

ULTRAHOCHFESTER BETON

Sonderdruck aus beton,
Ausgabe 6/2019

HEIDELBERGCEMENT

Dürnbachbrücke Tegernseebahn

ULTRAHOCHFESTER BETON IN DER ANWENDUNG

Die Dürnbachbrücke –
Deutschlands erste Eisenbahnbrücke aus UHPC

Lisa Wachter, Oliver Fischer, Nicholas Schramm



ECHT. STARK. GRÜN.

Ultrahochfester Beton in der Anwendung

Die Dürnbachbrücke – Deutschlands erste Eisenbahnbrücke aus UHPC

Lisa Wachter, Leimen, Oliver Fischer und Nicholas Schramm, München

Immer komplexere architektonische Vorgaben und der Wunsch nach schlanken Strukturen bedingen die Konzeption neuer, leistungsfähiger Baustoffe. Zu diesen Baustoffen gehört auch Ultra High Performance Concrete (UHPC) – ein Meilenstein in der Entwicklung der Betonbaustoffe, der vor allem über eine sehr hohe Druckfestigkeit, ein dichtes Gefüge sowie sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften verfügt. Dadurch wird die Voraussetzung für eine materialsparende, gewichtsreduzierte und damit ressourceneffiziente Betonbauweise geschaffen, die völlig neue Möglichkeiten für die Umsetzung komplexer architektonischer und bemessungstechnischer Vorgaben eröffnet. UHPC wurde bisher vor allem im Ausland angewendet, in Deutschland gab es bislang wenige Pilotprojekte. Im Sommer 2018 wurde UHPC nun erstmals in Deutschland bei der Überbauerneuerung einer Eisenbahnbrücke über den Dürnbach eingesetzt, worüber in dem Beitrag berichtet wird.

In Deutschland als ultrahochfester Beton bezeichnet, besticht Ultra High Performance Concrete (UHPC) vor allem durch sehr hohe Druckfestigkeiten und Biegezugfestigkeiten, ein dichtes Gefüge sowie sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften. Dadurch wird die Voraussetzung für eine materialsparende, gewichtsreduzierte und schlanke Betonbauweise geschaffen, welche völlig neue Möglichkeiten für die Umsetzung komplexer architektonischer und bemessungstechnischer Vorgaben eröffnet.

Es gibt verschiedene Ansätze, ab wann ein Beton als „ultrahochfest“ bezeichnet werden kann. Ein Ansatz ordnet Beton über der höchsten, in DIN EN 206-1/DIN 1045-2 genormten Festigkeitsklasse C100/115 der Kategorie UHPC zu. Alternativ gibt es auch die Anforderung einer charakteristischen Druckfestigkeit größer 150 N/mm². Der aktuelle Entwurf der DAfStb-Richtlinie „Ultrahochfester Beton“ sieht eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von mindestens 130 N/mm² [1] vor.

Aufgrund seiner hohen Packungsdichte bei sehr niedrigen w/z-Werten (0,2 bis 0,3), hat UHPC eine sehr geringe Kapillarporosität, weshalb derartige Betone einen hohen Korrosionswiderstand aufweisen. Der Einsatz von Hochleistungsfließmitteln auf PCE-Basis ermöglicht selbstverdichtende Konsistenzen. Charakteristisch für UHPC ist eine hohe Viskosität und damit verbundene „Klebrigkeit“. Aufgrund der geringen Duktilität der Zementsteinmatrix kommen in der Regel Fasern zum Einsatz. Die Faserart und -menge ist dabei stark von der späteren Beanspruchung abhängig. So können zum Beispiel durch die Zugabe von Mikrostaalfasern sehr hohe Biegezugfestigkeitswerte von bis zu 50 N/mm² [2] erreicht werden.

