

Fußgängerfertigteilbrücke aus ultrahochfestem Faserbeton in Lienz

Entwurf und Ausführung

Text | Michael Reichel, Johann Duregger

Bilder | © TU Graz, SW Umwelttechnik

In unserer wachsenden Infrastruktur werden die Forderungen nach wartungsarmen und langlebigen Bauwerken, welche auch den Forderungen der Nachhaltigkeit entsprechen, immer stärker.



Bild 1.1: Ansicht der Fußgängerfertigteilbrücke Lienz

Die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton liegt in einem Bereich von ca. 120 MPa bis 200 MPa und darüber. Höhere Druckfestigkeiten als 200 MPa eignen sich jedoch kaum zur wirtschaftlichen Anwendung bei Ingenieurbauwerken und bleiben damit eher Spezialanwendungen vorbehalten.

1 Einleitung

Dass ultrahochfester Beton eine solch hohes Potenzial in Bezug auf seine Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften aufweist, zeigten bereits Forschungsergebnisse (z. B. [1], [2]) vor ca. 20 Jahren, die aktuelle Forschungsergebnisse (z. B. [3], [4]) heute inzwischen bestätigen. Berücksichtigt man die enormen Stärken dieses Baustoffes konsequent bei der Umsetzung in einem materialgerechten Entwurf, lassen sich wirtschaftliche, dauerhafte und nachhaltige [5] Bauwerke mit eminentem Nutzen für unsere Volkswirtschaft errichten.

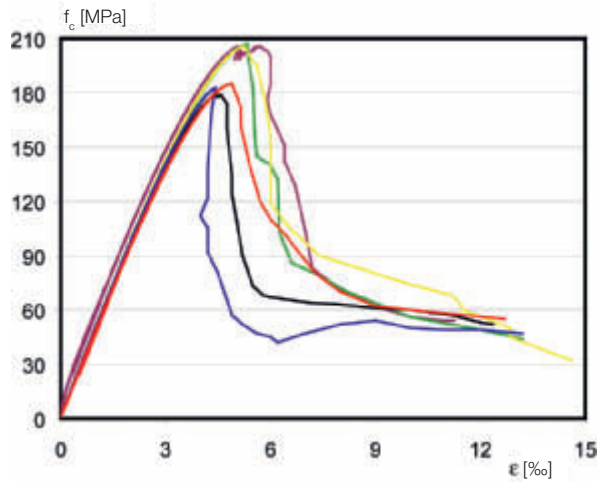
Mehr als 40 weltweit errichtete Brückenbauwerke – mit steigender Tendenz – belegen die zunehmende Akzeptanz dieses Baustoffes. Bereits vor 4 Jahren hat die Firma SW Umwelttechnik dieses Potenzial erkannt und begonnen, eine Rezeptur mit eigenen Rohstoffen gemeinsam mit der Universität Kassel zu entwickeln. Nach der erfolgreichen Entwicklung wurde in weiterer Folge nach entsprechenden Möglichkeiten für Erstanwendungen gesucht. Die Rad- und Fußgängerbrücke in Lienz stellt neben zwei weiteren kleineren Anwendungsbeispielen, der Fußgängerbrücke über die

„Dürre Liesing“ in Wien und der Feistritzbachbrücke, einen ersten größeren Schritt in der praktischen Umsetzung von großen Fertigteilen aus ultrahochfestem Beton für die Firma SW Umwelttechnik dar.

2 Eigenschaften und Tragverhalten von ultrahochfestem Faserbeton

Die Druckfestigkeit von ultrahochfestem Beton liegt in einem Bereich von ca. 120 MPa bis 200 MPa und darüber. Höhere Druckfestigkeiten als 200 MPa eignen sich jedoch kaum zur wirtschaft-

Bild 2.1: Spannungs-Dehnungs-Beziehungen zweier verschiedener Rezepturen für ultrahochfesten Beton der Fa. SW Umwelttechnik im Druckbereich

