrieben. Die Herstellung sowie das Versetzen der UHPC-Elemente erfordert eine hohe Genauigkeit und Qualität der Fertigung. Der Einsatz dünnwandiger UHPC-Bauteile subsumiert die Einbindung geometrischer Steifigkeiten in den Tragwerksentwurf und stellt eine besondere Herausforderung an den Tragwerksplaner. Das Fügen der Bauteile sowie die Besonderheiten im Zusammenhang mit der Vorspannung sind weitere Themen, deren Schwierigkeiten und Lösungen aufgezeigt werden. Um UHPC-Bauteile konkurrenzfähig am Markt einsetzen zu können, bedarf es besonderer Rahmenbedingungen. Auf den formal ästhetischen Aspekt wurde bei diesem Entwurf besonderer Wert gelegt.

## 1 Entwurfsgedanke

Der Rosenbach mündet in die Drau und weist zur Reduzierung der Geschiebemengen Sohlschwellen auf, die von der regionalen Energiewirtschaftsgesellschaft, vormals ÖDK, heute Verbund, in den 70er-Jahren des vorigen Jahrhunderts gebaut wurden und eine Breite im unmittelbaren Bachbett von 3,5 m, eine Tiefe von 4,5 m und eine Gesamtlänge von bis zu 52 m quer durch das Bachdelta aufweisen. Diese Sohlschwelle wurde bis zur Errichtung des neuen Brückentragwerks zur Überfuhr als sogenannte Furt genutzt und wies den Nachteil auf, dass bei längeren Niederschlägen und damit verbundenen Geschiebemengen des mitten im Gebirgszug der Karawanken entspringenden Rosenbachs eine Überfuhr nicht möglich war. Die anfallenden Geschiebemengen im Delta werden, wie in Bild 1a ersichtlich, derzeit zur Kiesaufbereitung genutzt. Die Topografie des Deltas und auch das umliegende Kieswerk assoziieren das Arbeiten mit dem Baustoff Beton. Der Umstand der bestehenden Furt und die Möglichkeit, auch Horizontalkräfte über das quer durch das Bachbett verlaufende Sohlbauwerk für eine Fundierung des Tragwerks zu nutzen, führen zur Lösung eines Zweigelenkrahmens, wobei die Neigung des Stiels sich der Böschungsneigung anpasst. Das HQ100 mit einem geforderten Freibord von mind. 0,50 m lässt die Trogform als Brückenquerschnitt logisch erscheinen, um damit an beiden Ufern umfangreiche Anschüttungen des bestehenden Straßennetzes zu vermeiden.

## Paulifurt-Bridge – design, planing and execution of a UHPC-shell-bridge

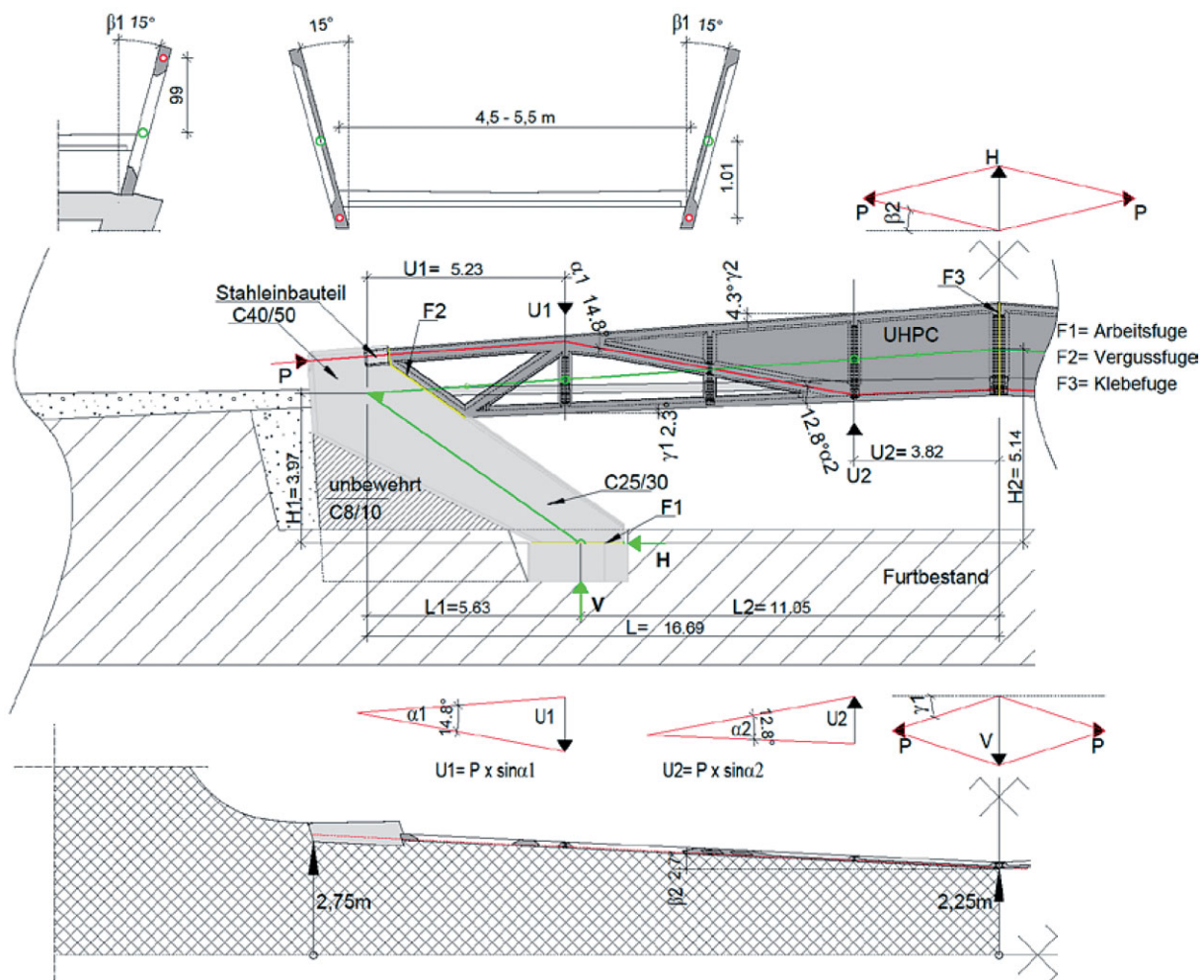
The following essay consists the description of the aspects of the planning and the execution of a trough shaped frame bridge with a span width of 32 meters. The beams of the frame are executed by pre-stressed UHPC elements. Each steps in the process from the decision of design until the mounting of the construction are described. The production and the setting of the UHPC elements required high specifications concerning the precision and quality in the production line. The application of thin-walled UHPC structural elements subsumed the integration of geometrical stiffness in the structural design and is a specific challenge for the structural engineer. The joining of the structural elements and the challenge in connection with the pre-stressing were additional subjects. This challenges and solutions are presented. There is a need for special frame conditions to apply UHPC structural elements on a competitive basis in the market place. Of particular importance in the design were the formal aesthetic of the structural design.

