

Fachbereich Bauingenieur- und Umweltingenieurwesen

Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens u. Bauchemie

Name Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt
Adresse Mönchebergstr. 7
34125 Kassel
Tel. +49 561 804 2602
+49 561 804 2601 (Sek.)
Fax +49 561 804 2662
E-mail m.schmidt@uni-kassel.de

Fachgebiet Massivbau

Name Prof. Dr.-Ing. E. Fehling
Adresse Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel
Tel. +49 561 804 2608
+49 561 804 2656 (Sek.)
Fax +49 561 804 2803
E-mail fehling@uni-kassel.de

14. Oktober 2011

Schlussbericht zum Projekt

„Einsatz eines korrosionsbeständigen, mit Kunststofffasern verstärkten Ultra-Hochfesten Betons als Ortbeton im Brückenbau“

Ausführende Stelle: Universität Kassel – Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie –
Institut für konstruktiven Ingenieurbau

Förderkennzeichen: 03VWP0010

Kassenzeichen: 810302372320

Geschäftszeichen: SIGNO-Prof Schmidt

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war es, die patentrechtlich geschützte Betonmischung der Universität Kassel [1], eines mit hochfesten Kunststofffasern verstärkten Ultra-Hochfesten Betons (UHPC), im Rahmen eines Pilotprojektes erstmalig praktisch anzuwenden und auf diese Weise im Sinne der Verwertungsoffensive – Verwertungsförderung – wirtschaftlich nutzbar zu machen.

1.2 Voraussetzungen

Im Rahmen des beantragten Vorhabens sollte der bisher ausschließlich unter Laborbedingungen hergestellte und verarbeitete Beton mit hochfesten Kunststofffasern für den Einsatz als Ortbeton weiterentwickelt und die in Hinblick auf die für den Bau einer Brücke bauaufsichtlich geforderten praxisnahen technischen Nachweise durchgeführt werden.

In Zusammenarbeit mit der Gemeinde Felsberg konnte ein möglicher Anwendungsfall gefunden werden. Der Überbau einer nicht mehr ausreichend tragfähigen Straßenbrücke in der Gemeinde Felsberg musste erneuert werden. Anhand dieses Anwendungsfalls sollte die Möglichkeit des patentierten Baustoffs aufgezeigt werden. Im Rahmen des Projekts wurde ein baustoffgerechter Entwurf für den Brückenüberbau entwickelt und berechnet, sowie der kunststofffaserverstärkte UHPC für die Anwendung als Ortbeton weiterentwickelt.

1.3 Zusammenarbeit, Planung und Ablauf

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte in enger Zusammenarbeit der Fachgebiete „Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie“ und „Massivbau“. Weiterhin war, die Fa. Gerdum und Breuer (Kassel) an der Erstellung eines Demonstrators beteiligt.

Für die Planung und Ablauf des Vorhabens wurde der im Antrag beschriebene Arbeitsplan zugrunde gelegt.

Im Einzelnen sollten die folgenden Entwicklungsschritte durchgeführt werden:

- a) Modifikation des patentierten Ultra-Hochfesten Betons zur Verwendung als Ortbeton mit gezielter Einstellung der Verarbeitungskonsistenz und geringer Zwangsentwicklung durch Verwendung schwindarmer, temperaturreduzierter Zemente mit niedrigem Wasseranspruch und gezielte Auswahl der erforderlichen Fließmittel sowie Einstellung der für einen längeren Transport ausreichenden Verarbeitungszeit.
- b) Ermittlung der mechanischen Kennwerte der optimierten Mischung im Labor als Grundlage für die Bemessung und Konstruktion (Druck- und Biegezugfestigkeit, Verformungsverhalten im Vor- und im Nachrissbereich; Anpassung des Gehalts an Fasern zum Erreichen der konstruktiv erforderlichen mechanischen Kennwerte).
- c) Erprobung und ggf. Anpassung der Misch- und Dosiereinrichtungen im Transportbetonwerk und Ermittlung des geeigneten Mischablaufs.

- d) Entwurf und statische Berechnung filigraner, materialsparender leichter und damit materialadäquater Brückenbauteile aus UHPC.
- e) Betonieren von halbmaßstäblichen Betonbauteilen mit UHPC-Transportbeton zur Erprobung der Fördereinrichtungen (Pumpen etc.), der geeigneten Schalung, des Fließverhaltens und der Sedimentationsneigung größerer Betonmengen während der Verarbeitung sowie der geeigneten Nachbehandlung (Schutzmaßnahmen) zur Vermeidung von Schwind- und Temperaturrissen.
- f) Herstellung von Bauteilen als Demonstratoren im praktischen Maßstab aus UHPC-Transportbeton unter baustellennahen Bedingungen im Labor und Prüfung dieser Bauteile im Großversuchsstand (Aufspannfeld) des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität Kassel unter statischer und einer verkehrsähnlichen dynamischen (Dauerschwing-)Belastung.

Die Arbeitsschritte a bis c wurden durch das Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie bearbeitet, die Entwicklung eines baustoffgerechten Entwurfes (Punkt d) erfolgte zeitlich parallel durch das Fachgebiet Massivbau. Die Herstellung von halbmaßstäblichen Bauteilen (Punkt e) und Erstellung eines Demonstrators (Punkt f) mit UHPC-Ortbeton erfolgte in Zusammenarbeit mit der Fa. Gerdum und Breuer und der beiden Fachgebiete der Universität Kassel. Nach eingehender Beratung mit verschiedenen Transportbetonfirmen konnte abweichend vom geplanten Vorgehen, die Erprobung im Transportbetonwerk (Punkt c) nicht realisiert werden. Hierfür wären größere technische Veränderungen an der Misch- und Dosiereinrichtung notwendig gewesen, die nicht in der Kürze des Projektes zu realisieren waren. Für die Anwendung des Ortbetons entschied man sich deshalb im Laufe des Projekts für einen mobilen Mischer, der direkt vor Ort eingesetzt werden kann.