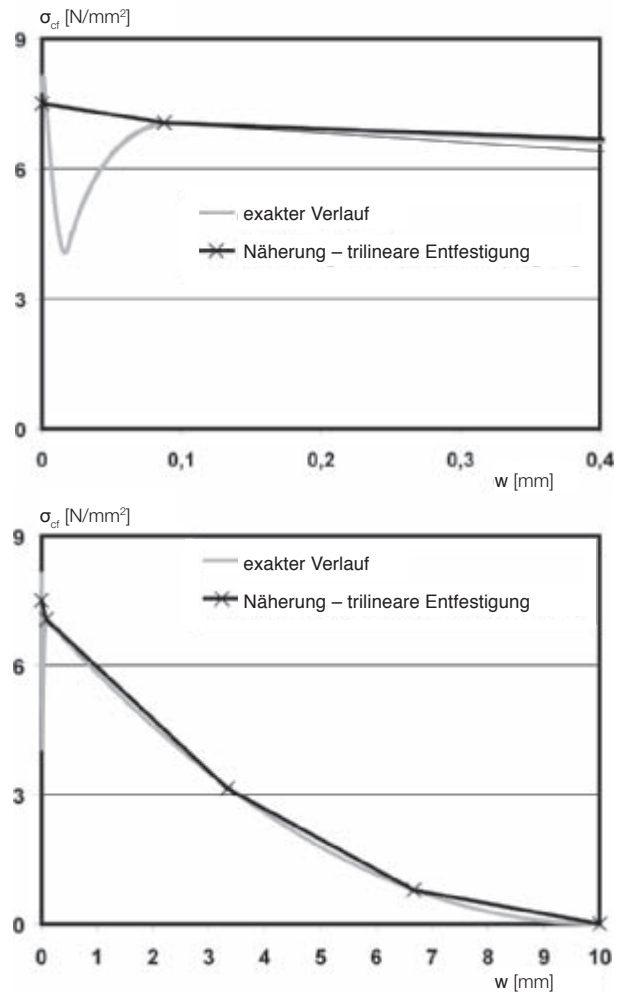


lichen Anwendung bei Ingenieurbauwerken und bleiben damit eher Spezialanwendungen vorbehalten. In Bild 2.1 sind exemplarisch Spannungs-Dehnungs-Beziehungen einer entwickelten Rezeptur für ultrahochfesten Beton unter Druckbeanspruchung dargestellt. Das notwendige duktile Verhalten im abfallenden Ast ergibt sich durch Zugabe von Stahlfasern.

Ultrahochfeste Betone weisen ohne Stahlfasern eine Zugfestigkeit zwischen 6 bis 11 MPa auf. Die Zugabe von Stahlfasern bewirkt eine Nachrisszugfestigkeit nach dem Reißen der Betonmatrix, die je nach Fasergehalt, Fasergeometrie und Faserorientierung weiter ansteigen kann oder wieder abfällt. Die Obergrenze der Nachrisszugfestigkeit in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Verarbeitbarkeit lässt sich ca. zwischen 10 bis 13 MPa einordnen. Aus dieser Sicht heraus sollte ein wirtschaftliches Abwägen zwischen Verzicht auf Bewehrung und damit meist hohem Fasergehalt oder optimaler Kombination aus Bewehrung und eher niedrigem Fasergehalt erfolgen. Neueste Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass schon bei geringen Fasergehalten eine gleichmäßige Rissverteilung mit sehr kleinen Rissabständen und Rissweiten, die absolut harmlos sind, erreicht wird [6]. In den Haupttragrichtungen sollte die gegenüber der Druckfestigkeit niedrigere Zugfestigkeit durch Vorspannung kompensiert werden. Bild 2.2 zeigt die zur Berechnung verwendete Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung unter zentrischem Zug.

Der Elastizitätsmodul von ultrahochfestem Beton liegt in der Größenordnung von 40.000 bis 60.000 MPa. Der Zuwachs des E-Moduls ausgehend von Normalbeton ist damit wesentlich kleiner als der Festigkeitszuwachs, vor allem bezogen auf die Druckfestigkeit. Dies bedingt, dass die Materialeinsparung infolge der höheren Festigkeiten nicht in schlankeren Tragwerken resultieren sollte, sondern eher in dünnwandigen, dafür aber ausreichend steifen Tragwerken ähnlich wie im Stahlbau.

