

Verbundvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton"

Schlussbericht

| | |
|---|--------------------------------|
| Zuwendungsempfänger: BASF Construction Polymers GmbH | Förderkennzeichen: 13N10499 |
| Vorhabenbezeichnung: BMBF Forschungsrahmenprogramm "Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING" Fördermaßnahme "Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture" Verbundvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus nanooptimiertem Ultra-Hochleistungsbeton" | |
| Laufzeit des Vorhabens: von 01.07.2009 bis 30.06.2013 | |

Inhalt

| | | |
|-----------|--|-----------|
| I | Kurzdarstellung | 2 |
| 1 | Aufgabenstellung | 2 |
| 2 | Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde | 5 |
| 3 | Planung und Ablauf des Vorhabens | 7 |
| 4 | Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde | 8 |
| 5 | Zusammenarbeit mit anderen Stellen | 13 |
| II | Eingehende Darstellung | 14 |
| 1 | Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse | 14 |
| 2 | Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises | 27 |
| 3 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit | 27 |
| 4 | Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit | 28 |
| 5 | Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen | 28 |
| 6 | Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen | 28 |

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

1.1 Aufgabenstellung des Gesamtprojekts

Im hier beschriebenen Forschungsvorhaben "Multifunktionale Fahrbahn aus UHPC" sollte ein Herstellungsverfahren für eine hoch tragfähige, lärmarme, ressourcensparende und dauerhafte Betonfahrbahn aus Ultra-hochfestem Beton (Ultra High Performance Concrete, UHPC) erarbeitet werden. Die Oberflächeneigenschaften Griffigkeit, Nassgriff, Entwässerung und Wasserverdrängung sowie Reduktion der Reifen-Fahrbahngeräusche sollten durch eine geometrisch definierte, reproduzierbare und dauerhafte Oberflächentexturierung erreicht werden.

Es wurden Arbeiten zur stofflichen und produktionstechnischen Anpassung des Ausgangsmaterials an die besonderen Belange des Straßenbaus und zur Ausarbeitung eines geeigneten Texturierungsverfahrens durchgeführt. Insbesondere wurde die Betonrezeptur und das Mischverfahren an die Erfordernisse des Materials angepasst.

Ein ökologisches Ziel des vorgestellten Konzepts war die Verminderung des Rohstoff- und Energieeinsatzes sowie der Emissionsbelastung, nicht nur durch die wesentlich dünnere Betondecke selbst, sondern auch durch die Verwendung hüttensandhaltiger Zemente. Letztere erfordern einen geringeren Energieeinsatz bei der Herstellung als die derzeit verwendeten Verfahren und Materialien.

Neuartig ist bei dem hier zugrunde gelegten Konzept insbesondere die Trennung der Fahrbahndecke in zwei Schichten mit unterschiedlicher Funktion: eine sog. Deckschicht mit einer Stärke von ca. 15 cm, die im Wesentlichen die Tragfähigkeit der Fahrbahn gewährleistet und eine ca. 2 cm dicke Nuttschicht, die die o. g. funktionalen und umwelttechnischen Eigenschaften aufweist (vgl. Abbildung 1).

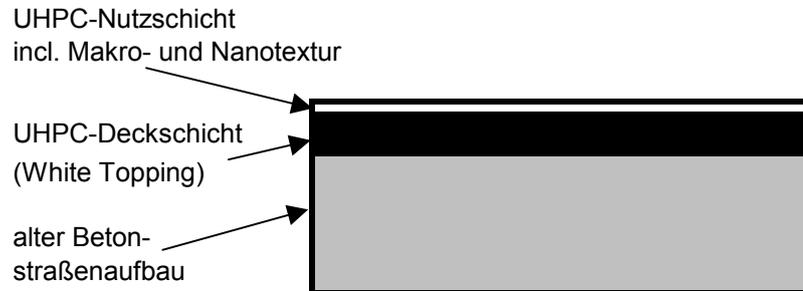


Abbildung 1. Geplanter Aufbau der Fahrbahndecke aus UHPC.

Die im Projekt umgesetzte Oberflächentextur ist durch Rauigkeitselemente geprägt, deren Größe und Formgebung im Bereich von Zehntel Millimetern bis etwa zehn Millimeter liegen. Die vorgegebene Makrotextur ist geeignet, die Rollgeräuschentstehung durch Schwingungsanregung des Reifens und air-pumping im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zu minimieren. Das Material sowie die Anordnung, Größe und Formgebung der Rauigkeitselemente unterstützen außerdem die Griffigkeit der Fahrbahn im trockenen und nassen Zustand.

In der Schlussphase des Vorhabens war der Bau eines Demonstrators zum Nachweis der funktionalen und umwelttechnischen Eigenschaften und der akustischen Performance vorgesehen.

1.2 Teilprojekte und Projektpartner

Das Forschungsvorhaben war in die nachfolgenden Teilvorhaben gegliedert, die jeweils von einem Projektpartner, ggf. in Kooperation mit weiteren Projektpartnern bearbeitet wurden.

Tabelle 1. Übersicht über die Teilvorhaben des Forschungsvorhabens:
 Laufende Nummern, Titel und ausführende Partner.

| Lfd. Nr. Teilvorh. | Titel | Ausführender Partner |
|--------------------|---|------------------------------------|
| I | Betontechnologische Grundlagen für dauerhafte, hoch belastbare tragende Betondeckschichten aus HPC und UHPC | Universität Kassel, FB 14 Bauwesen |
| II | Grundlagenforschung zur Wechselwirkung mit Additiven | BASF Construction Polymers |

| Lfd. Nr. Teilvorh. | Titel | Ausführender Partner |
|--------------------|---|---|
| III | Forschungsarbeiten zu Zement und Mischgut für Hochleistungsbeton | Holcim Deutschland |
| IV | Grundlagen der Kornbandoptimierung für Hochleistungsbeton | ThyssenKrupp Resource Technologies (früher: Polysius) |
| V | Grundlagen der Bewertung bei der Erprobung von nanooptimiertem UHPC im Straßenbau | Bundesanstalt für Straßenwesen |
| VI | Erarbeitung eines material- und prozessadäquaten lärmarmen Texturdesigns | Müller-BBM |
| VII | Erarbeitung der Methodik eines Texturprägeverfahrens für nanooptimierten UHPC | Röchling Automotive |
| VIII | Grundlagen der Mischtechnik für Hochleistungsbeton | Otto Alte-Teigeler |
| IX | Grundlagen der Einbautechnik für Hochleistungsbeton | EUROVIA Beton |

1.3 Aufgabenstellung im Teilprojekt II

(Grundlagenforschung zur Wechselwirkung mit Additiven)

Die Herstellung hochfester, leistungsfähiger und anwendungsgerechter Betone, wie sie im Rahmen des Verbundvorhabens angestrebt werden, erfordert eine gezielte Abstimmung aller Komponenten. Aus betontechnologischer Sicht bestehen solche hydraulisch abbindende Massen aus einem hohen Zementanteil von rund 600 - 700 kg/m³ und nicht unerheblichen Mengen an Silicastaub. Die Verwendung von Silicastaub führt zu einer Optimierung der Packungsdichte der Bindemittelmatrix und beeinflusst in positiver Weise die Druckfestigkeit des ausgehärteten Betons. Das Mikrogefüge von hochfesten Betonen ist praktisch undurchlässig für Chloridionen (z.B. aus Tausalzlösungen), welche in erster Linie für die Korrosion der Bewehrung verantwortlich sind. Das dichte Gefüge macht hochfeste- und ultrahochfeste Betone (UHPC) außerordentlich dauerhaft, was neue Einsatzgebiete ermöglicht. Dies erfordert einen extrem niedrigen Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert), wobei im konkreten Fall ein w/z-Wert von 0,20 angestrebt wird. Allerdings ergeben derartige Gemische ein nur schwer verarbeitbares, erdfeuchtes Haufwerk. Um bei solch

niedrigen w/z-Werten eine gut verarbeitbare, fließfähige Konsistenz zu gewährleisten, insbesondere auch in Hinblick auf die aufzubringende Texturierung auf der Fahrbahnoberfläche, ist der Zusatz maßgeschneiderter Fließmittel erforderlich.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aus bereits durchgeführten Forschungsprojekten^{1,2,3} ist bekannt, dass zur Verflüssigung von UHPC der Einsatz sogenannter Polycarboxylat-Fließmittel erforderlich ist. Polycarboxylatether (kurz: PCE) repräsentieren eine Generation von Fließmitteln, welche die Herstellung anspruchsvoller Betone ermöglichen. Die Anforderungen an derartige Fließmittel sind sehr vielfältig. Durch eine gezielte Auswahl der Monomere sowie einen gezielten Aufbau der Polymerstruktur kann das Wirkungsprofil der Polycarboxylatether gezielt auf den Anwendungsbereich eingestellt werden. Die Dispergierwirkung der Fließmittel beruht auf elektrostatischer Abstoßung, welche durch eine kammartige Struktur realisiert werden kann. Diese Kammpolymere bestehen aus einer Hauptkette, entlang der die adsorptionsfähigen funktionellen Gruppen - in der Regel Carboxylat - angeordnet sind, sowie aus Seitenketten, die aus ungeladenen wasserlöslichen Ethylenoxid-Einheiten aufgebaut sind. Die Polycarboxylate adsorbieren über ihre anionischen Gruppen auf die positiv geladenen Bereiche der Zement- und Zusatzstoffpartikel, während die Seitenketten in den Porenraum ragen und die Zusammenlagerung der Feststoffteilchen durch sterische Hinderung hemmen (Abbildung 4).

Die Wirkung von PCE-Fließmitteln wird wesentlich durch die Anmischmethode, die Mischungszusammensetzung des Betons und die Molekülstruktur des Fließmittels bestimmt. Eine optimierte Mischmethode unter Einsatz eines Intensivmischers mit hoher Scherrate führt zu einer wesentlich besseren Fließfähigkeit des UHPC als z. B. manuelles Anmischen mit geringer Scherrate⁴. Da geplant ist die Nutz- und Deckschichtmischungen in situ auf der Baustelle anzumischen, muss das zu entwickelnde Fließmittel eine gute und schnelle Verflüssigung des UHPC gewährleisten.