UHPC wird häufig als Feinkornbeton hergestellt, kann aber auch mit groben Gesteinskörnungen mit hohen Kornfestigkeiten hergestellt werden. Grundsätzlich kann UHPC in geeigneten Fertigteil-, Betonwaren- oder Transportbetonwerken hergestellt werden, sofern die vergleichsweise hohen Anforderungen an Dosiergenauigkeit

und gleichmäßige Produktionsbedingungen erfüllt sind.

UHPC wurde bisher vor allem im Ausland angewendet, z.B. sind hier die Schweiz und Frankreich mit regelmäßiger Anwendung für die Brückensanierung oder -verstärkung sowie im Fassadenbau zu nennen. In Deutschland gab es bisher wenige Pilot-

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Lisa Wachter studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern. Ab 2014 war sie als Betontechnologin im Bereich Qualitätsüberwachung der Heidelberger Beton GmbH tätig. 2017 wechselte sie in die Abteilung Engineering & Innovation der HeidelbergCement AG und ist dort seit 2019 Ansprechpartnerin für anwendungstechnische Fragestellungen bezüglich Transportbeton.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Oliver Fischer war nach seinem Bauingenieurstudium an der Technischen Universität München (TUM) als Wissenschaftlicher Assistent an den Instituten für Mechanik und Statik sowie für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) tätig und wurde 1994 zum Dr.-Ing. promoviert. Anschließend trat er in einen großen deutschen Baukonzern ein und war dort in verschiedenen leitenden Positionen im In- und Ausland tätig, zuletzt als Geschäftsleiter aller planenden Einheiten mit weltweiter Zuständigkeit. Er ist Mitglied zahlreicher Fachgremien und Ausschüsse und gibt bereits seit 1999 seine Erfahrungen durch

Lehraufträge an den Ingenieurnachwuchs weiter (Brückenbau: TU Darmstadt; Baudynamik: UniBwM). Im Oktober 2009 wurde er als Ordinarius auf den Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München berufen. In dieser Funktion leitet er auch die experimentelle Forschungseinrichtung Laboratorium für Konstruktiven Ingenieurbau (LKI) sowie die angeschlossene Abteilung des Materialprüfungsamtes (MPA BAU) der TUM. Darüber hinaus ist Oliver Fischer seit 2011 Mitglied des Vorstands der Büchting+Streit AG und dabei als Prüfenieur und EBA-Prüfer regelmäßig mit komplexen Projekten aus dem Ingenieur- und Brückenbau sowie dem Tunnelbau befasst.

M.Sc. Nicholas Schramm studierte Bauingenieurwesen mit Schwerpunkt im Ingenieurbau an der Technischen Universität München. Seit 2014 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. Zu seinen Forschungsgebieten zählen u.a. experimentelle und numerische Untersuchungen zur Entwicklung von Brücken- und Parkdeckträgern aus ultrahochfestem Beton (UHPC).

projekte. Zu erwähnen ist hier die Gärtnerplatzbrücke in Kassel aus dem Jahr 2005/2006, ein maßgeblich durch die Universität Kassel initiiertes Projekt.

Viele Forschungsprojekte an deutschen Hochschulen der vergangenen Jahre wie z.B. das DFG-Schwerpunktprogramm 1182/3 „Nachhaltiges Bauen mit ultrahochfestem Beton (UHPC)“ haben zu einem umfangreichen Wissen bezüglich der Materialeigenschaften, Bauteileigenschaften sowie Bemessungsgrundlagen geführt und ebnet damit den Weg für den baupraktischen Einsatz von UHPC. Ultrahochfester Beton ist derzeit in Deutschland noch nicht normativ geregelt. Viele andere Länder haben inzwischen Regelungen für UHPC verabschiedet, allen voran Frankreich, die Schweiz und China. In diesen Ländern ist das Bauen mit UHPC inzwischen aus der Baupraxis nicht mehr wegzudenken. Die kurz vor der Fertigstellung stehende DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton soll künftig als fundierte Planungs- und Anwendungsgrundlage den Einsatz von UHPC auch in Deutschland vereinfachen und so den Einsatz von UHPC fördern. Die Richtlinie soll sich in vier Teile gliedern, die sich mit der Qualitätssicherung, den Bemessungsgrundlagen, der Betonherstellung und der Bauteilherstellung befassen. Voraussichtlich wird die Richtlinie 2019 fertiggestellt und verabschiedet. Der Richtlinienentwurf sieht derzeit eine charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von mindestens 130 N/mm² für ultrahochfesten Beton vor.