Bild 2.2: Zur Berechnung verwendete Spannungs-Rissöffnungs-Beziehungen des ultrahochfesten Betons



Neueste Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass schon bei geringen Fasergehalten eine gleichmäßige Rissverteilung mit sehr kleinen Rissabständen und Rissweiten, die absolut harmlos sind, erreicht wird.

Weitere nennenswerte Eigenschaften sind das fast vernachlässigbare Kriechen mit $\phi \leq 0,3$ und das nicht mehr vorhandene Schwinden nach einer Wärmebehandlung. Die Verarbeitung und Nachbehandlung ist gegenüber Normalbeton aufwändiger und bedingt Erfahrung und Sensibilität des Personals. Somit bleibt die Herstellung von Bauteilen aus ultrahochfestem Beton derzeit in der Regel eher Betonfertigteilwerken vorbehalten.

Da die hohen Festigkeiten von ultrahochfestem Beton aus einer hohen Packungsdichte des Korngemisches bis in den Mehlkornbereich und einem niedrigem w/b-Wert resultieren und damit eine sehr geringe Porosität bedingen, wirkt sich dies äußerst günstig auf die Dauerhaftigkeitseigenschaften aus. Der Widerstand gegen das Eindringen korrosiver

Tafel 2.1: Eigenschaften der verwendeten Rezeptur

Druckfestigkeit:	$f_{ck} = 145 \text{ MPa}$
Nachrisszugfestigkeit:	$f_{ctk} = 7,0 \text{ MPa}$
Elastizitätsmodul:	$E_c = 48000 \text{ MPa}$
Querdehnzahl:	$\mu = 0,2$
Wärmeausdehnungskoeffizient:	$1,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$
Kriechzahl:	0,3 (mit Wärmebehandlung > 48 h, 60° C)
Schwindmaß:	0 (mit Wärmebehandlung > 48 h, 60° C)

Flüssigkeiten und Gase, Karbonatisierung, Eindringen von Chlorid und Abwitterung infolge Frost-Tausalz-Beanspruchung erhöht sich wesentlich gegenüber Normalbeton. Weiters sind der hohe Widerstand gegen säurehaltige Wässer sowie der hohe Widerstand gegen mechanische Beanspruchung wie Abrasion und Erosion zu nennen, welche insgesamt letztlich zu einer hervorragenden Dauerhaftigkeit und damit langen Lebensdauer führen. Wegen dieses hohen Dauerhaftigkeitspotenzials ist ultrahochfester Beton ein idealer Baustoff im Brückenbau. Die zum Bau der hier beschriebenen Fertigteiltrücke verwendeten Festbetoneigenschaften sind abschließend in Tafel 2.1 zusammengestellt.

3 Beschreibung des Bauwerkes – Entwurf und Detaillierung

Der Ausbau und die Erweiterung des Radwegnetzes der Stadt Linz erforderte den Neubau einer Rad- und Gehwegüberführung über die Amlacher Straße neben einer bestehenden Eisenbahnüberführung. Bild 3.1 zeigt die

Bild 3.2: Querschnitt und 3-D Berechnungsmodell des finalisierten Entwurfes

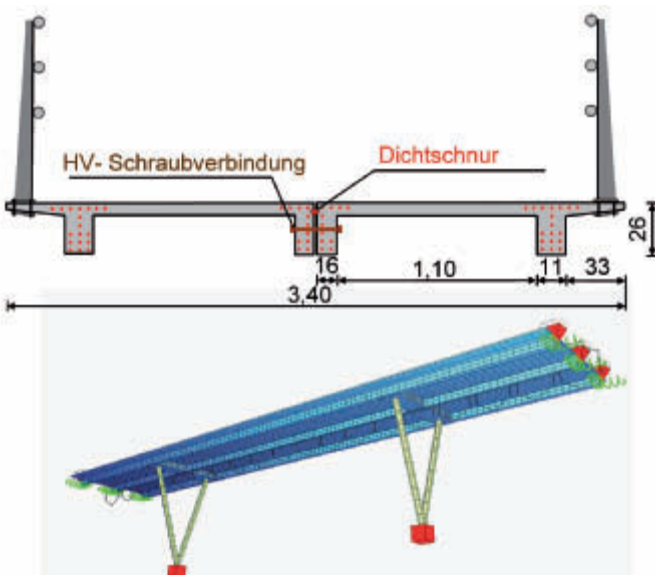


Bild 3.1: Ursprungssituation des Bestandes vor dem Bau der Brücke



Ursprungssituation vor dem Bau der Brücke. Das neu zu errichtende Bauwerk soll dabei direkt angrenzend vor der vorhandenen Bahnbrücke verlaufen.