1.4 Technischer Stand

Das durchgeführte Projekt war nicht Gegenstand anderer Forschungs-/Entwicklungsvorhaben und nicht von anderen Schutzrechtsanmeldungen betroffen.

Ultra-Hochfester Beton ist ein stahlähnlich fester Hochleistungsbeton mit einer Druckfestigkeit von rd. 200 N/mm² und einer im Vergleich zu Normalbeton weit höheren Dauerhaftigkeit und Lebenszeit. Mit ihm ist es möglich, sehr filigrane, materialsparende Bauwerke zu erstellen, die dadurch wesentlich nachhaltiger und insgesamt kostengünstiger sind als herkömmliche Massiv- oder Stahlbauwerke [2]. UHPC ist äußerst gefügedicht und widerstandsfähig, aber auch sehr spröde und versagt bei Überlastung schlagartig. Um die für Bauwerke ausreichende Sicherheit zu erreichen, werden dem UHPC in aller Regel feine Stahlfasern zugegeben, die wie eine „innere“ (Stahl-)Bewehrung wirken und ihm die erforderliche Duktilität und Sicherheit gegen Spröbruch verleihen.

Nachteilig ist, dass Stahlfasern sehr korrosionsanfällig sind. Insbesondere bei Brücken und Straßen ist dies ein erheblicher Nachteil, weil dort im Winter Tausalz aufgebracht und dadurch die Fasern mit Chloriden in Berührung kommen, die die Korrosion erheblich beschleunigen. Die Tragfähigkeit kann dadurch z. B. in sehr breiten Rissen erheblich herabgesetzt werden oder sogar verloren gehen. Zudem führt die Korrosion oberflächennaher Stahlfasern zu einer optisch sehr nachteiligen örtlichen Braunverfärbung.

Eine Alternative ist der von der Universität Kassel patentrechtlich geschützte Einsatz von hochfesten Kunststofffasern z.B. aus Polyvenylalkohol (PVA) oder Polyvinylnitril (PVN) [4] mit einem Elastizitätsmodul von 30.000 bis 40.000 N/mm² in UHPC [1]. Sie können – anders als sehr dehnbare Polypropylenfasern mit niedrigem E-Modul – bei entsprechender stoffgerechter Konstruktion des Bauwerks Stahlfasern gänzlich oder zumindest zu einem großen Teil ersetzen und damit die Dauerhaftigkeit chloridbeanspruchter Bauwerke sicherstellen. Zudem sind ganz neue konstruktive Lösungen möglich, wie z.B. die Reduzierung der Stahlfasern auf einen inneren, nicht bewitterten tragenden Konstruktionskern und eine äußere, den Korrosionswiderstand sichernden Schale aus dem patentierten UHPC mit Kunststofffasern.

1.4.1 Anwendungen

UHPC ist derzeit weltweit ein Forschungs- und – in begrenztem Umfang – ein Anwendungsthema, wobei Deutschland und hier insbesondere die Universität Kassel eine führende Rolle spielt [5]. Die Projektleiter sind gemeinsam bereits seit mehr als 10 Jahren mit der Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet Ultra-Hochfester Beton befasst [3]. Derzeit koordinieren sie u. a. ein durch die DFG gefördertes Schwerpunktprogramm SPP 1182 „Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton“ und bearbeitet zwei Forschungsprojekte des BMFT zur nanotechnologischen Optimierung von UHPC als Deckschicht für hoch beanspruchte Straßen und für weiterentwickelte keramikähnliche UHPC-Werkstoffe mit hohem Säurewiderstand. Unter ihrer Verantwortung wurden bereits mehrere Fuß- und Radwegbrücken aus UHPC gebaut, bei denen ultrahochfeste Betone mit Stahlfasern, die keinem patentrechtlichen Schutz unterlagen (früherer Entwicklungsstufen mit anderer Mischungszusammensetzung und anderen Eigenschaften) zum Einsatz kamen [6–8]. Aus den dabei gemachten Erfahrungen und aus den vorgenannten Dauerhaftigkeitsüberlegungen resultierte u. a. das Patent, das mit Hilfe der hier beantragten Unterstützung zur Anwendungsreife gebracht werden sollte. Ziel war und ist es, Vorbehalte gegen den neuen Werkstoff bezüglich der Herstellung und Anwendung zu beseitigen.

UHPC wird bislang vorrangig in Form von vorgefertigten Betonelementen verwendet, die allerdings nur einen kleineren Teil der Betonanwendungen bedienen. Als Ortbetonanwendung wurden bisher nur sehr wenige Projekte realisiert, wobei der UHPC vorrangig als Vergussmörtel für Fugen zwischen Fertigteilelementen vor Ort eingesetzt wurde. Zu nennen sind hier die Hawk Lake Bridge in Canada oder die Route 31 Bridge über die Canandaigua Mündung im Bundesstaat New York (USA). Weitere Projekte in denen UHPC als Ortbeton eingesetzt wurde, waren eine Brücke über den Fluss „La Morge“ und die Sanierung einer Betonleitplanke in der Schweiz sowie die Log Čezsoški Brücke in Slowenien. Bei den Projekten in der Schweiz wurde ein Ultra-Hochfester-Faserfeinkornbeton mit Fasergehalten von 9 – 11 Vol. % in Form von Stahlfasern verwendet, der an der ETH Lausanne entwickelt wurde [10]. Bei der slowenischen Brücke kam ein Compound zum Einsatz. Diese drei Projekte waren Sanierungsmaßnahmen bei denen jeweils eine 3–4 cm dicke Schicht des UHPC auf die zu sanierenden Flächen, wie die Brückenkappen, die Fahrbahn und die Gehwege, aufgebracht wurde [11].

