

Sonderdruck

6/2018

68. Jahrgang · 1739

beton

Die Fachzeitschrift für Bau+Technik

1+2/2019


69. Jahrgang · 1739

beton

Die Fachzeitschrift für Bau+Technik

- Nanotechnisch optimierte Bindemittel für die Herstellung von anwendungsfreundlichem Hochleistungsbeton, Teil 2
- 3D-Strukturanalysen von Betonen mittels hochauflösender Computertomographie
- Verstärkung von Mauerwerk mit textilbewehrtem Mörtel

www.verlagbt.de

VERLAG  BAU+TECHNIK

Nanotechnisch optimierte Bindemittel für die Herstellung von anwendungsfreundlichem Hochleistungsbeton

Thomas Deuse, Sabine Mutke, Frank Parker, Dirk Qvaeschning, Wiesbaden, Matthias Wulff, Deuna

Überreicht durch:

 **Dyckerhoff**

Sonderdruck
aus beton 6/2018 und 1+2/2019
Verlag Bau+Technik GmbH
www.verlagbt.de

Ergebnisse von Forschungsvorhaben

Nanotechnisch optimierte Bindemittel für die Herstellung von anwendungsfreundlichem Hochleistungsbeton; Teil 1

Thomas Deuse, Sabine Mutke, Frank Parker, Dirk Qvaeschning, Wiesbaden, Matthias Wulff, Deuna

Aus der Erkenntnis, dass der Portlandzementanteil in einem Ultrahochleistungsbeton (UHPC) aufgrund des geringen Wasseranteils nur zu einem geringen Teil hydratisiert und dann als inerter Kornbandanteil existiert, wurde in den hier beschriebenen Untersuchungen der Portlandzementanteil reduziert und direkt durch puzzolanische, latent-hydraulische bzw. inerte Feinstäube ersetzt. Im Gegensatz zur üblichen UHPC Herstellung mit Silikastaub als Feinstoff zur Lückenfüllung im Bindemittelgefüge wurden hier zur Vermeidung einer zu großen Oberfläche auf das Kornband abgestimmte Komponenten eingesetzt. In drei öffentlich geförderten Projekten BMBF OLAF „Hochleistungsbeton für Alle“, EU „Energy efficient Building H-House“ und BMBF „C³ Carbon Concrete Composite, Basisprojekt B2 Hochleistungsbeton“ wurden diese Kornband- und chemischen Optimierungen entsprechend den jeweiligen Anforderungen durchgeführt. Über die Eigenschaften der hergestellten Betone und die durchgeführten Untersuchungen wird berichtet. Einige Beispiele beschreiben Anwendungsmöglichkeiten der mit diesen Bindemittelkonzepten hergestellten UHPC's, wobei die Produktion von Maschinenbetten mit diesen Betonen bereits zur Serienanwendung gehört.

1 Einleitung

Bei der Herstellung von Portlandzementklinker entstehen rund 850 kg/t CO₂ durch das Entsäuern von Kalkstein von CaCO₃ zu CaO sowie durch die eingesetzten Brennstoffe im Brennprozess. Die Möglichkeiten zur Reduzierung des CO₂-Ausstosses sind hier nahezu ausgeschöpft. Eine wirksame CO₂-Reduzierung bietet der Austausch von Portlandzementklinker durch hochwertige Zementersatzstoffe. Portlandzementklinker ist auch zukünftig die Basis für dauerhafte Betonbauwerke. Bekanntermaßen können durch Variation der Mahlfineinheit der Zemente die mechanischen Eigenschaften von Beton gezielt eingestellt werden und die Rohstoffe sind in ausreichender Menge verfügbar. Portlandzementklinker durch Zementersatzstoffe zu substituieren, ist aus Gründen der Qualität und der Verfügbarkeit geeigneter Ersatzstoffe nicht einfach. Der Ersatzstoff mit der längsten Praxisbewährung ist Hüttsandmehl aus granulierter Hochofenschlacke. Die latent-hydraulischen Eigenschaften werden nach Wasserzugabe durch Portlandzementklinker aktiviert und in der Summe entsteht ein homogener Zementstein.

Bei Dyckerhoff (Buzzi Unicem Gruppe) wurde bereits vor etwa 20 Jahren ein Verfahren entwickelt, bei dem Zementbestandteile einzeln gemahlen, gesichtet und im

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Thomas Deuse studierte Bauingenieurwesen an der Universität Siegen. Berufliche Stationen waren Bauleiter bei Gartenmann, Anwendungstechniker im Bereich anorganische Chemieprodukte bei der Degussa AG, Projektleiter bei Peri sowie bautechnischer Berater bei der Ceca Klebstoff GmbH. 1996 Eintritt in die Dyckerhoff AG, Wiesbaden, zunächst mit Aufgaben im technischen Vertrieb Spezialbaustoffe und später im Produktmarketing Bindemittel und Zement. Seit 2011 ist Thomas Deuse Leiter der Abteilung Produktentwicklung und Spezialbaustoffe bei der Dyckerhoff GmbH.

Dipl.-Ing. Chem. (FH) Sabine Mutke studierte Chemische Technik an der Fachhochschule Fresenius in Wiesbaden. 1989 trat sie in die Dyckerhoff AG ein als Laborleiterin der physikalischen Chemie/Mineralogie im Wilhelm Dyckerhoff Institut. 2013 wechselte sie in die Abteilung Produktentwicklung. Seit 2015 ist Sabine Mutke Projektleiterin in der Abteilung Forschung und Entwicklung bei der Dyckerhoff GmbH.

Frank Parker studierte Mineralogie am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz. Er absolvierte eine Ausbil-

dung zum Chemielaboranten und arbeitete ab 1989 im Zentrallabor bei Erbslöh, Geisenheim, und IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim. Seit 1994 Mitarbeiter im Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden zunächst im Bereich Spezialtiefbau und Güteüberwachung. Seit 2005 ist Frank Parker in der Anwendungstechnik und Produktentwicklung der Spezialbaustoffe der Dyckerhoff GmbH tätig.

Dipl.-Lab.-Chem. Dirk Qvaeschning studierte Chemie an der Universität Siegen mit dem Schwerpunkt Bau- und Werkstoffchemie. Von 1997 bis 2009 war er in unterschiedlichen Positionen im Bereich der Entwicklung von zementären Baustoffen und Betonsatzmitteln tätig. Seit 2009 ist Dirk Qvaeschning Projektleiter im Bereich Produktentwicklung des Wilhelm Dyckerhoff Instituts.

Dipl.-Betriebswirt (FH) Matthias Wulff ist Bautechniker im Hoch-/Tiefbau. Berufliche Stationen waren Laborleiter bei Dr. Moll GmbH & Co.KG Isernhagen und Labormitarbeiter bei Südharz-Asphalt Herzberg. Seit 2010 ist Matthias Wulff Laborleiter bei der Deuna Zement GmbH.



Bild 1: Gärtnerplatzbrücke in Kassel

Foto: Universität Kassel



Bild 2: Wildbrücke in Kärnten

Anschluss daran gezielt wieder zu Bindemitteln mit besonderen Eigenschaften zusammengesetzt werden können. Dabei werden die Bindemittelleigenschaften durch Kombination von Portlandzementklinker und Hütten sandmehlen mit unterschiedlichen Partikelgrößen, zum Teil in Kombination mit anorganischen Oxiden, auf die Anforderungen der Anwendungen eingestellt und sind dadurch in der Leistungsfähigkeit den reinen Portlandzementen deutlich überlegen.

Zunächst erfolgte dies bei Feinstzementen für Injektionen und in den vergangenen Jahren verstärkt auch bei der Herstellung von Normzementen mit besonderen Eigenschaften (sogenannte Premiumzemente). Ausgehend von diesen Erfahrungen wurde in staatlich geförderten Projekten an der weiteren Optimierung der Bindemittelsysteme gearbeitet.

2 Stand des Wissens

2.1 Literaturbetrachtung

Materialtechnisch gesehen wird der Zement als Bindemittel für die Anwendung in UHPC bei den bekannten Zusammensetzungen mit Wasserzementwerten von 0,17 bis 0,23 nicht voll ausgenutzt. Zur vollständigen Hydratation des Zements steht nicht ausreichend Wasser zur Verfügung und im Vergleich zu 10 % bei Standardbeton, werden bei UHPC sogar 50 bis 70 % des Klinkers nicht verbraucht [1]. Die unhydratisierten Zementpartikel verbleiben zwar als hochfeste Komponenten mit optimalem Verbund zur hydratisierten Zementsteinmatrix, aber große Teile des hochwertigen Bindemittels haben nur eine Funktion als Füllstoff. Da die Herstellung der in diesen Zusammensetzungen verwendeten Portlandzemente bekanntlich mit erheblichen CO₂-Emissionen verbunden ist, sollte aber möglichst vermieden werden, dass Teile des Bindemittels nur als Füllstoff dienen.

UHPC besteht oftmals aus 600 kg/m³ bis 900 kg/m³ Zement, bis zu rd. 250 kg/m³ sehr feinem, reaktivem Silikastaub, unterschiedlichen feinen Gesteinsmehlen und Sand. Über 40 Vol.-% des UHPC sind Feinststoffe mit einer Korngröße von weniger als 0,25 mm. Solche Zusammensetzungen

der Einzelkomponenten sind in den gängigen Mischanlagen zur Herstellung von z.B. Fertigteilen und Betonwaren wenn überhaupt nur sehr schwer ohne größere Umbauten zu handhaben. Transportbetonwerke sind in derzeitiger Auslegung (Verwiegung, Siloauslegung, Mischer) überhaupt nicht zur Herstellung von UHPC geeignet. Allein für den staubfreien Umgang mit den ungewohnten Feinststoffen (z.B. Silikastaub) sind erhebliche Investitionen erforderlich [2].

In Deutschland gibt es nicht zuletzt aufgrund der geltenden bauaufsichtlichen Regelungen nur einige wenige UHPC Bauwerke. Am bekanntesten ist die 2004 auf Basis einer Rezeptur der Universität Kassel errichtete Gärtnerplatzbrücke mit UHPC-Obergurten und nur 8 cm dicken Fahrbahnplatten auf einem Stahlrohr-Fachwerkträger (Bild 1). 2011 lieferte die Firma Max Bögl, Neumarkt, UHPC Elemente nach eigener Rezeptur zum Bau der Wildbrücke in Kärnten, Österreich (Bild 2).

Weltweit gibt es darüber hinaus zahlreiche Projekte auf Basis von UHPC-Trockenfertigmischungen wie z.B. Ductal von Lafarge Holcim. Die mit speziellen Hochleistungsmischern hergestellten UHPC-Betone weisen beeindruckende mechanische Kennwerte auf.

2.2 Sachstandsbericht des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)

Im Jahr 2008 wurde ein erster Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton verfasst [3]. 2013 begann ein Unterausschuss des DAfStb mit der Entwicklung einer Richtlinie zu UHFB Ultrahochfester Beton mit den Arbeitsgruppen AG1 Betontechnik und Ausführung und AG2 Bemessung und Konstruktion [4]. Die Betontechnik beschäftigt sich nach wie vor im Wesentlichen mit den aus dem Schwerpunktprogramm bereits bekannten Normzementen und Zusammensetzungen. Positive praktische Erfahrungen mit Bindemittelvormischungen werden zwar zur Kenntnis genommen, aber bislang bei der Erarbeitung der Richtlinie nicht berücksichtigt. Dies ist darin begründet, dass

im bauaufsichtlich geregelten Bereich keine Compounds wie nachfolgend beschrieben existieren. Dem Zementhersteller bleibt es überlassen, sehr zeit- und kostenaufwändige bauaufsichtliche Zulassungen zu erwirken. Da die Anwendung selbst aber noch keine geregelte Bauweise ist, stehen die Kosten für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen bzw. Zustimmungen im Einzelfall für den konkreten Einsatz in keinem Verhältnis zu einem möglichen Bindemittelabsatz.

2.3 Forschungsvorhaben des Bundesverbands der Transportbetonindustrie (BTB)

2008 wurde ein Forschungsvorhaben UHFB vom Bundesverband der Transportbetonindustrie begonnen. Betriebsversuche an vier verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Verfahrensweisen sollten für die Transportbetonindustrie Aufschluss über die Einsatzmöglichkeiten von UHPC geben. Berücksichtigt wurden verschiedene Mischertypen, Anlagenkapazität bezüglich Lagerung und Dosierung der Ausgangsstoffe sowie Dosierreihenfolge, Transport und Förderung des UHFB.

Zum Einsatz kamen konventionelle Zusammensetzungen mit Portlandzement und Silikastaub sowie ein vorgemischter Portlandpuzzolanzement und ein Bindemittelcompound mit Quarzfeinsand. Der Vorteil dieses Bindemittelcompounds war, dass nur ein leeres Zementsilo benötigt wurde und es zusammen mit den an der Anlage vorrätigen Gesteinskörnungen verarbeitet werden konnte. Für alle anderen Varianten mit speziellen Gesteinsmehlen waren zusätzliche Dosier- und Bevorratungseinrichtungen erforderlich, die an Transportbetonwerken vor der Herstellung größerer UHFB-Mengen in einer vollautomatischen Prozesskette installiert werden müssten. Bei kleinen Produktionsmengen wäre nur eine manuelle Dosierung mit erhöhten Anforderungen an die Arbeitssicherheit wegen Staubbelastung durch Silikastaub bei deutlich reduzierter Anlagenkapazität möglich. Für die großtechnische UHFB-Herstellung im Transportbetonwerk mit dem vorgemischten Bindemittelcompound (Nanodur® Compound 5941) der

Dyckerhoff GmbH wurde als Einschränkung die fehlende bauaufsichtliche Zulassung genannt; ansonsten schlug nur die vergleichsweise lange Mischzeit durch den Aufschluss des PCE negativ zu Buche. Aber nicht nur die einfachere Handhabung, sondern auch die durch trockene Vormischung der Feinststoffe im Zementwerk erzielbare bessere Homogenität des Bindemittels für UHFB sprechen für die Compound-Variante [2].

3 Entwicklungsziele

Die bis dahin durchgeführte Entwicklung des UHPC und seine Umsetzung in die Praxis nahm kaum Rücksicht auf die vorhandene anlagentechnische Situation der Betonindustrie. Wenige spezialisierte Unternehmen erarbeiteten sich in Verbindung mit Hochschulen Einzelösungen, die jedoch für eine breite Anwendung bis heute wenig geeignet sind. Wesentliche Voraussetzung für den Erfolg neuer Produkte und/oder Bauweisen in der Betonindustrie ist die weitestgehend mögliche Nutzung bestehender Maschinenteknik und Rohstoffe. UHPC der universitären Prägung ist eine gute wissenschaftliche Leistung ohne ausreichenden Praxisbezug. Das beginnt bei den für die zielsichere dichte Packung unverzichtbaren Hochleistungsmischern, die für die Bauindustrie eine erhebliche Investition bedeuten und sich nur bedingt für das Tagesgeschäft der großen Massen eignen. Es setzt sich fort über besondere arbeitsmedizinisch nicht unproblematische feine Quarzkörnungen bis hin zu schwierig handhabbaren Zusatzstoffen wie Silikastaub. Diese Rohstoffe sind weder in der Betonindustrie tagtäglich im Einsatz, noch existieren dafür geeignete Bevorratungs- und Dosierrichtungen. Deshalb gibt es heute nach mehr als 20 Jahren Entwicklungszeit immer noch nur wenige Spezialunternehmen für die Produktion und Anwendung des High-Tech-Werkstoffs UHPC.