Wesentliche Vorgaben für den Entwurf waren neben den fixen Randbedingungen aus der Geh- und Radwegtrassierung und der Belastung gemäß ON EN 1991-2 mit einem 12-t-Dienstfahrzeug eine maximal zulässige Bauhöhe von nur 80 cm, um das Lichtraumprofil unter der Brücke nicht einzuschränken, sowie kurze Sperrpausen während der Errichtung. Die Einbeziehung der Bestandsstützwände der seitlichen Geh- und Radwege zur Abstützung des Überbaus war bei entsprechend leichter Ausführung und geschickter Wahl der Bauzustände nicht ausgeschlossen. Infolge der erforderlichen wesentlichen Kriterien „schnelle Montage – leicht und schlank“ stellte ein wartungsarmes Bauwerk aus ultrahochfestem Beton eine konkurrenzfähige Alternative zu Tragsystemen aus herkömmlichen Materialien dar.

Im Zuge einer Variantenstudie wurden mehrere Varianten vom einfeldrigen Fertigteiltragwerk bis hin zu Stahlverbundkonstruktionen unter Verwendung von ultrahochfestem Beton betrachtet. Um die Schlankheit der Brücke weiter zu erhöhen und die Schwingungsproblematik zu entschärfen, wurden auch Dreifeldsysteme unter Nutzung der bestehenden Stützwände als Gründung untersucht. Der finalisierte Entwurf ist ein Dreifeldsystem bestehend aus zwei in Querrichtung zusammengespannten Fertigteilen, der auf Wunsch des Fertigteilherstellers als weiteren wirtschaftlichen Produktionsvorteil eine bereits vorhandene Stahlschalung für Pi-Platten nutzen konnte. Der Querschnitt und das Gesamttragwerk sind in Bild 3.2 dargestellt. Trotz der weitgehend vorgegebenen Schalungsgeometrie ist das Tragwerk sehr schlank (Konstruktionshöhe 26 cm) und leicht (22 t inkl. Stützen und Ortbetonquerträger) und ermöglicht damit eine schnelle sowie einfache Montage innerhalb eines Tages.

Die im Spannbett vorgespannten Fertigteile enthalten außer der Spannstahlbewehrung und in gesonderten lokalen Bereichen keine weitere Betonstahlbewehrung. Die Nachriss-

Bild 3.3: Detail Bewehrungsführung Anschluss Ortbetonquerträger – Fertigteil
 Bild 3.3 a: Querträgeranschluss am Innensteg

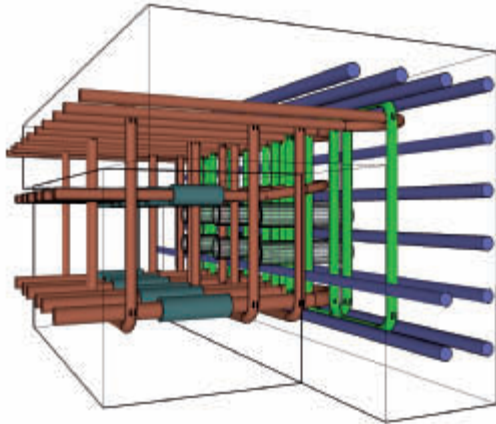
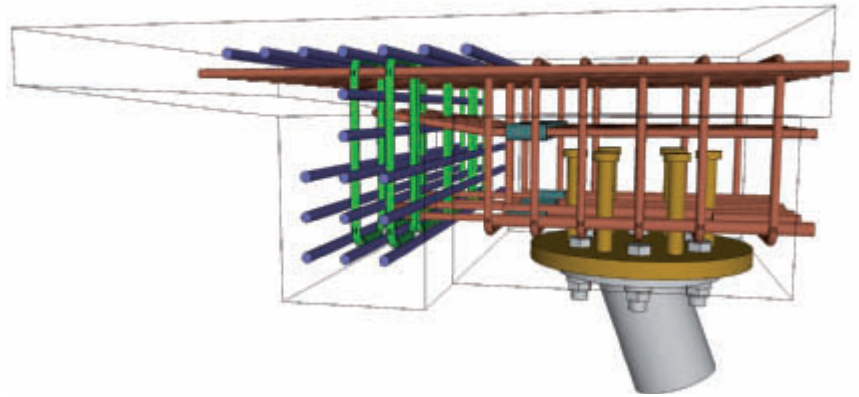