Die meisten kommerziell verfügbaren Fließmittel wurden für den Einsatz in herkömmlichen Betonen entwickelt, deren Hauptbindemittel Portlandzement ist. UHPC besteht aus einer Vielzahl verschiedenster Feinststoffe. So lassen sich Mörtel die Zement und Silicastaub als Bindemittel enthalten erheblich schwerer verflüssigen als reine Zementmörtel ohne Silicastaub¹. Dies ist ein grundlegender Hinweis darauf,

¹ Plank, J.; Schröfl, C.; Gruber, M.; Lesti, M.; Sieber, R.: Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizer in Ultra-High Strength Concrete: the Importance of PCE Compactibility with Silica Fume. *Journal of Advanced Concrete Technology* 7, 2009, S. 5-12

² Schießl, P.; Mazanec, O.: DFG-Abschlussbericht: Optimierung des Mischprozesses ultrahochfester Betone (DFG-Projekt Nr.: 253/36-1), 2007

³ Schießl, P.; Mazanec, O.; Lowke, D.; Plank, J.; Schröfl, C.; Gruber, M.; Schmidt, M.; Glotzbach, C.; Stephan, D.: Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit und Gefügeentwicklung von UHPC - Einfluss von Fließmittel und Silicastaub auf das Mischen und die Verarbeitbarkeit von UHPC. *CementInternational*, Heft 4 (8), 2010, S. 60-71

⁴ Mazanec, O.; Schießl, P.: Mixing Time Optimisation for UHPC. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*. In: *Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, March 05-07, 2008, S. 401-408, ISBN: 978-3-89958-376-2

dass Silicastaub eine wesentliche Rolle bei der erfolgreichen Dispergierung von UHPC spielt und dass die Molekülstruktur des Fließmittels dahingehend angepasst werden muss.

Bei den angestrebten ultrahochfesten Straßenbeton-Mischungen mit plastischer Konsistenz muss beachtet werden, dass neben einer ausreichend verarbeitbaren Konsistenz auch eine für die Texturierung erforderliche ausgeprägte Thixotropie vorhanden sein muss. Dies ist eine essentielle Herausforderung bei der Fließmittelentwicklung, da mit zunehmender adsorbierter Polymerschichtdicke eine bessere Dispergierung der Partikel eintritt; die thixotropen Eigenschaften von UHPC-Mischungen aber erheblich abnehmen^{5;6}.

Weiterhin darf das Fließmittel die Zementhydratation nicht zu stark verzögern oder sich negativ auf die Endfestigkeit der Betone auswirken, da die angestrebten Straßenbeton-Mischungen eine hohe Druckfestigkeiten und lange Lebensdauer erreichen sollen.

Die oftmals auftretende frühzeitige Rissbildung von UHPC infolge chemischem und/oder autogenem Schwinden kann durch die Zugabe von Schwindreduzieren vermieden werden^{7,8,9}. Neben der Entwicklung des Fließmittels gehörte auch die Auswahl eines geeigneten Schwindreduzierers zum Arbeitspaket der BASF.

⁵ Lowke, D: Sedimentationsverhalten und Robustheit von Selbstverdichtenden Betonen - Optimierung auf Basis der Modellierung der interpartikulären Wechselwirkungen in zementbasierten Suspensionen, Dissertation Technische Universität München, 2013

⁶ Mazanec, O.: Charakterisierung der Mischzeit und des rheologischen Verhaltens ultrahochfester Betone unter Einbeziehung interpartikulärer Wechselwirkungen, Dissertation Technische Universität München, 2013

⁷ Schachinger, I., Schmidt, K., Heinz, D., Schießl, P.: Early-Age Cracking Risk and Relaxation by Restrained Autogenous Deformation of Ultra High Performance Concrete. 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Juni 2002, Leipzig, Band 2, S. 1341-1354

⁸ Eppers, S.: Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2010

⁹ Schäffel, P.: Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das autogene Schwinden und weiterer Eigenschaften von Zementstein. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2009

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Verteilung der Aufgaben unter den Partnern in diesem Verbundprojekt ist in Abbildung 2 dargestellt:

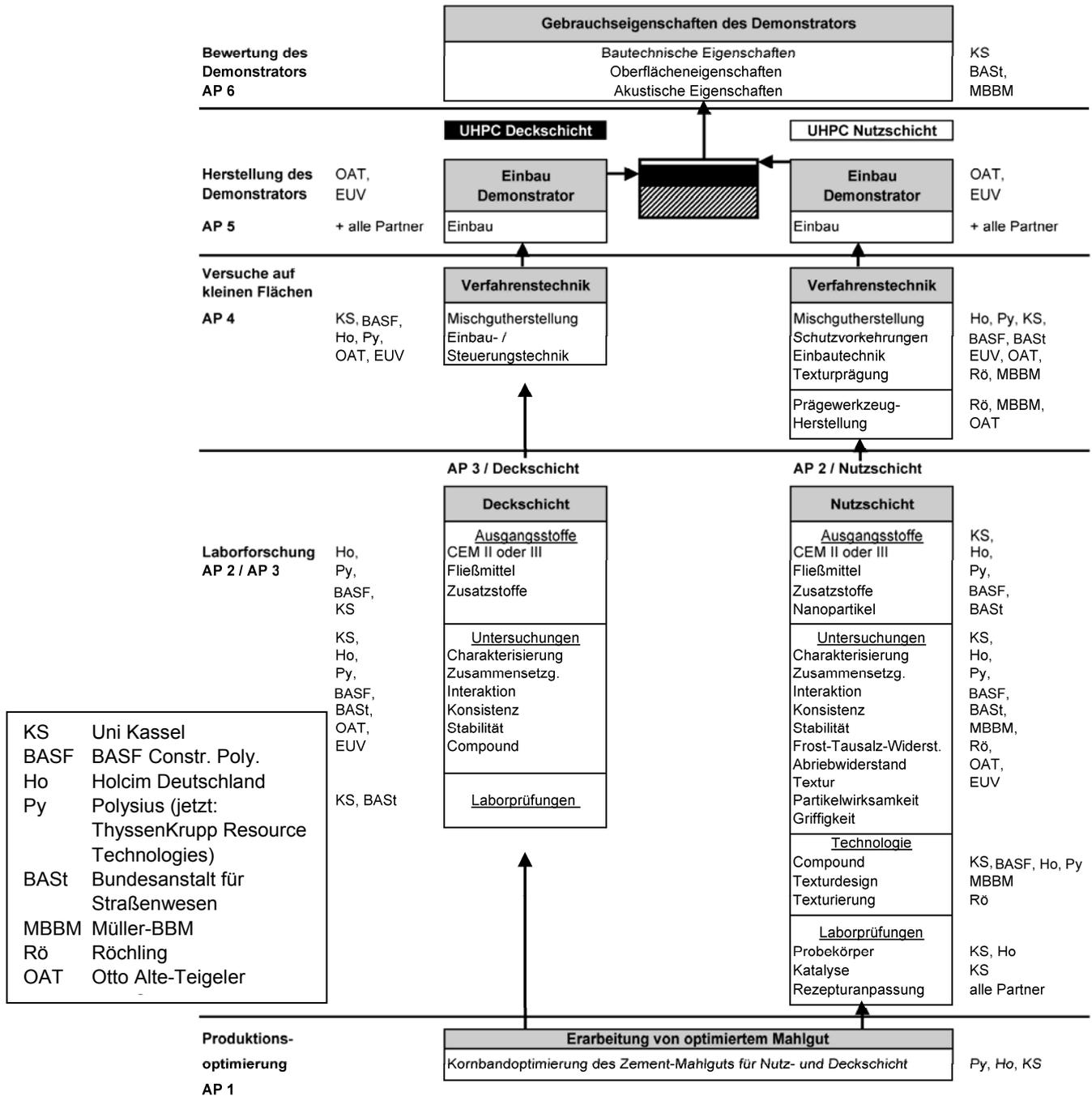


Abbildung 2. Arbeitspakete (AP) und Verteilung der Aufgaben unter den Partnern.

Wie Abbildung 2 zeigt, war die BASF bei der Entwicklung der Deck- und Nutzschichtmischungen sowie bei den Versuchen auf kleinen Flächen beteiligt. Zudem war die BASF bei der Herstellung des Demonstrators beratend tätig.

Die BASF hat maßgeblich an der Auswahl der Ausgangsstoffe für die Nutz- und Deckschichtmischungen mitgewirkt und an einer mit den Projektpartnern abgestimmten Referenzmischung systematisch die Interaktion des Fließmittels mit den Feinststoffen untersucht. Auf Basis der Untersuchungen konnte ein Fließmittel entwickelt werden, mit dem sich die Nutz- und Deckschichtmischung gut verflüssigen und verarbeiten lassen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens hat sich herausgestellt, dass das Mischen von UHPC im großtechnischen Maßstab auf der Baustelle mit der vom Partner OAT vorgesehenen mobilen Mischtechnik nicht zielführend ist. Zur Lösung der aufgetretenen Probleme hat die BASF maßgebend an der Auswahl einer alternativen Mischtechnik, bei der Entwicklung der Mischabläufe zur Herstellung der Deck- und Nutzschichtmischungen sowie bei der Ablaufplanung zum Einbau der Betone mitgewirkt. Darüber hinaus war die BASF an der Entwicklung der Einbautechnologie zur Texturierung der Nutzschicht beteiligt.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bereits in den 60er-Jahren erreichten Roy und Gouda¹⁰ an Betonproben, die bei hohen Temperaturen und erhöhtem Druck nachbehandelt wurden, Druckfestigkeiten bis zu 650 N/mm². Ende der 80er-Jahre begannen Richard und Cheyrezy¹¹ in Frankreich und Kanada umfangreiche Forschungsaktivitäten zur Entwicklung von Hochleistungsbetonen mit extrem hohen Festigkeiten und deutlich verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften. Durch die Reduzierung des Wassergehaltes bei gleichzeitiger Verwendung von Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylaten, der Zugabe von reaktiven und inerten Zusatzstoffen, fein abgestuften Sandsieblinien, Faserzusatz und Wärmebehandlung konnte die Festigkeit gegenüber normalen Betonen auf über 200 N/mm² vervierfacht werden.