Die Forderung des Bauherrn, ein möglichst wartungsfreies Bauwerk zu errichten, war einerseits Entscheidungsgrundlage für den Einsatz des Werkstoffs UHPC gegenüber einem Stahltragwerk und andererseits logisches Argument für die Ausführung eines Zweigelenkrahmens, womit auf jegliche Lagerkonstruktionen und Fahrbahnübergänge verzichtet werden konnte. Selbst die Fahrbahnplatte sollte ohne Abdichtung und Asphaltsschicht auskommen. UHPC-Bauteile können nur als dünnwandige ebene Plattenelemente (5–20 cm Dicke) wirtschaftlich im Werk hergestellt werden. Dies führte in einem ersten Schritt zu einer Betonfachwerklösung (Bilder 1 und 2). Mit einer vorliegenden Spannweite von ca. 32 m konnten die Elemente nicht als ein ganzes Stück hergestellt werden, woraus in logischer Konsequenz die Segmentbauweise mit Vorspannung folgte. Wie aus den Beispielen bereits umgesetzter UHPC-Brücken bekannt, führen die Anwendungen dünnwandiger UHPC-Elemente zu Stabilitätsproblemen [1, 2].

In der vorliegenden Anwendung ist durch das Umsetzen des bereits im Hochbau seit Jahrhunderten eingesetzten Konstruktionsprinzips der Faltwerke das Stabilitätsproblem gelöst. Hierzu konnten im Vorfeld vom Autor und dem Unternehmen SW Umwelttechnik einige Kleinprojekte im Anwendungsbereich des Hochbaus erfolgreich ausgeführt werden, die als „UHPC-Schalenbauten“ bezeichnet werden. Dazu fügen sich ebene Scheibenelemente, die im Werk mit hoher Genauigkeit und Qualität vor-



**Bild 1** a) Nordansicht Brückentragwerk, b) UHPC-Schale  
a) Bridgeview from north, b) UHPC shell



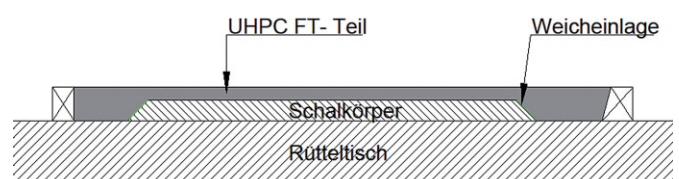
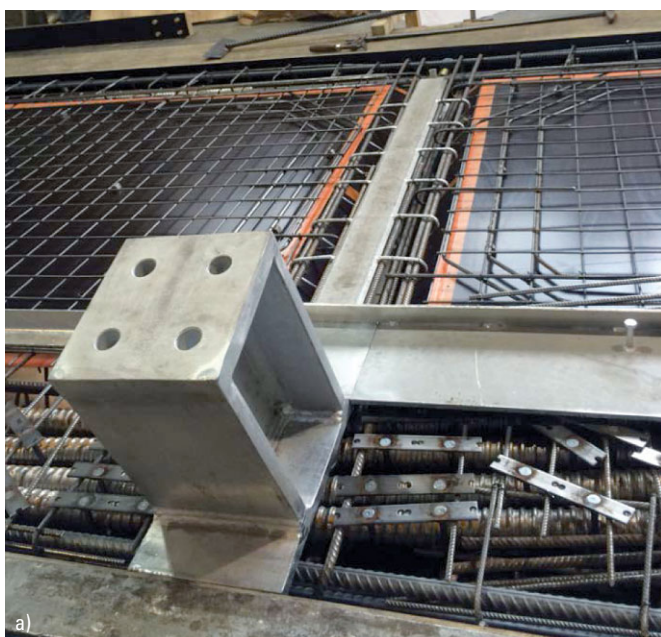
**Bild 2** Grundriss, Querschnitt und Ansicht Brückentragwerk, statisches System und Fugenanordnung  
Ground view, section and bridge view, static system and jointing arrangement

gefertigt werden, zu einer räumlichen Struktur. Das Besondere dabei stellen die Qualität des Elements aus UHPC, die Fügetechnik sowie die sich aus der Geometrie und räumlichen Anordnung ergebende Steifigkeit im System dar. Im vorliegenden Anwendungsfall der Brücke ist die Trogfläche im Querschnitt mit  $\beta_1 = 15^\circ$  nach außen geneigt und zusätzlich im Grundriss symmetrisch zur Tragwerksachse um  $\beta_2 = 2,7^\circ$  gedreht, sodass sich durch den in Tragwerkmitte erzeugten Knick eine geometrische Steifigkeit der dünnwandigen Fachwerksscheibe ergibt, die keine Verstärkung des Obergurts in Querrichtung erfordert und den Einsatz planparalleler, ebener Elemente möglich macht. Die Kabelgeometrie der Vorspannung im Riegel entspricht dem unterspannten Träger und ermöglicht einerseits ein wirtschaftliches Tragverhalten, andererseits das Fügen der Elemente durch die hohen Normalkräfte – im Zustand der größten positiven Momentenbelastung wird Dekompression erreicht. Die UHPC-Scheibe weist eine konstante Dicke von 60 mm auf und wird durch Rippen mit einer Dicke von 155 mm verstärkt. Im Auflagerbereich mit dem negativen Stützmoment wird die vollflächige Scheibe in Fachwerkstäbe aufgelöst, wobei die diagonale Rippe die volle Querkraft aufnimmt und in den Widerlagerflügel (= Stiel) einleitet. Die offenen Felder im Auflagerbereich sind mit verzinktem Stahlgeflecht gefüllt und betonen so die räumliche Wirkung des Tragwerks. In Feldmitte, mit positiven Momenten und hohen Druckkräften im Obergurt, tragen vertikale Querrippen sowie die vollflächige 60-mm-UHPC-Scheibe zur Stabilisierung des Obergurts bei. Durch den bereits erwähnten Knick kann der Obergurt in Tragwerkmitte als gehalten angesehen werden. So wird das System geometrisch ausgesteift. Produktionsbedingt lassen sich nur ebene UHPC-Elemente wirtschaftlich herstellen, die zusätzlich durch ihre geometrische Anordnung wiederum das Stabilitätsproblem der dünnwandigen Elemente entschärfen.