Bild 3.3 b: Querträgeranschluss am Außensteg und Stützenanschluss



zugfestigkeit infolge der Stahlfasern deckt allein die Tragfähigkeit in Querrichtung, die Querkrafttragfähigkeit und die Mindestbewehrung ab. Lediglich lokal im Endverankerungsbereich der Spanngliedlitzen und in den Anschlussbereichen der nachträglich ergänzten Querträger ist infolge des konzentrierten Kraftflusses zusätzliche Bewehrung notwendig. Die beiden Fertigteile wurden noch im Werk durch hochfeste vorgespannte Schrauben verbunden. Um die Stahlschalung nicht zu zerstören, wurden die Querträger aus schwindarmem Normalbeton nachträglich anbetoniert. Dies hatte wiederum die in Bild 3.3 gezeigten aufwändigen Bewehrungsanschlüsse durch den spärlich vorhandenen Platz zwischen Ortbetonquerträger und Fertigteiltragwerk zur Folge.

Nachdem das Tragwerk eingehoben wurde, ergänzen schlanke V-förmige Stahlzwischenstützen, aufgelagert auf den bestehenden Stützmauern, das Tragwerk zu einem Dreifeldsystem. Da die leichten Fertigteile zunächst ihr Eigengewicht über die Brückengesamtlänge als Einfeldträger abtragen, wird die Belastung auf die bestehenden Stützmauern minimiert. Nur die Verkehrslasten wirken am endgültigen Dreifeldsystem. Deshalb bleiben die Stützmomente klein, die durch eine nahezu zentrische Spannbettvorspannung beherrschbar sind. Wegen des geringen Kriechens und vernachlässigbaren Schwindens des wärmebehandelten ultrahochfesten Betons ist die Betrachtung von Schnittgrößenumlagerungen vernachlässigbar.

4 Begleitende Materialtests und Bauteilversuche

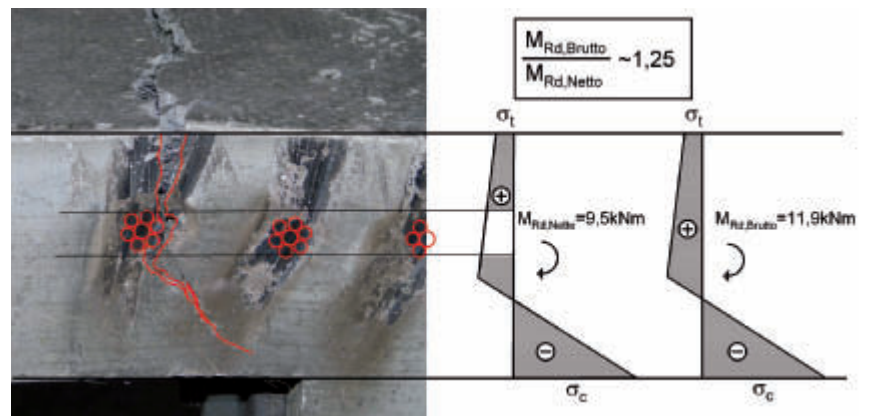
Zur Bemessung von ultrahochfestem Faserbeton existieren derzeit noch keine gültigen Normen und Richtlinien, sodass die Bemessung durch Bauteilversuche abgesichert werden sollte. Zum anderen hat die Faserorientierung, die durch die gewählte Betoneinbringung stark beeinflusst wird, einen entscheidenden Einfluss auf die Tragfähigkeit in Plattenquerrichtung.