Aus dieser Erkenntnis heraus resultierten als Entwicklungsziele die einfache Verarbeitung von UHPC, d.h. die Produktion mit konventioneller Maschinenteknik und in der Branche üblichen Ausgangsstoffe sowie die Normfähigkeit des eingesetzten Bindemittels. Begünstigt durch die vorhandene Produktion von Feinstzementen (s. Abschnitt 4.1) und den Erfahrungen beim Umgang mit synthetischen Oxiden wurde zunächst analog klassischem UHPC die dichte Packung der Rohstoffkörnungen eingestellt und optimiert. Die dabei erzielten Ergebnisse wurden durch Patente geschützt.

3.1 Patente

Klassische UHPC-Zusammensetzungen folgen der bekannten Zementreaktion und ergänzen das mineralogische Zweistoffsystem aus Zement und Gesteinskörnung durch reaktives Siliziumdioxid für die puzzolanische Reaktion. Diese kann aber erst nach 8 bis 12 Stunden beginnen, wenn sich ausreichend Calciumhydroxid gebildet hat. Die zusätzlichen C-S-H-Phasen verdichten erst dann das Gefüge aus den zuerst durch die Hydratationsreaktionen gebildeten Phasen. Bekannt war, dass synthetische Oxide sehr viel schneller als das industrielle Nebenprodukt Silikastaub reagieren. Dies zeigten Untersuchungen der Universität Siegen [5], bei denen Silikastaub und ein synthetisches Oxid einer gesättigten Calciumhydroxidlösung zugegeben und die Reduzierung des pH-Werts als Indikator für die C-S-H-Phasenbildung gemessen wurden (Bild 3).

Die Reaktion des synthetischen Oxids war in diesem Versuch bereits nach drei Stunden nahezu abgeschlossen. Aus diesen Beobachtungen entstand für das UHPC-Bindemittel die Idee, eine puzzolanische Reaktion in der Ruhephase der Zementreaktion stattfinden zu lassen. Dies wurde erfolgreich durch den Einsatz von reaktiven synthetischen Oxidpulvern auf Silizium und Kalzium umgesetzt. Im Jahr 2007 wurde diese Idee erfolgreich zum Patent angemeldet.

Weitere Schutzrechte wurden z.B. für einen Verbundwerkstoff angemeldet, der auch Bindemittel Zusammensetzungen mit mehreren Hauptbestandteilen wie Hüttensand, Flugasche und Kalksteinmehl enthält [6].

4 Entwicklungsschritte zur Optimierung des UHPC-Bindemittelcompounds

4.1 Mikrodur®-Technologie

Basis der nachfolgenden Entwicklungen ist die Herstellung von Feinstzementen mit separater Mahlung von Portlandzementklinker und Hüttensandmehl aus Hochleistungssichtern. Der bei der Produktion eingesetzte Portlandzementklinker ist ohne Sekundärbrennstoffe hergestellt. Im Werk Neuwied wurde bereits vor mehr als zwanzig Jahren für diese Feinstzemente eine Produktionsanlage errichtet. Die Anwendungen der dort produzierten Feinstzemente mit Feinheiten d_{95} von 6 μm , 9,5 μm und 16 μm waren zunächst Injektionen im geotechnischen Bereich und zur Bauwerksinstandsetzung für kleinste Hohlräume. Schon bald zeigte sich, dass sich diese Feinstzemente auch zur Vergütung von verschiedensten Baustoffen eignen.

Die nächsten Schritte waren die Entwicklung von Hochleistungsfließmörteln ohne Silikastaub zum Verguss hohlraumreicher Asphaltsschichten als halbstarre Beläge (Microfond) sowie die Bindemittelvormischung Flowstone zur Herstellung von Betonwerksteinen für Kunst- und Architekturwendungen.

2004 begann dann die systematische Vergütung von Normzementen mit Feinstzementen. Beim Bau des Lufthansa Aviation Centers LAC am Flughafen Frankfurt wurden mit Veridur CEM II/A-S 52,5 R Stützen aus Hochleistungsbeton erstmalig ohne Silikastaub gefertigt (Bild 4) [7].

Die mit Feinstzementen vergüteten Normzemente werden als Premiumzemente bezeichnet. Sie haben sich mittlerweile am

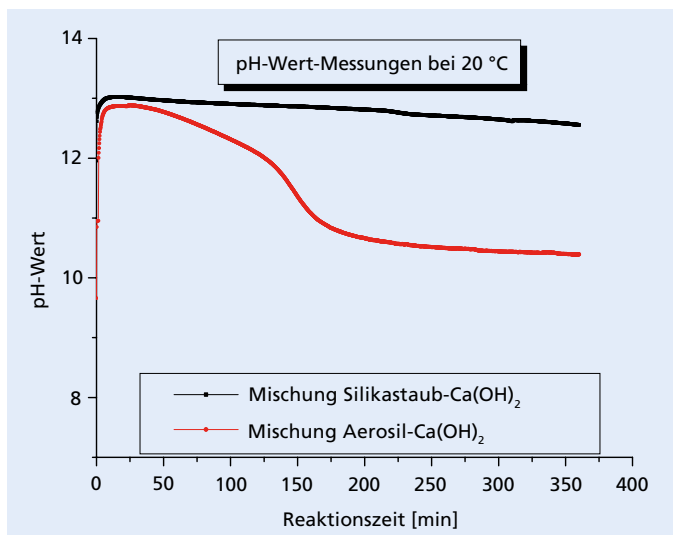


Bild 3: Zeitlicher pH-Wert-Verlauf einer Calciumhydroxid-Lösung mit Silikastaub und Aerosil (synth. Oxid) [5]



Bild 4: Stützenkonstruktion des Lufthansa Aviation Centers in Frankfurt

Markt etabliert und sind bei besonderen Anforderungen unverzichtbar. Vom Bau von Kühltürmen über Hochleistungsbetonfundamenten, Windkraftanlagen, Abwasserbauelementen bis hin zu zahlreichen Brückenverstärkungen – vornehmlich in den Niederlanden – haben sich die als Normzement angemeldeten Premiumzemente vielfach bewährt. Betrachtet man die außergewöhnliche Dauerhaftigkeit über den Gewährleistungszeitraum hinaus, so sind diese teuren Spezialbaustoffe volkswirtschaftlich erheblich günstiger als die Standardbetonbauweise.

4.2 Nanodur®-Technologie

Die Nanodur®-Technologie ist die logische Fortsetzung der Mikrodur®-Technologie unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Projekten der UHPC-Forschung. Die dort erarbeitete dichte Packung des Zementsteins ermöglicht außergewöhnliche Eigenschaften. Nach der Kombination von Normzementen und Feinstzementen wurde als nächster Entwicklungsschritt der zusätzliche Einsatz von synthetischen Oxiden mit einer Korngröße im nanoskaligen Bereich umgesetzt. Die synthetischen Oxide kommen sowohl zur Kornbandoptimierung als auch zur Hydratationssteuerung zum Einsatz. Sie werden entweder im Nassverfahren durch Fällung oder durch pyrogene Verfahren wie Flammhydrolyse und -pyrolyse hergestellt. In den Prozessen entstehen Primärpartikel im Bereich weniger Nanometer, 5 bis 50 nm bei pyrogener Herstellung und 5 bis 100 nm bei der nasschemischen Fällung. Diese Primärpartikel bilden im Herstellungsprozess sofort über Feststoffbrücken verbundene Aggregate, die anschließend je nach Verfahren unterschiedlich stark agglomerieren (Bild 5). Die Agglomerate können durch scherintensive Einarbeitung in andere Materialien dann wieder zu Aggregaten dispergiert werden. Die Aggregatgröße liegt bei den pyrogenen unterhalb 200 nm, bei den gefällten synthetischen Oxiden jedoch schon im Mikrometerbereich. Bild 5 zeigt zur Verdeutlichung der Größenordnung eine TEM-Aufnahme eines synthetischen Oxids mit ca. 10 nm großen Primärpartikeln [8].

Auf der Basis eines hochwertigen CEM I 52,5 R, der sich schon bei den Premiumzementen bewährt hatte, erfolgt die granulometrische Optimierung durch die Feinstzementkomponenten aus der Mikrodur®-Technologie und synthetischen Oxiden. Die einzelnen Komponenten werden in einem Pulvermischer mit Messerköpfen in mehreren Schritten zum finalen Bindemittel Nanodur® homogenisiert. Im Ergebnis entsteht ein stabiles Bindemittel, das auch bei pneumatischer Förderung und bei längeren Transportwegen keine Entmischung zeigt. Der Zement Nanodur® – normfähig als CEM II/B-S 52,5 R – zur einfachen Herstellung von UHPC erhielt den Innovationspreis der Zulieferindustrie Betonbauteile 2008 der 52. Betontage in Neu-Ulm (Bild 6).

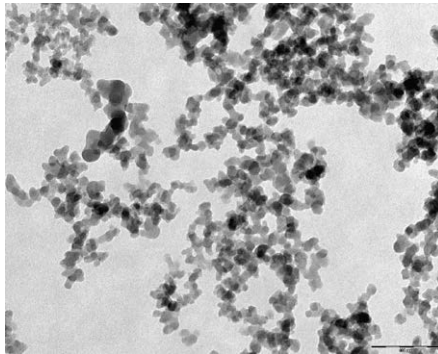


Bild 5: TEM-Aufnahme eines synthetischen Oxids

Quelle: Evonik

5 Kurze Beschreibungen der geförderten Projekte

Die Dyckerhoff GmbH hat seit 2009 in drei öffentlich geförderten Projekten die Möglichkeiten der Bindemitteloptimierung mit speziellem Augenmerk auf CO₂-Reduzierung untersucht. Das erste Projekt war OLAF (s. Abschnitt 5.1) in der BMBF-Ausschreibung NanoTecture zu Nanotechnologie im Bauwesen. Es folgten H-House (s. Abschnitt 5.2) im Rahmen der Initiative Energy efficient Building EeB des 7. Rahmenprogramms der Europäischen Union und Basisprojekt B2 innerhalb des C³ Carbon Concrete Composite (s. Abschnitt 5.3) der BMBF Ausschreibung „Zwanzig20 – Unternehmen Region“.

5.1 OLAF – Nanotechnologisch Optimierter, Langlebiger, energieeffizienter und insbesondere Anwendungsfreundlicher Hochleistungsbeton [9]

Hochleistungsbetone sind zunehmend in der Lage, metallische Werkstoffe zu substituieren. Ein dichtes Zementsteingefüge ermöglicht hohe mechanische Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit. Konventioneller Ultra High Performance Concrete UHPC erfordert wie schon erwähnt außergewöhnliche feinteilige Rohstoffe, besondere Mischtechnik sowie Nachbehandlung. Dies erschwert die Markteinführung, die ohnehin durch aufwändige Zulassungen sehr zeit- und kostenaufwändig ist.

5.1.1 Nanotechnologische Optimierung

Die Eigenschaften von UHPC (Ultra High Performance Concrete) sind im Wesentlichen durch eine dichte Packung des Zementsteingefüges bestimmt. Abgestufte Gesteinskörnungen und reaktive Bindemittelkomponenten werden bei niedrigen Wasser/Zement-Werten zur Erzielung geringster Hohlräume optimiert. UHPC-Zusammensetzungen enthalten darüber hinaus SiO₂-Komponenten für die zur mineralischen Gefügeverdichtung beitragende puzzolanische Reaktion. Anders als beim konventionellen UHPC wurde bei BMBF OLAF die granulometrische Gefügeoptimierung durch Feinstzemente und Steinkohlenflugaschen sowie inerte Kalksteinfeinmehle erreicht. Die puzzolanische Reaktion als Steuerung der Zementhydratation erfolgte



Bild 6: Urkunde des Innovationspreises der Zulieferindustrie Betonbauteile

durch synthetische Oxide. Der Projektpartner, die Firma Evonik, synthetisierte während der Projektlaufzeit eine Vielzahl verschiedener nanostrukturierter Oxide. Während des Projektverlaufs wurde festgestellt, dass es keine geeigneten Prüfmethode für UHPC gibt, die reproduzierbare Ergebnisse zu einer eindeutigen Auswahl hätten liefern können. Die spröden Materialeigenschaften in Verbindung mit Einflüssen aus der Lagerung lieferten bei den rustikalen Druck- und Biegezugprüfungen keine ausreichenden Differenzierungen. Außerdem fehlte es im betrachteten Projektrahmen noch an genügend detaillierten und erprobten Analysemethoden, um den genauen Wirkmechanismus von nanopartikulären Systemen in einer komplizierten UHPC-Matrix hinreichend beschreiben zu können.

5.1.2 Langlebigkeit

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) hat in den letzten Jahren zahlreiche Betonschäden verursacht und wird in der Öffentlichkeit oftmals reißerisch als Betonkrebs dargestellt. Verursacht wird AKR von quarzhaltigen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, die durch Reaktion mit Alkalien aus dem Zement quellfähige Gele bilden und den Beton durch Volumenzunahme zerstören. Unterstützt wird dieser Vorgang durch Klimaeinflüsse und angreifende Medien. Betone durchlaufen in ihrem Lebenszyklus zahllose Klimaschwankungen. In der Klimawechsellaagerung können diese Prozesse zeitraffend simuliert werden.

Die Prüfmethode erlaubt die Einbindung von angreifenden Medien (Wasser, Tausalze, Sulfatlösungen) in realitätsnahen Klimazyklen (Bild 7).

Die Klimawechsellaagerung wurde über den Zeitraum von 1 Jahr mit Basalt als wenig

empfindlicher und Granodiorit als besonders AKR sensibler Gesteinskörnung durchgeführt. Die gemessenen Dehnungen lagen weit unterhalb der Grenzwerte für Wasser und Taumittel (Bilder 8a und b).

5.1.3 Energieeffizienz

Besondere Energieeffizienz wird erreicht, wenn das Bindemittel über das von der aktuellen Zementnorm erlaubte Maß hinaus feinteilige Kompositbestandteile wie Hütensand, Flugasche und Kalksteinmehl enthält (Bild 9). Die daraus resultierende CO₂-Einsparung wurde in einer Life Cycle Analysis des Projektpartners Evonik nachgewiesen. Das im Projekt entwickelte Bindemittelkonzept mit weniger als 50 M.-% des CO₂-intensiven Portlandzementklinkers enthält nanostrukturierte Oxide auf Basis von synthetischem Siliziumdioxid sowie Kalkkomponenten zur Steuerung der puzzolanischen Reaktion in der frühen Hydratationsphase.

In umfassenden vergleichenden Betonuntersuchungen mit dem Bindemittelkonzept in einer praxisbewährten Rezeptur mit Nanodur® Compound 5941, Gesteinskörnungen aus Grubensand, Hartsteinsplitt und Mikrostauffasern wurde nachgewiesen, dass beim neuen OLAF Bindemittelkonzept sowohl die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul, Druck- und Biegezugfestigkeit als auch Dichtigkeit, Dauerhaftigkeit und Widerstand gegen Frost-Tausalz vergleichbar sind.

Grobkornrezeptur OLAF:

- 1050 kg/m³ Bindemittel Compound 5941
- 812 kg/m³ Basaltsplitt 2/5
- 377 kg/m³ Quarzsand 0/2
- 60 kg/m³ Mikrostauffasern
- 160 kg/m³ Wasser
- 15 kg/m³ PCE-Fließmittel

Kriechbelastung und Klimawechsellagerung zeigten ebenfalls, dass mit ausgewählter Zusammensetzung des Bindemittels und dessen Hydratationssteuerung mit nanostrukturierten synthetischen Oxiden ein hochwertiger Beton mit außergewöhnlichen Eigenschaften hergestellt werden kann, obwohl dieses Bindemittel weniger als 50 M.-% Portlandzementklinker enthält.