Eine erste technische Anwendung fand ultrahochfester Beton 1998 beim Bau der 60 m langen Fuß- und Radwegbrücke in Sherbrooke, Kanada¹². In Frankreich folgten weitere Anwendungen wie z. B. für Unterbauten und Rieseleinbauten für den Kühlturm des Kraftwerks Cattenom und eine 2001 in Sermaises errichtete 19 m lange

¹⁰ Roy, D. M.; Gouda, G. R.: Cement and Concrete Research. Vol 3, 1983, No. 6. S. 261-266

¹¹ Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composit of Reactive Powder Concretes.; Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, Elsevier Science Ltd 1995, S. 1501-1511

¹² Aitcin, P. C.; Lachemi, M.: The Sherbrooke Reactive Powder Concrete Footbridge. Structural Engineering International, 2/1998, S. 140-144

Brücke¹³. In Korea wurde 2002 die Seonyu Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von 120 m fertig gestellt¹⁴. 2002 entstand die Sakata-Mirai Fußgängerbrücke in Sakata, Japan¹⁵. Der Bau der ersten europäischen Fußgängerbrücke, der Gärtnerplatzbrücke in Kassel, wurde im Jahre 2007 abgeschlossen¹⁶. Die erste Straßenbrücke („Wildbrücke“) mit einer Haupttragkonstruktion aus UHPC (Bogen mit achteckigem Kastenquerschnitt) wurde 2010 bei Völkermarkt in Österreich errichtet. Bei einer Gesamtlänge der Brücke von 157 m überspannt ein Bogenpaar rd. 70 m¹⁷. Eines der derzeit eindruckvollsten Bauwerke aus UHPC ist das Museum of Civilisations from Europe and the Mediterranean (MuCEM), das 2013 in Marseille eröffnet wurde.

Zur Verringerung der Porosität und somit des Anteils von Kapillarporen in der Zementsteinmatrix wird der Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) bei UHPC deutlich gegenüber dem von Normalbeton reduziert. Zumeist werden Zemente mit hohem Sulfatwiderstand und niedrigem C₃A-Gehalt eingesetzt¹⁸. Diese haben durch den geringen Gehalt an Gips- oder Anhydritzusätzen zur Erstarrungsregelung einen deutlich geringeren Wasseranspruch als normale Portlandzemente.

Eine Verbesserung des Verbundbereiches zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung erfolgt durch die Zugabe von Silicastauben (Abbildung 3). Silicastaube gehören neben Flugaschen zu den puzzolanischen Betonzusatzstoffen. Reaktive Silicastaube mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 0,1 - 0,3 µm und spezifischen Oberflächen zwischen 15 und 25 m²/g (N₂ Adsorption, BET Methode) erfüllen gleich mehrere Aufgaben im UHPC. Die amorphen SiO₂-Partikel bilden durch puzzolanische Reaktion zusammen mit dem bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxid festigkeitssteigernde Calciumsilikathydratphasen¹⁹. Durch die Bildung weiterer Hydratationsprodukte werden Fehlstellen verschlossen und somit die Porosität der Matrix verringert. Dank ihrer Gestalt und geringen Größe im Submikrometerbereich füllen sie außerdem den Porenraum zwischen den größeren Zement- und Zusatzstoffpartikeln aus. Dadurch sinkt bis zu einer optimalen Zugabemenge der Wasseranspruch des Systems und das Gefüge wird dichter. Die Grenze ist dann erreicht, wenn im Partikelsystem volumetrisch mehr Silicastaub als füllbarer Porenraum vorhanden ist. Nun können Wasserbedarf und Viskosität deutlich

-
- ¹³ Casanova, P.; Durukal, A.: The Semaises footbridge: an fire-resistant ultra high performance fibre reinforced concrete footbridge without reinforcement. Footbridge 2002 International conference. Paris 20-22 November 2002
- ¹⁴ Behloul, M.; Lee, K. C.: Innovative Footbridge Design in Seoul, Seonyu Footbridge, fib 2002, Osaka Japan
- ¹⁵ Taisei Corp.; Taiheiyo Cement Corp.; Maeta Concrete Industry Ltd.: Sakata-Mirai Bridge Project Brochure, 2002
- ¹⁶ Fehling, E.; Bunje, K.; Schmidt, M.; Schreiber, W.: The „Gärtnerplatzbrücke“ - Design of First Steel Bridge across the River Fulda in Kassel Germany. In: Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05-07, 2008, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10, S. 581-588
- ¹⁷ Reichel, M., Sparowitz L.: UHPFRC Segmentbrücken - Konstruktionsprinzipien, Bemessungsansätze und Machbarkeit. In: Tagungsband Strassen- und Brückentag 2008, Strassen- und Brückentag 2008, Spittal a. d. Drau 2008, S. 87 - 99
- ¹⁸ Bornemann, R.; Fehling, E.: Ultrahochfester Beton - Entwicklung und Verhalten. Leipziger - Massivbau Seminar, Band 10, Titel des Seminars: Hybrides Bauen mit Hochleistungswerkstoffen - Höhere Effizienz durch geschicktes zusammenfügen; Leipzig 2002, S. 1-15
- ¹⁹ Larrad, F.: Ultrafine particles for making very high performance concretes. LCPC, Paris, Frank-reich, 1992 veröffentlicht von E & FN Spon, 2-6 Boundrary Row, London SE 8HN. ISBN 0419 176004

ansteigen. Die spezifische Oberfläche von Silicastauben ist um eine Größenordnung größer als die des Zements. Somit hat Silicastaub bereits bei einem Anteil von 10 M.-% im Bindemittel einen höheren Oberflächenanteil als der Zement²⁰. Durch die hohe Feinheit können Wechselwirkungen mit Fließmittelmolekülen entstehen, die sich ungünstig auf die rheologischen Eigenschaften auswirken²¹.

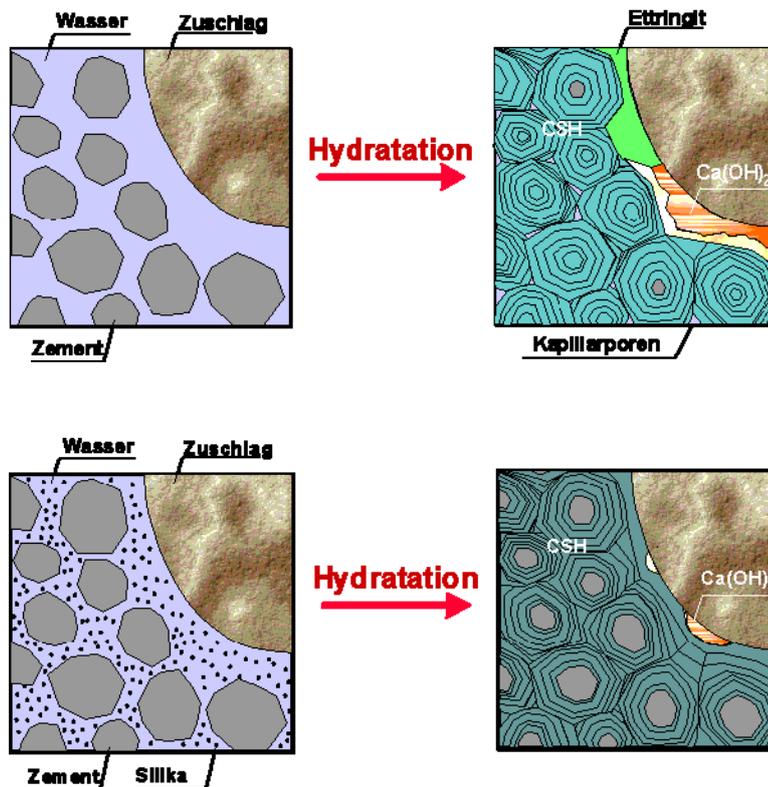


Abbildung 3: Verbesserung des Verbundbereiches zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung durch die Zugabe von Silicastaub in Anlehnung an²²

Zur Verflüssigung werden Hochleistungsbetonen meist Fließmittelpolymere zugegeben. Diese unterteilen sich in die Gruppen der Polykondensate und Polycarboxylate. Unter den Polykondensaten haben β -Naphthalinsulfonsäure-Formaldehyd-Polykondensate (NFS) und Melamin-Formaldehyd-Sulfit-Harze (MFS) die größte industrielle Bedeutung. Diesen Fließmitteln liegt ein elektrostatischer Wirkmechanismus zugrunde. Zur Verflüssigung von UHPC ist ihre Effektivität jedoch

²⁰ Schmidt, M.; Stephan, D.; Krelaus, R.; Geisenhanslücke, C.: The promising dimension in building and construction: Nanoparticles, nanoscopic structures and interface phenomena pt. 1. CementInternational 5, 2007, S. 86-100

²¹ Glotzbach, C.; Stephan, D.; Amrhein, K.; Fröhlich, S.; Schmidt, M.: Charakterisierung der inter-partikulären Wechselwirkungen von Feinstoffleimen. In: 17. Internationale Baustofftagung (ibau-sil), Weimar, Band 1, 2009, S. 319-324

²² König, R.; Wagner, J.P.: Microsilica. Handbuch der Firma Woermann, S. 10-83

zu gering. Hier kommen ausschließlich Polycarboxylate zum Einsatz, die sich durch eine sehr breite Strukturvielfalt auszeichnen. Bewährt haben sich Polymere, die eine kurze Hauptkettenlänge und mittlere Seitenkettenlänge besitzen¹.

PCE werden z. B. durch radikalische Copolymerisation hergestellt. Sie bestehen aus einer Hauptkette, an die nicht-ionische, hydrophile Seitenketten gebunden sind (Abbildung 4). In der Hauptkette befinden sich zahlreiche Carboxylgruppen, die bei alkalischen pH-Werten deprotoniert sind, woraus sich die anionische Ladung ergibt. Für die radikalische Copolymerisation können verschiedene Monomere eingesetzt werden, wobei ein Monomer die Carboxylankergruppe und das zweite Monomer die Seitenkette trägt. Als Monomere mit Carboxylgruppen (COO⁻-Gruppen) werden Acrylsäure, Methacrylsäure und Maleinsäureanhydrid verwendet. Die Verknüpfung von Haupt- und Seitenkette erfolgt je nach Fließmittelgeneration mit Ester- oder Etherbindung. Die Molekülstruktur bestimmt die Effektivität des PCE. Zu den für die Dispergierwirkung wichtigen strukturellen Einflussgrößen zählen die anionische Ladungsdichte, die Seitenkettenlänge, die Hauptkettenlänge und die Seitenketten-dichte des PCE.

Allen Fließmittelpolymeren für Zementsuspensionen liegt ein adsorptiver Wirkmechanismus zugrunde. Damit Fließmittelpolymere auf Partikeloberflächen adsorbieren können, müssen sie sich zunächst in der Porenlösung des Bindemittels lösen. Die Lösungsstruktur der schwach anionischen Polyelektrolyte ist vom pH-Wert und der Ionenstärke der Porenlösung abhängig.