## 2 Herstellung des UHPC-Fertigteils

Die Schale besteht aus vier Fertigteilelementen mit einer Außenabmessung je Element von ca.  $16 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$ . Die Elemente sind spiegelsymmetrisch, sodass jeweils zwei Elemente mit der gleichen Schalgeometrie entstehen. Die Elemente selbst bestehen aus Rippen mit einer Bauteildicke von 155 mm und aus Platten mit einer Bauteildicke von 60 mm. Die Rippe wurde mit einer  $45^\circ$  Schrägabschallung hergestellt und verkehrt auf dem Rütteltisch betoniert. Die ebene Oberseite des Fertigteils bildet die Innenseite des Tragwerks. Das gesamte Fertigteil wurde nach Fertigstellung im Werk hydrophobiert. Diese Maßnahme war notwendig aufgrund des natürlichen Umstands, dass der Werkstoff UHPC ein erhöhtes Schwindverhalten [1] aufweist und aufgrund von Geometrie und Einbauteilen (Bewehrung, Stahlbauteile) zu Haarrissen neigt, die durch die Hydrophobierung verschlossen werden. Die Schwindverformungen von Platte und Rippen sind unterschiedlich. Um eine möglichst zwängungsarme Erhärtungsphase zu gewährleisten, sind in den Schrägabschallungen der Rippenelemente im Übergang zu den Plattenfeldern Weicheinlagen vorgesehen, was den Schalungsaufwand erhöht. Die Herstellungstoleranz der Elemente lag bei  $0/-10 \text{ mm}$ . Es tritt lediglich eine Verkürzung der Elemente zufolge Schwindverformungen auf.

Sämtliche Querrippen der Elemente sind zur Aufnahme der Querrahmenwirkung mit einbetonierten HEM-100-Profilen versehen und ermöglichen gleichzeitig einen stahlbautechnologischen Anschluss zu den Querträgern der Fahrbahnplatte. Die Rippengeometrie und der Stahleinbauteil erfordern eine Betondeckung von lediglich 15 mm. Deshalb wurden zur Vermeidung von Abplatzungen die Kanten der Profile abgerundet. Damit ist eine einigermaßen gute Verteilung der Fasern gewährleistet und



b)



c)

**Bild 3** a) Herstellen der Elemente am Rütteltisch, b) Schalprinzip, c) Probe-Zusammenbau im Werk  
a) fabricating of elements on a vibration table, b) principle of formwork, c) testing assembly

ein Abplatzen wird verhindert. Die Geometrie erfordert eine sehr genaue Herstellung mit sehr geringer Toleranz der in zwei Richtungen geneigten Stahleinbauteile, insbesondere im Kopfplattenanschluss, für den später zu montierenden Querträger der Fahrbahn (Bild 3).

Eine besondere Herausforderung war der Einbau der Hüllrohre für die Vorspannkabel. Die Hüllrohre sind in der Rippe geführt und weisen einen Außendurchmesser von 52 mm auf. Während des Betoniervorgangs mussten sie gegen Aufschwimmen gesichert werden. Besondere Sorgfalt wurde auf die dichte Ausführung gelegt, denn ein Eindringen von Betonschlämme hätte zum völligen Verlust des Elements geführt. Aufgrund der Durchdringung sämtlicher Stahleinbauteile durch die Hüllrohre musste vorab eine Einbaureihenfolge festgelegt werden. Gleich nach dem Betoniervorgang jedes Elements wurden die Spannhüllrohre mit einer Installationsfeder auf Fehlstellen untersucht. Es konnte an keinem der vier hergestellten Elemente eine Fehlstelle entdeckt werden. Da die Hüllrohre übereinander angeordnet sind, mussten an den Umlenkstellen U1 und U2 zwischen den Hüllrohren Kopfbolzen über den Radius verteilt eingebaut werden. Damit konnten die aus den Umlenkkraften  $U = P/r$  resultierenden Querkraftkräfte kurzgeschlossen werden.

An den Koppelstellen F2 und F3 sind zur bauseitigen Montage und zum Fügen der Elemente Aussparungen vorgesehen, die mithilfe von Styroporkörpern hergestellt wurden. Diese Aussparungen wurden auf der Baustelle mit einem Epoxidharz mit hoher Festigkeit verfüllt, das gleichzeitig auch zum Vergießen bzw. zum Verkleben der Fugen F2 und F3 herangezogen wurde.

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Herstellungsgenauigkeit der Elemente und der Unsicherheit über das Schwindverhalten der bis zu 16 m langen Elemente führte die Werksleitung einen Probe-Zusammenbau vor Auslieferung der Fertigteile an die Baustelle durch.

### 3 Montage und Toleranzen

Zeitgleich mit der Herstellung der UHPC-Fertigelemente im Werk wurden die Widerlager vor Ort betoniert. Die Fundamentbalken sind in die bestehende Furt eingebunden, womit die systemimmanenten Horizontalkräfte  $H$  des vorgespannten Zweigelenkrahmens ohne besondere Maßnahmen für die Fundierung aufgenommen werden und so einfache Streifenfundamente ermöglichten. Einen wesentlichen statischen und auch ästhetischen Bestandteil der Brücke liefern die Widerlagerflügel. Diese bilden den Stiel der Rahmenkonstruktion und sind in der Ebene der Schalenelemente fortgeführt. Die Neigung der Schalenelemente im Grundriss beträgt  $\beta_1 = 2,7^\circ$  zur Tragwerkslängsachse, die Neigung der Schalenelemente im Aufriss beträgt  $\beta_2 = 15^\circ$  zur Vertikalen und führt zu dem in Tragwerkmitte erwähnten Knick in der Fuge F3. Des Weiteren ist der Übergang vom UHPC-Fertigteil zum Widerlager der Böschungsneigung folgend ausgebildet. Zur Vermeidung

von Abtriebskräften ist im unmittelbaren Bereich der Vorspannung eine in Kraftrichtung rechtwinkelige Fuge angeordnet. Die Widerlagerflügel sind mit dem Fundamentbalken durch einfache Steckisenverbindungen „gelenkig“ verbunden. Eine aufwendige Betongelenkausbildung wurde in der ersten Planungsphase angedacht, konnte jedoch in der Ausführungsphase durch eine quasi gelenkige Lösung mit Steckisen ersetzt werden. Es zeigte sich im späteren Vorspannvorgang, dass ausreichende Rotationsfähigkeit in der Fuge F1 vorhanden ist und richtig entschieden wurde.