Im Sommer 2018 wurde UHPC nun erstmals in Deutschland bei der Überbauernovierung einer Eisenbahnbrücke eingesetzt. Der Überbau einer Eisenbahnbrücke über den Dürnbach der Tegernsee-Bahn in Gmund am Tegernsee wurde mit einem von der Fa. Max Bögl Fertigteile GmbH & Co. KG hergestellten UHPC-Fertigteil erneuert. Dafür wurde das neue UHPC-Compound EFFIX® PLUS von HeidelbergCement eingesetzt. Alle am Projekt „Dürnbachbrücke“ beteiligten Partner sind in Tafel 1 aufgeführt.

EFFIX® PLUS, das neue UHPC-Compound von Heidelberg Cement als Grundlage für eine ultra-hochfeste Mörtelmatrix

EFFIX® PLUS ist ein Compound für ultrahochfeste Betone. Es stellt die Grundlage für die ultra-hochfeste Mörtelmatrix dar. EFFIX® PLUS enthält bereits alle trockenen, feinen Bestandteile, die hinsichtlich der optimalen Packungsdichte aufeinander abgestimmt wurden: Bindemittel, Zusatzstoffe sowie verschiedene Gesteinsmehle und -sande mit einem Größtkorn von 0,5 mm. Die hohen Druckfestigkeiten werden vor allem durch die optimierte Kornzusammensetzung des Compounds sowie sehr geringe w/z-Werte zwischen 0,2 und 0,3 erreicht.

Mit EFFIX® PLUS können ohne Zugabe weiterer Gesteinskörnungen Feinkornbetone mit Würfeldruckfestigkeiten größer 150 N/mm² sowie – je nach Anwendung

Tafel 1: Objektsteckbrief „Dürnbachbrücke“

Projekt	Pilotprojekt Ersatzneubau einer Eisenbahnbrücke aus ultrahochfestem Beton
Bauherr	Tegernsee-Bahn Betriebsgesellschaft mbH
Idee, Konzeption, Entwurfsplanung, wissenschaftliche Begleitung	Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Büchting + Streit AG
Ausführungsplanung	Ingenieurbüro SSF Ingenieure AG
Fertigteilhersteller	Max Bögl Fertigteilewerke GmbH & Co. KG, Sengenthal
Bauunternehmen	PORR Bau GmbH, Kematen in Tirol
Bindemittelcompound	UHPC-Compound EFFIX® PLUS der HeidelbergCement AG
Bauteil	Brückenüberbau: Stützweite 5,25 m, Gesamtlänge 6,50 m
Baujahr	2018

und Anforderung – durch Zugabe verschiedener Fasertypen hohe Biegezugfestigkeiten am Balken über 30 N/mm² erreicht werden.

In Abhängigkeit von den jeweiligen Projektanforderungen können dem Compound grobe Gesteinskörnungen wie z.B. Basalt zugegeben werden.

Durch die Zugabe von Hochleistungsfließmitteln wird eine selbstverdichtende Konsistenz mit einem Setzfließmaß von mindestens 700 mm und einer Fließzeit (t_{500}) von unter 10 Sekunden erreicht. Die Fließmittelauswahl kann, angepasst an die jeweiligen Anforderungen, mit Unterstützung von HeidelbergCement erfolgen. Um die Verarbeitungseigenschaften anwendungsspezifisch zu beeinflussen, ist auch die Zugabe weiterer Zusatzmittel denkbar, z.B. von zusätzlichen Konsistenzhaltern oder Erhärtungsbeschleunigern.

