

QUICKWAY

Hochfahrwege aus UHPC

AUTOREN | Johannes Oppeneder, Lutz Sparowitz, Philipp Hadl, Bernhard Freytag, Nguyen Viet Tue

BILDER | © Institut für Betonbau/Labor für Konstruktiven Ingenieurbau, TU Graz

Nie wieder Verkehrsstaus in den größten Städten der Welt – dieser heutzutage unvorstellbare Luxus war die Motivation für die Entwicklung von QUICKWAY, welches u. a. von der FFG im Programm „Mobilität der Zukunft“ in den vergangenen drei Jahren gefördert wurde. Ein engmaschiges Netz aus aufgeständerten einspurigen Fahrwegen aus faserbewehrtem Ultra-Hochleistungsbeton (UHPFRC) bietet eine zusätzliche Verkehrsebene, auf der sich autonome Fahrzeuge schnell und sicher bewegen können. Über dieses Netz werden nicht nur der Individualverkehr und Kleingütertransporte abgewickelt, sondern auch der öffentliche Massenverkehr – es bietet somit eine kostengünstige Alternative zur U-Bahn, insbesondere in Gebieten mit problematischem Baugrund. Das gewöhnliche Straßennetz soll nur noch dem Quell- und Zielverkehr sowie dem Zweirad-, Fußgänger und Schwerverkehr dienen [1].

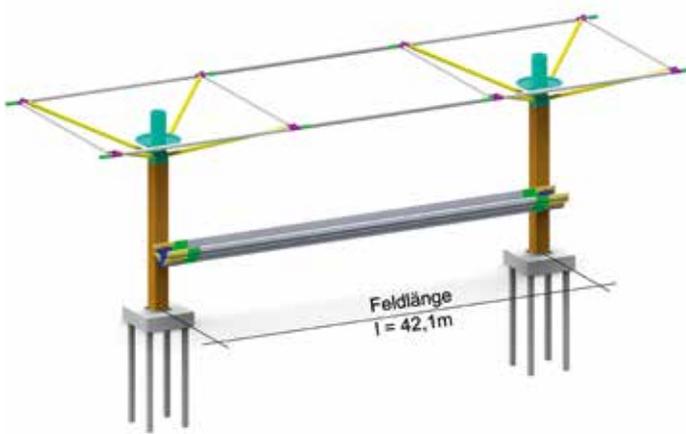


Abbildung 1: Visualisierung Konstruktionskonzept

Der Verkehrsfluss von QUICKWAY lebt von einem zentralen Controller, der die Routenplanung und Navigation aller Fahrzeuge in Echtzeit übernimmt. Das Fahrzeug fährt autonom entlang der Route mithilfe einer sensorbasierten lokalen Steuerung.

Baukasten für die einfache Herstellung der Fahrwege

Um einen raschen Baufortschritt gewährleisten zu können, beruht das Konstruktionskonzept auf einem modularen Baukastensystem, wie Abbildung 1 zeigt. Die einzelnen Elemente aus UHPFRC werden dabei, analog der Segmentbauweise, durch eine externe Vorspannung über Trockenfugen miteinander verbunden. Die Tragwerksoptimierung führte zu einer Kombination aus Trog- und Kastenquerschnitt für die Fahrwegträger, wie Abbildung 3 zeigt. Dieser Querschnitt sorgt im Vergleich zu offenen Querschnitts-





Abbildung 2: QUICKWAY-Knoten

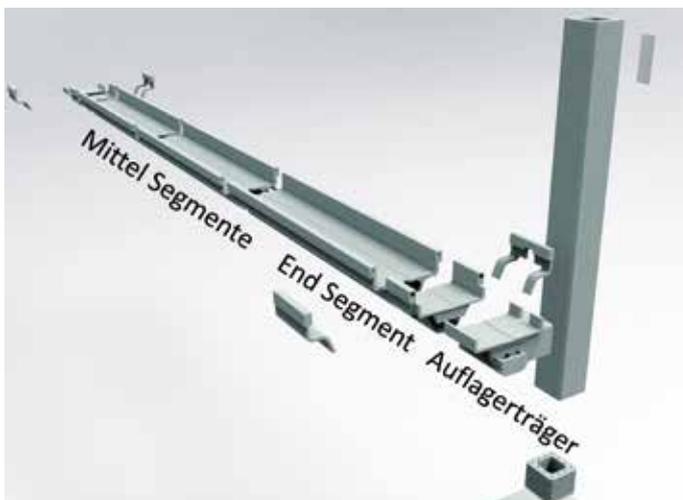


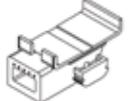
Abbildung 3: Querschnitt Versuchsbauteil