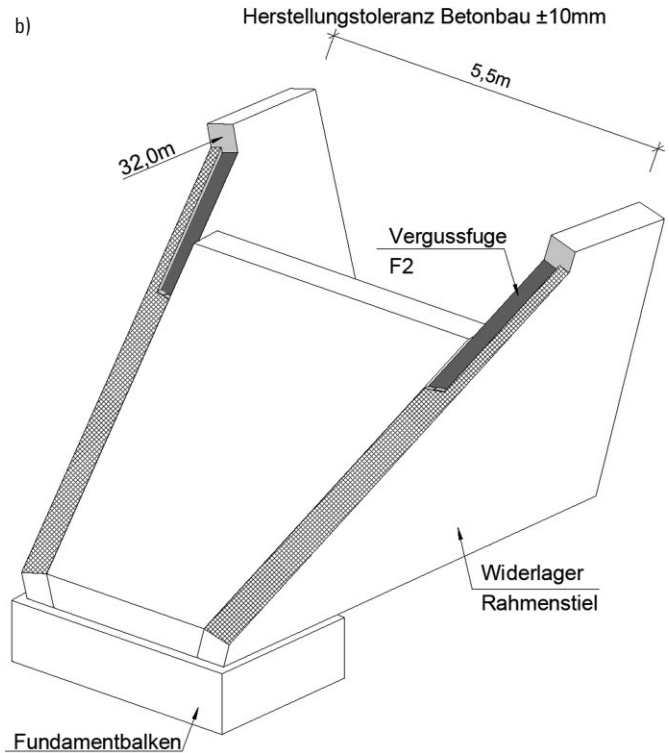
Die Widerlagerkonstruktionen an beiden Ufern sind auf eine Länge von 32 m völlig symmetrisch mit einer Toleranz der Fugenspreizmasse von  $\pm 10$  mm hergestellt worden (Bild 4). Die Schwierigkeit in der Herstellung lag in der zur Symmetrieachse der Brücke in allen drei Richtungen verdrehten Fugenebene F2, weshalb das Toleranzmaß in mehreren Punkten der Fugenebene eingehalten werden musste.

Die Aufnahme des Toleranzausgleichs, resultierend aus den vor Ort hergestellten Widerlagerflügelebenen ( $\pm 10$  mm) als auch den im Werk vorgefertigten UHPC-Elementen ( $0/-10$  mm), erfolgt ausschließlich in der Vergussfuge F2. Die in Tragwerkmitte befindliche Klebefuge F3 hingegen ist ohne Berücksichtigung eines Toleranzausgleichs ausgeführt worden. Sowohl die Verguss- als auch die Klebefugen sind mit einem 3-Komponenten-Epoxy-Klebemörtel ausgeführt. Die erforderliche Mindestdruckfestigkeit der Klebefuge liegt bei  $87 \text{ N/mm}^2$  und kann bereits durch die 7-Tagefestigkeit des Klebemörtels in Höhe von  $100 \text{ N/mm}^2$  erfüllt werden.

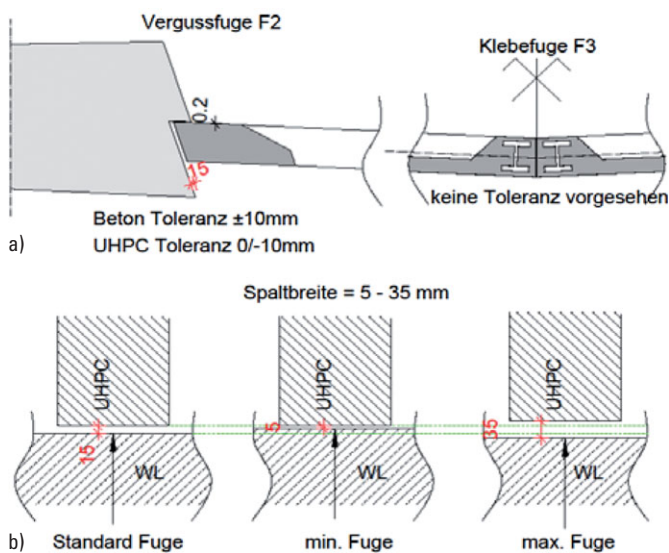
Die planerische Spaltbreite der Vergussfuge beträgt 15 mm und ergibt aufgrund der geforderten Toleranzen der einzelnen Bauteile einen Öffnungsspielraum der Fuge von 5 bis 35 mm (Bild 5).

Nach Herstellen der beiden Widerlager sowie der Montage eines Montagejochs in Tragwerkmitte und der Vormontage der UHPC-Fertigteile auf einen Vormontageplatz konnte die erste Tragwerkshälfte mit einem 30-Tonnen-Kran vom Ufer aus eingehoben werden (Bild 6). Die UHPC-Fertigteile wurden mithilfe der Fahrbahnquerträger und zusätzlicher temporärer Aussteifungselemente zum halben Tragwerk verbunden und konnten so als ein Stück eingehoben werden.

Nach dem Absetzen der ersten Tragwerkshälfte auf ein Hilfsjoch und dem Widerlager erfolgte das Einrichten der Elemente an den Koppelstellen. Mit dem Einhub der zweiten Tragwerkshälfte konnte die Klebefuge F3 mithilfe von Schraubverbindungen auf Kontakt verschraubt werden und für den zwingend erforderlichen Anpressdruck sorgen. Das Einrichten der Tragwerkshälften erfolgte jeweils durch die genaue Positionierung der Koppelstellen für die Hüllrohre, dies sowohl am Widerlager als auch in Tragwerkmitte. Zur Kontrolle des Fugenschlusses sind an den UHPC-Elementen in Tragwerkmitte sowohl an der



**Bild 4** a) Herstellen der Widerlagerflügelwände, b) Geometrie und Herstellungstoleranzen Betonbau  $\pm 10$  mm  
a) Fabricating of wing wall, b) geometry and concrete producing tolerance  $\pm 10$  mm



**Bild 5** a) Verguss- (F2) und Klebefuge (F3), b) erforderliche Fugenbreite der Vergussfuge F2  
a) Grouting- (F2) and splicing joint (F3), b) essential grouting joint width F2

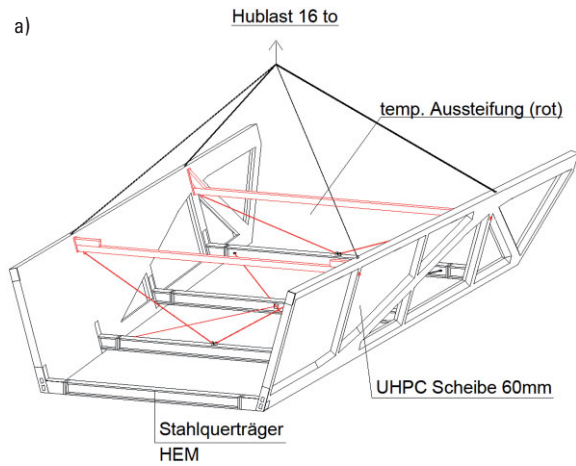
Unterseite als auch an der Innenseite auf Höhe der Fahr-  
bahn Spione montiert worden, die das Öffnen der Klebe-  
fuge zufolge eventuell auftretender Setzungen am Hilfs-  
joch ankündigen sollten. Der Zeitraum von Montage bis  
zum Spannen der Brücke dauerte ca. drei Wochen und  
war von der Fertigstellung der Fahrbahnplatte abhängig.