Im Rahmen des beantragten Projekts sollte ein UHPC mit Kunststofffasern so entwickelt werden, dass ein großflächiger Einsatz unter Baustellenbedingungen ermöglicht wird. Idealerweise sollte der UHPC im Transportbetonwerk hergestellt, zur Baustelle transportiert und auf der Baustelle eingebaut werden können. Dadurch sollte ein noch viel größeres Anwendungsgebiet erschlossen werden als dies mit UHPC-Fertigteilen möglich ist.

Bisherige Forschungsergebnisse und Erfahrungen auf den das Vorhaben betreffenden Fachgebieten wurden in Fachveröffentlichungen [1–9] publiziert.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung, Notwendigkeit und zahlenmäßiger Nachweis

Um eine Realisierung des Projektes innerhalb der kurzen Projektlaufzeit zu ermöglichen arbeiteten verschiedene wissenschaftliche Mitarbeiter aus den Fachgebieten „Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie“ und „Massivbau“, sowie eine Laborantin auf dem Projekt (siehe Verwendungsnachweis). Weiterhin wurden die Arbeiten am Projekt durch 2 Studenten des Bauingenieurwesens unterstützt, die ihre Studienabschlussarbeiten zum Thema anfertigten [11, 12].

Die entstandenen Sachkosten gliedern sich in Material für den Schalungsbau (Pos. 2–4 und 9) sowie Kosten für den Kauf von Baustoffen: Bewehrungsstahl (Pos. 1) Stahlfasern (Pos. 5) und PVA-Fasern (Pos. 6–8). Die mineralischen Baustoffe (Zement, Zusatzstoffe und Sand) wurden aus eigenen Mitteln der Universität Kassel finanziert bzw. von Herstellern zur Verfügung gestellt.

2.2 Erzielte Ergebnisse

Ziel des Projektes war die Modifikation des patentierten kunststofffaserverstärkten Ultra-Hochfesten Betons für die Verwendung als Ortbeton, sowie die Entwicklung eines materialgerechten Brückenquerschnittes für einen konkreten Anwendungsfalles im Rahmen der Verwertungsoffensive.

Die Umsetzung der Ziele erfolgte in 3 Schritten:

2.2.1 Planung und Bemessung

Am Fachgebiet Massivbau wurde in Kooperation mit der Gemeinde Felsberg, dem Ingenieurbüro IBB Fehling + Jungmann GmbH, Kassel, sowie in enger Absprache mit dem zuständigen Amt für Straßen- und Verkehrswesen Kassel der Entwurf für eine Wirtschaftswegebrücke in der Gemeinde Felsberg erarbeitet. Hierbei handelt es sich um den Ersatzneubau für eine rd. 51 m lange und in vier Brückenfelder unterteilte Brücke, deren Überbau aufgrund starker Schäden erneuert werden musste.

Der von der Universität Kassel im Rahmen des Projekts erarbeitete Entwurf sieht für den Überbau den Einsatz ultrahochfesten Betons vor. Statisches System des Überbaus im Endzustand ist ein Durchlaufträger über vier Felder. Der Regelquerschnitt des Überbaus, der in Kooperation mit dem Ingenieurbüro IBB Fehling + Jungmann GmbH, Kassel, entwickelt wurde, ist in Bild 1 dargestellt. Es handelt sich um eine Spannbetonplatte aus ultrahochfestem Beton. Die Überbauhöhe beträgt 35 cm. Zur Kosten- und Gewichtersparnis sind fünf mit Leichtbeton gefüllte Kammern vorgesehen, in denen eine zusätzliche verbundlose Vorspannung geführt wird.

Die Breite zwischen den Geländern beträgt 4,50 m. Abdichtung oder Fahrbahnbelag sind nicht vorgesehen, d. h. es handelt sich um einen direkt befahrenen Überbau. Der Korrosionsschutz der Betonstahl- und Spannstahlbewehrung wird im Wesentlichen durch Vorspannung in Verbindung mit einem ausreichend dichten Betongefüge sowie ergänzend durch eine statisch nachgewiesene Rissbreiten beschränkende Bewehrung sichergestellt.