formen für eine wesentlich höhere Torsionssteifigkeit bei erhöhter Biegesteifigkeit. Die statisch wirksamen Brüstungen dienen außerdem der Absturzsicherung und dem Lärmschutz. Die Vorspannkabel sind im Inneren des Hohlkastens und in der verbreiterten Druckzone angeordnet.

Abbildung 1 vermittelt einen Überblick über die Konstruktion. Die verschiedenen Elemente des Baukastensystems sowie die unterschiedlichen Segmente des Fahrwegträgers sind in Abbildung 4 dargestellt. Insgesamt werden nur 60 Elementtypen benötigt, um das gesamte Verkehrsnetz einer Megacity realisieren zu können.

Abbildung 4: Baukasten/Explosionszeichnung des Fahrwegträgers



BAUKASTEN		
Stütze 	Auflagerträger 	End Segment 
gekrümmtes Segment 	Rampen Segment 	gerades Segment  12.5m

Material

Für die Herstellung der 6 bis 12 cm dicken Bauelemente wurde an der TU Graz eine eigene Betonrezeptur aus selbstverdichtendem UHPFRC entwickelt. Durch die filigranen Abmessungen des Kastenquerschnitts und die angestrebten, schnellen Fertigungstakte ist ein Verzicht auf konventionelle Betonstahlbewehrung sinnvoll. Der UHPFRC mit max. Korndurchmesser von 0,8 mm enthält 2 Vol.-% Stahlfasern, um die erforderliche Zugtragfähigkeit zu erreichen.

Bei der Auswahl der für die UHPFRC-Rezeptur benötigten Ausgangsstoffe wurde insbesondere auf die Verfügbarkeit und die Kosten der Materialien geachtet. Die Betonoptimierung erfolgte primär mit in Österreich und Deutschland verfügbaren Ausgangsstoffen, wobei bei der Umsetzung von QUICKWAY die Rezeptur auf lokal verfügbare Rohstoffe anzupassen ist. Aufbauend auf einer theoretischen Optimierung der Packungsdichte wurde durch Kleinversuche eine geeignete Betonrezeptur entwickelt. Untersuchungen wurden dabei zur Mischungsstabilität, Entlüftungsfähigkeit, Fließfähigkeit, Schwinden und Zugtragfähigkeit durchgeführt. Einzelheiten können [2] und [3] entnommen werden. Mit der entwickelten UHPFRC-Rezeptur werden die aus der Statik geforderten Materialeigenschaften aus Tabelle 1 problemlos erreicht. Des Weiteren ist anzumerken, dass die angegebenen Materialkennwerte durch eine Wärmebehandlung weiter gesteigert werden könnten. Die Anwendung dieses sehr kosten- und energieintensiven Verfahrens wird beim Bau eines QUICKWAYs jedoch nicht angestrebt.

Tabelle 1: Geforderte und erreichte Frisch- und Festbetoneigenschaften

	gefordert	erreicht
Setzmaß nach [2] auf trockener Stahlplatte	750 – 850 mm	✓
Fließzeit t_{500}	6 – 12 s	✓
Zylinderdruckfestigkeit	$f_{ck} = 150 \text{ MPa}$	$f_{ck} = 170 \text{ MPa}; f_{cm} = 180 \text{ MPa}$
Matrixzugfestigkeit	$f_{ct,el,k} = 6,0 \text{ MPa}$	$f_{ct,el,k} = 6.5 \text{ MPa}; f_{ct,el,m} = 8,4 \text{ MPa}$
Nachrisszugfestigkeit	$f_{ctk,r} = 6,0 \text{ MPa}$	$f_{ctk,r} = 7.3 \text{ MPa}; f_{ctm,r} = 10,4 \text{ MPa}$
Elastizitätsmodul	$E_c \geq 50.000 \text{ MPa}$	$E_c = 52.000 \text{ MPa}$
Endschwindmaß	$\leq 0,7 \text{ mm/m}$	$\approx 0.65 \text{ mm}$