Da für das Einmischen und Aufschließen des Fließmittels keine speziellen Mischintensitäten erforderlich sind, kann UHPC mit EFFIX® PLUS in den gängigen Mischertypen sowohl im Fertigteilwerk, als auch im Betonwaren- oder Transportbetonwerk eingesetzt werden. Die Gesamtmischzeit liegt erfahrungsgemäß im Bereich von 5 Minuten.

Die Bereitstellung der UHPC-Ausgangsstoffe als abgestimmtes Compound aus Zement, Zusatzstoffen, Sanden und Gesteinsmehl bietet den Vorteil, dass für die Herstellung eines UHPC nur ein Silo zur Verfügung stehen muss statt mehrerer Silos bei Zugabe der einzelnen Komponenten in den Mischer. Darüber hinaus hat der Verwender den Vorteil einer gleichmäßigen und überwachten Produktqualität.

Das Pilotprojekt Bahnbrücke über den Dürnbach

Die bestehende Brückenkonstruktion über den Dürnbach (Baujahr 1929) in Gmund am Tegernsee mit einer Länge von 6,50 m und einer Breite von 4,57 m musste erneuert werden. Da der Dürnbach regelmäßig Hochwasser führt, sollte ein größerer Durchflussquerschnitt erreicht werden. Initiiert von der Technischen Universität München wurde die Ausführung mit einem stahlfaserbewehrten UHPC vorgeschlagen, welche eine im Vergleich zu einer konventionellen Lösung deutlich geringere Konstruktionshöhe ermöglicht. Für einen möglichst einfachen Bauablauf bot sich die Ausführung als Fertigteil an. Das Fertigteil mit einer Länge von 6,50 m und einer Breite von 4,57 m stellte



Bild 1: Querschnitt der Eisenbahnbrücke mit Schotterhalterung

Foto: HeidelbergCement AG

Tafel 2: Anforderungen an den UHPC für das Brückenfertigteil

Frischbetoneigenschaften	Setzfließmaß	≥ 700 mm
	Verarbeitungszeit	90 Minuten
	Größtkorn	8 mm
Festbetoneigenschaften	Druckfestigkeitsklasse	C 150/155
	Elastizitätsmodul	48000 N/mm ²
	Nachrisszugfestigkeit	11 N/mm ²
	Stahlfasergehalt und -schlantheit	2,5 Vol.-% mit l/d = 12,5 mm/0,175 mm

die Fa. Max Bögl Fertigteilewerke GmbH & Co. KG her.

Konzeption, Betontechnologie und Herstellung des Brückenfertigteils

Da eine DAfStb-Richtlinie für die Planung und Herstellung von ultrahochfestem Beton noch im Entwurf ist, war für die Umsetzung des Pilotprojekts eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Die Konzeption und Entwurfsplanung sowie die Erstellung der gutachterlichen Stellungnahme für die Zustimmung im Einzelfall, erfolgte durch den Lehrstuhl für Massivbau der TU München in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Büchting + Streit AG. Grundlage für die gutachterliche Stellungnahme waren ausländische Vorschriften, eigene Laborerfahrungen sowie insbesondere der aktuelle Entwurf der DAfStb-Richtlinie Ultrahochfester Beton.

Um eine Vergrößerung des Durchflussquerschnitts zu erreichen, wurde für das Fertigteil ein trogförmiger Plattenquerschnitt gewählt (Bild 1). Der 4,57 m breite und 6,50 m lange Überbau wurde als ein auf acht Elastomerlagern schwimmend gelageres Gesamtfertigteil in Spannbetonbauweise ausgeführt. Die vorgespannte Platte ist nur 20 cm stark. Zum Vergleich: In konventioneller Bauweise wäre eine Plattendicke

von ca. 40 cm zuzüglich einer 5 cm dicken Schutzbetonschicht erforderlich gewesen. Konventionelle Bewehrung war nur in den Anschlussbereichen bzw. in lokalen Bereichen notwendig.