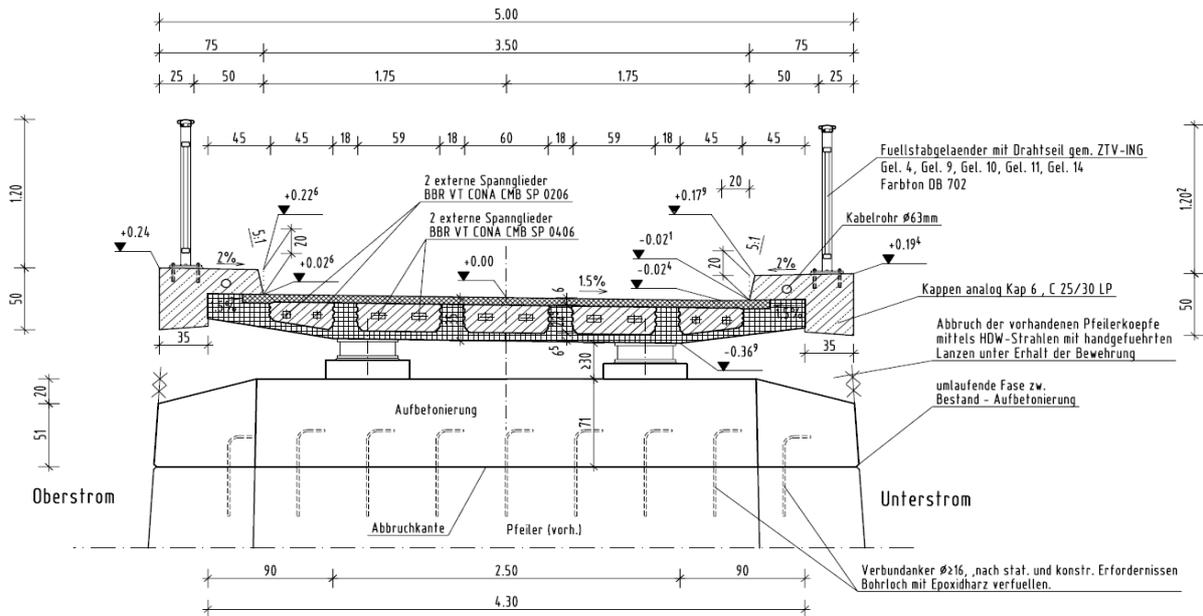


Abbildung 1: Regelquerschnitt des Brückenüberbaus in Ultra-Hochfestem Beton

Die Herstellung des Überbaus wurde als Fertigteillösung mit Ortbetonergänzung geplant. Der Gesamtüberbau ist in vier Fertigteile gegliedert, um einfachen Transport und Montage zu gewährleisten. Abmessungen und Anordnung der Fertigteile sind in Bild 2 schematisch dargestellt. Das statische System im Bauzustand ist ein statisch bestimmter Gerberträger.

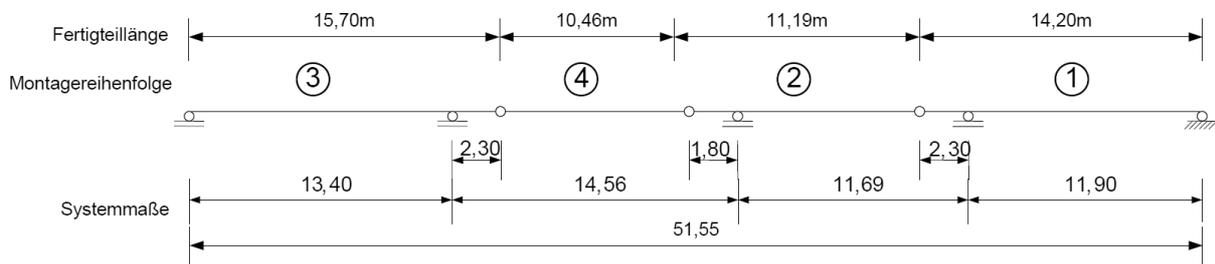


Abbildung 2: Statisches System des Überbaus in Längsrichtung während des Bauzustands

Die Herstellung der Fertigteile sollte im Spannbett erfolgen. Die Fertigteile bestehen aus der unteren, ca. 6 cm dicken Gurtplatte, den aufgehenden, ca. 18 cm breiten Stegen sowie den Massivstreifen am linken und rechten Plattenrand im Bereich der Geländer. Zudem sind Querträger im Bereich der Unterstützungspunkte sowie zusätzlich zwei Querträger in jedem Feld vorgesehen. Letztere dienen der Aussteifung und als Umlenksattel für die verbundlose Vorspannung. Die zuvor beschriebenen Teile der Konstruktion werden aus stahlfaserbewehrtem Ultra-Hochfestem Beton hergestellt.

Die Ortbetonergänzung umfasst die obere, in Bild 1 darstellungstechnisch abgesetzte Gurtplatte im Fahrbahnbereich. Diese wird über die gesamte Brückenlänge als Zweischichtsystem aufgebracht. Auf eine ca. 4 cm dicke mit Stabstahl und Stahlfasern bewehrte Deckplatte aus Ultra-Hochfestem Beton wird frisch-in-frisch eine 2 cm dicke Deckschicht aus mit PVA-Fasern bewehrtem Ultra-Hochfestem Beton aufgebracht, so dass sich eine Gesamtdicke der oberen Gurtplatte von ca. 6 cm ergibt. Zwischen Fertigteile und Ortbetonergänzung ist eine

platte von ca. 6 cm ergibt. Zwischen Fertigteil und Ortbetonergänzung ist eine Verbundbewehrung vorgesehen. Durch den Einsatz korrosionsbeständiger Kunststofffasern im oberen Bereich der Deckschicht können Rostfahnen, wie sie bei Stahlfasern auftreten, vermieden werden.

Nach dem Erhärten der Ortbetonergänzung wird die zusätzliche verbundlose Vorspannung aufgebracht. Die Herstellung der Kappen erfolgt konventionell aus normalfestem LP-Beton. Der zuvor beschriebene Entwurf wurde statisch nachgewiesen und in einem Entwurfsplan dokumentiert.

2.2.2 Ortbetonentwicklung

Die Entwicklung des kunststofffaserverstärkten Ultra-Hochfesten Betons für die Anwendung als Ortbeton erfolgte am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie.