In diesem Zeitraum konnten jedoch keine Setzungen fest-  
gestellt werden.

Die Fahrbahnplatte wurde mit Teilfertigteilen C30/37 oh-  
ne Unterstellung in Anlehnung an [3] und nach den Aus-  
führungsdetails der ÖBV-Richtlinie für Verbundbrücken  
[4] hergestellt (Bild 7). Die Untersicht der Brücke weist in  
diesem Fall eine besonders hohe Qualität auf. Der Auf-  
beton ist ein Hochleistungsbeton HL-Beton C50/60, die-  
ser benötigt bei entsprechender Oberflächenentwässer-  
ung keine weitere Abdichtung. Bei der Herstellung ist  
auf eine entsprechende Nachbehandlung zu achten, wo-  
bei es ratsam ist, vor dem eigentlichen Betoniervorgang  
Probefelder herzustellen, um die Qualität der Oberfläche  
zu definieren. Die Entwässerung in Brückenlängsachse  
erfolgt über ein dachförmiges Längsgefälle zu beiden Wi-  
derlagern.

#### 4 Fügen der Bauteile

Unmittelbar nach Montage der in Mittelachse verklebten  
und verschraubten UHPC-Fertigteile wurden die Koppel-  
stellen für die Vorspannung an der Vergussfuge F2 fertig-  
gestellt bzw. die Hüllrohre hinsichtlich Durchgängigkeit  
der Litzen geprüft. An der Fuge F2 wurde zum nachträg-  
lichen Koppeln der Hüllrohre ein von oben zugänglicher  
Manipulationsraum vorgesehen, der als Stahleinbauteil



**Bild 6** Montage des halben Tragwerks; a) Montageaussteifung, b) Hubvorgang  
Installation of the half structure; a) temporary stiffening, b) lifting of the half structure



**Bild 7** Herstellen der Fahrbahnplatte; a) Verlegen der Bauteil-Fertigteile, b) Betonieren der Fahrbahnplatte mit Hochleistungsbeton ohne Abdichtung  
Installation deck slab; a) mounting prefabricated elements, b) concreting deck slab with high-performance-concrete without waterproofing

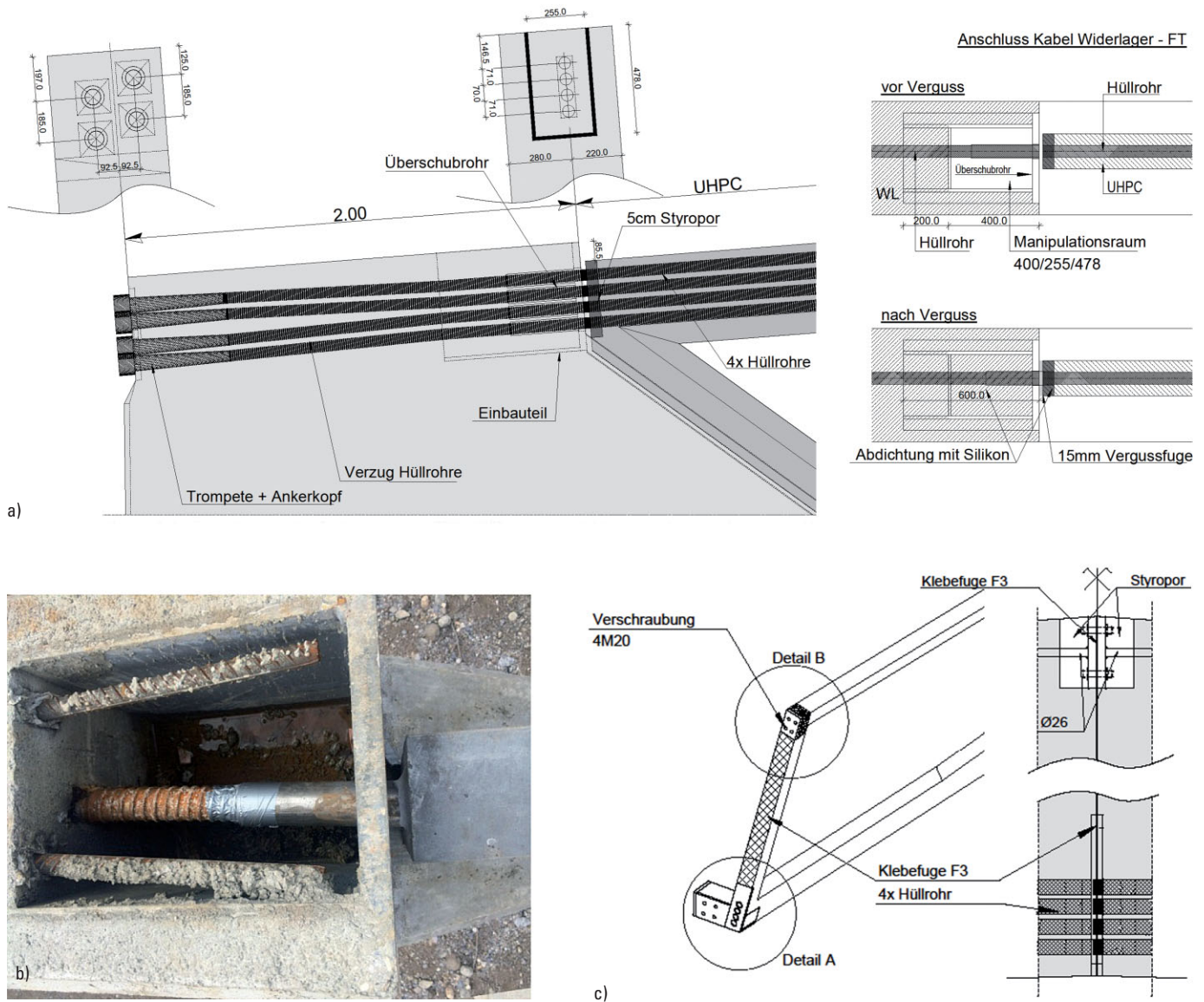
mit der Abmessung von 400/255/478 mm (L/B/H) im Widerlagerflügel eingebaut wurde. Dies ermöglichte das Koppeln der Hüllrohre mithilfe eines Stahlüberschubrohres mit einem Außendurchmesser von 60 mm und 300 mm Länge. Die Muffe wurde nach einer Manipulation in die richtige Lage an beiden Enden mit Silikon verschlossen.