5.1.4 Anwendungsfreundlichkeit

Im OLAF-Projekt wurde ein anwendungsfreundlicher Hochleistungsбетон durch ein vorgemischtes Bindemittel erreicht, in dem alle notwendigen Feinststoffe zur Erzielung einer möglichst dichten Packung in einem speziellen Pulvermischer im Zementwerk trocken homogenisiert wurden. Die Mischwerkzeuge rotieren dabei im Bereich von 100 bis 500 U/min und die im Materialstrom angeordneten Messerköpfe mit 1000 bis 5000 U/min. Es handelt sich also um eine Kombination von Mischen und Mahlen (= Zertrümmerung von Aggregaten und Agglomeraten). Das anwendungsfertige Bindemittelcompound (OLAF-Compound 5941) mit 59 M.-% Zement und 41 M.-% Quarzfeinsand wurde im Zementwerk hergestellt.

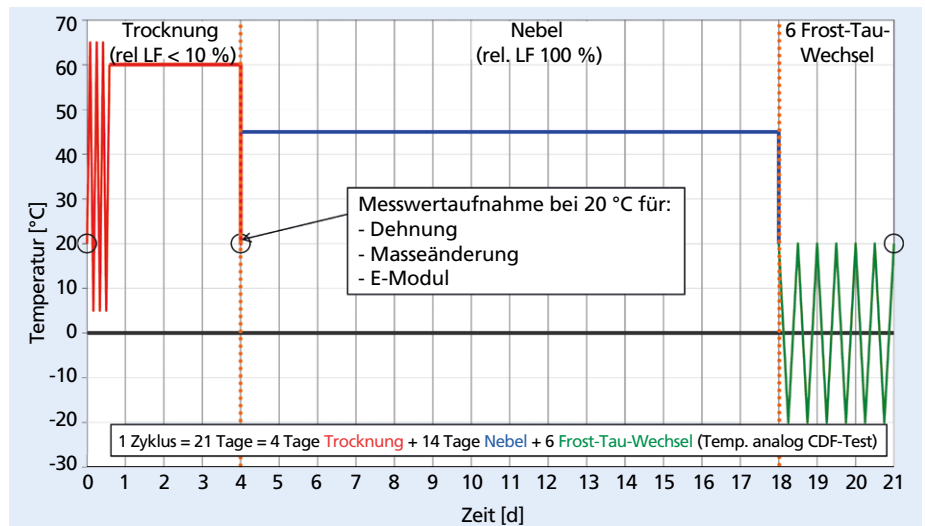


Bild 7: Klimazyklen in der Klimakammer (Beispiel)

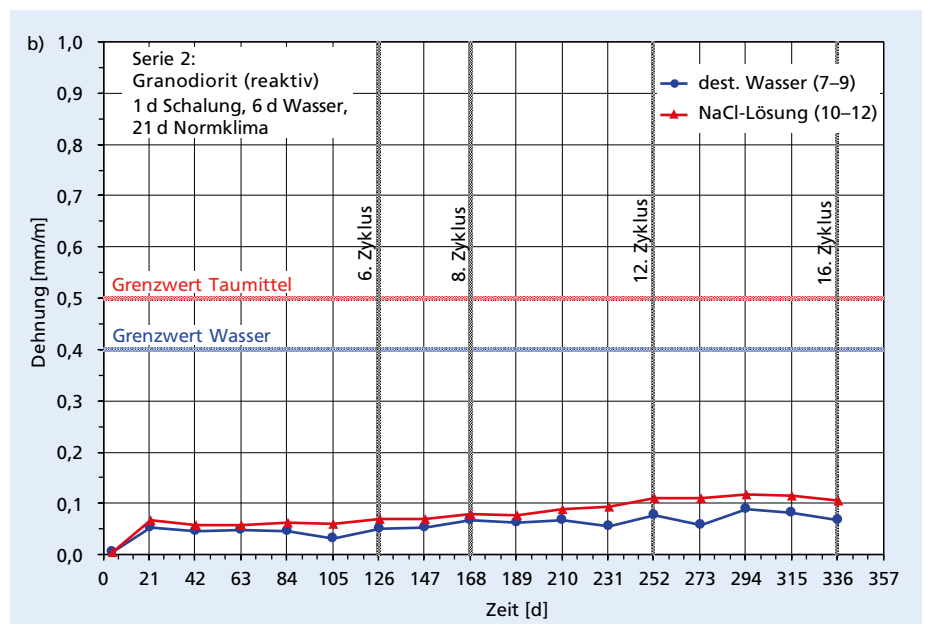
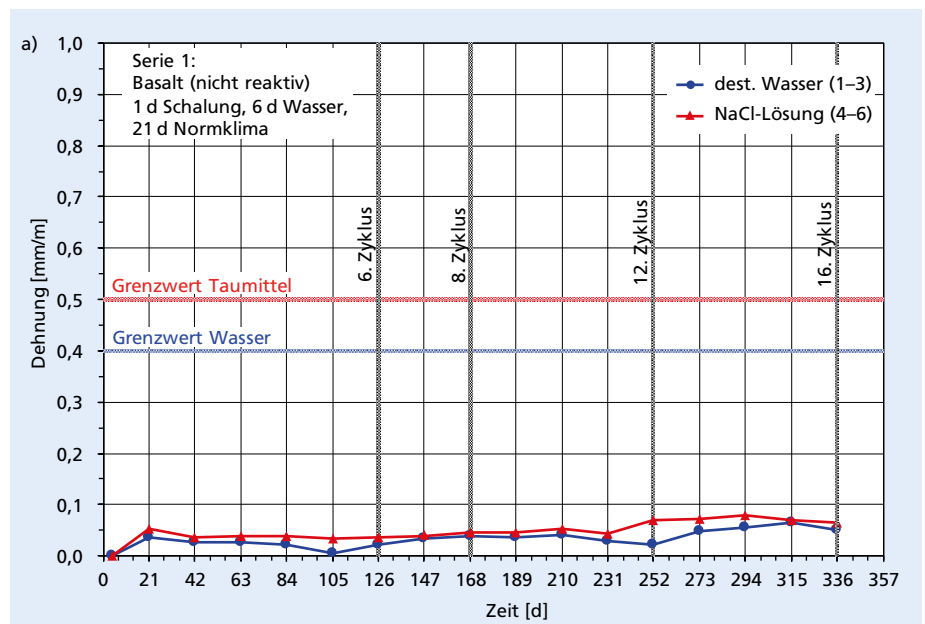


Bild 8: Dehnungswerte für a) Gesteinskörnung Basalt und b) Gesteinskörnung Granodiorit

Das intensiv trocken vorgemischte Bindemittel stellt auch in wenig scherintensiven Beton-Tellermischern in Verbindung mit üblicher, in Betonwerken vorhandener Gesteinskörnung eine problemlose UHPC-Produktion sicher. Gegenüber konventionellem UHPC nach Stand der Technik mit handelsüblichen Zementen und Puzzolanen wie insbesondere Silikastaub ist also keine aufwändige und teure Mischtechnik notwendig, um die Homogenität des Bindemittels und des Frischbetons zu gewährleisten. Durch die Aufbereitung eines speziell zusammengesetzten Bindemittels in einem Hochleistungsmischer mit allen notwendigen Feinstoffen als Pulver werden keine hohen Investitionen für aufwändige Betonmischtechnik im Betonwerk benötigt und somit wird nicht nur Großunternehmen sondern auch kleineren Unternehmen der Zugang zur UHPC-Technologie ermöglicht.

Das Bindemittelkonzept auf Basis von weniger als 50 % Portlandzement mit drei weiteren Hauptbestandteilen Hüttensand und Kalksteinfeinmehl sowie Steinkohlenflugasche ist nach aktuellem Stand ein CEM X und damit noch nicht normfähig [9].

5.2 H-House-Projekt [10]

Das von der EU geförderte Projekt hat die Entwicklung verschiedener eco-innovativer Bausysteme für energieeffiziente Konstruktionen und gesünderes Wohnen zum Inhalt. Letzteres umfasst im Wesentlichen Innenwände aus Holz- und Lehmbaumaterialien, die in diesem Beitrag nicht thematisiert werden.

Als Konzept für Neubau und Instandsetzung von Außenwänden sind Konstruktionen auf Basis Hochleistungsbeton UHPC in Sandwichbauweise mit mineralischen Dämmstoffen denkbar (Bild 10).

Aufgabe der deutschen Partner im Bereich Betontechnik war im Wesentlichen die Erarbeitung von Baustoffkonzepten für Kombinationen aus tragendem UHPC und mineralisch wärmedämmendem Porenbeton. Die beteiligten Partner waren die Unternehmen Dyckerhoff und XELLA unter Leitung der Bundesanstalt für Materialprüfung BAM.

In Verwertung der Ergebnisse aus dem OLAF-Projekt wurden zunächst Rohstoffe verschiedener Zementwerks-Standorte auf ihre Eignung geprüft. Als Klinkerersatzstoffe waren Kalkstein- und Trassmehl sowie Steinkohlenflugasche vorgesehen.

Da sich das Nanodur® Compound 5941 zwischenzeitlich bei der Herstellung von Maschinenbetten und Werkzeuggestellen international bewährt hatte, wurde diese Vormischung aus 59 M.-% Zement und 41 M.-% Quarzfeinsand auch für die Herstellung von UHPC im H-House-Projekt ausgewählt.

Die ersten Schritte umfassten den schrittweisen Ersatz des Portlandzements durch die einzelnen Klinkerersatzstoffe Flugasche, Kalkstein und Trass. Es wurden Normprismen hergestellt und die Biegezug- und Druckfestigkeit gemäß DIN EN 196-1 nach 2 d, 7 d und 28 d geprüft. Zusätzlich

wurden je drei Normprismen im Alter von 24 h ausgeschalt und bei 12 bar und 180 °C für 6 h autoklaviert.

Mittels Rietveldanalyse wurde die Hydratphasenentwicklung untersucht. Einzelne ausgewählte Proben wurden mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht.

Die Prüfungen zeigten, dass die Fes-

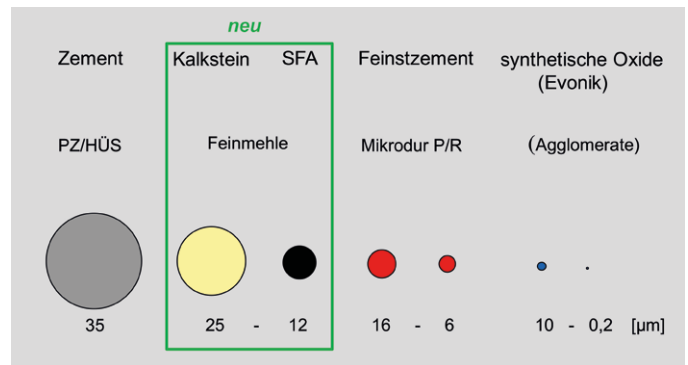


Bild 9: Größenvergleich der Komponenten des Bindemittels

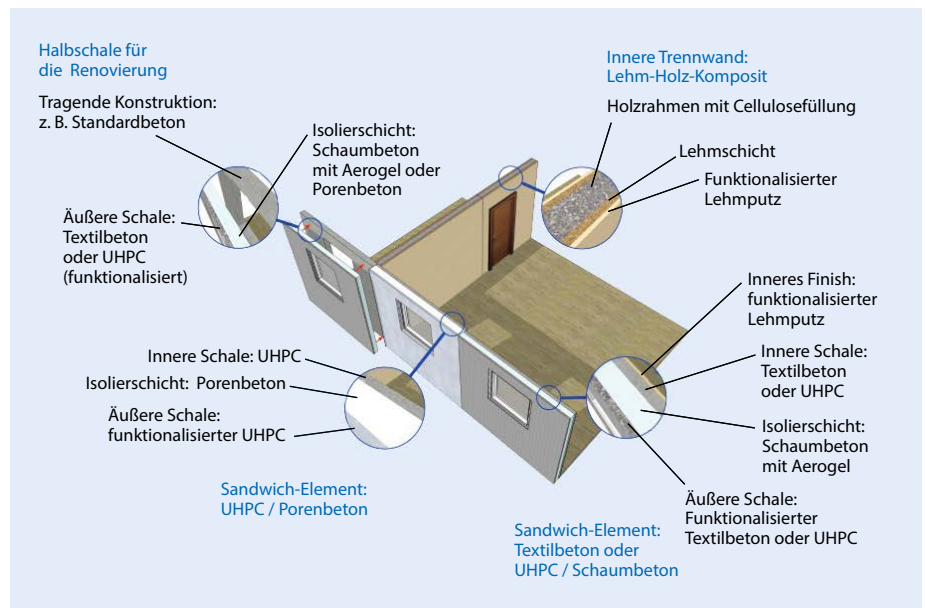


Bild 10: H-House Konstruktionen

Tafel 1: Für UHPC eingesetzte Bindemittelmischungen

Nr.	Zementart	Spezifische Oberfläche nach Blaine [cm²/g]	Charakterisierung				
1	CEM I 52,5 R	~ 5300	Schnelle Festigkeitsentwicklung				
2	CEM I 42,5 R	~ 3900	Hoher Sulfatwiderstand				
3	CEM I 52,5 R	~ 5200	Normale Festigkeitsentwicklung				
4	CEM I 42,5 R	~ 4000	Weißzement				
Zement	Nr.	Zusammensetzung [M.-%] (gerundet auf 5 M.-%)					
		Portlandzementklinker	Hüttensand A	Hüttensand B	Flugasche	Kalksteinmehl	
CEM II/B-S	II-a	70 (1)	30	-	-	-	
	II-b	70 (2)	30	-	-	-	
CEM V/A	V-a	55 (3)	-	30	15	-	
	V-b	55 (2)	-	30	15	-	
CEM III/A-M (S-LL)*	III-a	55 (1)	10	20	-	15	
	III-b	55 (4)	20	10	-	15	
	III-c	40 (2)	30	-	-	30	
CEM III/A-M (S-V-LL)*	III-d	50 (3)	30	-	15	5	
	III-e	50 (3)	-	30	15	5	

*) Nicht geregelt in EN 197

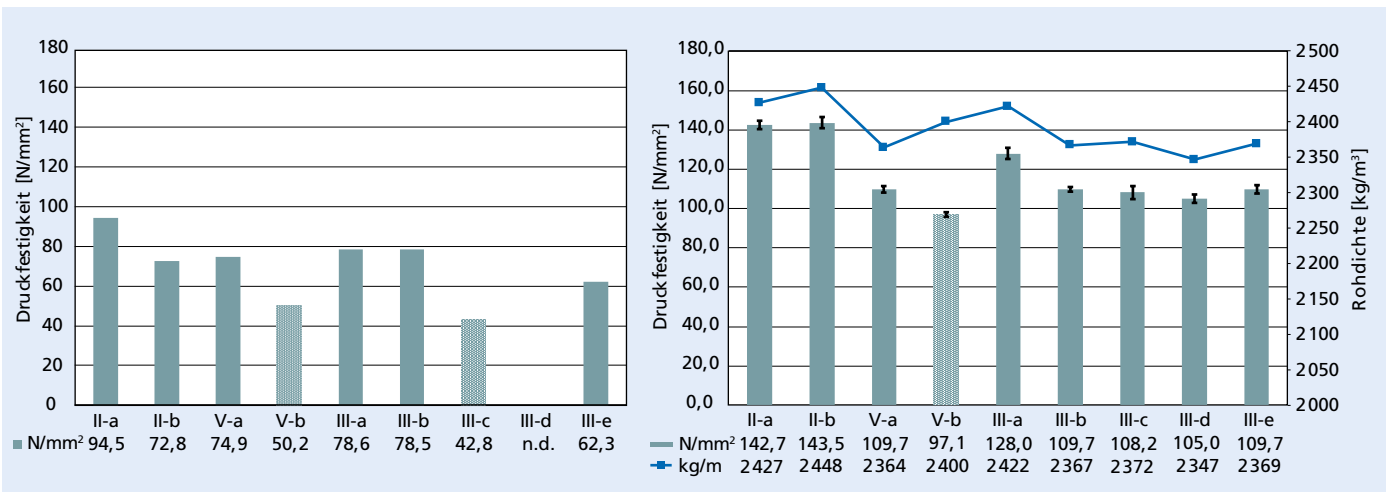


Bild 11: Druckfestigkeiten der UHPC-Betone nach 2d (links) und 28d (rechts), Rohdichte blaue Linie

tigkeiten durch die Autoklavierung im Vergleich zur Normlagerung um ca. 10 % bis 20 % gesteigert wurden. Damit war belegt, dass eine Autoklavierung des UHPC grundsätzlich möglich ist und Sandwichelemente bestehend aus einem tragenden UHPC-Fertigteil und der isolierenden Porenbetonmasse gemeinsam autoklaviert werden können. Eine detaillierte Betrachtung der Prüfergebnisse folgt in Teil 2.