Im Rahmen des Projekts wurde die Realisierung der Ortbetonergänzung als zweischichtiges System favorisiert, das auf der Baustelle frisch in frisch eingebaut werden sollte. Ultra-Hochfeste Betone werden in der Regel mit Stahlfasern hergestellt um ein ausreichend duktilen Verhalten im Nachbruchbereich zu gewährleisten. Nachteilig ist, dass durch die Verwendung der Stahlfasern an der Betonteiloberfläche durch Witterungseinflüsse Korrosionsflecken entstehen können, die keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben, jedoch als ästhetischer Mangel empfunden werden. Die Oberflächen solcher Bauteile werden deshalb nachträglich mit einem Schutzanstrich versehen, der regelmäßiger Wartung unterliegt. Durch die Gestaltung der Ortbetonergänzung als zweischichtiges System kann die stahlfaserhaltige Schicht durch die darüber befindliche PVA-faserhaltige Schicht geschützt werden. Ziel bei der Entwicklung war es, die Betonoberfläche ohne zusätzliche Beschichtung als Fahrbahnbelag zu verwenden. Um eine ausreichende Griffigkeit der Betonoberfläche zu garantieren, wurde für die Ortbetonschichten Basalt als Gesteinskörnung verwendet.

Da die beiden Schichten im Bauwerk statisch als monolithische Schicht wirken sollen, waren die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften der beiden Ortbetonmischungen aufeinander abzustimmen. Vorgesehen war ein Einbau der Schichten frisch in frisch. Die Konsistenzen der beiden Mischungen mussten deshalb so aufeinander abgestimmt werden, dass Vermischen der beiden Mischungen bei Verdichtung der oberen Schicht vermieden wird. Weiterhin war darauf zu achten, dass beide Schichten ausreichend lange verarbeitbar sind, und dass es zu keiner Bildung einer trockenen Trennschicht, sogenannte „Elefantenhaut“, zwischen den beiden Schichten während des Einbaus kommt.

Ultra-Hochfeste Betone werden zur Erzielung der hohen Festigkeiten mit einem sehr niedrigen Wasser/Zement-Wert von 0,2 – 0,25 hergestellt, bei gleichzeitiger Packungsdichteoptimierung der Feinstbestandteile. Eine Verarbeitung des Betons ist nur durch die Verwendung spezieller Fließmittel auf Polycarboxylatether möglich. Durch den sehr geringen Wassergehalt und die eingesetzten Fließmittel im Beton reagieren Ultra-Hochfeste Betone jedoch sehr empfindlich auf Umwelteinflüsse wie z.B. Temperatur, Luftfeuchte und Wind. Dies war bei der Entwicklung der Rezepturen zu beachten. Aufgrund des sehr hohen Anteils an Bindemittel zeigen UHPC außerdem ein stärkeres autogenes Schwinden als Normalbetone. Zur Reduzierung des Schwindens des UHPC wurden in beide Ortbetonmischungen Hochzement und Basalt eingesetzt. Weiterhin wurde der Anteil an Leim im Vergleich zu bekannten UHPC-Mischungen deutlich reduziert.

Zur Entwicklung des zweischichtigen Ortbetonsystems wurden im Labor nachfolgende Versuchsreihen durchgeführt:

In der ersten Versuchsreihe wurden verschiedene PVA-Fasern mit Hilfe einer bekannten UHPC-Rezeptur untersucht. Bewertet wurden die Verarbeitungskonsistenz der verschiedenen Mörtel, sowie das Verformungsverhalten an Prismen unter Biegezugbeanspruchung. Die verwendeten PVA-Fasern sind hoch chemisch- und alkalibeständig, besitzen eine hohe Zugfestigkeit und eine lange Witterungsbeständigkeit bei einer geringen Rohdichte von $1,3 \text{ kg/dm}^3$. Diese Fasern tragen während der Entwicklung der Frühfestigkeit dazu bei, die Bildung von Schwindrissen zu reduzieren. Bei den Versuchen zur Bestimmung der PVA-Fasern wurden Fasern verschiedener Geometrien in die Basismischung eingebracht. Die Fasern des Typs RFS 400x18 (Firma Kuralon) zeigten das beste Ergebnis in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und das Nachrissverhalten.

Ein wichtiger Aspekt, bei der Entwicklung der Ortbetonmischungen war, wie oben beschrieben, die Reduzierung des Schwindverhaltens, durch Verwendung eines klinkerarmen Bindemittels und Reduzierung des Leimgehaltes in der Mischung.

Durch die Verwendung von Hochofenzementen anstelle von Portlandzementen konnte neben der Verringerung des Schwindens auch eine Erhöhung der Verarbeitungszeit der Mischung erreicht werden. Im Versuchsprogramm wurden insgesamt drei verschiedene Zemente in Kombination mit Fließmittel für die Verwendung in UHPC untersucht. Bewertungskriterien waren die Fließfähigkeit (untersucht mit dem kleinen Setzfließmaß) und das Entlüftungsverhalten des Leimes (DIN 1015) und die maximal erzielbare Druckfestigkeit (gemessen an Würfeln mit einer Kantenlänge von 5 cm). Die Auswahl der Zemente erfolgte ebenfalls auf Basis der Kasseler UHPC-Mischung M3Q. Durch den Einsatz von Hochofenzementen konnte eine weichere Konsistenz und ein niedrigerer Luftporengehalt erreicht werden. Die Druckfestigkeit, gemessen an wärmebehandelten Probekörpern, lag mit $190\text{--}220 \text{ N/mm}^2$ in der Größenordnung von Mischungen mit Portlandzement. Dabei stellte sich ein bestimmter Zement CEM III/A 52,5 N HS/NA als besonders geeignet heraus. Dieser Zement zeigte mit einem Hüttensandgehalt von 50 % eine sehr gute Fließfähigkeit, einen geringen LP-Gehalt und eine sehr hohe Druckfestigkeit. Des Weiteren wurden verschiedene Quarzmehle mit unterschiedlicher Granulometrie mit Hilfe von Packungsdichteberechnungen und Frischbetonuntersuchungen vergleichend untersucht.