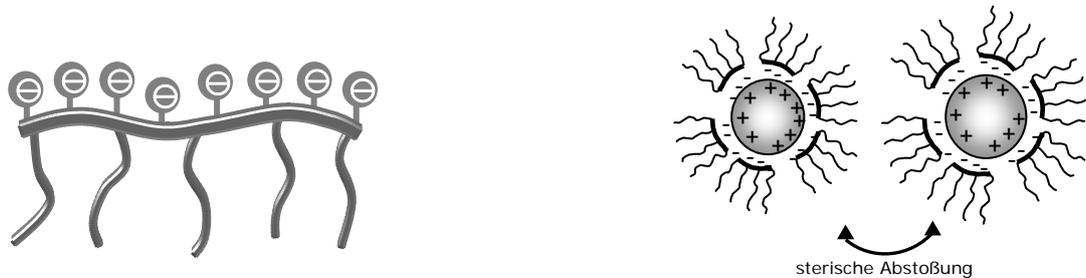


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Molekülstruktur eines Polycarboxylat Fließmittels (PCE) (links) und Wirkmechanismus (rechts)

Die Fließmittelpolymere adsorbieren mit den Carboxylgruppen auf Partikeloberflächen und umgeben diese mit einer Polymerhülle. Osmotische und entropische Effekte der ungeladenen Seitenketten sorgen dafür, dass die Partikel weit genug auf Abstand gehalten werden. Die dabei auftretende abstoßende Wechselwirkung wird als sterische Wechselwirkungsenergie bezeichnet. Entscheidende Faktoren für die Größe der sterischen Wechselwirkung von PCE sind die Dichte der adsorbierten Seitenketten sowie deren Ausdehnung in die Porenlösung^{23, 24}. Gleichzeitig wird die

²³ Napper, D. H.: Polymeric stabilization of colloid surfaces. Academic Press, London, 1983, ISBN 0-12-513980-2

Dichte der Oberflächenbelegung durch die Adsorptionskonformation des Fließmittelpolymers beeinflusst. PCE können grundsätzlich im „train“, „loop“ und „tail“ Adsorptionsmodi adsorbieren. Die Adsorption von PCE hängt u. a. von dem chemischen Aufbau und Molekulargewicht des Polymers, der Ionenkonzentration der Porenlösung, der Oberflächenladung und der Partikelkonzentration ab. Mit zunehmender Adsorption wird immer mehr Partikeloberfläche mit Polymer belegt, wodurch die Polymerschicht dichter wird und die Stärke der sterischen Abstoßung zunimmt.

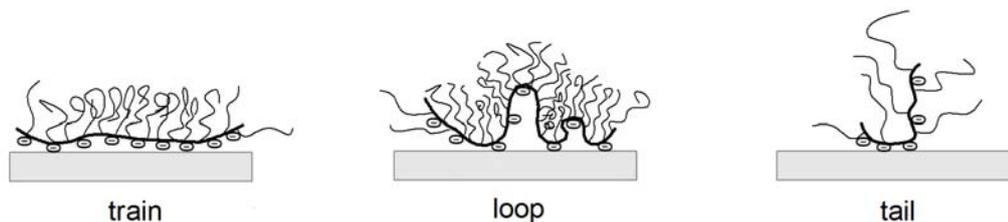


Abbildung 5: Schematische Darstellung möglicher Adsorptionskonformationen „train“ (links), „loop“ (Mitte) und „tail“ (rechts) von Polymeren nach Jenckel²⁵

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen, dass eine Vielzahl von Faktoren die Dispergierwirkung von Fließmittelpolymeren beeinflusst. Für den zielsicheren Einsatz von Fließmitteln im UHPC ist folglich ein maßgeschneidertes Moleküldesign erforderlich.

Die Schwindverformungen ultrahochfester Betone werden im Wesentlichen von dessen Matrixvolumen (Zementleim, Zusatzstoffe) und dem Hydratationsgrad des Zementsteins beeinflusst. Während Kapillar- und Karbonatisierungsschwinden wegen hoher Silicastaubgehalte und eines dichten diffusionshemmenden Gefüges bedeutungslos sind, kommt es bei UHPC durch die niedrigen w/z-Werte zu einem verstärkten chemischen Schwinden, da sich nur sehr dünne Wasserfilme um die Zementpartikel bilden, die von den Hydratationsprodukten schnell überbrückt werden. Tendenziell haben ultrahochfeste Betone höhere Schwindmaße als Normalbetone. Daher werden ihnen oftmals chemische Schwindreduzierer zugegeben.

Die am häufigsten eingesetzten Schwindreduzierer zählen zu den nichtionischen Tensiden. Sie sind durch einen hydrophob-hydrophilen Molekülaufbau gekennzeichnet. Der hydrophobe Molekülteil besteht aus einer verzweigten oder einer unverzweigten Kohlenwasserstoff-Kette, an der eine oder mehrere hydrophile Gruppen gebunden sein können²⁶. Durch das Herausdrängen der Tensidmoleküle aus dem Wasser wird die Oberflächenspannung herabgesetzt. Bei einer kritischen Mizellbildungskonzentration agglomerieren die Moleküle zu Mizellen mit

²⁴ Lewis, J. A.; Matsuyama, H.; Kirby, G.; Morissette, S.; Young, F.: Polyelectrolyte Effects on the Rheological Properties of Concentrated Cement Suspensions. Journal of American Ceramic Society, 83 (8), 2000, S. 1905-1913

²⁵ Jenckel, E.; Rumbach, B.: Adsorption of high polymers from solution. Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie, 55, 1951, S. 612-618

²⁶ Schwuger M. J.: Zur Wirkungsweise von Tensiden in technischen Prozessen. Chemie-Ingenieur-Technik 44, 1972, S. 374-378

kugelförmiger Gestalt. Hierbei sind die hydrophoben Teile nach innen gekehrt und werden durch eine hydrophile Schale vom Wasser abgeschirmt. Ist die kritische Mizellenbildungskonzentration erreicht, ändert sich die Oberflächenspannung der wässrigen Lösung nicht mehr. Zum einen beruht die schwindreduzierende Wirkung nichtionischer Tenside auf einer Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung. Zum anderen wird davon ausgegangen das sich die Tensidmoleküle während der Hydratation des Zementes aufgrund ihres unpolaren Charakters in der Porenlösung anreichern und dabei den Spaltdruck zwischen den Gelpartikeln verstärken⁹. Die Folge ist eine Abnahme des autogenen Schwindens.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass das Mischen des UHPC mit der vom Partner OAT vorgesehenen mobilen Mischtechnik nicht wie geplant durchgeführt werden konnte. Daher erwies es sich als erforderlich, die Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich für das Mischen des UHPC in das Projekt einzubinden. Die Firma Eirich verfügt über umfassende Erfahrungen mit Intensivmischern für unterschiedliche Materialien. Mit der Mischtechnik der Firma Eirich war das Mischen des UHPC in der im Projekt entwickelten Rezeptur möglich.

II Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

Arbeitsprogramm

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Vielzahl Polycarboxylatether unterschiedlicher Zusammensetzung im Labormaßstab synthetisiert, um a) ihre Wirkung prinzipiell untersuchen zu können und b), um Modellsubstanzen zur Erforschung der Struktur-Wirkungsbeziehung bereit zu stellen. Dabei wurden die Länge der Seitenkette, die Seitenkettendichte entlang des Polymerrückgrats, die Ladungsdichte in der Hauptkette und die Länge der Hauptkette variiert. Die synthetisierten Polymere wurden in einer mit den Projektpartnern abgestimmten Mörtelrezeptur hinsichtlich der Verflüssigungswirkung, Verzögerung der Zementhydratation und der Festigkeitsentwicklung getestet.

Im Weiteren wurden chemische Schwindreduzierer aus dem Produktportfolio der BASF ausgewählt und deren Wirksamkeit in der Nutzschichtmischung getestet.

Polymersynthesen

Um Erkenntnisse über die Wirkung von Polycarboxylatethern in Silicastaubreichen, wasserarmen Beton zu generieren wurden diverse Polycarboxylatether unterschiedlicher Zusammensetzung als Modellsubstanzen zur Erarbeitung der Struktur-Wirkungsbeziehung im Labormaßstab synthetisiert. Die Synthesetechnik zur Herstellung der Polymere ist detailliert in²⁷ beschrieben. Die Synthesetechnik der freien radikalischen Polymerisation in wässriger Lösung ermöglicht die Herstellung zahlreicher, architektonisch unterschiedlich aufgebauter Moleküle. So kann die Länge der Seitenkette und die Seitenkettendichte bzw. die Ladungsdichte sowie das Molekulargewicht des Polymers variiert werden. Neben der Ladungsdichte lässt sich auch die Art des Ladungsträgers variieren, in dem z. B. Sulfonsäuregruppen anstatt Carboxylatgruppen eingebaut werden. Weiterhin besteht die Möglichkeit durch Copolymerisation mit nicht geladenen Monomeren die Ladungsdichte am Polymerrückgrat einzustellen. Aufgrund der vielseitigen Möglichkeiten die Polymerstruktur zu verändern, konzentrierte sich die Arbeit zunächst auf die Synthese von Polycarboxylatether mit unterschiedlichen Seitenkettenlängen und Ladungsdichten.

Testrezeptur und anwendungstechnische Prüfungen

Anhand einer von der Universität Kassel bereitgestellten Testrezeptur wurden ausgewählte Polymere hinsichtlich ihrer Wirkung getestet.

In Abbildung 6 ist die Zusammensetzung der Testrezeptur, inkl. Anmachwasser, schematisch dargestellt. Bezogen auf die Feststoffkomponenten entspricht die Zusammensetzung 38% Zement, 6% Silicastaub, 55% inerten Zuschlagsstoffen (Quarzsand und -mehl) und 1 % Additiv. In diesem Zusammenhang wird darauf

²⁷ Patent WO 2006/133933 A2: Polyether-haltiges Copolymer, veröffentlicht am 21.12.2006

hingewiesen, dass die ursprüngliche Mikrosilika-Type „983 U“ der Fa. Elkem an der Universität Kassel zum Einsatz kam. Nachdem diese Qualität vom Lieferanten nicht mehr angeboten wird, wurde die Type 971 U (höhere N₂ BET-Oberfläche, geringere Reinheit) eingesetzt. Aus Vorversuchen war bekannt, dass sich ultrahochfeste Betone mit dieser Silicastaubqualität schlechter verflüssigen lassen als mit der Mikrosilika-Type „983 U“.