Die konstruktive Ausbildung der H-House Elemente war Bestandteil der Arbeitspakete anderer Partner. Für die Herstellung der UHPC-Platten wurde eine so genannte Feinkornrezeptur eingesetzt:

- Feinkornrezeptur H-House:
- 1050 kg/m³ Bindemittel Compound 5941
- 1150 kg/m³ Grubensand 0/2 mm
- 168 kg/m³ Wasser
- 18 kg/m³ PCE-Fließmittel

Für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurden aus den verschiedenen Bindemittelmischungen die aussichtsreichsten herausgesucht. Trass fand dabei aus betrieblichen Gründen als Klinkersatz keine Berücksichtigung mehr. Stattdessen wurden Mischungen mit Kalksteinmehl und Flugasche ausgewählt (Tafel 1).

Bei der Festigkeitsprüfung nach 2 und 28 Tagen schnitten im Vergleich zu den Referenzmischungen (II-a, II-b) auf Basis von Nanodur® Compound 5941 die Varianten mit Steinkohlenflugasche (III-d, III-e, V-a und V-b) tendenziell schlechter ab als diejenigen mit unterschiedlichen Kalksteinfeinmehlen (III-a-c). Die Leistungsfähigkeit des Bindemittels Variante III-a mit sehr feinem Kalksteinmehl kam der Referenz II-a am nächsten (Bild 11). Die Mischung (III-b) mit Weißzement als Basis erreichte ebenfalls noch sicher die Druckfestigkeitsanforderung von mindestens 100 N/mm².

Beim CDF-Test traten nach 28 Frost-Tau-Wechseln nur bei den Flugaschevarianten leichte Abwitterungen bis maximal 90 g/m² auf. Alle übrigen Bindemittel zeigten fast keinen Materialverlust (Bild 12). Die Chloridmigration lag bei allen Varianten sehr niedrig. Der Grenzwert von 5×10^{-12} m²/s wurde bei weitem nicht erreicht (Bild 13).

Da dunkle Flugasche auch aus optischen Gründen für Fassadenelemente ungeeignet ist, wurde schließlich die Bindemittelvariante III-a auf Basis Grauzement auf Weißzement (III b) umgestellt und dann z.B. in

Betriebsversuchen bei Firma Strängbetong in Schweden mit lokaler Gesteinskörnung getestet.

Zur Demonstration der Fließeigenschaften von TP-H-House Compound 5941 wurde außerdem ein filigranes Falwerk (Bild 14) für einen Messestand hergestellt.

Der Zementanteil im eingesetzten Compound von 59 M.-% wäre nach Verabschiedung der prEN 197-1:2014 (D) normfähig mit der Bezeichnung CEM II/C-M (S-LL).

5.3 Carbon-Concrete-Composite-Projekt (C3)/Basisprojekt B2: Hochleistungsbeton [11]

Ziel des Basisprojekts B2 war es, Hochleistungsbetone zu entwickeln, die gegenüber den aktuell auf dem Markt verfügbaren Betonen eine stark erhöhte Dauerhaftigkeit, einen optimierten Verbund zur Carbonbewehrung und eine deutlich verbesserte Energie- und CO₂-Bilanz aufweisen sollten. Die zu entwickelnden Hochleistungsbetone sollen einen Beitrag zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und der Langlebigkeit beitragen. Dazu waren neue Bindemittelkonzepte zu erarbeiten, die speziell

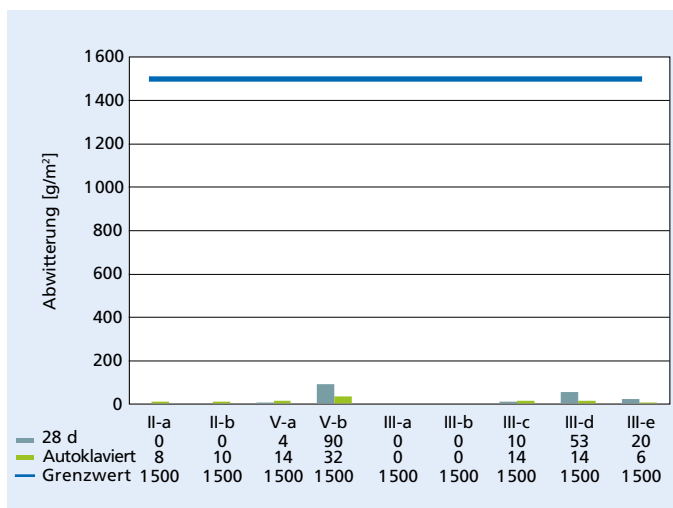


Bild 12: Ergebnisse der CDF-Tests

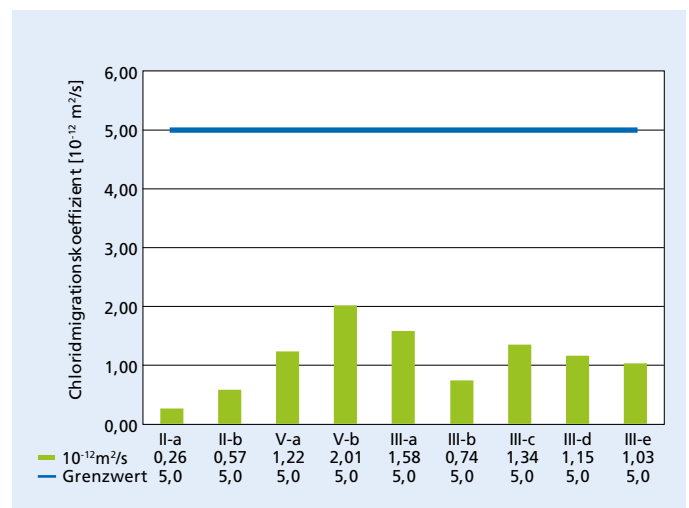


Bild 13: Ergebnisse der Chloridmigrations-Tests

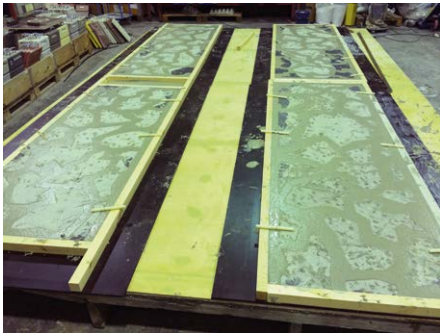


Bild 14: Filigranes Faltenwerk aus UHPC in der Form (oben) und freistehend (unten)

geeignet sind, als Hochleistungsbetone in Fertigteilen sowie bei der Verstärkung und Instandsetzung von Bauteilen mit Carbonbewehrung eingesetzt zu werden. Hier wurden natürlich auch die Ergebnisse aus den bereits angesprochenen Projekten OLAF und H-House verwertet.

5.3.1 Bindemittel-auswahl und Optimierung
Zwei Werk trockenmischungen auf Basis Nanodur® und OLAF Compound 5941 wurden von den Projektpartnern geprüft und bewertet. Dabei zeigte sich, dass die feinstoffreichen UHPC-Betone aufgrund der Klebrigkeit in Verbindung mit grober gebrochener Gesteinskörnung die Strukturen der Textilgelege nur sehr schwer gleichmäßig zu durchdringen vermochten. Für die Anwendung der Bindemittel im Textilbeton war daher eine Reduzierung der Klebrigkeit, Viskosität und Fließgrenze erforderlich.

Die hohe Klebrigkeit der OLAF/Nanodur®-Betone wird einerseits von der großen Feinheit der Feinstzemente und Oxidkomponenten verursacht und andererseits von dem im Compound 5941 eingesetzten Quarzfeinsand. Letzteres ließ sich durch Umstellung auf eine modifizierte Feinkornzusammensetzung beheben, bei der eine feine Quarzkomponente anteilig gegen eine gröbere ausgetauscht wurde. Gleichzeitig erfolgten Abstufungen im Feinstbereich. Anstelle des Nanodur®-Bindemittels CEM II/B-S 52,5 R wurde für weitere Versuche der Projektpartner ein vergleichsweise „gröberer“ C3-Nanodur® als Zementreferenz, der einem CEM III/A 52,5 R entsprach, eingesetzt. Zudem wurden Hüttsand- und Kalksteinfeinmehle sowie Steinkohlenflugasche verwendet. Diese

Tafel 2: Zusammensetzung der Grobkornmischungen

	Nanodur Deuna	C3 Nan. 603-1 Neuwied	BMK-D5-1 Deuna
Bindemittel [kg/m ³]	619	669	621
CEM I 42,5 R [kg/m ³]	370	-	255
CEM I 52,5 R [kg/m ³]	-	360	-
Granitsplitt 2/5 [kg/m ³]	880	419	837
Sand 0/2 mm [kg/m ³]	430	669	530
Sand BCS 413 [kg/m ³]	-	267	250
Quarzmehl M4 [kg/m ³]	430	101	-
Quarzmehl M500 [kg/m ³]	-	67	-
Wasser [kg/m ³]	163	194	145
w/b	0.26	0.29	0.23
PCE [kg/m ³]	15.5	16	16
Rohdichte [kg/m ³]	2,549	2,415	2,470

Untersuchungen erfolgten in einer praxisbewährten Feinkornmischung:

- 713 kg/m³ Bindemittel (modifizierter Zement)
- 430 kg/m³ Quarzmehl M4
- 1150 kg/m³ Quarzsand H 33
- 185 kg/m³ Wasser
- 18 kg/m³ PCE-Fließmittel

Alle Bindemittel-Modifikationen aus drei verschiedenen Hüttsandmehlen, Steinkohlenflugasche und Kalksteinfeinmehl erreichten die im Projekt geforderten Druckfestigkeiten an Prismen 40 mm x 40 mm x 160 mm von > 100 N/mm² und Biegezugfestigkeiten > 15 N/mm².

5.3.2 Granulometrische Optimierung des Hochleistungsbetons

Die Kombination von Ergebnissen zur granulometrischen UHPC-Optimierung der TU Dresden und den Erfahrungen mit den Bindemittelrohstoffen aus den oben besprochenen Projekten führten zu gut anwendbaren UHPC-Bindemittel-Zusammensetzungen. Das resultierende Bindemittelkonzept (BMK-D5-1) enthält Norm- und Feinstzemente (Mikrodur®) zur granulometrischen Optimierung.

In Bild 15 sind die Druck- und Biegezugfestigkeiten von drei ausgetesteten UHPC-Zusammensetzungen (Tafel 2) graphisch dargestellt.

Die beiden ersten Zusammensetzungen haben aber einen deutlich ungünstigeren CO₂-Footprint mit Portlandzementanteilen von 360 kg/m³ bzw. 370 kg/m³ gegenüber der Rezeptur mit dem Bindemittel „BMK-D5-1“ mit 255 kg/m³ Zementanteil. Der dort deutlich geringere Portlandzementgehalt erbringt in Verbindung mit Hüttsand und Feinstzement sowie Kalksteinmehl dann aber durch die ganzheitliche granulometrische Abstimmung mit praxisgerechten Gesteinskörnungen dennoch gute Biegezug- und ausreichende Druckfestigkeiten.

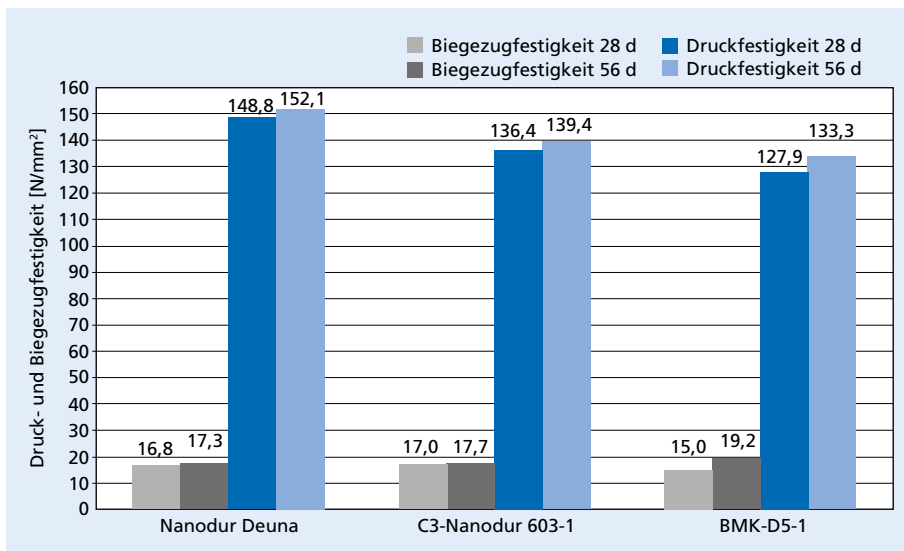


Bild 15: Mechanische Kennwerte der Grobkornmischungen

Das Bindemittel ist ja speziell für C³-Beton konzipiert und wird immer in Verbindung mit Carbonbewehrung eingesetzt werden.

6 Schlussbetrachtung

Im Ergebnis der Untersuchungen der zuvor beschriebenen Projekte bleibt festzuhalten, dass bei optimierter Zusammensetzung der Bindemittel aus hochwertigen Rohstoffen in Verbindung mit geeigneten Feinstzementkomponenten immer ein sehr dichter Zementstein entsteht, der bei unter Wasser gelagerten Prüfkörpern Druckfestigkeiten im Bereich von 120 N/mm² bis 150 N/mm² und Biegezugfestigkeiten zwischen 15 N/mm² und 20 N/mm² erreicht. Das ist im Übrigen vergleichbar mit konventionellen UHPC-Zusammensetzungen, deren höhere mechanische Kennwerte überwiegend aus besonderen Verfahren wie Warmbehandlung sowie speziellen Additiven wie Fasern resultieren. Weitere Prüfergebnisse folgen in Teil 2.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts OLAF (FKZ 03X0066A) und des C³-Carbon Concrete Composite Basisprojekts B2 (FKZ 03ZZ0303E) sowie bei der EU-Kommission im Rahmen des Projekts H-House (GA 608893).

Literatur

- [1] OLAF: Abschlussbericht BMBF Projekt OLAF (FKZ 03X0066B Evonik), TIB-Hannover, Hannover 2012.
- [2] Afßbrock, O.; Böing, R.; Rothenbacher, W.; Stein, K.; Winzer, R.: Praxistest ultrahochfester Beton im Transportbetonwerk. *beton* 63 (2013) H. 6, S. 226–231.
- [3] Sachstandsbericht „Ultrahochfester Beton“. DAFStb Heft 561, Berlin 2008.