Nach der Auswahl des Bindemittels erfolgte die eigentliche Einstellung der Leime bzw. Mörtel (mit Sand) für beide Ortbetonmischungen. Als Frischbetongrößen wurden das Setzfließmaß (DIN EN 12390), der Luftporengehalt und die Fließzeit am Auslauftrichter an Leim- und Mörtelproben untersucht. Weiterhin wurde die Veränderung der Konsistenz über einen Zeitraum von 2 Stunden an einem Viskomat untersucht, um eine möglichst lange Verarbeitung für den Ortbeton sicherzustellen. Die Leime der beiden Schichten sollten möglichst fließfähig sein. Für die Versuche wurde ein kleines Setzfließmaß (Hägerrmannkonus) von 30–33 cm gemessen.

Die eigentliche Einstellung der Betonkonsistenz erfolgte in einem späteren Schritt durch gezielte Zugabe der Fasern, des Sandes und des Basaltes. Um eine Vermischung beider Ortbetonmischungen beim Einbau zu vermeiden, sollte die untere stahlfaserhaltige Schicht eine F2-Konsistenz und die darüber liegende PVA-faserbewehrte Schicht eine fließfähige Konsistenz (F4–F5) aufweisen. Jedoch sollte letztere auch mit einem leichten Gefälle von 1,5 % eingebracht werden können.

Die Konsistenz der oberen PVA-faserbewehrten Schicht konnte durch eine Reduzierung des Microsilikaanteils im Leim und die Variation des Sandanteils M3Q eingestellt werden. Der Wasser-Bindemittelgehalt der unteren Schicht wurde auf 0,195 und für die PVA-faserbewehrte Schicht auf 0,20 festgelegt.

Im nächsten Schritt erfolgte der Übergang vom Mörtel zum Beton durch Zugabe der Gesteinskörnung.. Getestet wurden Basaltgehalte zwischen 20 und 40 Vol.%. Für die stahlfaserbewehrte Schicht wurden zwei Microdrahtfasern unterschiedlicher Länge (13 und 17 mm) untersucht.. Die Fasern 0,19 mm/17 mm wurden aufgrund der größeren Schlankheit und höheren Zugtragfähigkeit ausgewählt. Erste Versuche zur Applizierung der beiden Schichten aufeinander wurden im Labor realisiert. Dazu wurden eine unbewehrte und eine bereichsweise mit Stabstahl bewehrte Platten hergestellt. Eingebaut wurde der Ortbeton in den Schichtstärken, wie sie auch später auf der Baustelle realisiert werden sollten. Die untere Schicht wies eine Dicke von 4 cm und die obere Schicht eine Dicke von 2 cm auf. Mit einer Konsistenzklasse F2 steifer konnte nach Erhärtung ein sehr guter Schichtenaufbau gemessen werden.

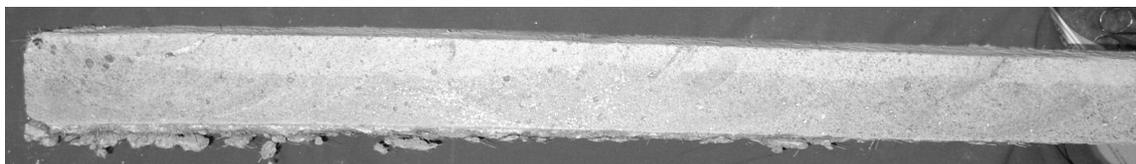


Abbildung 3: Querschnitt durch eine Versuchsplatte

An den Platten wurden nach Erhärtung umfassende Versuche zum Schichtenverbund, zur Festigkeitsentwicklung und zur Wirkung der Nachbehandlung durchgeführt. Es konnte sichergestellt werden, dass die beiden Schichten als monolithische Schicht wirkten und eine ausreichend hohe Verbundfestigkeit aufwiesen. Während der Erhärtung der Applizierungsversuche wurden im Alter von 2, 7, 14, und 28 Tagen Festbetonuntersuchungen durchgeführt. Bohrkerne erreichten dabei eine 28 Tage-Festigkeit von im Mittel 172 N/mm² und erzielten damit den geforderten Wert von 160 N/mm² (siehe Tabelle 1). Die Oberfläche der mit Nachbehandlungsmittel geschützten Fläche zeigte keine Schwindrisse und zeichnete sich durch gute Oberflächenzugfestigkeiten aus. Die gemessene Oberflächenzugfestigkeit betrug im Mittel 3 N/mm².

Tabelle 1: Druckfestigkeit von Bohrkernen aus der Versuchsplatte 2

Prüfalter	Druckfestigkeit [N/mm ²] BK-D-			Mittel [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
	2.1	2.2	2.3		
2d	81,1	81,3	77,2	79,9	1,9
7d	129,7	150,9	124,2	134,9	11,5
14d	143,1	164,3	142,2	149,9	10,2
28d	165,4	180,5	168,5	171,5	6,5

Die Untersuchungen führten abschließend zu geeigneten Ortbetonrezepturen, die auch beim Bau des Demonstrators verwendet wurden. Die erzielte Konsistenz entsprach mit einem Ausbreitmaß von 51 cm der Konsistenzklasse F4. Der Gehalt an PVA-Fasern betrug 2,0 Vol.-%.

An der stahlfaserbewehrten Schicht wurden 28-Tage-Zylinderdruckfestigkeiten von im Mittel 167 N/mm^2 erreicht, dies lag oberhalb des geforderten Wertes von 160 N/mm^2 . Die gemessene Schwindverformung aus autogenem Schwinden lag bei der Mischung mit Stahlfasern bei im Mittel $550 \text{ } \mu\text{m/m}$ und bei der Mischung mit PVA-Fasern bei $763 \text{ } \mu\text{m/m}$.