Aus der Bemessung ergaben sich für die vorgespannte und stahlfaserbewehrte Fertigteilbrücke die in Tafel 2 dargestellten Anforderungen an die Festbetonkennwerte. Zusätzlich galt es die anspruchsvollen Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften, resultierend aus dem geplanten Herstellverfahren und früheren Erfahrungen des Fertigteilherstellers Max Bögl mit ultrahochfestem Beton, zu erfüllen: Die selbstverdichtende Konsistenz mit einem Setzfließmaß

Tafel 3: Verwendete Betonzusammensetzung für die Dürrbachbrücke

Bestandteil	Menge
EFFIX® PLUS	1800 kg/m ³
Basalt 2/5	150 kg/m ³
Basalt 5/8	150 kg/m ³
Stahlfasern	196 kg/m ³
Hochleistungsfließmittel	25 kg/m ³
w/z-Wert	0,27

von ≥ 700 mm sollte über eine Verarbeitungszeit von 90 Minuten aufrechterhalten werden. Dafür bot sich das neue Compound EFFIX® PLUS der HeidelbergCement AG an.

In enger Abstimmung mit der Technischen Universität München wurde die Betonzusammensetzung (Tafel 3) auf die Anforderungen aus der Bemessung und dem Herstellungsprozess im Fertigteilwerk angepasst und vor Ort im Rahmen einer Probetonage geprüft. In dieser wurden die erforderlichen Mischzeiten, Mischintensitäten sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften inkl. E-Modul, Biegezug- und Nachrisszugfestigkeiten bis zu einem Alter

Tafel 4: Ergebnisse der Frisch- und Festbetonuntersuchungen des für die Dürrbachbrücke verwendeten UHPC (Festbetonkennwerte: Wasserlagerung)

Kenngroße		Wert
Setzfließmaß (nach 15 Minuten)	mm	710
Fließzeit t ₅₀₀ (nach 15 Minuten)	s	7
Frischbetontemperatur	°C	25
Druckfestigkeit nach 28 d (Würfel 150 mm Kantenlänge)	N/mm ²	165 ¹⁾
Biegezugfestigkeit ³⁾ nach 28 d (Balken 500 mm × 100 mm × 100 mm)	N/mm ²	26 ²⁾
E-Modul nach 28 d (Zylinder, d/h = 150 mm/300 mm)	N/mm ²	47500 ²⁾

¹⁾ Mittelwert aus zwölf Prüfergebnissen, ²⁾ Mittelwert aus drei Prüfergebnissen, ³⁾ Ungekerbt, 4-Punkt-Biegezugversuch



Bild 2: Herstellung der Probekörper für die Festbetonprüfungen
Foto: HeidelbergCement AG



Bild 3: Probetonage im Fertigteilwerk
Foto: Max Bögl Fertigteilewerke GmbH, Sengenthal



Bild 4: Einheben des Fertigteils mithilfe eines Autokrans

Foto: HeidelbergCement AG

von 56 Tagen geprüft. Zusätzlich wurde eine Musterplatte mit den Abmessungen 2,0 m × 0,8 m × 0,21 m hergestellt. Die Festbetonuntersuchungen erfolgten sowohl an der Technischen Universität München als auch im Betonlabor von HeidelbergCement in Leimen.

Bei der Herstellung des Brückenfertigteils lag die Gesamtmischzeit inklusive Einbringen der Stahlfasern im Doppelwellenzwangsmischer des Fertigteilwerks bei unter 5 Minuten; dies ist für einen UHPC sehr kurz. Insgesamt wurden für das Fertigteil 8,8 m³ UHPC benötigt. Um Unterbrechungen beim Einbau zu vermeiden, wurden vier Betonchargen à 1,1 m³ in einem Fahrmischer zusammengeführt. Der selbstverdichtende UHPC wurde mit einem Betonkübel in die Brückenschalung eingebracht. Direkt im Anschluss an den Einbau wurde ein Nachbehandlungsmittel aufgesprüht und das Fertigteil mit Folie abgedeckt.