- [4] Entwicklung einer Richtlinie. DAFStb-Unterausschuss „Ultrahochfester Beton“, AG1 Betontechnik und Ausführung.
- [5] Korpa, A.; Trettin, R.: Nanoscale puzzolans for improving ultra high performance cementitious binders. *CEMENT INTERNATIONAL* 5 (2007) No. 1, pp. 74–83
- [6] Patentanmeldung DE 10 2011 101 448 A1, Dyckerhoff AG.
- [7] Blobner, A.; Israel, D.; Möller, W.; Winzer, R., Silicafreier hochfester Beton mit Dyckerhoff Veridur, *Betoninformationen* 44 (2004) H. 1, S. 3–7.
- [8] Deuse, T.; Parker, F.; Strunge, J.: Nanostrukturierte Steuerungskomponenten in Normzement für ultrahochfeste Betone. *Nanotechnologie aktuell* (2008).
- [9] OLAF: Abschlussbericht BMBF Projekt OLAF (FKZ 03X0066A Dyckerhoff), TIB-Hannover, Hannover 2012.
- [10] H-House Project. www.h-house-project.eu
- [11] Basisvorhaben B2 – Nachhaltige Bindemittel und Betone für die Zukunft, Teilvorhaben: Zemente und Bindemittelsysteme für hochfeste C³-Beton (FKZ 03ZZ0303E), TIB Hannover, Hannover 2017.

Ergebnisse von Forschungsvorhaben

Nanotechnisch optimierte Bindemittel für die Herstellung von anwendungsfreundlichem Hochleistungsbeton; Teil 2

Thomas Deuse, Sabine Mutke, Frank Parker, Dirk Qvaeschning, Wiesbaden, Matthias Wulff, Deuna

In Teil 1 dieses Beitrags wurde die Entwicklung nano-technisch optimierter Bindemittel zur Herstellung von Hochleistungsbetonen sowie die Eigenschaften beschrieben, die damit produzierte Hochleistungsbetone (UHPC) bei der Erprobung in drei öffentlich geförderten Projekten zeigten. Die Beschreibung der Tests und ihrer Ergebnisse wird in diesem Teil fortgesetzt. Außerdem wird mithilfe einer speziellen Versuchsanordnung die Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Lagerungsart aufgezeigt. Die Leistungsfähigkeit der in Teil 1 entwickelten Bindemittel wird anhand anwendungstechnischer Tests beschrieben und die Untersuchungen durch mineralogische und mikroskopische Methoden ergänzt. Dabei werden auch das Treibhauspotenzial der verschiedenen Bindemittel und deren Nachhaltigkeit in UHPC im Vergleich zu Standardbeton einbezogen. So konnte festgestellt werden, dass sich der Anteil von Portlandzementklinker in den UHPCs um etwa 50 M.-% im Vergleich zu einem Standardbeton bei gleichbleibender hoher Leistung reduzieren ließ. Beispiele verdeutlichen die Möglichkeiten, die sich aus der hohen Leistungsfähigkeit dieser UHPCs in der Praxis ergeben.

1 Einleitung

UHPC konventioneller Prägung wird aus Normzementen, überwiegend feinteiligen Gesteinskörnungen und reaktiven Siliciumkomponenten hergestellt – meist Silikastaub als Nebenprodukt der Ferrosiliciumproduktion. Die Anwendungen in Deutschland sind nicht zuletzt aufgrund der geltenden bauaufsichtlichen Regelungen sehr überschaubar – weltweit gibt es insbesondere auf Basis von Trockenfertigmischungen eindrucksvolle Bauwerke aus dem High Tech Werkstoff UHPC. Der Stand der Technik in Deutschland wurde u.a. dokumentiert durch den Forschungsbericht DFG FE 497/1-1(2005) [1], den Sachstandsbericht des DAfStb (2008) [2], die Ergebnisse des BTB Forschungsvorhabens UHFB (2013) [3] und Teil 1 zu dieser Veröffentlichung [4].

Dyckerhoff stellt seit mehr als 20 Jahren speziell gesichtete Feinstzemente (Mikrodur®) auf Basis Portlandzementklinker und Hüttsand für Anwendungen bei Injektionen im geotechnischen Bereich und zur Bauwerksinstandsetzung her. Daraus abgeleitet entstanden Spezialprodukte wie Microfond-Mörtel zum Verguss so genannter halbstarrer Beläge sowie die Bindemittelvormischung Flowstone zur Herstellung von Betonwerksteinen für Kunst- und Architektur Anwendungen. Der nächste Schritt waren die Premiumzemente, d.h. durch Mikrodur® vergütete Normzemente mit außergewöhnlicher Leistungsfähigkeit für Betone zur Herstellung hochfester Stützen, Fundamente,

Kühltürme, Windkraftanlagen, Abwasserbauelementen und Brückenverstärkungen.

Durch Kombination dieser gefügeoptimierten Bindemittel mit reaktiven synthetischen Oxiden entwickelte Dyckerhoff 2007

die Nanodur® Technologie und meldete Bindemittel und Herstellungs-Verfahren zum Patent an.

In drei öffentlich geförderten Projekten „OLAF – Hochleistungsbeton für Alle“

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Thomas Deuse studierte Bauingenieurwesen an der Universität Siegen. Berufliche Stationen waren Bauleiter bei Gartenmann, Anwendungstechniker im Bereich anorganische Chemieprodukte bei der Degussa AG, Projektleiter bei Peri sowie bautechnischer Berater bei der Ceca Klebstoff GmbH. 1996 Eintritt in die Dyckerhoff AG, Wiesbaden, zunächst mit Aufgaben im technischen Vertrieb Spezialbaustoffe und später im Produktmarketing Bindemittel und Zement. Seit 2011 ist Thomas Deuse Leiter der Abteilung Produktentwicklung und Spezialbaustoffe bei der Dyckerhoff GmbH.

Dipl.-Ing. Chem. (FH) Sabine Mutke studierte Chemische Technik an der Fachhochschule Fresenius in Wiesbaden. 1989 trat sie in die Dyckerhoff AG ein als Laborleiterin der physikalischen Chemie/Mineralogie im Wilhelm Dyckerhoff Institut. 2013 wechselte sie in die Abteilung Produktentwicklung. Seit 2015 ist Sabine Mutke Projektleiterin in der Abteilung Forschung und Entwicklung bei der Dyckerhoff GmbH.

Frank Parker studierte Mineralogie am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz. Er absolvierte eine Ausbil-

dung zum Chemielaboranten und arbeitete ab 1989 im Zentrallabor bei Erbslöh, Geisenheim, und IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim. Seit 1994 Mitarbeiter im Wilhelm Dyckerhoff Institut, Wiesbaden zunächst im Bereich Spezialtiefbau und Güteüberwachung. Seit 2005 ist Frank Parker in der Anwendungstechnik und Produktentwicklung der Spezialbaustoffe der Dyckerhoff GmbH tätig.

Dipl.-Lab.-Chem. Dirk Qvaeschning studierte Chemie an der Universität Siegen mit dem Schwerpunkt Bau- und Werkstoffchemie. Von 1997 bis 2009 war er in unterschiedlichen Positionen im Bereich der Entwicklung von zementären Baustoffen und Betonsatzmitteln tätig. Seit 2009 ist Dirk Qvaeschning Projektleiter im Bereich Produktentwicklung des Wilhelm Dyckerhoff Instituts.

Dipl.-Betriebswirt (FH) Matthias Wulff ist Bautechniker im Hoch-/Tiefbau. Berufliche Stationen waren Laborleiter bei Dr. Moll GmbH & Co.KG Isernhagen und Labormitarbeiter bei Südharz-Asphalt Herzberg. Seit 2010 ist Matthias Wulff Laborleiter bei der Deuna Zement GmbH.

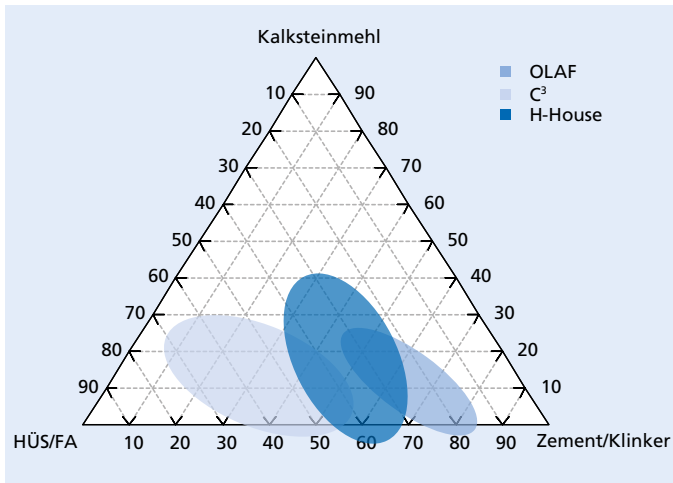


Bild 1: Einordnung der in den Projekten angewendeten Bindemittelkonzepte im Dreistoffsystem.

(BMBF), „Energy efficient Buildings: H-House“ (EU) und „C³ Carbon Concrete Composite: Basisprojekt B2 Hochleistungsbeton“ (BMBF) wurden Zementrohstoffe in Kombination mit synthetischen Oxiden untersucht und für die jeweiligen Anwendungsfelder Bindemittelkonzepte erarbeitet (Bild 1).

Dabei kamen weitere Hauptbestandteile wie Hüttensand, Flugasche und Kalksteinmehl zum Ein-

satz, die z.T. auch mit unterschiedlicher Feinheit kombiniert wurden. Ziel war die Reduzierung des Klinkeranteils zur Verbesserung der Ökobilanz. Es sollte jedoch mindestens eine Druckfestigkeit von 100 N/mm² sowie eine Biegezugfestigkeit von 15 N/mm² erreicht werden.

Für die Anwendung im Betonwerk sollten die dort vorhandenen Gesteinskörnungen und die Mischtechnik vor Ort verwendbar sein. Dabei hat sich die Herstellung eines Bindemittel-Compounds bewährt, wobei die trockene Vormischung und Homogenisierung der Komponenten in Intensivmischern im Zementwerk erfolgt. Das Mischungsverhältnis von Bindemittel zu Quarzfeinsand beträgt 59:41. Tafel 1 gibt einen Überblick über die in den Projekten erarbeiteten Bindemittelrezepturen im Vergleich zum Nanodur[®] Compound 5941, das als Referenz genutzt wurde.

Tafel 1: Übersicht über die in den Projekten untersuchten Bindemittelkonzepte

Zement gem. prEN 197-1:2014 (D)	PZ Klinker [M.-%]	Hüttensand [M.-%]	Flugasche [M.-%]	Kalkstein LL [M.-%]
(Nanodur [®]) ¹⁾ CEM II/B-S	65...79	21...35	–	–
(H-House) ¹⁾ CEM II/C-M (S-LL)	50...64	16...44	–	6...20
(OLAF) ¹⁾ CEM X (S-V-LL) ²⁾	< 50	6...20	6...20	6...20
(C ³ BMK-D5-1) CEM VI (S-LL)	35...49	31...59	–	6...20

¹⁾ Eingesetzt als Compound 5941 mit 59 M.-% Zementanteil und 41 M.-% Quarzfeinsand

²⁾ Aktuell nicht zur Normung vorgesehen

Tafel 2: Übersicht der verwendeten UHPC-Zusammensetzungen

Bestandteil	Einheit	Grobkorn	Feinkorn	Leim
Bindemittel Compound 5941	kg/m ³	1050	1050	1000
Grubensand 0/2 (lufttrocken)	kg/m ³	430	1150	–
Edelsplitt 2/5 (lufttrocken)	kg/m ³	880	–	–
Wasser	kg/m ³	168	167	138
PCE-Fließmittel	kg/m ³	13,7	17,9	13,6

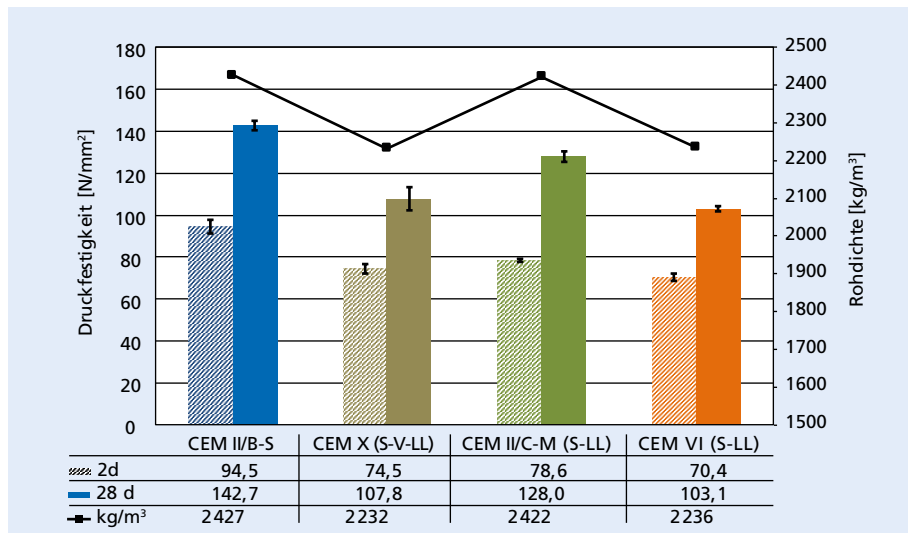


Bild 2: Prismendruckfestigkeiten und Rohdichten der Feinkornmischungen

2 Untersuchung der Materialeigenschaften

2.1 Druck- und Biegezugfestigkeiten

Für die Prüfung der mechanischen Kennwerte wurden mit den verschiedenen Bindemittelmischungen Normprismen (40 mm x 40 mm x 160 mm) hergestellt und nach 24 h ausgeschalt. Die weitere Lagerung bis zur Prüfung erfolgte bei 20 °C unter Wasser. Es wurden Druck- und Biegezugfestigkeiten nach 2 Tagen und 28 Tagen geprüft. Für die Prüfungen wurden zum einen Leim- und zum anderen Feinkornmischungen (Tafel 2) verwendet. Von den Leimprismen wurden jeweils drei Proben nach dem Ausschalen für sechs Stunden bei 12 bar und 180 °C autoklaviert.

Die Druckfestigkeiten der untersuchten Feinkornzusammensetzungen (Bild 2) liegen nach 28 Tagen Wasserlagerung zwischen 100 N/mm² und 140 N/mm². Sie hängen naturgemäß vom Klinkergehalt der verwendeten Bindemittel ab. Mit einem Anteil an weiteren Hauptbestandteilen im Bindemittel von mehr als 50 M.-% werden – aufgrund der Dichtigkeit des Gefüges – immer noch Druckfestigkeiten von mehr als 100 N/mm² erzielt. Dieser Wert stellte die Zielfestigkeit für die in den Projekten vorgesehenen Anwendungen dar.

Die Biegezugfestigkeiten der untersuchten Feinkornzusammensetzungen (Bild 3) hängen ebenfalls von den reaktiven Bestandteilen der verwendeten Bindemittel ab. Der für die Bemessung von Fassadenelementen wichtige Schwellenwert von 15 N/mm² wird – als Mittelwert – auch von den Bindemitteln mit hohem Gehalt an weiteren Hauptbestandteilen erreicht. Aufgrund der stärkeren Prüfstreuung liegt der charakteristische Wert der Biegezugfestigkeit aber tiefer.

Die autoklavierten Leimprismen erbrachten durchgehend höhere Druckfestigkeiten als die in Wasser gelagerten Proben nach 28 Tagen Aushärtung (Bild 4). Das bestätigt auch die Literatur [5, 6]. Die Matrix war spröde und die Brucheigenschaften ähneln der von Keramik.