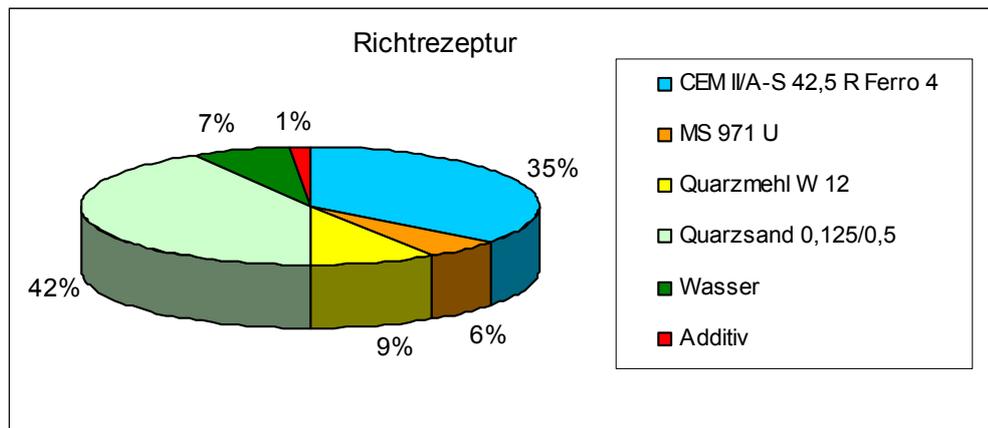


Abbildung 6: Anteilmäßige Zusammensetzung der Mörtelrezeptur

Wie eingangs erwähnt, resultieren bei den niedrigen w/z-Werten wie sie hier angestrebt werden, schwer verarbeitbare, erdfeuchte Massen. Dies zeigt sich u. a. bereits beim Anmischen. So sind Mischeraggregate notwendig, die in der Lage sind, einen entsprechenden Energieeintrag zu leisten bzw. genügend hohe Scherkräfte aufzubringen. Dementsprechend lange sind auch die Mischzeiten. Mischzeiten von 9 bis 12 Minuten sind für solch zähe Massen durchaus üblich^{28,29}. In dem vorliegenden Fall wurde nach einigen Vorversuchen folgende Mischprozedur angewandt:

Vorab gesiebter Silicastaub (um größere Agglomerate aufzubrechen), Zement, Quarzmehl und 25% der Quarzsandmenge werden in einem Hobbart-Mischer (bzw. Rilem-Mischer mit Starkstromanschluss) für 1 Minute trocken vorgemischt. Nach Zugabe des Fließmittels und des Anmachwassers wird 3 Minuten lang gemischt. Nach 2 Minuten Mischpause (zur vollständigen Entfaltung des Fließmittels) wird bei laufendem Mischer die restliche Quarzsandmenge zugegeben und weitere 5 Minuten gemischt. Die komplette Nassmischdauer beträgt insgesamt 10 Minuten. Unter den gegebenen Mischbedingungen und Verwendung der „problematischen“ Mikrosilika-Type konnte mit dem angegebenen Referenzdispersiermittel (Glenium® 51) selbst bei einer Dosierung von 7 M.-% bez. auf Zement und einem Wasser/Zement-Wert von 0,20 keine Dispersierwirkung erzielt werden. Um einen relativen Wirkungs-

²⁸ Bonneau, O.; Lachemi, M.; Dallaire, E.; Dugat, J.; Aitcin, P.-C.: Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes. ACI Materials Journal, Juli-August 1997, S. 286-290

²⁹ Borghoff, M.: Die erste europäische Verbundbrücke mit UHPC in Kassel - Herstellung der ultra-hochfesten Betonfertigteile. Beton + Fertigteil-Technik, Heft 9, 2006, S. 58-65

vergleich der Polymere untereinander zu ermöglichen wurde daher der w/z-Wert, bei einer üblichen Dispergiermitteldosierung von 2,3 % bez. auf Zement, auf 0,28 angehoben.

Zur Beurteilung der Dispergierwirkung wird der frisch angemischte Mörtel in einen sogenannten Hägermann-Konus gefüllt, der nach definierten Zeitspannen hochgehoben wird³⁰. Die Mörtelprobe, die von zäher Konsistenz geprägt ist, fließt nach dem Anheben des Konus langsam auseinander und kommt meist erst nach einigen Minuten zum Stillstand. Anhand zweier, senkrecht zueinander stehenden Messungen wird das durchschnittliche Fließmaß in cm bestimmt. Je größer das Fließmaß ist, desto besser ist die Dispergierwirkung des Fließmittels. Im Alter von 29, 59 und 89 min wird der im Mischbehälter verbliebene Mörtel erneut für 10 s zum Abbau der Ruhestuktur mit dem Mörtelmischer aufgemischt, in den Hägermann-Konus gefüllt und das Fließmaß bestimmt.

Von den meisten Mörtelproben wurden zudem Prismen mit den Abmessungen $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}^3$ hergestellt und deren Druckfestigkeit nach 1 und 2 Tagen sowie nach 7 und 28 Tagen Lagerung bei $20 \text{ °C} / 65 \text{ \% rel. F.}$ bestimmt. Die Festigkeit nach 1- und 2-Tagen gibt Aufschluss über das Abbindeverhalten des Betons, insbesondere über den Einfluss des Fließmittels auf den Hydratationsverlauf. Somit lassen sich Zusammenhänge zwischen Polymerstruktur und Verzögerungswirkung ableiten.

Die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen hingegen geben Auskunft zur Endfestigkeit, die natürlich auch stark vom w/z-Wert beeinflusst wird. Prinzipiell gilt, dass geringere Mengen an Anmachwasser die Endfestigkeit erhöhen, da bei Verdunsten weniger Hohlräume und Kapillarporen zurückbleiben und folglich das Gefüge dichter ist.

Ergebnisse und Diskussion

I. Variation der Ladungsdichte

Um den Einfluss der Ladungsdichte auf das Fließverhalten des UHPC-Mörtels und die Festigkeitsentwicklung der Mörtelprismen zu untersuchen, wurden flüssige Polymere mit gleicher Seitenkettenlänge aber mit unterschiedlichen Anteilen an Ladung getestet (Abbildung 7). Die Nummern in den dargestellten Abbildungen beschreiben die unterschiedlichen Polymersynthesen. Für die Seitenkette wurde eine mittlere Kettenlänge gewählt. Abbildung 7 ist zu entnehmen, dass sich tendenziell eine geringere Ladungsdichte positiv auf das Fließverhalten auswirkt. Mit abnehmender Ladung nimmt das Anfangsfließmaß zu. Optimal ist nach vorliegenden Erkenntnissen ein Ladungs- zu Seitenketten-Verhältnis von ca. 2,5 (Polymerbezeichnung 581). Bei geringeren Ladungsdichten (Polymer 549) wird vermutlich die Adsorptionskraft des Polymers auf die positiv geladenen Zementpartikel zu sehr verringert, was eine Abnahme der Fließwirkung zur Folge hat.

³⁰ Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (Hrsg.): DIN EN 12350: Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß. Ausgabe 2009-08, Beuth Verlag, Berlin 2009

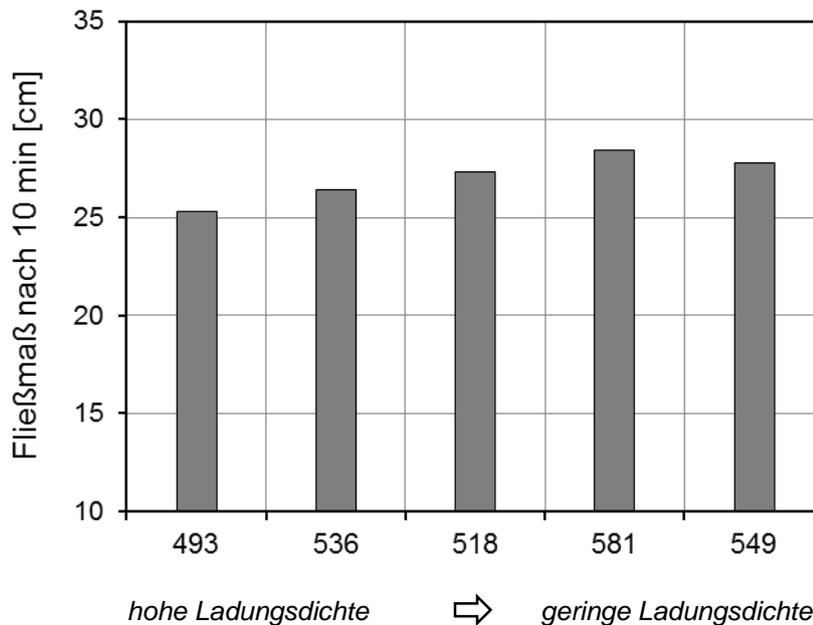


Abbildung 7: Einfluss der Ladungsdichte der synthetisierten PCE mit mittlerer Seitenkettenlänge auf das Fließmaß von UHPC unmittelbar nach dem Mischen (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

Hinsichtlich der Verflüssigungswirkung über die Zeit zeigen sich bei den Fließmitteln deutlich Unterschiede. Mit steigender Ladungsdichte kommt es zu einer schnelleren Abnahme des Fließmaßes (Abbildung 8). Durch Erhöhung des Fließmittelgehalts kann die vorzeitige Abnahme des Fließmaßes nicht vermieden werden, so dass die Fließmittelmenge bei UHPC nicht der ausschlaggebende Faktor für die vorzeitige Abnahme des Fließmaßes sein kann.

Die zeitliche Entwicklung des Fließmaßes ist bei PCE-Fließmitteln eng mit deren Adsorptionsgeschwindigkeit verknüpft³¹. Die Adsorptionsgeschwindigkeit von Polycarboxylatethern nimmt üblicherweise mit steigender Ladungsdichte zu. So erreichen Fließmittelpolymere mit hoher Ladungsdichte bereits während der Induktionsperiode des Zements die maximale Adsorption³¹. Bei dem sehr geringen w/z-Wert wird wahrscheinlich ein Großteil der Fließmittelpolymere durch früh entstandene Hydratationsprodukte überwachsen und/oder nach Plank³² in frisch gebildete Calciumaluminathydratschichten $[(Ca_2Al(OH)_6)^+]$ chemisch eingebaut (sog.