Die selbstverdichtenden Eigenschaften wurden während der gesamten Betonier-

dauer aufrechterhalten. Auf das Verdichten konnte gänzlich verzichtet werden. Die Proben für die Frisch- und Festbetonuntersuchungen wurden aus beiden Fahrzeugen entnommen, und es wurde das gleiche Prüfprogramm wie bei der Probetonage durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Prüfergebnisse ist in Tafel 4 aufgeführt. Zusätzlich wurden seitens der Technischen Universität München Temperatursensoren und Dehnmessstreifen für die Erfassung des sich einstellenden Dehnungszustands in der Überbauplatte angebracht.

Drei Wochen nach Herstellung wurde das Brückenelement vom Lagerplatz der Max Bögl Fertigteilwerke GmbH zum Einbauort transportiert.

Um zusätzlich zu den Laborerfahrungen praktische Erkenntnisse zu gewinnen, fand nach Einheben des Fertigteils eine gesonderte Probelastung mit definierten Achslasten und Überfahrtgeschwindigkeiten statt. Die Ergebnisse der messtechnischen Überwachung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den angenommenen bzw.

berechneten Werten. Das Tragverhalten der Brücke ist damit sehr positiv.

Zusammenfassung und Ausblick

Die erfolgreich verlaufene Pilotanwendung von UHPC für die Eisenbahnbrücke Dürnbach veranschaulicht die Leistungsfähigkeit und die Möglichkeiten dieser Bauweise. Der als vergleichsweise leichte Fertigteil konzipierte neue Brückenüberbau konnte aufgrund seines im Vergleich zu einem konventionellen Fertigteil geringeren Gewichts in die bestehenden Widerlager der alten Brücke gehoben werden. Zudem war es möglich, aufgrund der guten Dauerhaftigkeitseigenschaften, der hohen Dichtigkeit und der Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung auf eine gesonderte Abdichtung und den sonst erforderlichen Schutzbeton zu verzichten. Insgesamt konnte durch die Ausführung mit UHPC eine Reduktion der erforderlichen Gesamthöhe um etwa 25 cm und damit auch die gewünschte Vergrößerung des Durchflussquerschnitts bei Hochwasser ohne jegliche Anpassung der vorhandenen Gleislage ermöglicht werden. Das Pilotprojekt hat gezeigt, dass die schlanke und sehr dauerhafte UHPC-Bauweise auch wirtschaftlich eine interessante Alternative zur herkömmlichen Bauweise darstellen kann, was unter anderem durch den Einsatz eines UHPC-Compounds (EFFIX® PLUS) ermöglicht wurde. Wichtig für eine erfolgreiche Umsetzung derartiger Projekte ist insbesondere die enge Zusammenarbeit und Abstimmung aller Projektbeteiligten.

Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau, 2018. DAfStb-Richtlinie: Ultrahochfester Beton, Teil 2: Beton, Entwurf 5. Oktober 2018
- [2] Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmid, Universität Kassel, 2005. Forschungs-Bericht DFG FE 497/1-1: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC)



Bild 5: Auf bestehende Widerlager aufgelegte Fertigteilbrücke

Foto: HeidelbergCement AG



Bild 6: Eisenbahnbrücke mit Messtechnik in Betrieb

Foto: Prof. Fischer, TU München

WWW.HEIDELBERGCEMENT.DE

HEIDELBERGCEMENT

HeidelbergCement AG

Engineering & Innovation

Oberklamweg 6

69181 Leimen

www.heidelbergcement.de



Die vorliegende Informationsschrift einschließlich aller darin enthaltenen Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt und Eigentum der HeidelbergCement AG. Verwertungen sind ohne Zustimmung der HeidelbergCement AG nicht zulässig. Dies gilt insbesondere auch für Vervielfältigungen, Übersetzungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.