Abbildung 5: Befüllversuch in transparenter Schalung



Abbildung 6: Schalung/Versuchskörper

Herstellung

Infolge der Querschnittsgeometrie ist die Herstellung anspruchsvoll. Einerseits muss das Verfahren die für UHPFRC typischen hohen Qualitätsanforderungen hinsichtlich Faserverteilung und -orientierung gewährleisten. Andererseits müssen eine rasche Taktung und ein wirtschaftlicher Einsatz im Werk möglich sein. Als Baufortschritt werden im Projekt 800 m pro Tag angestrebt. Die Kernpunkte des entwickelten und getesteten Herstellungsprozesses sind:

- einseitige Befüllung einer „liegenden“ Schalung
- robuste Schalung aus beschichtetem Normalbeton
- Innenschalung mit reduzierbarem Querschnitt
- geordnete Luftverteilung an der Konterschalung anstatt Entlüftung über teure Drain-Sheets

Statik und Großversuch

Das statische Konzept des Fahrwegträgers basiert auf geraden oder im Grundriss gekrümmten Einfeldträgern. Die verschiedenen gekrümmten Segmente werden mit geraden, polygonal im Hohlkasten geführten Spanngliedern über Trockenfugen verbunden. Die erforderliche Vorspannkraft wird durch den Dekompressionsnachweis für die seltene Lastfallkombination ermittelt. Maßgebend in der Konstruktion sind Torsion und Querkraft in Kombination mit Biegung an den Trockenfugen [6], insbesondere in Kurven. Da noch kein einheitliches Regelwerk zur Bemessung derartiger Konstruktionen vorliegt, wurde zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse ein Großversuch im Maßstab 1 : 2 durchgeführt.

In Abbildung 7 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Dieser besteht aus drei Segmenten, die mittels externer Vorspannung über Trockenfugen zu einem Kragarm zusammengesetzt wurden. An diesem einfachen System wurden verschiedene Lastsituationen aus

Insgesamt werden nur 60 Elementtypen benötigt, um das gesamte Verkehrsnetz einer Megacity realisieren zu können.