Aus diesem Grund erfolgte die Herstellung von jeweils einem 1:1-Probekörper mit der gleichen Betoneinbringung wie später am tatsächlichen Bauwerk, um den gewählten Herstellungsprozess, aber zugleich auch die in den statischen Berechnungen getroffenen Annahmen zu bestätigen. Dafür wurde einmal das Querbiegeverhalten quasi in Feldmitte

Zur Bemessung von ultrahochfestem Faserbeton existieren derzeit noch keine gültigen Normen und Richtlinien, sodass die Bemessung durch Bauteilversuche abgesichert werden sollte.

zwischen zwei Stegen und einmal das Stützmoment über dem Mittelsteg untersucht. Die Versuchsdurchführung erfolgte als reiner Belastungsversuch mithilfe von Gewichten aus Beton und Stahl vor Ort im Fertigteilwerk. Der Vergleich der gemessenen Traglasten mit den Bemessungstraglasten der statischen Berechnung ergab eine ausreichende Sicherheit von 2,15. Zusätzlich ließ sich aus den gemessenen Traglasten die Zugarbeitslinie zurückrechnen, die gut mit der der statischen Berechnung zugrunde liegenden Arbeitslinie korrelierte.

Bild 4.1: Lokalisiertes Biegeversagen der Platte in Querrichtung im Bereich der Querschnittsschwächung durch die Spannbettlitze und qualitativer Vergleich der aufnehmbaren Biegemomente



Aufgrund des Versagensmechanismus im Bereich des Stützmomentes erscheint noch wesentlich zu bemerken, dass bei der dünnwandigen Bauweise ähnlich wie im Stahlbau die Berücksichtigung von örtlichen Querschnittsschwächungen bei der Bemessung wieder mehr in den Vordergrund rückt, wie Bild 4.1 zeigt.

5 Fertigung und Montage

Als Schalung für die Fertigteile aus ultrahochfestem Beton wurde die im Werk Lienz vorhandene Pi-Plattenstahlschalung (Pi-Platte ist eine Doppelstegplatte) für den vorgesehenen Querschnitt entsprechend modifiziert, wobei besonderes Augenmerk auf einer absolut dichten Schalhaut lag.

Das Mischen erfolgte in Chargen zu je 0,5 m³ und erforderte somit die Anpassung der Verarbeitungsgeschwindigkeit, um einen kontinuierlichen Materialfluss zu sichern und die schädliche Elefantenhautbildung zu vermeiden. Nach Befüllung der beiden Stege wurde anschließend die Platte in Schlangenlinien quer zur Brückenlängsrichtung betoniert, um die Fasern mit der Fließrichtung des Betons in ihre statisch günstigste

Die komplette Brücke wurde mit einem Sondertransport zur Baustelle gebracht und dort mit einem Mobilkran auf die vorbereiteten Widerlager während einer Sperrpause für den Verkehr von nur 3 h versetzt.

Lage zu orientieren. Das Abrollen mit einer Nadelwalze diente zum Lösen von unter der Oberfläche eingeschlossenen Luftblasen. Die Stahlschalung ist mit frequenzgesteuerten Außenrüttlern ausgestattet, die während der gesamten Betonage in Betrieb waren. Durch zusätzliche Tauchrüttler ließ sich eine ausreichende Vernadelung der einzelnen Einbauchargen gewährleisten. Anschließend wurde die Oberfläche mit PE-Folie abgedeckt.

24 Stunden nach der Betonage wurde die Schalung geöffnet und das Bauteil wiederum mit einem Vlies und einer PE-Folie abgedeckt, um die Fertigteile einer Wärmebehandlung für die Dauer von 48 h mit 50–60 °C zu unterziehen. Danach verblieben die Fertigteile für weitere 3 Tage in der Schalung. Erst dann erfolgte das Aufbringen der Spannbettvorspannung.

Die Verbindung der beiden Pi-Platten-Fertigteile mithilfe der hochfesten Schrauben wurde im Werk durchgeführt. Danach erfolgte das nachträgliche Anbetonieren der End- und Zwischenquerträger, das sowohl vom Einbau der Anschlussbewehrung als auch von der Betoneinbringung mittels Einfüllöffnungen in der Fertigteilplatte hohe Anforderungen an die Produktion stellte.