Des Weiteren wurden an Platten der Größe $15 \times 70 \text{ cm}$ Versuche zur Beurteilung des Verbundes zwischen Fertigteil und Ortbeton durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass durch Vorbehandlung des Fertigteils mittels Sandstrahlen ein sehr guter Verbund zum Fertigteilbeton erzielt werden konnte.

2.2.3 Demonstrator

In Zusammenarbeit mit der Firma Gerdum und Breuer wurde zum Abschluss des Projekts noch ein Demonstrator gebaut, um die Umsetzung der Ergebnisse aus dem Labor unter Baustellenbedingungen nachzuweisen. Hergestellt wurde eine bewehrte Platte der Größe $1,5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ aus Normalbeton, auf welche die beiden Ortbetonschichten appliziert wurden.

Auf der Platte wurde eine Stabstahlbewehrung angeordnet, die mittig in der unteren Ortbetonschicht liegen sollte. Verwendet wurde Betonstahl BSt 500 S mit einem Durchmesser von 12 mm . Bewehrt wurde die Schicht in Quer- und Längsrichtung mit einem Stababstand von 10 cm . Beide Schichten wurden zeitlich mit einem Abstand von einer halben Stunde aufeinanderfolgend mit einem Zwangsmischer hergestellt und direkt nach der Herstellung eingebaut. Die Verdichtung der beiden Schichten erfolgte jeweils mit einer Rüttelbohle. Um ein Abbinden der unteren stahlfaserbewehrten Schicht nach dem Einbau und der Verdichtung zu vermeiden, musste diese nach der Herstellung an der Oberfläche feucht gehalten werden, bis die obere PVA-faserbewehrte Schicht aufgebracht werden konnte. Die Abfolge der Herstellung war auch für das geplante Brückenbauwerk vorgesehen.



Abbildung 4: Einbau und Verdichtung der unteren Schicht mit Stahlfasern



Abbildung 5: Stahlfaserschicht nach Verdichtung



Abbildung 6: Einbau der PVA-faserbewehrte Schicht



Abbildung 7: Verdichtung der oberen Schicht mit Rüttelbohle



Abbildung 8: Oberflächenstruktur UHPC mit PVA-Fasern



Abbildung 9: Fertig hergestellte Ortbetonplatte

Die Mischungen wurden so eingestellt, dass sie ca. 90 min sicher eingebaut werden können. Nach der Erhärtung wurden wiederum in zeitlichen Abständen Bohrkern d/l=50 mm/50 mm aus der Platte entnommen und nach DIN EN 12504-1 auf Druck geprüft. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgezeigt.

Tabelle 2: Druckfestigkeit an Bohrkernen

Prüfalter	Druckfestigkeit [N/mm ²]			Mittel [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
7d	140,6	145,8	147,2	144,5	3,5
28d	170,2	168,2	177,4	172,0	4,8
56d	191,9	188,2	182,7	187,6	4,6

Abweichend von der im Antrag ursprünglich geplanten Vorgehensweise, wurde der Beton für die Ortbetonplatte mit einem mobilen Mischer hergestellt. In Gesprächen mit verschiedenen Transportbetonherstellern hatte sich im Laufe des Projektes herausgestellt, dass keine geeignete Mischeinrichtung im Umkreis der geplanten Baumaßnahme zur Verfügung steht, die für die Herstellung von Ultrahochfesten Beton geeignet wäre.

Die Gesamtmenge an Ortbeton sollte bei dem geplanten Bauvorhaben 12 m³ betragen. Da eine zeitliche Taktung des Ortbetoneinbaus notwendig war, konnte nur mit sehr kleinen Betonierchargen gearbeitet werden. Hierzu wurde ein Mischer mit einem kleinen Mischvolumen (max. 1 m³) benötigt. Die vorhandenen Mischer im Umkreis der geplanten Baumaßnahme verfügten über ein sehr großes Mischvolumen, welches eine ausreichende Mischung des geringen Mischgutes nicht gewährleistet hätte. Problematisch waren die Dosiergenauigkeit der Anlagen, die Anhaftung von Feinststoffen an der Behälterwandung im Mischer, die Zugabe der Fasern zur Mischung sowie die geringe Mischintensität des Mixers. Hier besteht für die weitere Umsetzung der UHPC-Bauweise als Ortbeton noch dringender Optimierungsbedarf.

Die Erstellung eines Demonstrators zur Durchführung dynamischer Versuche unter Verkehrsbelastung konnte aufgrund der vorgenannten Problematik nicht in dem geplanten Umfang durchgeführt werden. Es wurde daher entschieden, die vorgenannt beschriebenen Platten unter Verwendung eines mobilen Mixers als Demonstrator herzustellen. Bewertet wurde die Misch-, Einbau- und Verdichtungsfähigkeit der UHPC-Ortbetone. Erkannt wurde in den Versuchen, dass an die Einbaugeräte im Vergleich zu Normalbeton höhere Anforderungen zu stellen sind. Für die Realisierung von zukünftigen Ortbetonmaßnahmen wird ein leistungsstarker mobiler Mischer benötigt, der über gute Wandabstreifer verfügt um Feinststoffagglomerate in der Mischung zu vermeiden. Da UHPC-Ortbeton aufgrund seiner hohen Packungsdichte eine sehr zähe Konsistenz aufweist, ist die Förderung des Betons zur Einbaustelle noch zu optimieren, das Arbeiten mit Pumpen ist für die eingebauten Konsistenzen nicht möglich. Für die Verdichtung der UHPC-Mischungen wurden Rüttelbohlen eingesetzt, die sich in den Versuchen als ausreichend leistungsfähig herausgestellt haben. Jedoch war hier auf eine gleichmäßige Vorschubgeschwindigkeit beim Einbau zu achten, da sonst die Schichten in ihrer Dicke variierten.