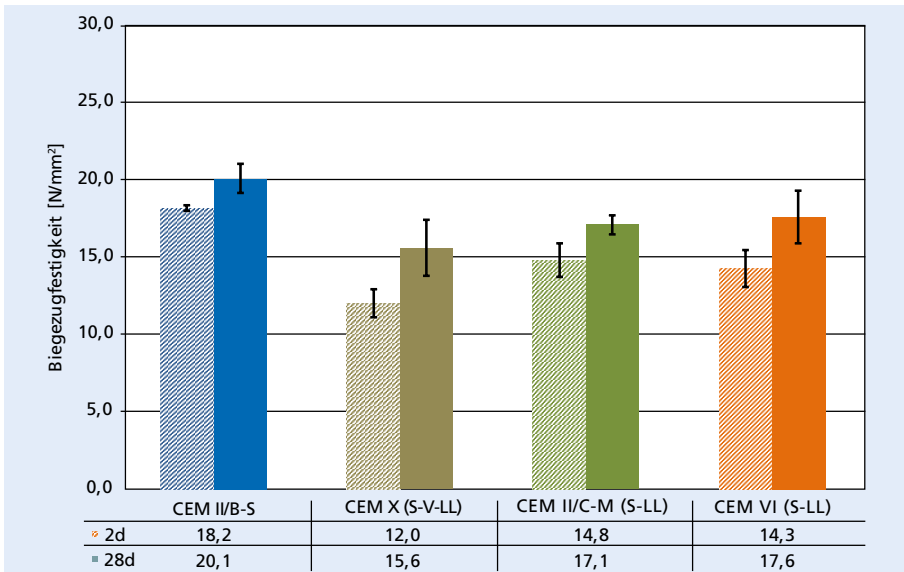


Bild 3: Biegezugfestigkeiten der Feinkornmischungen

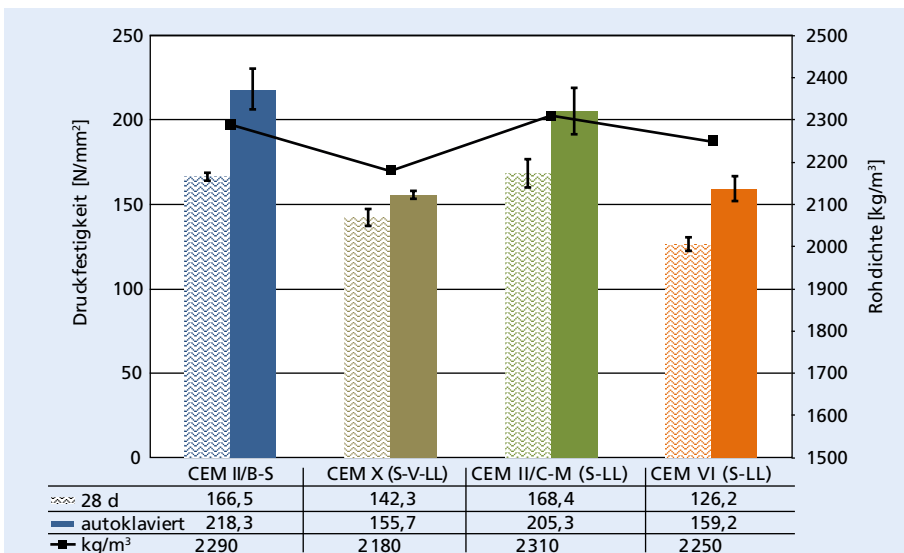


Bild 4: Druckfestigkeiten sowie Rohdichten der autoklavierten Leimprismen (zum Vergleich sind die Druckfestigkeiten der Leimprismen nach 28 Tagen Wasserlagerung dargestellt)

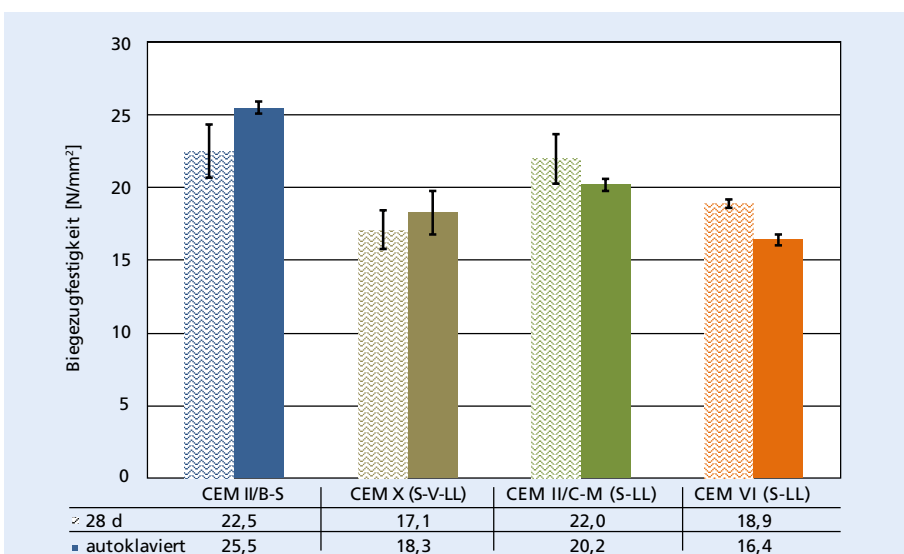


Bild 5: Biegezugfestigkeiten der autoklavierten Leimprismen (zum Vergleich sind die Biegezugfestigkeiten der Leimprismen nach Wasserlagerung mit aufgeführt)

Die Biegezugfestigkeiten lassen sich dagegen durch die Autoklavierung nicht in jedem Fall steigern. Hier wirkt sich der alleinige Austausch von Klinker durch Kalksteinmehl festigkeitsmindernd aus. Die durch das Kalksteinmehl bewirkte Änderung der C-S-H-Zusammensetzung hat offenbar zur Folge, dass das Gefüge stabiler auf die Druck-, aber instabiler auf die Biegezugbeanspruchung reagiert. Die in der Probe CEM X (S-V-LL) neben dem Kalksteinmehl enthaltene Si-reiche Flugasche scheint diesen negativen Effekt auszugleichen. Hier ist wieder eine Erhöhung der Biegezugfestigkeit durch Autoklavierung erkennbar (Bild 5).

Chr. Lehmann [6] erwähnt, dass Kalksteinmehl bei der Autoklavierung weniger effektiv wirkt. Er beschreibt in seiner Dissertation, dass Ca-reiche Ausgangsstoffe zu Ca-reichen C-S-H-Phasen führen und Si-haltige Materialien den Si-Anteil in den C-S-H-Phasen erhöhen. Ein hohes Si/Ca-Verhältnis in den C-S-H-Phasen hat sich bei seinen Autoklavierungs-Versuchen generell als festigkeitssteigernd ausgewirkt. Bei den hier beschriebenen Versuchen zeigt sich, dass bereits das Si/Ca-Verhältnis der Bindemittelcompounds mit den Druck- und Biegezugfestigkeiten der autoklavierten Leimprismen korreliert (Bild 6a). Dies gilt jedoch nur bei Betrachtung der gleichen reaktiven Ausgangsmaterialien. Bei Änderung der Zementkomponente wird dieser Zusammenhang gestört (Bild 6b).

2.2 Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Biegezugfestigkeiten der UHPC's

Bisherige Untersuchungen zeigten bei der Biegezugprüfung von UHPC-Prismen starke Schwankungen zwischen den Einzelwerten. Diese hohen Standardabweichungen sind besonders ungünstig, da gerade die Biegezugfestigkeit für die Beurteilung der Eigenschaften von UHPC eine wichtige Rolle spielt. Eine gezielte Untersuchung des Einflusses verschiedener Lagerungsbedingungen zeigte, dass der Feuchtezustand und somit die Lagerungsbedingungen speziell bei Hochleistungsbetonen einen signifikanten Einfluss haben (Bild 7).

Die einzelnen Arbeitsschritte bei der Biegezug-Prüfung von der Entnahme bis zur Belastung der Prüfkörper sind zwar grundsätzlich geregelt, aber bei UHPC können bereits geringfügige Variationen erhebliche Unterschiede in den Messwerten bewirken. Dieses Phänomen ist zwar grundsätzlich auch von Normalbeton bekannt, ist aber bei Hochleistungsbeton besonders ausgeprägt. Da die betontechnischen Erklärungsmodelle nicht ausreichen, um diese Beobachtung zu erklären, wurden Untersuchungen beim Fraunhofer Institut für Silikatforschung (ISC) in Würzburg in Auftrag gegeben, um die Ursachen der starken Schwankungen der Biegezugfestigkeiten zu erklären. Hierfür wurden trockene und wassergelagerte Prüfkörper getestet.

Die Untersuchung der Feuchteverteilung im Prüfkörper ergab einen starken Gradienten-

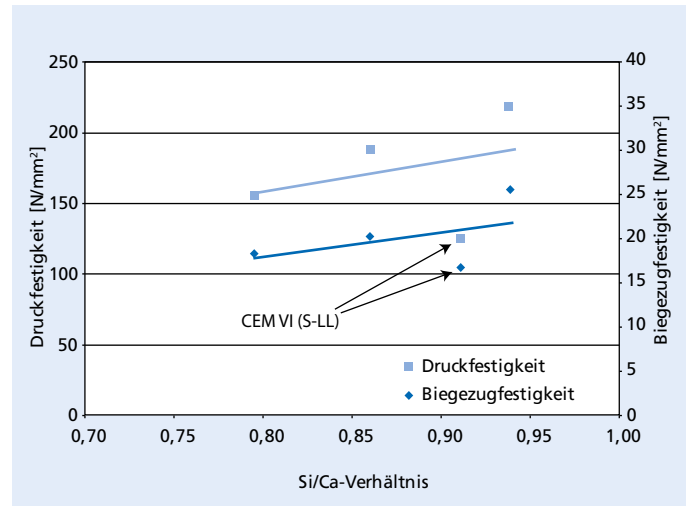
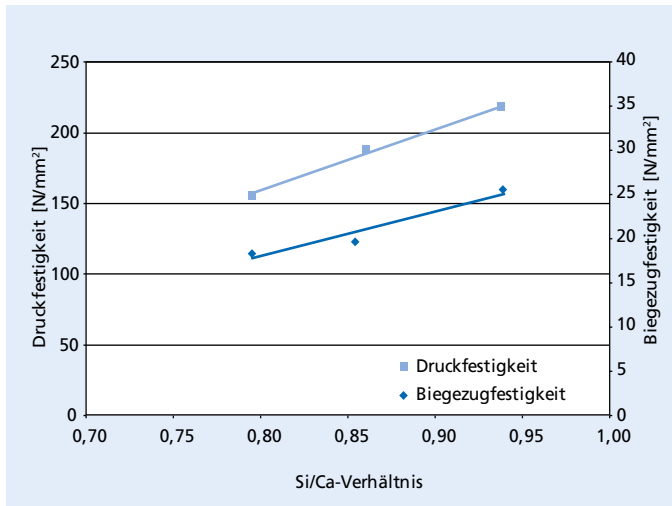


Bild 6: Abhängigkeit der Druck- und Biegezugfestigkeit vom Si/Ca-Verhältnis der Bindemittelcompounds von autoklavierten Leimprismen
 a) CEM II/B-S, CEM X (S-V-LL), CEM II/C-M (S-LL), b) Wechsel der Bindemittelbasis bei CEM VI (S-LL), keine Korrelation

ten im oberflächlichen Bereich von 0 bis 5 mm. Mit einem in Bild 8 skizzierten Versuch wurde die Auswirkung solcher Feuchtegradienten gemessen. Dabei wurde ein trockener Prüfkörper auf zwei Auflagern zur Hälfte ins Wasser gelegt und die aus dem Quellen innerhalb von zwei Stunden verursachte mittige Verformung im Bereich von 12 µm mit extrem empfindlichen elektro-optischen Messgeräten erfasst. Rechnerisch wurde nun eine Last ermittelt, die dieselbe Verformung zur Folge gehabt hätte. Die Größenordnung lag dabei im Bereich der üblichen Biegezugfestigkeiten. Mit diesem einfachen Versuch wurde nachgewiesen, dass der Feuchtegehalt die Biegezugfestigkeit extrem beeinflusst [7].

2.3 Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit

2.3.1 Frost-Tau-Widerstand nach dem CDF-Verfahren

Beim CDF-Verfahren wird die zu prüfende Betonoberfläche kopfüber in eine 3 %-ige

NaCl-Lösung getaucht und 28 Frost-Tau-Wechseln zwischen -20 und +20 °C ausgesetzt. Danach wird die Menge des dabei abgewitterten Materials bestimmt. Für die Prüfungen wurden die Grobkornmischungen aus Tafel 2 verwendet.

Die Abwitterungen aller geprüften UHPC-Proben nach 28 Wechseln lagen weit unterhalb des Abnahmekriteriums für den CDF-Test von 1500 g/m² [8]. Sogar der vom Berliner Senat in den Ausführungsvorschriften über Geh- und Radwege [9] festgelegte Grenzwert von 200 g/m² für die Abwitterung von taktilen Platten wird eingehalten. Aufgrund der hohen Gefügedichtigkeit können Wasser oder Salzlösungen kaum in das Gefüge eindringen, wie auch die geringe Wasseraufnahme zeigt (Bild 9). Daher wird der Frostwiderstand von UHPC nicht vom Luftporenanteil bestimmt [10]. Frost-Tausalz-Belastungen stellen somit normalerweise kein Problem für UHPC dar.

2.3.2 Chloridmigration

Bei der Chloridmigration wird die Eindringtiefe einer NaCl-Lösung in einen definierten Betonkörper unter Anlegung einer Spannung von 30 V geprüft. Dann werden die Prüfkörper gespalten und mithilfe von Silbernitratlösung die Eindringtiefe der Chlorid-Ionen gemessen. Über die angelegte Spannung, die gemessene Stromstärke und weitere Parameter errechnet sich daraus der Chloridmigrationskoeffizient, der ein Maß für das Eindringvermögen der Chlorid-Lösung ist. Je geringer der Koeffizient, desto dichter ist das Gefüge und desto schwächer dringt die Chlorid-Lösung in die Betonmatrix ein.