Die komplette Brücke wurde mit einem Sondertransport zur Baustelle gebracht und dort mit einem Mobilkran auf die vorbereiteten Widerlager während einer Sperrpause für den Verkehr von nur 3 h versetzt. Abschließend erfolgte die Montage des Glasgeländers an bereits einbetonierte Profilanschlüsse, das mit seiner entsprechenden Leichtigkeit die Schlankheit der Brücke unterstreicht. Wie zuvor bereits beschrieben, ist ultrahochfester Beton gegen aggressive Umwelteinwirkungen wie Chlorid und auch mechanische Einwirkungen weitgehend resistent. Um jedoch die geforderte Rutschsicherheit auf der Brückenoberfläche zu gewährleisten, hat man sich für das zusätzliche Auftragen einer dünnen Epoxidharzbeschichtung mit Quarzsandeinstreuung entschieden.



Bild 5.1 a: Betonage der Fertigteile



Bild 5.1 b: Abziehen der Oberfläche mit einer Nadelwalze

6 Zusammenfassung

Der Bau der Lienzer Fußgängerbrücke aus ultrahochfestem Beton demonstriert einen weiteren Schritt zur Umsetzung der Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet des Hochleistungsbetons. Es zeigt sich eindrucksvoll, dass ein sinnvoller Einsatz eines neuen, aber auch teureren Hochleistungswerkstoffes unter Einbeziehung einer geschickten Montagewahl dennoch zu wirtschaftlichen, wartungsarmen wie auch ästhetisch ansprechenden Bauwerken mit langer Lebensdauer führen kann. Die Autoren danken letztlich der Stadtgemeinde Lienz für ihren Mut zur Realisierung eines derartigen Bauwerkes. Nur durch die weitere Umsetzung in der Praxis lassen sich wichtige Erfahrungen und Erkenntnisse im Umgang mit dem neuen Baustoff gewinnen, die wiederum neue klare Aufgaben für eine anwendungsorientierte Forschung liefern, um letztlich das viel versprechende Potenzial des Materials in Zukunft einer breiteren Anwendung zuzuführen. ■



Bild 5.2 a: Montage der Brücke

7 Literatur

- [1] Bache, H.H.: Compact Reinforced Composite, Basic Principles, CBL Report No 41, Aalborg Portland A/S, 1987.
- [2] Richard, P., Cheyreyz, M.: Reactive Powder Concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, ACI SP144-24, 507-518, 1994.
- [3] Schmidt, M. et al.: Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton. DAFStb, Heft 561, Berlin: Beuth 2007.
- [4] Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T. u. a.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Uni Kassel 2003.
- [5] Sakai, K. et al.: Environmental design of concrete structures – general principles. fib bulletin 47, Lausanne 2008.
- [6] Leutbecher, T.: Rissbildung und Zugtragverhalten von mit Stabstahl und Fasern bewehrtem Ultrahochfesten Beton (UHPC). Dissertation, Uni Kassel 2007.



Bild 5.2 b: Fertige Brücke mit Glasgeländerkonstruktion

Projektdaten:

Bauherrschaft: Stadtgemeinde Lienz | **Herstellung und Montage des Brückentragwerkes:** SW Umwelttechnik GmbH | **Entwurf, Tragwerksplanung und Detaillierung:** Institut für Betonbau /TU Graz | **Planung und Durchführung der Bauteilversuche:** Labor für Konstruktiven Ingenieurbau/TU Graz | **Begleitende Materialtests:** Baulabor Fachhochschule Kärnten | **Zivilingenieur – Verkehrsplanung:** Tragwerksplanung Tagger | **Herstellung der Widerlager:** Fa. OSTA/Lienz | **Glasgeländer:** Fa. Glas Rainer | **Fahrbahnbeschichtung:** Fa. Bauchemie/Villach

Autoren:

DI Michael Reichel
TU Graz, Institut für Betonbau
▶ www.ibb.tugraz.at
Ing. Johann Duregger
SW Umwelttechnik
▶ www.sw-umwelttechnik.at