Sowohl der Manipulationsraum als auch die Fuge F2 – die IST-Spaltbreite der Fuge betrug ca. 20 mm – wurden sofort nach Montage der Fertigteile mit Vergussmörtel unterschiedlicher Anforderungen vergossen (Bild 8). Der Manipulationsraum konnte mit einem schwindfreien und expandierenden Vergussmörtel vom Typ SikaGrout®-316 vergossen werden. Die Fugen F2 und F3 wurden aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Druckfestigkeit mit einem 3-Komponenten-Epoxi-Klebemörtel SikaDur®-43 HE ausgeführt, der bereits nach sieben Tagen eine Druckfestigkeit von 100 N/mm<sup>2</sup> aufweist.

Die Hüllrohre im Widerlagerflügel weisen aufgrund der Einzelverankerungen mit je vier Litzen sowohl einen ver-

tikalen als auch einen horizontalen Verzug in der Hüllrohrgeometrie auf.

Wie bereits im Abschn. 3 ausgeführt, wurde die Fuge F3 unmittelbar nach Einhub der zweiten Tragwerkshälfte verklebt und verschraubt. Die Verschraubung am Obergurt der UHPC-Fertigteile erfolgt mit vier M20 10.9 Schrauben, die auch im Endzustand unter der Einwirkung der ständigen Lasten wirksam sind. Der am Obergurt zur Manipulation erforderliche Platzbedarf für die Verschraubung wurde durch Einlegen von Styroporkörpern geschaffen und wie bereits erwähnt mit dem höherwertigen Mörtel (SikaDur®-43 HE) zur Aufnahme von auftretenden Druckkräften im Endzustand vergossen. Für den dichten Übergang der Hüllrohre im Untergurt war das Fräsen einer Dichtringnut im Kontaktblech vorgesehen. In der Ausführungsphase konnte darauf verzichtet werden, da die Verklebung der Fuge in Kombination mit dem Pressdruck aus der Vorspannung ein Austreten des Verpressguts verhinderte. Der Übergang der Vorspannkabel in Tragwerkmitte weist sowohl einen vertikalen als auch horizontalen Knickwinkel von  $\gamma_1 = \beta_2 = 2,7^\circ$  (vgl.



**Bild 8** Verguss- und Klebefugenausbildung; a) Vergussfuge F2, b) Vergussfuge mit Einbauteil und Muffe, c) Klebefuge F3  
Detail grouting- and splicing joint; a) grouting joint F2, b) grouting joints with mounting part and muffle, c) splicing joint F3

Bild 2) auf und blieb während des gesamten Verpressvorgangs der Hüllrohre dicht.

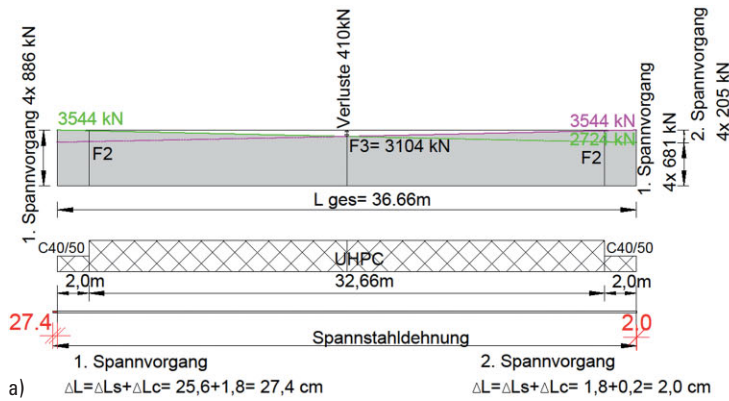
## 5 Spannvorgang

Nach dem Aufbringen der Betonierlast und dem Aushärten sowohl des Fahrbahnbelags als auch der oben erwähnten Verguss- und Klebefugen konnte nach ca. drei Wochen mit dem Spannvorgang begonnen werden. Das Einschießen der vier Spannlitzen mit dem Durchmesser von 21 mm pro Litzenpaket in die Hüllrohre mit dem Durchmesser von 52 mm bereitete aufgrund der vorhandenen Koppelstellen gewisse Schwierigkeiten, sodass z. T. von beiden Widerlagerseiten gearbeitet werden musste. Es bereitete nicht wie vielleicht vermutet der Knick in Tragwerkmitte die Schwierigkeiten beim Einschießen, sondern die Überschubmuffe in der Vergussfuge F2. Aufgrund der erwähnten Verwindungen der Hüllrohre im Widerlagerflügel kam es im Muffenstoss zu Engstellen,

die durch wechselseitiges Einschießen der Litzen von beiden Widerlagerseiten gelöst werden konnten (Bild 9).

Zum Einsatz kam eine Vorspannung mit nachträglichem Verbund durch Auspressen mit Zementmörtel, um damit die Resttragfähigkeit des Tragwerks zu erhöhen. Auf einen nachträglichen Austausch der Spannlitzen wurde damit verzichtet. Des Weiteren wurden mit der Wahl des Vorspannverfahrens die Spannkraftverluste zufolge Reibung aus dem Umlenkwinkel  $\alpha$  resultierend mit  $\mu = 0,22$  gegenüber  $\mu = 0,06$  einer verbundlosen Vorspannung deutlich erhöht. Ein Umstand, der dazu geführt hat, dass zwei Spannvorgänge, jeweils von beiden Widerlagerseiten, notwendig wurden.

Sowohl im ersten als auch im zweiten Spannvorgang wurde jeweils die volle Vorspannkraft der vier Litzenpakete, bestehend aus je vier Litzen  $A_v = 4 \cdot 1,5 \text{ cm}^2$  (Summe  $6 \text{ cm}^2$ ) mit einer Kraft von 886 kN, durch synchrones Spannen mittels zweier Spannpressen an beiden Trag-



**Bild 9** a) Spannvorgang, b) Spannprelle für ein Litzenpaket  
 a) Pretensioning, b) prestressing jack for one wire packet

werkshälften aufgebracht. Der Dehnweg eines Litzenpakets beim ersten Spannvorgang lag bei  $\Delta l_1 = 27,4 \text{ cm}$ , wobei sich ca. 1,8 cm aus der Betonstauchung des Tragwerks ergaben. Im zweiten Spannvorgang auf der gegenüberliegenden Widerlagerseite wurde wiederum die volle Vorspannkraft von 3544 kN aufgebracht und damit die gesamten Spannkraftverluste von ca. 25 % kompensiert. Die Dehnwege der Litzenpakete im zweiten Spannvorgang betrugen demnach nur noch  $\Delta l_2 = 2 \text{ cm}$ . Betrachtet man den völlig symmetrischen Vorspannkraftverlauf über die gesamte Tragwerkslänge, sind die Verluste in Tragwerkmitte mit ca. 410 kN am größten und konnten durch den gewählten Spannvorgang in zwei Schritten auf ca. 12 %, d.h., auf die Hälfte gegenüber einem einseitigen Spannvorgang, reduziert werden. Letztendlich konnte durch das Aufbringen der vollen Vorspannkraft von 3544 kN pro Tragwerkshälfte das Tragwerk in Tragwerkmitte von den beiden Hilfsjochen befreit werden.