Die Prüfung orientierte sich an dem BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)“ [11]. Sie wurde an

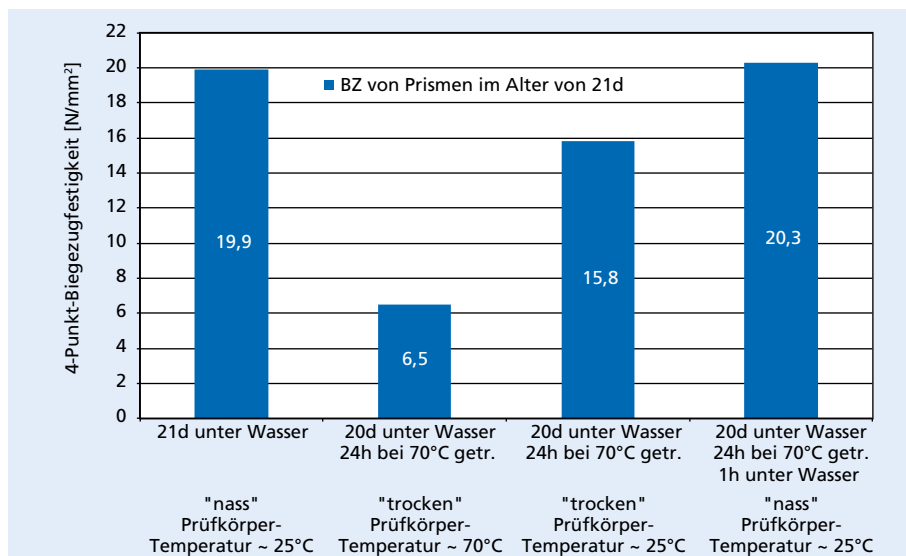


Bild 7: Biegezugfestigkeiten in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen der Prüfkörper, gemessen an Prismen 160 mm × 40 mm × 40 mm (n = 3)

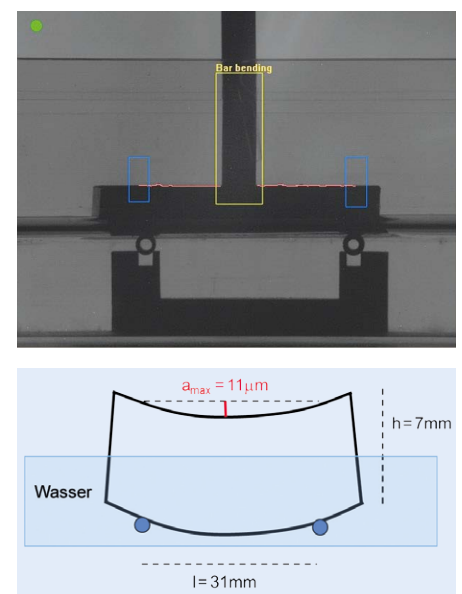


Bild 8: Messaufbau (oben): 40 mm × 20 mm × 7 mm Mörtelprisma, halb im Wasser, Oberseite mit wasserdichtem Lack beschichtet, Prüfkörper auf Rollen; Prinzipskizze zum Durchbiegeversuch (unten)

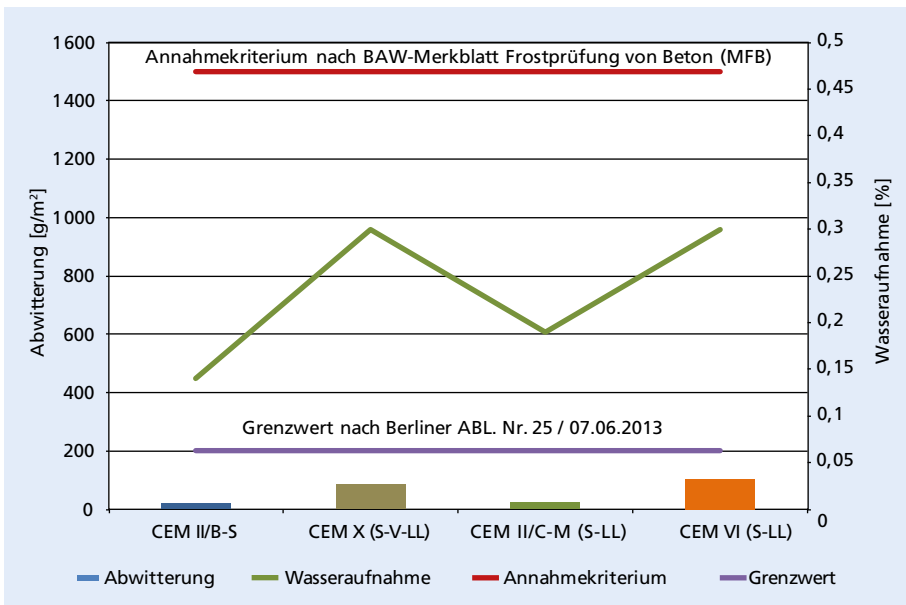


Bild 9: Abwitterung und Wasseraufnahme der Prüfkörper in der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung nach 28 Wechseln (Feinkornmischung gem. Tafel 2).

Probekörpern der Feinkornrezeptur nach Tafel 2 durchgeführt. Die gemessenen Migrationskoeffizienten aller geprüften Proben lagen deutlich unter dem Grenzwert von $5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Den höchsten Wert wies die Probe CEM II/C-M (S-LL) auf. Hier wirkt sich der Austausch von Hüttensand durch Kalksteinmehl als weiterer Hauptbestandteil aus. Aber auch dieses Bindemittel erfüllt den Grenzwert deutlich (Bild 10).

Ähnliche Ergebnisse werden auch in [12] beschrieben, wobei in diesem Fall reine Portlandzementsysteme mit Silikastaub geprüft wurden. Die Ergebnisse belegen, dass auch unabhängig von der Bindemittelzusammensetzung, aufgrund des dichten Gefüges, die Chloridmigration sehr niedrig liegt und die Gefahr einer Stahlkorrosion bei UHPC äußerst gering ist.

2.4 Gefügeuntersuchungen

2.4.1 Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie gibt Auskunft über Menge und Größe der Poren. Verwendet wurde das Model AutoPore IV 9505 von Fa. Micromeritics. Die Prüfungen wurden an Leimprismen durchgeführt. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden ca. 10 mm große Teilstücke 24 Stunden bei 105°C getrocknet und danach gemessen. Bild 11 zeigt die Porenverteilungen der UHPC-Leime im Alter von 28-Tagen (a) sowie die Verteilung in den autoklavierten Pendants (b). Wie im UHPC angestrebt, sind nach 28 Tagen Hydratation praktisch keine Kapillar- und Luftporen vorhanden. Es liegen in allen untersuchten Proben Poren im oberen Gelporen-Bereich von $0,01 \mu\text{m}$ und $0,05 \mu\text{m}$ vor. Den geringsten Porenan-

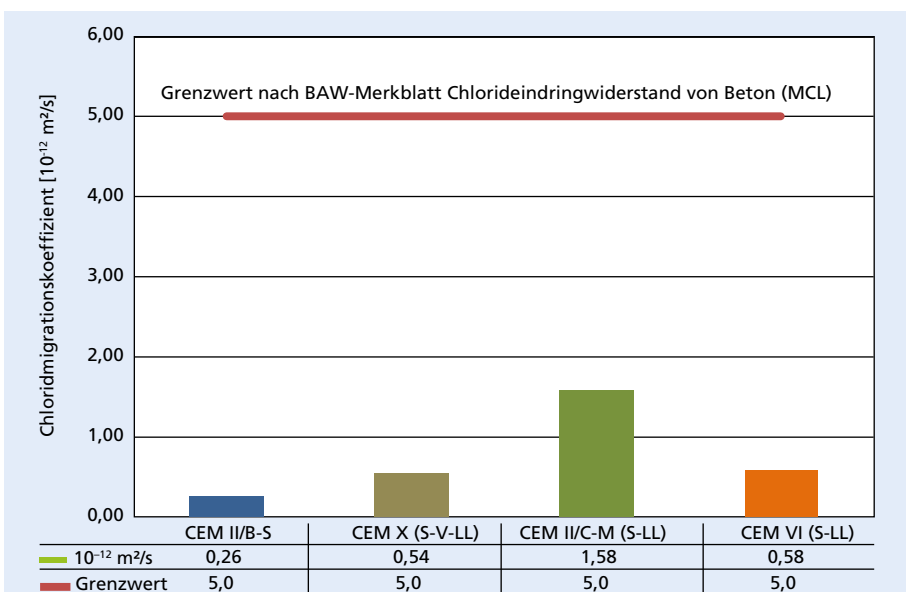


Bild 10: Ergebnisse der Chloridmigrationsprüfung (Prüfkörper: Feinkornmischung nach Tafel 2)

teil weist der als Basis verwendete Nanodur® (CEM II/B-S) auf. Die UHPC-Mischungen mit verminderter Klinkermenge haben einen signifikant höheren Anteil. Zudem verschiebt sich mit der Zunahme des Porenanteils das Maximum der Verteilung zu größeren Porendurchmessern. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus den CDF-Prüfungen zeigt eine Korrelation zwischen beiden Parametern: je geringer der Porenanteil umso geringer ist die Abwitterung.

Die Autoklavierung der Proben führt zu einer deutlichen Verminderung des Porenanteils und einer Verschiebung in den unteren Gelporen-Bereich von $< 10 \text{ nm}$. Hier sind keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den verschiedenen klinkerreduzierten UHPC-Mischungen erkennbar, deren Gelporenanteil sogar noch etwas geringer liegt als bei der Nanodur®-Mischung. Offenbar konnten trotz des geringen Wassergehalts ausreichend Hydratphasen-Neubildungen und Transformationen stattfinden, um das kompakte UHPC-Gefüge noch weiter zu verdichten.

2.4.2 Rasterelektronenmikroskopie

Für die rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurde ein Stereoscan 360 von Cambridge Instruments verwendet. Die Untersuchungen erfolgten an Leimproben im Sekundärelektronen-Modus. Die Teilproben wurden frisch gebrochen und die Oberfläche mit Platin besputtert.

Unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigen die UHPC-Mischungen mit Flugasche und Kalksteinmehl im Vergleich zu einem Normalbeton ein sehr dichtes Gefüge, in dem Hydratationsprodukte und unhydratisierte Phasen eine dichte strukturlöse Grundmasse bilden (Bild 12, oben). Einzelne Hydratphasen sind im REM nicht mehr erkennbar. Die oberflächlich hydratisierten Hüttensandpartikel sind eng mit der restlichen Bindemittelmatrix verbunden. Die Quarzmehlpartikel brechen in der wassergelagerten Probe glatt aus der Bindemittelmatrix heraus. Die autoklavierten Proben zeigen dagegen einen engen Verbund der Zementmatrix sowohl mit dem Hüttensand als auch mit den Quarzpartikeln (Bild 12, Mitte). Quarz und Hüttensand sind mit der Bindemittelmatrix kompakt verzahnt, da beim Autoklavierungsprozess trotz des geringen Wassergehalts eine weitere Reaktion mit der Bindemittelmatrix stattfand.

Bei der Steinkohlenflugasche bewirkte die Autoklavierung offenbar keine derartig intensive Verbesserung des Verbunds mit der Bindemittelmatrix, da hier die Flugaschepartikel meist genauso aus der Matrix herausbrachen wie bei den wassergelagerten Proben (s. Bild 12, unten). Allerdings waren Hydratationssäume auf den Oberflächen zu erkennen.

2.4.3 Röntgendiffraktometrie

Zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung wurden die Leimproben gemahlen und mittels Röntgendiffraktometrie untersucht. Dabei wurde ein Diffraktometer D4 der Fa. Bruker verwendet.

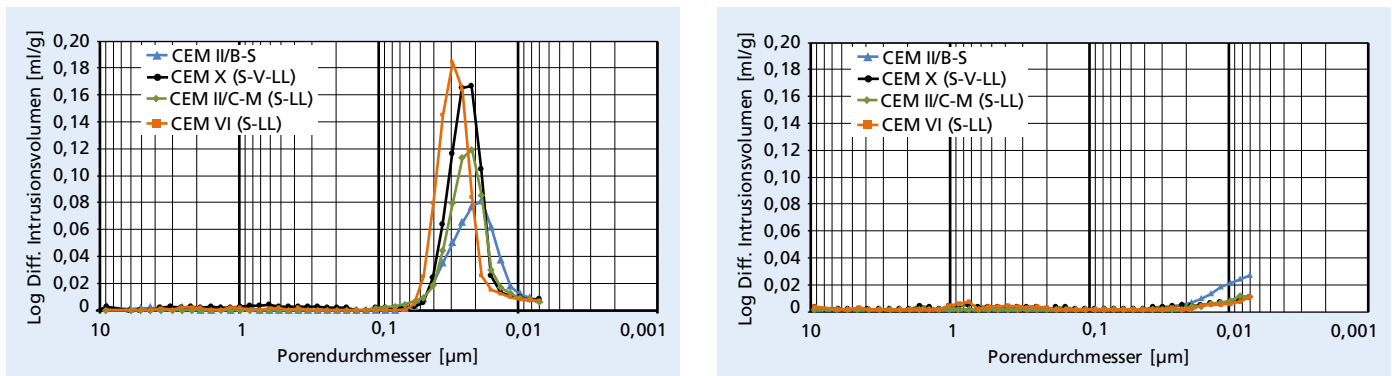


Bild 11 a und b: Porengrößenverteilung der UHPC-Leimprismen nach 28 Tagen Hydratation (links) und nach Autoklavierung (rechts)

In den 28 Tage hydratisierten Leimen bilden sich neben Ettringit auch die AFm-Phasen Monosulfat und Monocarbonat. Der Anteil an C-S-H-Phasen und die amorphen Anteile aus Hüttensand und Flugasche können nicht unterschieden werden.

Die Autoklavierung führt zur Umwandlung der Aluminate zu Hydrogranat C_3AH_6 .

Tobermorit oder Xonolit können entgegen der Untersuchungen von [6] in den hier untersuchten Bindemittelmischungen nicht nachgewiesen werden. Es bilden sich offensichtlich röntgenamorphe Silikathydrate. Deren Anteil steigt mehr oder weniger deutlich mit der Autoklavierung an. Nach [6] bilden sich trotzdem kristalline C-S-H-

Phasen, die eine eng vernetzte stabile Struktur erzeugen, die umso ausgeprägter ist, je höher die Autoklavierungstemperatur gewählt wird. Diese Kristalle waren jedoch erst im Transmissionselektronenmikroskop zu erkennen und hatten Größen von mehreren 10 bis 100 nm. Solch kleine Hydratphasen sind trotz Kristallstruktur im Diffraktometer nur als röntgenamorpher Anteil nachzuweisen.

Durch den geringen Wasseranteil sind in den untersuchten Materialien immer unhydratisierte Klinkerphasen zu erkennen, selbst nach der Autoklavierung. Hierbei reduzieren sich Restklinker und Quarzanteil durch eine weitere Hydratation, der Anteil an amorphen Phasen nimmt dagegen zu (Bild 13). Die Hydratation des Hüttensands kann mit dem Diffraktometer nicht erfasst werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die weiteren reaktiven Hauptbestandteile teilweise in C-S-H Phasen umwandeln und so den Zementstein verdichten. Das so entstandene Betongefüge unterscheidet sich bezüglich der mineralischen Zusammensetzung in keiner Weise vom Standardbeton – es hat nur eine höhere Verdichtung des Zementsteins durch Phasenumwandlungen stattgefunden. Unbekannte Risiken aus hoher Silikastaubdosierung, wie beim konventionellen UHPC ohne vollständigen Verlauf der puzzolanischen Reaktion, sind hier nicht gegeben.

3 Betrachtungen zur Nachhaltigkeit

Zur Betrachtung der Nachhaltigkeit der UHPCs wird zum einen das Treibhauspotenzial der getesteten Bindemittel herangezogen und zum anderen das Nachhaltigkeitspotenzial der Hochleistungsbetone abgeschätzt.