2.3 Verwertbarkeit der Ergebnisse und geplante Veröffentlichung.

Durch die Zusammenarbeit mit der Stadt Felsberg konnte im Rahmen der Verwertungsoffensive ein möglicher Anwendungsfall für die PVA-faserbewehrte Ortbetonmischung gefunden werden. Die Entwurfsplanung für einen Brückenüberbau einer mehrfeldrigen Brücke aus UHPC erfolgte

gemeinsam mit dem Ingenieurbüro IBB Fehling + Jungmann GmbH. Die Entwicklung der Bauweise und der Mischungen wurde im Rahmen des Projekts bis zur Anwendungsreife gebracht. Zusammen mit der Stadt Felsberg und dem Amt für Straßen- und Verkehrswesen Kassel wurde eine beschränkte Ausschreibung mit Teilnehmerwettbewerb durchgeführt. Im Rahmen einer Präqualifikation sollten die potentiellen Anbieter ihre Erfahrungen im Umgang mit UHPC nachweisen. Zwei Bietergemeinschaften konnten aufgrund ihrer Qualifikation als geeignet eingestuft werden. Dies führte bei der Gemeinde Felsberg als Auftraggeber allerdings zu Bedenken, dass eine ausreichende Anzahl von Bewerbungen mit annehmbaren, marktüblichen Preisen abgegeben werden. Daraufhin wurde das Ausschreibungsverfahren im August 2011 durch den Bauherrn aufgehoben. Der Brückenneubau soll jetzt in konventioneller Spannbetonbauweise erfolgen.

Die Gemeinde hat aber in Aussicht gestellt, dass die gewonnenen Erfahrungen bei einem weiteren Projekt umgesetzt werden können.

Das Projekt hat gezeigt, dass prinzipiell UHPC als Ort beton herstellbar ist und der Einsatz von PVA-Fasern positiv bezüglich der Oberflächenqualität von Sichtbeton- und Nutzflächen zu bewerten ist. Leider besteht noch sehr viel Aufklärungs- und Schulungsbedarf bei interessierten Firmen und Bauherren bezüglich des Baustoffs UHPC und dessen besonderer Eigenschaften. Die zukünftige Verwertung des Patents sieht die Publizierung der erzielten Ergebnisse in Fachzeitschriften und auf Tagungen vor, sowie die Vorstellung des Konzepts bei interessierten Bauherren.

3 Literatur

[1] Patentschrift DE 103 32 491 B4: Betonmischung für einen ultrahochfesten Beton sowie deren Verwendung, Patentinhaber: Universität Kassel, Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 12.01.2006

[2] Schmidt, M., Jerebic, D.: Nachhaltigkeit von Bauwerken aus UHPC – Beispiel der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Betonwerk International, H. 3 (2010), S. 560–57.

[3] Schmidt, M.; Fehling, E.: Ultra High Performance Concrete (UHPC), 10 Jahre Forschung und Entwicklung an der Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No. 1, Heft 7, Kassel University Press, GmbH, Kassel, 2005.

[4] Bornemann, R., Faber, S.: UHPC with steel- and non-corroding high-strength polymer fibres under static and cyclic loading. Proc. 1st Int. Symposium on Ultra-High-Performance Concrete, Kassel, 2004. Hrg. Schmidt, M., E. Fehling, C. Geisenhanslüke. Kassel University Press, 2004.

[5] Fehling, E., Schmidt, M., Teichmann, T., Bunje, K., Bornemann, R., Middendorf, B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultra-Hochfester Betone UHPC, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, No. 1, Heft 1, 130 Seiten, Kassel University Press, Kassel, 2005, ISBN 3-89958-108-3.

[6] Schmidt, M.; Krelaus, R.; Freisinger, S.; Dilger, K.; Wisner, G.; Böhm, S.; Heim, P.; Mihm, K.H.: Neue konstruktive Möglichkeiten im Betonbau durch Kleben von Bauteilen aus ultra-hochfestem Beton; Tagungsband 9. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, Februar 2009.

[7] Schmidt, M.: Einsatz von UHPC beim Bau der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Beton 57 (2007), H. 6, S. 252–255.

[8] Fehling, E.; W. Schreiber; K. Bunje; M. Schmidt: Brücke aus Ultrahochfestem Beton über die Fulda bei Kassel. Bauingenieur, 79 (2004) H. 7/8, S. 351–353.

[9] Schmidt, M.: Instandsetzen und Verstärken von Betonbauwerken und Bauteilen mit ultrahochfestem Beton (UHPC), Beton–Insta 2007, 20 Jahre Bundesgütegemeinschaft Instandsetzung von Betonbauwerken e.V., 09. – 10.05.07, S. 97–103.

[10] Brühwiler, E. et al.: Instandsetzung einer Betonbrücke mit ultrahochleistungsfähigem Faserfeinkornbeton (UHLFB), in Beton– und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 9, Seite 822–827, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2005

[11] Happich, M.: Optimierung Ultrahochfester Betone für die Verwendung als konstruktive mitwirkende Ortbetonergänzung im Brückenbau, Diplomarbeit angefertigt am Fachgebiete Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, Universität Kassel, 2011

[12] Hillebrand, M.: Entwurf einer vierfeldrigen Straßenbrücke aus ultrahochfesten Beton, Masterarbeit am Fachgebiet Massivbau, Universität Kassel, 2011

Kassel, den 14.10.2011

Der Projektleiter

Prof. Dr.–Ing. habil M. Schmidt