## 6 Berechnung und Bemessungskonzept

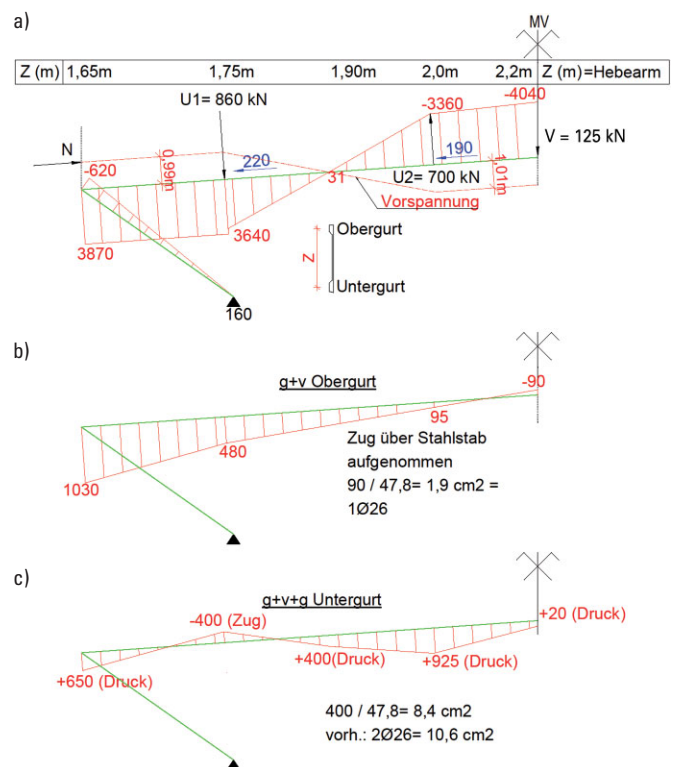
Die Berechnung der Brücke erfolgt zur Berücksichtigung aller räumlichen Einflussgrößen mithilfe eines 3D-FE-Modells – die Brücke wurde dabei als Schalenmodell generiert. Hier ist in erster Linie die Untersuchung der Stabilitätsgefährdung des Obergurts zu erwähnen, die ohne Berücksichtigung der räumlichen Stabilisierungseffekte nicht zu einem befriedigenden Ergebnis geführt hätte. Die Stabilität des Obergurts wird durch die geometrische Steifigkeit des bereits erwähnten Knicks in Tragwerkmitte sowie durch die in Querrichtung verlaufenden Rahmen im Abstand von ca. 3,8 m garantiert. Als Einwirkung ist das für Straßenbrücken übliche Lastmodell 1 nach EN 1991-2 inkl. NAD ÖNORM B1991-2 mit  $\alpha = 0,80$  angesetzt, das einer Doppelachselbelastung von  $2 \times 24 \text{ Tonnen}$  entspricht.

Wie aus Bild 2 und den Schnittkraftbildern am vereinfachten Rahmenmodell in Bild 10 ersichtlich, beschränkt sich die stabilitätsgefährdende Druckgurtlänge des Obergurts auf ca.  $L = 11,5 \text{ m}$  von der Tragwerkmitte aus. In diesem Bereich wurden auch die Felder zwischen den



Querrippen vollflächig mit 60 mm UHPC geschlossen und tragen somit zusätzlich zu den bereits erwähnten Effekten zur Stabilisierung des Obergurts bei. Es kommen somit drei positive Effekte zum Tragen.

Betrachtet man die Schlankheit des Obergurts in Querrichtung mit einer Breite von  $b = 155 \text{ mm}$ , so konnte die Schlankheit aufgrund des Knicks in Tragwerkmitte auf  $L/b \approx 75$  reduziert werden. Der positive Einfluss der Querrahmenwirkung sowie das Schließen der Felder für die Stabilisierung des Obergurts konnten am Schalenmodell über Plattenbeulen nachgewiesen werden. Der Last-



**Bild 10** Vereinfachte Ermittlung der Gurtkräfte am Rahmenmodell; a) Vorspannmomente, b) Normalkraftverlauf SLS g+v im Obergurt, c) Normalkraftverlauf ULS g+v+q im Untergrurt  
 Simplified calculation of flange forces by a frame model; a) prestressed moments, b) axial forces SLS g+v on top flange, c) axial forces ULS g+v+q on lower flange

steigerungsfaktor unter Vollast für Beulen des Obergurts wurde mit  $\eta > 2,1$  ermittelt.

Zur vereinfachten Nachrechnung und Kontrolle der Ergebnisse am FE-Modell wurde ein ebenes Rahmenmodell erstellt, das die Ergebnisse bestätigte. In Bild 10a wird die positive Wirkung der Vorspannung dargestellt. Es zeigt den stabilitätsgefährdeten Bereich des Obergurts und die Größenordnung der Umlenkkräfte aus der Vorspannung mit den daraus resultierenden Vorspannmomenten inklusive den Zwängungen. Die Umlenkkraft in Tragwerkmitte von  $V = 125 \text{ kN}$  ergibt sich aus der vertikalen Umlenkkraft mit  $\gamma_1 = 2,7^\circ$ , diese belastet das Tragwerk zusätzlich. Die sich aus der Umlenkung  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  ergebenden Verluste der Vorspannkraft betragen in Summe  $410 \text{ kN}$ .

Für die Bemessung der UHPC-Elemente konnten einerseits die Faserbewehrung (Faserlänge  $l_f = 12 \text{ mm}$ ,  $f_{yf} = 2000 \text{ N/mm}^2$ ) mit einem Faseranteil von  $\rho_f = 2 \text{ Vol.-%}$  als auch die Vorspannung herangezogen werden. Die Zugspannungen im Schalenelement sind damit auf  $\sigma_{cf0,d} = 8 \text{ N/mm}^2$  begrenzt. Für die Bemessung als Biegebauteil gilt der in [1] bzw. [2] vereinfacht angeführte Spannungsblock mit einem daraus aufnehmbaren Gebrauchsmoment von  $M_{zul} \approx 19,133 \cdot f_{ck} \cdot b \cdot h^2$  für Rechteckquerschnitte – die Betongüte der UHPC-Elemente ist mit  $f_{ck}/f_{ck,cube} = 160/190$  [1] ausgeführt worden. Zur Erhöhung der Resttragfähigkeit wurde herkömmlicher Bewehrungsstahl verwendet, um auftretende Zugkräfte in den Gurten abzudecken. Des Weiteren sind zur besseren Verteilung der Schwindrisse in den ausbetonierten Feldern zwischen den Gurten leichte Mattenbewehrungen AQ5.0 verwendet worden.