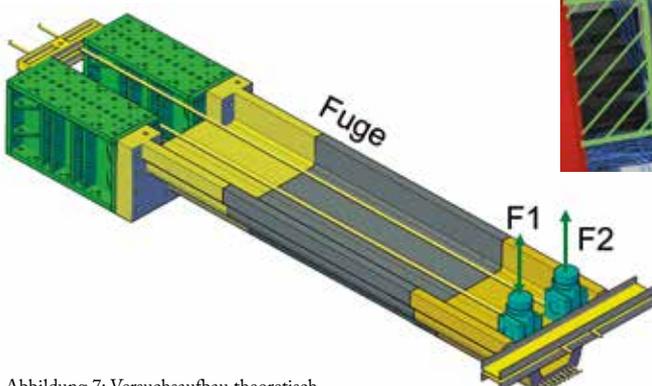


Abbildung 7: Versuchsaufbau theoretisch

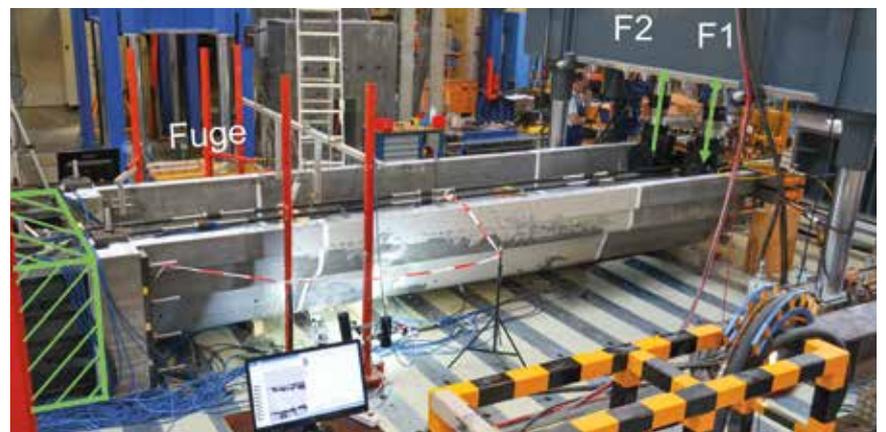


Abbildung 8: Versuchsaufbau im Labor

gekrümmten sowie geraden Trägern aufgebracht und schließlich bis zum Versagen des Versuchskörpers gesteigert. Im Rahmen des Großversuchs, siehe Abbildung 8, konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen vom gewählten Trägersystem problemlos aufgenommen werden können. Die Berechnungsergebnisse konnten weitestgehend verifiziert werden, wenngleich festgestellt werden konnte, dass die Vorgehensweisen verschiedener Richtlinien, z. B. [4] oder [5], zu eher konservativen Berechnungsergebnissen führen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklung von QUICKWAY ist so weit fortgeschritten, dass ein erstes Bauprojekt in Angriff genommen werden kann.

Neben den hier kurz angerissenen Ergebnissen zur Fertigteil-Konstruktion, der Statik und zum Gießverfahren liegen u. a. detaillierte Ergebnisse zur Trassengestaltung, zur Werkslogistik, zur Montage und zu den Herstellungskosten vor. Das Projekt QUICKWAY verdeutlicht einmal mehr, dass UHPFRC ein idealer Baustoff für Lösungen im Infrastrukturbereich ist. Bei der Umsetzung solcher Vorhaben braucht es jedoch die Herstellung großer Mengen UHPFRC in kurzer Zeit, was mit den derzeit betriebenen Mischanlagen noch nicht möglich ist. Die Betonindustrie ist daher aufgefordert, in die Weiterentwicklung der UHPFRC-Herstellung zu investieren. An der TU Graz wird dahingehend ein aktueller Schwerpunkt in der anwendungsnahen Forschung gesetzt.

- [1] Sparowitz, Lutz; Freytag, Bernhard; Nguyen, Viet Tue: QUICKWAY – Hochfahrwege aus UHPC. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. Sonderheft, 2013, S. 41–48.
- [2] Hoang, K., Dissertationsvorhaben: A Systematic Mix Design Approach for Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (in Vorbereitung), TU Graz, Institut für Betonbau.
- [3] Hadl, P., Dissertationsvorhaben: Zum besseren Verständnis der Streuung des Zugtragverhaltens von stahlfaserbewehrtem Normalbeton und Ultra-Hochleistungsbeton (in Vorbereitung), TU Graz, Institut für Betonbau.
- [4] Association Française de Génie Civil (AFGC) Documents scientifiques et techniques Betons fibres a ultra-hautes performances, Recommendations, Juin 2013.
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb): Heft 561, Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 1. Auflage 2008.
- [6] Oppeneder, J.; Sparowitz L.; Hadl P.; Freytag B.; Tue N.V.: Modular construction kit for the QUICKWAY system. Proceedings SEMC 2016, Capetown 2016.

AUTOREN

DI BSc Johannes Oppeneder
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue
 Em. Univ.-Prof. DI Dr. techn. Lutz Sparowitz
 DI BSc Baumeister Philipp Hadl
 TU Graz, Institut für Betonbau
 Priv.-Doz. DI Dr. techn. Bernhard Freytag
 TU Graz, Labor für Konstruktiven Ingenieurbau
 ■ www.quickwaytechnology.com

BETON SCHAFFT LEBENS(T)RÄUME.

LAFARGE
Building better cities™

Beton punktet mit idealen thermischen Eigenschaften, Brandbeständigkeit, enorm hoher Wiederverwertbarkeit und gestalterischen Möglichkeiten.
 Beton – der innovative Baustoff für Raumplanungs- und Architektururlösungen.

www.lafarge.at

L A member of
LafargeHolcim