³¹ Mazanec, O.; Gehlen, C.: Auswirkung der Fließmitteladsorption auf die Mischzeit und das Ansteifen von UHPC. In: Beiträge zum 50. Forschungskolloquium des DAfStb am 8./9. Oktober 2009 an der Technischen Universität München, 2009, S. 121-130

³² Plank, J.; Dai, Z.; Keller, H.: "Organo-mineral phases formed during cement hydration", In: Pro-ceedings of the 12th ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, contribution M6-05-1, Montreal/Canada, 2007

Interkalation zu Organo-Mineral-Phasen). Die noch verbleibende wirksame adsorbierte Polymermenge ist für eine sterische Trennung der Partikel nicht ausreichend, wodurch diese agglomerieren: Eine Abnahme des Fließmaßes ist die Folge. Demgegenüber ist die adsorbierte Polymermenge bei Fließmitteln mit niedriger Ladungsdichte während der Anfangsreaktion des Zements geringer. Folglich wird vermutlich weniger adsorbiertes Fließmittelpolymer unwirksam. Der in der Lösung verbleibende Rest kann im Verlauf der Ruhephase des Zements nachadsorbieren. Durch diesen Depoteffekt werden neu entstandene Oberflächen der kristallisierenden Zementhydratphasen belegt und die Fließfähigkeit bleibt länger erhalten.

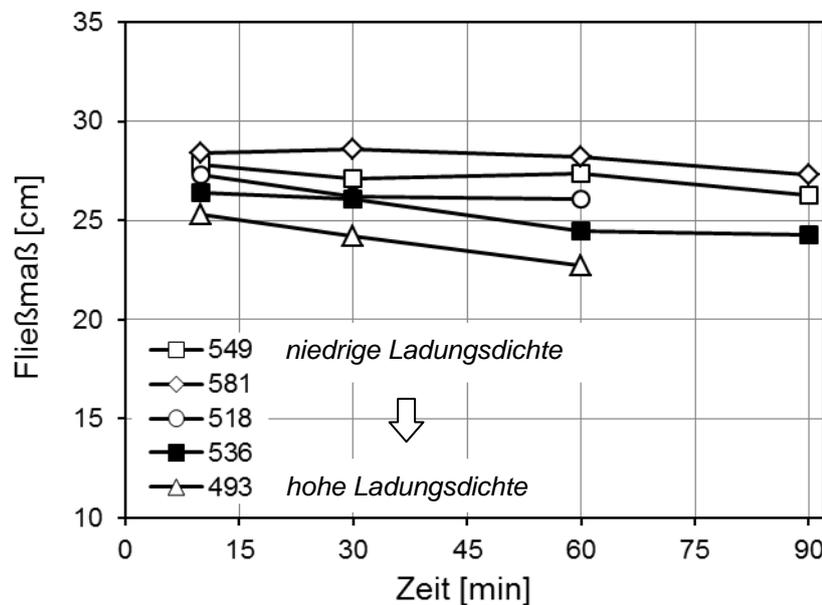


Abbildung 8: Einfluss der Ladungsdichte der synthetisierten PCE mit mittlerer Seitenkettenlänge auf die Verarbeitungszeit (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

Die Zugabe von PCE-Fließmitteln kann die Zementhydratation verzögern. Im vorliegenden Fall verringert sich die verzögernde Wirkung mit abnehmender Ladungsdichte der Polymere (Abbildung 9).

Die verzögernde Wirkung beruht nach³³ zum einen auf der Komplexbildung von Ca^{2+} -Ionen. Diese werden von den Carboxylgruppen der Hauptkette des Polymers komplex gebunden und stehen nicht für eine Bildung der C-S-H-Phasen zur Verfügung.

Zum anderen interagieren bei der Adsorption von PCE-Fließmitteln die Carboxylgruppen der Hauptkette stark mit der Oberfläche. Entscheidende Faktoren für die

³³ Richter, F. H.; Winkler, E. W.; Baur, R. H.: The calcium binding capacity of polycarboxylates. Journal of American Oil Chemistry Soc. 66 (11), 1989, S. 1666-1672

Größe der Wechselwirkung von PCE mit den Zementoberflächen sind die Ladungsdichte und die Seitenkettenlänge. Mit zunehmender Adsorption wird immer mehr Partikeloberfläche mit Polymer belegt, wodurch die Polymerschicht dichter wird.

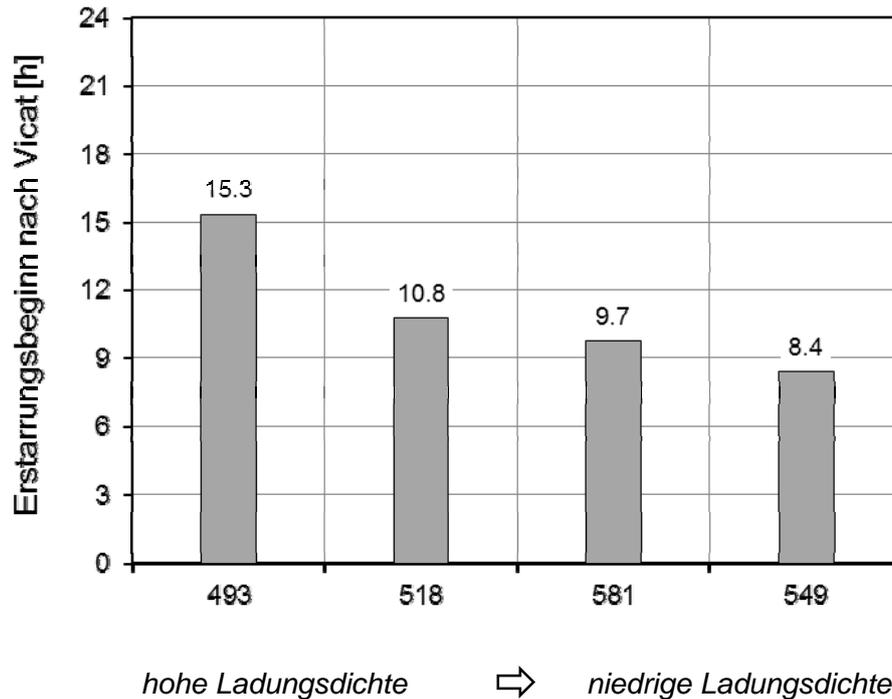


Abbildung 9: Einfluss der Ladungsdichte der synthetisierten PCE mit mittlerer Seitenkettenlänge auf die Erstarrungszeit von UHPC (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

Gleichzeitig wird die Dichte der Oberflächenbelegung durch die Adsorptionskonformation des Fließmittelpolymers beeinflusst. PCE können grundsätzlich im „train“, „loop“ und „tail“ Adsorptionsmodi adsorbieren^{23,25}. Je stärker dabei die elektrostatische Anziehung des Polymers zur Oberfläche ist, desto wahrscheinlicher ist die Adsorption im „train“-Modus (Abbildung 5). Bei diesem Adsorptionsmodus belegt fast die gesamte Hauptkette die Oberfläche, während die ungeladenen Seitenketten in die Porenlösung ragen. Die Polymerschicht auf der Oberfläche ist somit dicht gepackt wodurch der Zutritt von Wasser in Bereichen erschwert wird, in denen Polymere auf der Zementpartikeloberfläche adsorbiert sind. Besonders bei hohen Fließmitteldosierungen, wie sie beim UHPC zum Einsatz kommen, kann dies zu einer langen und meist unerwünschten Verzögerung der Hydratation führen.

Wie erwartet verbessert sich auch die Festigkeitsentwicklung der Prismen mit abnehmender Ladungsdichte der Polymere (Abbildung 10). Besonders deutlich wird dies, beim Vergleich der die 1-Tagesfestigkeiten der Proben 493 und 549. Hier steigt die Druckfestigkeit um rd. das Fünffache an ($f_{c,493} = 7,9 \text{ N/mm}^2$; $f_{c,549} = 41,3 \text{ N/mm}^2$).

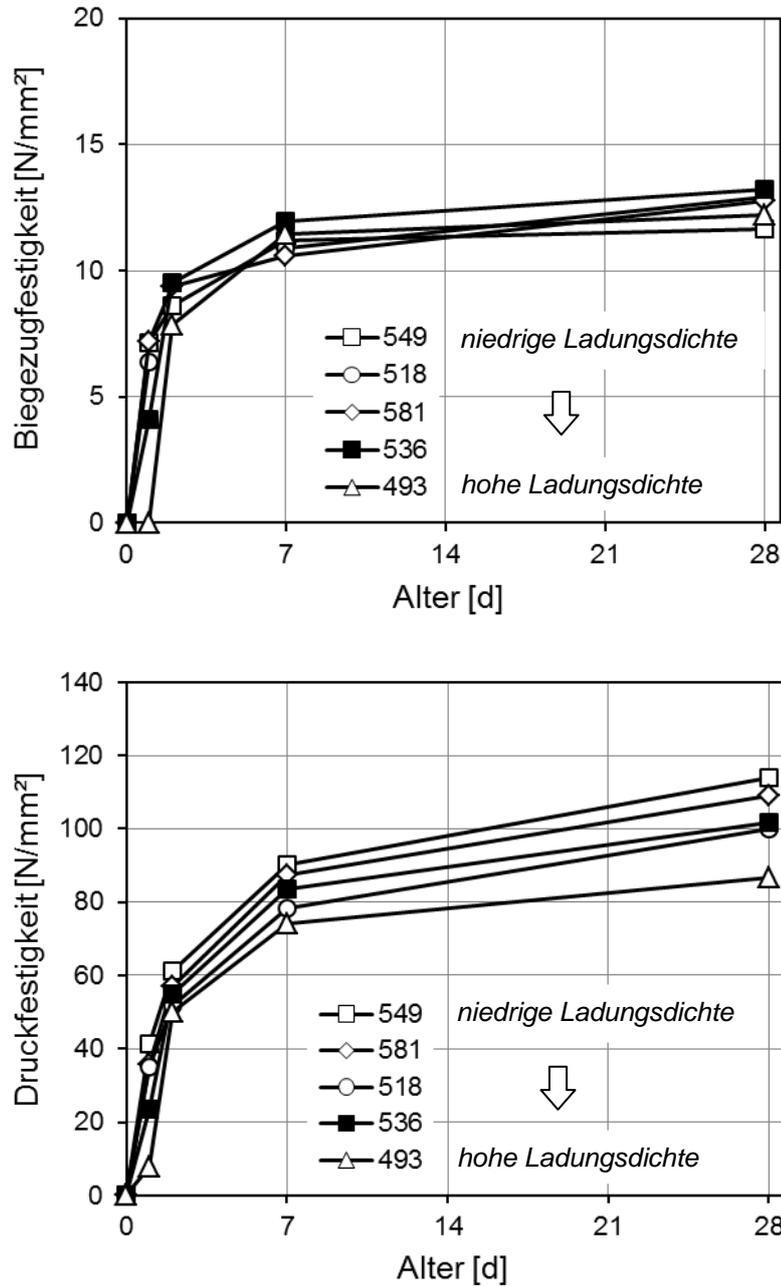


Abbildung 10: Einfluss der Ladungsdichte der synthetisierten PCE mit mittlerer Seitenkettenlänge auf die Festigkeitsentwicklung (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

II. Variation der Seitenkettenlänge

Um den Einfluss der Seitenkettenlänge auf die Dispergierwirkung und die Festigkeitsentwicklung zu untersuchen, wurden jeweils Polymere mit niedriger und mittlerer Ladungsdichte aber mit unterschiedlicher Seitenkettenlänge getestet. Aus Abbildung 11 wird deutlich, dass unabhängig von der Ladungsdichte, lange Seitenketten sich generell nachteilig auswirken. Die Polymere 267 und 337, welche auf langen Seitenketten basieren, zeigen die geringsten Anfangsfließmaße. Zwischen mittleren und kurzen Seitenketten ist der Unterschied im Anfangsfließmaß und der Verarbeitungszeit (Abbildung 12) gering. Jedoch dispergieren Polymere mit kürzerer Seitenkette tendenziell schwächer und verzögern stärker die Zementhydratation (Abbildung 13).