Alle Fugen sind als Nassfugen ausgeführt und der Vorspanngrad grundsätzlich so gewählt, dass eine Überdrückung für alle Lastfallkombinationen vorhanden ist. Für die Auslegung der Fuge in Tragwerkmitte ergeben sich zwei maßgebende Betrachtungen, die in Bild 10 b) und c) dargestellt sind. Dabei galt es nachzuweisen, welche Zugkräfte in der Fuge F2 unter den verschiedenen Lastkombinationen und der gewählten Vorspannkraft auftreten. Das Tragwerk konnte so abgestimmt werden, dass lediglich im Eigengewichtszustand SLS g+v im Obergurt über einen kurzen Bereich Zugkräfte von ca.  $90 \text{ kN}$  auftreten, die durch eine Verschraubung vier M20 an der Koppelstelle sowie ein im Obergurt verlaufendes Längseisen  $1 \text{ } \varnothing 26 \text{ mm}$  aufgenommen werden. Die in diesem Fall positive Wirkung der Vorspannverluste sind nicht berücksichtigt worden, sodass auf der sicheren Seite liegend der Bewehrungsstab eingelegt und die Resttragfähigkeit damit erhöht wurde. Für den Untergurt konnte im ULS g+v+q Dekompression nachgewiesen werden, sodass die Fuge stets überdrückt wird, auch wenn die Vorspannverluste in Tragwerkmitte berücksichtigt werden.

Da die Berechnung als idealer Zweigelenkrahmen nur bedingt durch die Ausbildung der Fuge F1 als Gelenk gegeben ist, musste auch eine Teileinspannung des Stiels betrachtet werden, der die positive Wirkung der Vorspan-

nung für das Tragwerk minimiert. Das ideale Gelenk am Übergang von Stiel zu Fundamentbalken sowie die möglichst zwängungsfreie Verdrehung des Stiels vor dem Spannvorgang wurden auch durch das Einschütten der Widerlagerflügelwände beeinflusst. Um die Drehbewegung der Widerlagerwand im Spannvorgang zwängungsärmer zu gestalten, wurde vor dem Einschütten der Widerlagerwand eine Folie als Gleitschicht eingebaut. Die möglichst freie Drehbewegung des Widerlagerflügels war erforderlich, um die Vorspannkraft über die Widerlagerflügel in die UHPC-Fertigteile einzuleiten. Der Widerlagerflügel wirkt somit gleichzeitig als Spannbloch zur Eintragung der Vorspannkraft in die UHPC-Elemente. Wie die parallel geführten Kraft- bzw. Wegmessungen gezeigt haben, konnten durch die oben angeführten Maßnahmen die Spannkraftverluste minimiert und das idealisierte statische System des Zweigelenkrahmens als ausreichend genau für das Abbilden des realen Tragverhaltens bestätigt werden.

## 7 Resümee

Die Umsetzung des Projekts war nur möglich, da auf einzuhaltende Formalismen beim Einsatz neuer Baustoffe seitens des Bauherrn verzichtet wurde und die Berechnungen und Ansätze des Ingenieurs in Abstimmung mit der Fertigteilfirma als Zertifizierung ausreichten. Diese vom Ingenieurgedanken geleitete Konstruktion zeigt ihre Ästhetik und bestätigt, dem Trend der Überregulierung durch Normen und Richtlinien entgegenzuwirken.

Mit diesem innovativen Bauwerk konnte nicht nur gezeigt werden, dass die Anwendung von UHPC ein werkstoffgerechtes Planen erfordert, sondern sich dieses auch in ästhetischer Formfindung ausdrücken lässt (Bild 11). Die Anwendung der UHPC-Schalenbauweise soll in dieser Form weiterentwickelt werden und zu weiteren Anwendungsprojekten im Hoch- und Brückenbau führen. Die derzeitigen Grenzen der Herstellung der Elemente



**Bild 11** Brückenansicht West  
Bridgeview from west

mit 16 m Länge wurden bei diesem Projekt erreicht. Ein wesentliches Augenmerk soll der Entwicklung der Kopelstellen sowie dem reibungsfreien Einbau der Vorspannkabel gelten. Es hat sich in diesem Projekt auch gezeigt, dass auf aufwendig herzustellende Fugенbearbeitung einer Trockenfuge verzichtet werden kann und die Nassfuge Vorteile in der Toleranz und Montage aufweist. Wie überhaupt sollte aus Sicht des Autors dem Fügen durch Verkleben vermehrt Aufmerksamkeit geschenkt werden.

## Dank

Um Bauwerke dieser Art umsetzen zu können, bedarf es den unbedingten Willen aller Beteiligten (Tab. 1). Darum gilt in erster Linie der Dank dem Bauherrn Marktgemeinde St. Jakob im Rosental für dessen mutige Entscheidung, dieses Projekt mitzutragen, sowie der Firma SW Umwelt-

**Tab. 1** Beteiligte  
Participants

Bauherr	Marktgemeinde St. Jakob im Rosental in Kärnten (Österreich)
Ausführung Betonarbeiten	Teerag Asdag AG, Klagenfurt
Ausführung Spannarbeiten	KB-Vorspann-Technik GmbH, Salzburg
Ausführung UHPC-Fertigteil	SW Umwelttechnik GmbH, Lienz (Österreich)
Planung	Structural Design Olipitz ZT GmbH, Graz Architektonische Mitwirkung: Dr. PETER ECKERSTORFER

technik aus Osttirol, die für die Herstellung und Montage der UHPC-Elemente verantwortlich war.

## Literatur

- [1] FEHLING, E.: *Ultrahochfester Beton UHPC*. Betonkalender 2013, 2. Teil, S. 117–240.
- [2] FREYTAG, B.; SANTNER, G.: *Bemessung von Bauteilen aus faserbewehrtem UHPC – Zug, Druck, Biegung*. In: Nachhaltig Bauen mit Beton: Werkstoff und Konstruktion, 2. Grazer Betonkolloquium, 2014.
- [3] OLIPITZ, M.: *Verbundbrücken mit Teilfertigteilen im kleineren und mittleren Spannweitenbereich*. In: Zement + Beton 2005, Heft 1, S. 44.
- [4] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik: *Richtlinie Stahl-Beton-Verbundbrücke*. Ausgabe: Juni 2006.

## Autor



Dipl.-Ing. Dr. techn. Michael Olipitz  
SDO ZT GmbH  
Sporgasse 32  
8010 Graz  
Austria  
olipitz@olipitz.com