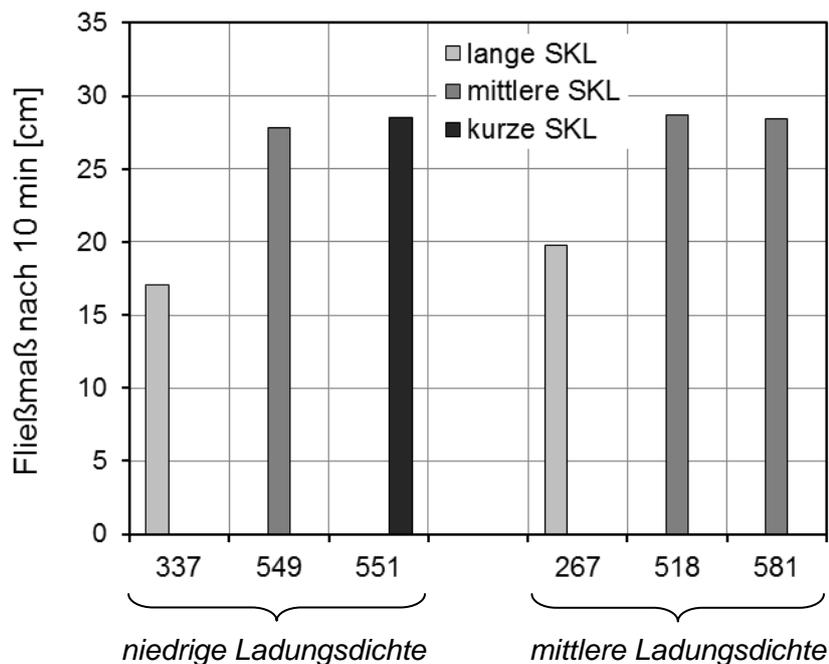


Abbildung 11: Einfluss der Seitenkettenlänge (SKL) der synthetisierten PCE auf das Anfangsfließmaß (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

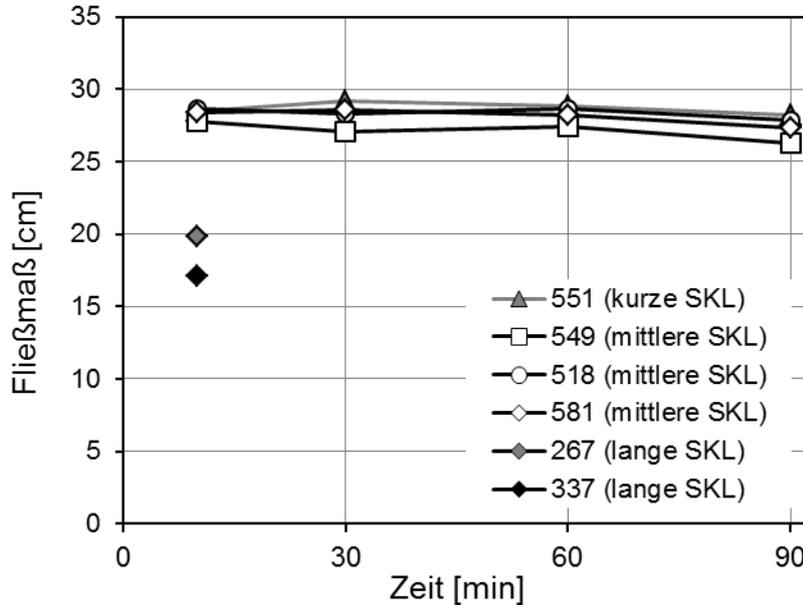


Abbildung 12: Einfluss der Seitenkettenlänge (SKL) der synthetisierten PCE auf die Verarbeitungszeit (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

Der Einfluss der Seitenkettenlänge auf die Verzögerung bzw. die Festigkeitsentwicklung ist in Abbildung 13 dargestellt. Der Vergleich der 1-Tagesfestigkeiten zeigt, dass Fließmittelpolymere umso stärker verzögern, je kürzer ihre Seitenkette ist.

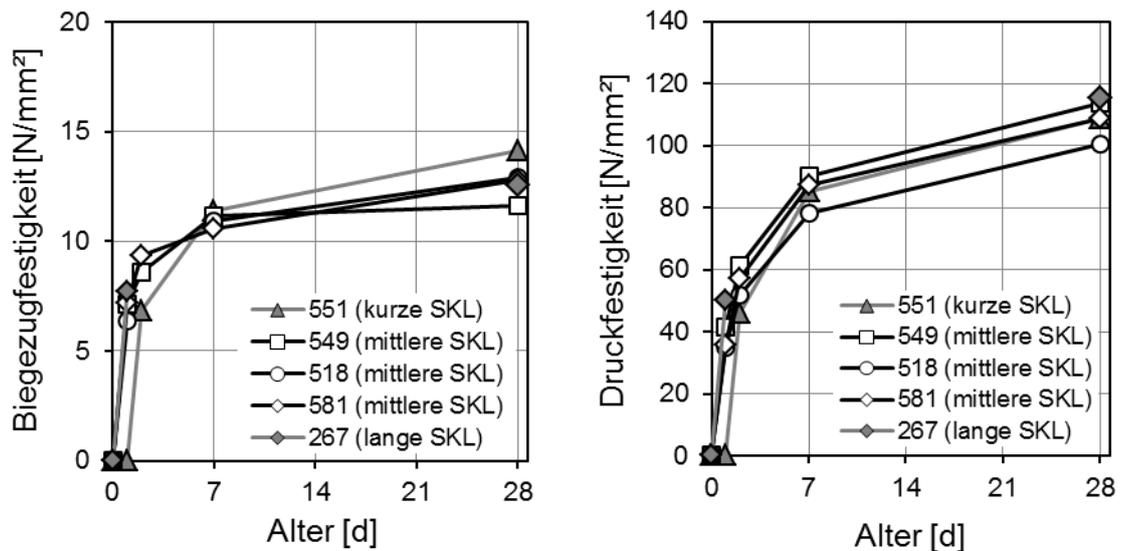


Abbildung 13: Einfluss der Seitenkettenlänge (SKL) der synthetisierten PCE auf die Festigkeitsentwicklung (Fließmitteldosierung = 2,3 M.-% bez. auf Zement)

So weist der UHPC mit dem Fließmittel 551 (kurze SKL) im Alter von 1 d keine Festigkeit auf, während mit dem Fließmittel 518 (mittlere SKL) bereits 35 N/mm² und mit dem Fließmittel 267 (lange SKL) sogar 49 N/mm² erreicht werden. Im Alter von 28 Tagen ist die Druckfestigkeit mit allen Fließmitteln annähernd gleich. Daraus ist ersichtlich, dass Polymere mit kurzen Seitenketten die Zementhydratation deutlich stärker verzögern als Polymere mit mittleren oder langen Seitenketten.

Zusammenfassend stellen Polycarboxylatether mit mittlerer Seitenkettenlänge und geringer Ladungsdichte in der Hauptkette die aussichtsreichsten Fließmittelpolymere für UHPC dar.

Auf Basis der Laboruntersuchungen wurde für die Praxisversuche das Fließmittel mit der Synthesenummer 518 ausgewählt, was eine mittlere Seitenkettenlänge und geringe bis mittlere Ladungsdichte aufweist. Das flüssige Fließmittel wurde mit UHPC 0518 L bezeichnet. Der Fließmittelwirkstoffgehalt betrug 40%.

Das Fließmittel zeigte auch im Praxisversuch eine gute Wirkung in der Nutz- und Deckschichtmischung (Abbildung 15 und Abbildung 16). Beide Mischungen ließen sich mit einer angemessenen Mischtechnik (s. Mischversuche bei der Fa. Eirich am 17.- 18.07.12) gut verflüssigen und ausreichend lange verarbeiten. Von dem Fließmittel wurden dem Projekt für Einbau- und Mischversuche rd. 1300 kg zur Verfügung gestellt.

Trocknung des ausgewählten Fließmittels

Das flüssige Fließmittel UHPC 0518 L / 40% wurde im Laborsprühtrockner der BASF zu einem pulverförmigen Fließmittel sprühgetrocknet. Die Wirksamkeit des pulverförmigen Fließmittels wurde in den Labors der BASF und der Universität Kassel überprüft. Die Mischzeit und Konsistenzerhaltung waren gleichwertig zum flüssigen Produkt. Im Projektteam wurde jedoch beschlossen mit dem flüssigen Produkt weiterzuarbeiten, da sich dieses bei den Einbauversuchen auf der Baustelle leichter dosieren lässt.

Auswahl eines Schwindreduzierers

Neben der Entwicklung des Fließmittels gehörte auch die Auswahl eines geeigneten Schwindreduzierers zum Arbeitspaket der BASF. Dem Projekt wurden zwei flüssige Schwindreduzierer zur Verfügung gestellt, die speziell das chemische Schwinden reduzieren, das bei UHPC aufgrund des geringen Wasserzementwerts den maßgeblichen Anteil am Gesamtschwinden ausmacht^{7,8}. Die Wirksamkeit der Schwindreduzierer wurde an der Universität Kassel geprüft. Die Zugabe der Schwindreduzierer führte zu einer deutlichen Verringerung des Schwindmaßes (Abbildung 14).

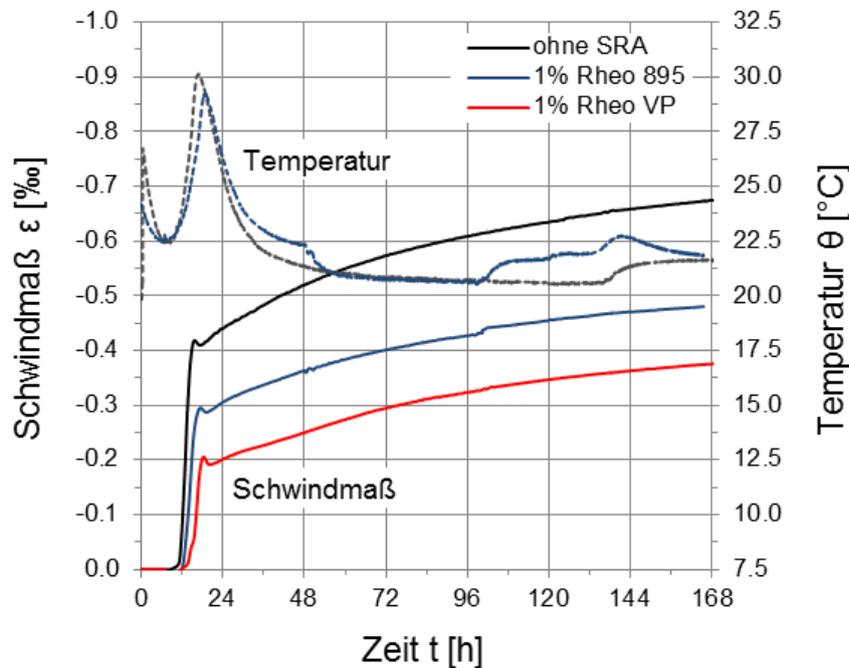


Abbildung 14: Schwinden der Nuttschichtmischung in Abhängigkeit des zugebenen Schwindreduzierers (SRA). Die Untersuchungen wurden von der Universität Kassel durchgeführt.

Praxisversuche

Da der Nachweis zur Funktionstauglichkeit des Fließmittels UHPC 0518 L / 40 % bei der Herstellung von UHPC im großtechnischen Maßstab noch ausstand, konzentrierten sich die Arbeiten im letzten Halbjahr 2012 vor allem auf die Herstellungs- und Einbautechnik der Nutz- und Deckschichtmischungen. Hier wurden Versuche mit verschiedenen Mixern, Mischabläufen, Mischgeschwindigkeit sowie Fließmittel- und Faserzugabezeitpunkten durchgeführt (siehe Abschlussbericht der Universität Kassel). Die Versuche bestätigten, dass das Fließmittel UHPC 518 L auch im großtechnischen Maßstab die geforderten Eigenschaften erfüllt. Die UHPC ließen sich während des Mischens schnell verflüssigen und ausreichend lange verarbeiten.

Bei dem Einbauversuch am 12.05.12 in Braunschweig-Rünningen hat sich herausgestellt, dass das Mischen der derzeit vorgesehenen UHPC-Rezeptur mit der bisher verwendeten Technologie (modifizierter Fahrmischer) nicht in der Form möglich ist, die zu einem erfolgreichen Einbau führt. Aufgrund der Erkenntnisse wurde im Projektteam vereinbart, systematische Mischversuche bei der Firma Eirich in Kilsheim (17.- 18.07.2012) durchzuführen. An der Planung und Durchführung der Mischversuche war die BASF maßgeblich beteiligt (Abbildung 15 und Abbildung 16). Für die Nutz- und Deckschichtmischungen konnten sogenannte hybride Mischabläufe

entwickelt werden, mit denen sich die UHPC gezielt in kurzer Mischzeit (≤ 4 min) herstellen lassen. Unter hybriden Mischabläufen wird das Mischen in mehreren Teilabläufen bei variierender Mischgeschwindigkeit verstanden. Dabei wird die Mischgeschwindigkeit entsprechend den jeweiligen Anforderungen angepasst^{34,35}. Hohe Werkzeuggeschwindigkeiten beschleunigen dabei insbesondere die Verteilung von Wasser und Fließmittel. Nach dem Übergang von einer kohäsiven Paste zur Suspension ist eine hohe Mischgeschwindigkeit nicht mehr erforderlich. Um den Energieeintrag zu minimieren, wird die abschließende Homogenisierung des Mischguts bei geringeren Werkzeuggeschwindigkeiten realisiert.



Abbildung 15: Mischversuche zur Herstellung der Nuttschicht am 17.- 18.07.12 bei der Fa. Eirich. Eirich-Intensivmischer, Modul R15 mit Steuereinheit (links), Blick in den Mischbehälter (oben rechts) und eingebaute texturierte Nuttschichtmischung

Mit einem derartigen hybriden Mischablauf ist es möglich 1,5 m³ der Deckschichtmischung in einer Mischzeit von 240 s herzustellen. Dabei erweist sich ein Zeitraum von rd. 100 s mit hoher Werkzeuggeschwindigkeit ($v_u = 6,6$ m/s) als optimal. Anschließend wird die Werkzeuggeschwindigkeit auf 3,3 m/s gesenkt (siehe Abschlussbericht der Universität Kassel).

³⁴ Lowke, D.; Pötz, M.; Schießl, P.: Optimierung des Mischablaufs für selbstverdichtende Betone. Beton 12, 2005, S. 2-5

³⁵ Mazanec, O.; Schießl, P.: Mixing Time Optimisation for UHPC. Ultra High Performance Concrete (UHPC). In: Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, March 05-07, 2008, S. 401-408, ISBN: 978-3-89958-376-2

Förderkennzeichen 13N 10499
Schlussbericht

Seite 26



Abbildung 16: Mischversuche zur Herstellung der Deckschicht am 17.- 18.07.12 bei der Fa. Eirich. Eirich-Intensivmischer, Modul R24 (links), Blick in den Mischbehälter (oben rechts) und Deckschichtmischung unmittelbar nach Ende des Mischprozesses

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die BASF hat bei diesem Projekt die Grundlagenforschung zur Wechselwirkung mit Additiven durchgeführt. Für die Erbringung dieser Forschungsleistungen sind bei BASF vor allem Personalkosten angefallen, so dass diese auch die mit Abstand wesentlichste Position beim zahlenmäßigen Nachweis ausmachen.

Hinzu kommen noch die Reisekosten, welche für die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Dienstreisen angefallen sind. Die Reisen bewegten sich alle im Inland.

Seitens BASF wurden für das Projekt auch einige Materialien beigesteuert. Allerdings sind die entstandenen Materialkosten insgesamt jedoch eher von untergeordneter Bedeutung.

Eine wesentliche Kostenposition im zahlenmäßigen Nachweis sind aber noch die Fremdleistungen. Da sich im Verlauf des Projekts zeigte, dass das Mischen des UHPC mit der vom Partner OAT vorgesehenen mobilen Mischtechnik nicht wie geplant durchgeführt werden kann, wurde die Firma Maschinenfabrik Gustav Eirich für das Mischen des UHPC beauftragt.

Der ursprüngliche Kostenplan wurde von BASF deutlich unterschritten. Insbesondere bei den Personalkosten, aber auch bei den Materialkosten, sind tatsächlich deutlich weniger Kosten angefallen, als ursprünglich bei der Antragstellung veranschlagt wurden.

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ultrahochfester Beton ist ein neuartiger Baustoff der in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Aufgrund seiner speziellen Zusammensetzung ist eine praxiserichte Verarbeitung des Betons ohne die Zugabe von hochwirksamen Fließmitteln nicht möglich. Dabei hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass die meisten kommerziell verfügbaren Fließmittel nicht oder nur schlecht in der Lage sind diese speziellen Betone zu verflüssigen. Gleichzeitig gibt es bisher nur sehr wenige Untersuchungen die sich mit der Wechselwirkung von Fließmitteln im UHPC und der Entwicklung eines für UHPC geeigneten Fließmittels beschäftigen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte durch gezielte Variation von zwei wesentlichen Syntheseparametern die Struktur-Wirkbeziehung von Polycarboxylatether Fließmitteln in ultrahochfesten Betonen abgeleitet werden. Darauf basierend war es möglich mit einem angemessenen Versuchsprogramm ein Fließmittelpolymer zu entwickeln, das in der Lage ist UHPC gut zu verflüssigen. Darüber hinaus beeinträchtigt das Fließmittel die bei UHPC wichtigen Festigkeitseigenschaften nur unwesentlich. Das Ziel des vorliegenden Teilprojekts „Grundlagenforschung zur

Wechselwirkung mit Additiven“ konnte demzufolge mit vertretbarem Aufwand erreicht werden.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Das Projekt bietet die Möglichkeit dicht gepackte, hydraulisch schnell abbindende standfeste Hochleistungsbetone im Straßenbau einzusetzen. Prinzipiell könnte dies zu einer Verschiebung der Bautechnologie vom Asphaltbau zum Betonbau führen.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Additive sind speziell für Hochleistungs- betone geeignet, die mit sehr geringem Wasserzementwert und hohem Gehalt an dicht gepackten Feinststoffen hergestellt werden. Diese Betone eröffnen neue Möglichkeiten für nachhaltige und ökonomische Bauweisen mit außergewöhnlich filigranen Abmessungen, die bisher nicht dem Betonbau vorbehalten waren. Da seit Jahren der Trend zu immer leistungsfähigeren Baustoffen mit hoher Festigkeit und langer Lebensdauer geht, ist von guter Verwertbarkeit auszugehen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse sollte es möglich sein, die Innovation auch auf fließfähige ultrahochfeste Betone zu übertragen. Insbesondere die Fertigteilindustrie könnte hiervon profitieren.

5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach derzeitigem Stand der Technik sind uns keine Aktivitäten bei anderen Stellen bekannt, die zum Ziel haben Fließmittelpolymere speziell für ultrahochfeste Betone zu entwickeln.

6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Die Aktivitäten bzgl. geplanter Veröffentlichungen sollen innerhalb des Projektverbunds gebündelt werden. Es sind Veröffentlichungen zu den nachfolgend genannten Themenkreisen vorgesehen, bei denen aber die Gemeinsamkeit aller Teilaspekte erkennbar bleiben soll:

- a. Materialtechnik, Baustofftechnik
- b. Herstellung und Einbau
- c. Akustik

Es wird angestrebt, dass möglichst viele Partner koordiniert Veröffentlichungen einreichen.