Bei modernen Hochleistungsbetonen trägt das zementäre Bindemittel bis zu 85 % zur CO_2 -Bilanz der Betone bei. Die restlichen 15 % entfallen im Wesentlichen auf die eingesetzten Hochleistungsfließmittel und den Materialtransport. Zur Verminderung des Treibhauspotenzials ist es daher naheliegend, den Anteil des Portlandzementklinkers im Hochleistungsbeton zu reduzieren. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass sich mit granulometrisch-nanotechnisch optimierten Bindemitteln unter Einsatz von hohen Anteilen an weiteren Hauptbestandteilen dauerhafte

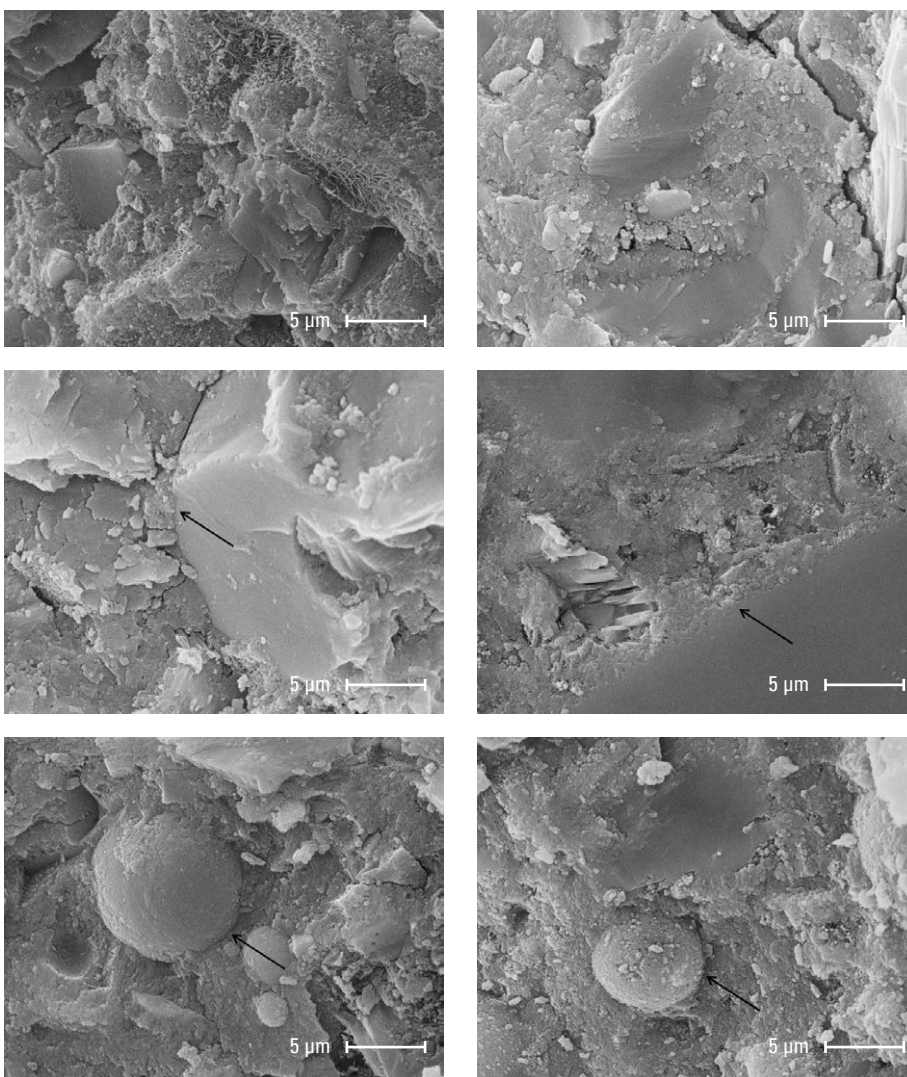


Bild 12: Rasterelektronenmikroskopie: obere Bildreihe: Vergleich von Normalbeton (links) mit Nanodur® (rechts) mittlere Bildreihe: Quarzkorn in 28 Tage hydratisierter (links) und autoklavierter Matrix (rechts) untere Bildreihe: Flugasche in 28 Tage hydratisierter (links) und autoklavierter Matrix (rechts)

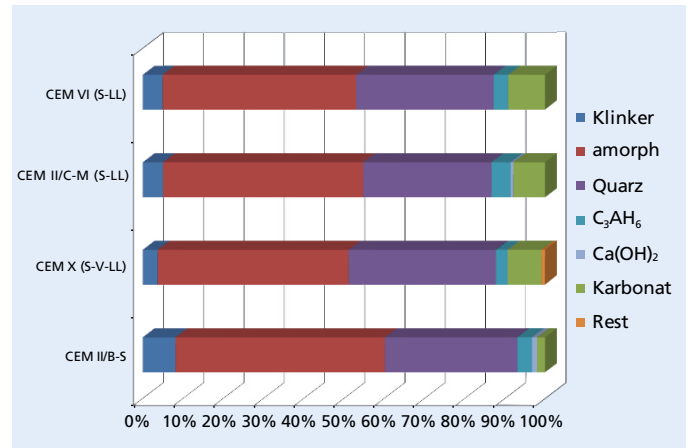
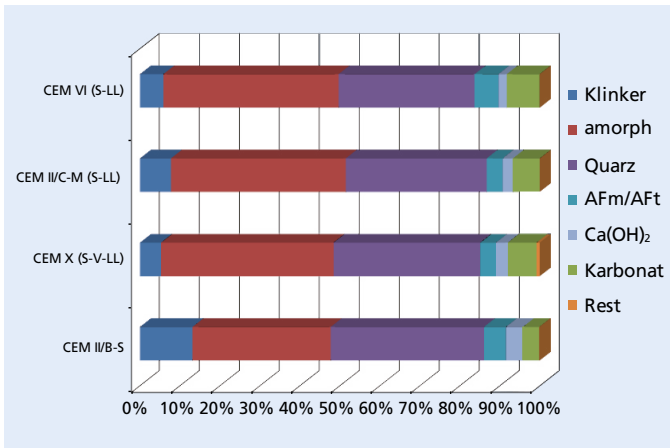


Bild 13: Mineralogische Zusammensetzung der Leimprismen a) nach 28 Tage Hydratation (links), b) nach Autoklavierung (rechts)

UHPCs mit Festigkeiten von 100 N/mm² bis 140 N/mm² herstellen lassen.

In allen drei Projekten wurden für die entwickelten Bindemittelkonzepte Ökobilanzen erstellt. Sie beziehen sich auf die Bereitstellung von 1 m³ Frischbeton im Werk. Als Referenzmischung dient eine hochfeste Betonzusammensetzung (C55/67) mit 475 kg/m³ CEM I 52,5 R und einem w/z-Wert von 0,40.

Bezogen auf das Referenzsystem zeigt ein Vergleich der Treibhauspotenziale der betrachteten Bindemittelsysteme Veränderungen von +10 % bis -20 % (Bild 14).

Dabei weisen die UHPC-Betone – aufgrund des hohen Bindemittelgehalts – generell höhere Treibhauspotenziale auf als herkömmliche Referenzbetone. Durch die Auswahl geeigneter weiterer Hauptbestandteile kann das CO₂-Äquivalent der Bindemittel jedoch gesenkt werden, ohne die Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betone zu verschlechtern.

Diese Betrachtung deckt jedoch nur einen Teilaspekt der Ökobilanz ab. Ein anderer Aspekt ist die Nachhaltigkeit der unterschiedlichen Bauweisen. Mit UHPC können wesentlich dauerhaftere und schlankere Bauteile produziert werden als mit Nor-

malbeton. Über den geringeren Materialverbrauch verringert sich das Treibhauspotenzial der UHPC-Bauweise gegenüber dem Referenzsystem z.T. erheblich. Damit verbessert sich zwangsläufig auch die Nachhaltigkeit.

Ein Ansatz zur Bewertung der Nachhaltigkeit auf der Baustoffebene wird in [13] beschrieben. Dieser Ansatz berücksichtigt neben der CO₂-Bilanz auch Faktoren wie Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der verwendeten Baustoffe.

In Anlehnung an [13] wird das Beton-Nachhaltigkeitspotenzial Ω nach folgender Gleichung vereinfacht aus der Lebensdauer der Betone, der Leistungsfähigkeit ausgedrückt als charakteristische Druckfestigkeit und dem Treibhauspotenzial (Global Warming Potenzial (GWP)) definiert:

$$\Omega = \frac{\text{Lebensdauer} \cdot \text{Leistungsfähigkeit}}{\text{GWP}}$$

Da die untersuchten Bindemittel in Hochleistungsmischungen geprüft wurden, weisen alle sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften auf (s. Abschnitt 2.3). In Übereinstimmung mit der Literatur wurde die

maximale Lebensdauer mit 200 Jahren angenommen. Als spezifisches Leistungsmerkmal der Bindemittelsysteme wurde die charakteristische Druckfestigkeit berücksichtigt. Bild 15 zeigt das Nachhaltigkeitspotenzial der UHPC-Betone mit den einzelnen Bindemittelvarianten im Vergleich zu einem Standardbeton mit CEM I 52,5 R. Gegenüber dem Standardbeton lässt sich das Nachhaltigkeitspotenzial um bis zu 40 % bis 65 % steigern.

Um dieses Potenzial für die Praxis nutzbar zu machen, ist jedoch eine bauaufsichtliche Regelung notwendig (s. Abschnitt 7.2). Bisher sind dazu zeit- und kostenintensive Zustimmungen im Einzelfall notwendig, welche Planer und Bauherren davon abhalten, die Vorteile der UHPC-Bauweise stärker in die Anwendung zu überführen.

4 Mischtechnik

Zur Aufbereitung von UHPC werden aufgrund einer Vielzahl mischtechnisch schwieriger Feinstbestandteile besonders scherintensive Hochleistungsmischer empfohlen. Nanodur® Compound 5941 wird bereits im Zementwerk in Hochleistungspulvermischern homogenisiert und erlaubt deshalb die zielsichere Herstellung von UHPC

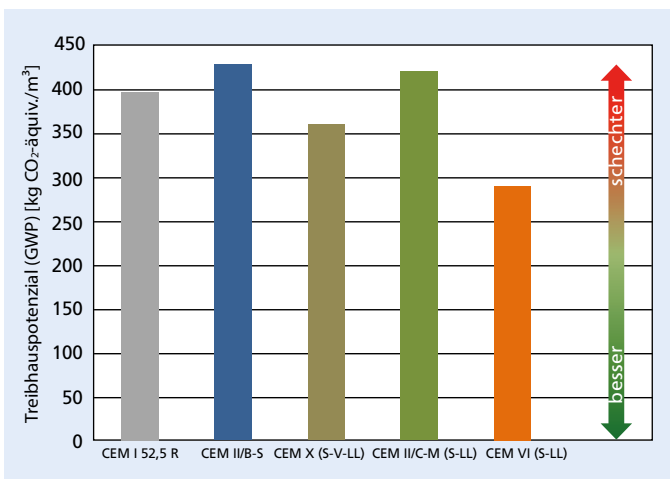


Bild 14: Treibhauspotenzial (GWP) der einzelnen Bindemittel, bezogen auf 1 m³ Beton

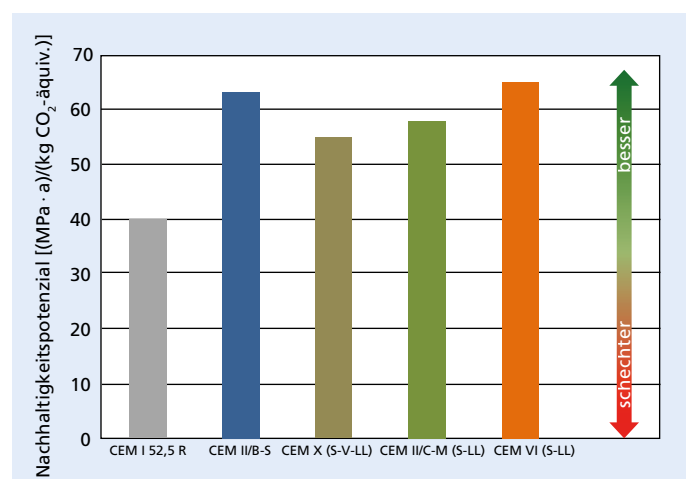


Bild 15: Nachhaltigkeitspotenzial der UHPC-Feinkornmischungen mit den einzelnen Bindemitteln im Vergleich zu einem Referenzbeton



Bild 16: Herstellung von UHPC mit Nanodur® Compound 5941 im Trommelmischer

in normalen Tellermischern. Dies zeigt im Vergleich zu üblichen UHPC-Anwendungen mit Silikastaub die ausgesprochene Anwenderfreundlichkeit der in den Projekten entwickelten UHPC-Konzepte. So kann z.B. der UHPC mit dem Nanodur® Compound 5941 auch in einfachen Trommelmischern hergestellt werden.

Für die Versuche kam Nanodur®-Beton mit 60 kg/m^3 Mikrostahlfasern zum Einsatz. Die Herstellung erfolgte im Trommelmischer (Bild 16). Zunächst wurden alle trockenen Ausgangsstoffe eine Minute vorgemischt. Anschließend wurde langsam die Wasser-PCE-Mischung zugegeben.

Je nach Auswahl der Hochleistungsfließmittel wird die gewohnte Konsistenz (Bild 17) nach 8 min Gesamtmischzeit (nass + trocken) erreicht. Die Frischbetontemperatur liegt zwischen $21,8 \text{ }^\circ\text{C}$ und $23,2 \text{ }^\circ\text{C}$ bei

einer Ausgangstemperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen liegen alle auf vergleichbarem Niveau (Tafel 3). Eine solche Verfahrensweise kann für Transportbeton im Falle größerer Mengen perspektivisch durchaus interessant sein, wobei dann das Material im Werk kurz homogenisiert und im Fahrmischer dann fertig gemischt wird. Für den Maschinenbau kann das insbesondere im Ausland eine interessante Alternative für kleinere Unternehmen sein, da marktübliche Trommelmischer mit Füllvolumina bis zu 320 l standardmäßig verfügbar sind.

5 Anwendungsbeispiele

5.1 Maschinenbau

Die Anfänge von Beton im Maschinenbau gehen auf das Jahr 1917 zurück, wo der Ingenieur Georg Schlesinger erstmals Gusseisen für Werkzeugmaschinengestelle durch zementgebundenen Beton ersetzte. Anwendungen in größerem Umfang gab es dann ab 1940, aber das Material konnte sich im Wesentlichen wegen hohen Verschleißes und fehlender Genauigkeit auf Dauer nicht durchsetzen. Attraktiv war aber grundsätzlich die bessere Dämpfung von massivem Beton gegenüber metallischen Werkstoffen. VDF Böhringer (heute MAG IAS GmbH) setzte in der 1980er Jahren dann einen B55 zur Herstellung von Bett-Unterteilen in Verbindung mit aufgeklebten Blöcken aus Gusseisen ein [14].

Mit Entwicklung des UHPC erfuhr der Beton eine Renaissance im Anwendungsgebiet Maschinenbau und substituiert seitdem den verbreiteten Polymerbeton oder „Mineralguss“. Gegenüber diesem reaktionsharzgebundenen Material, das in massiven Stahlformen verdichtet werden muss, genügen für selbstverdichtenden UHPC einfache Holzschalungen. Ein weiterer Vorteil ist die größere Formbeständigkeit in Bezug auf das Kriechen bei höheren Temperaturen. Wesentliche Anforderung bei der Herstellung von Maschinenbetten ist eine rissfreie Produktion großer Geometrien durch die hohe Zugfestigkeit des Zementsteins. Gefordert wird ein linear-elastisches Verhalten. Nach der Jahrtausendwende setzte die Homag Gruppe erstmals UHPC in größerem Maßstab als Bett für Holzbearbeitungsmaschinen ein (Bild 18).

Die UHPC Grobkornzusammensetzung mit Dyckerhoff Nanodur® Compound 5941 kam beim Spezialfertigteilwerk Sudholt-Wasemann 2010 erstmals in großem Maßstab zum Einsatz und ist bis heute unverändert:

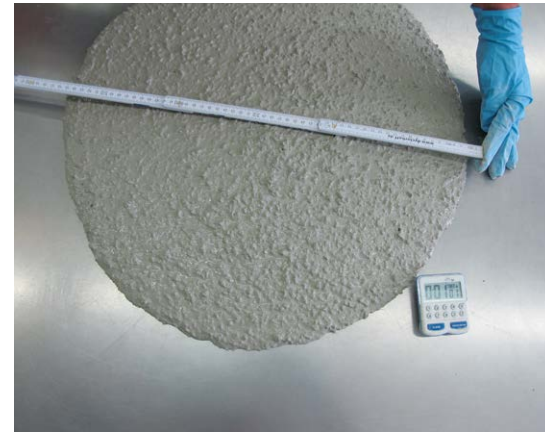


Bild 17: Ausbreitmaß des im Trommelmischer gemischten UHPC

- 1050 kg/m^3 Nanodur® Compound 5941
- 880 kg/m^3 Splitt 2/5
- 430 kg/m^3 Sand 0/2
- 158 kg/m^3 Wasser
- 15 kg/m^3 PCE
- 6 kg/m^3 Schwindreduzierer

Für die Bemessung wird eine Biegezugfestigkeit von 5 N/mm^2 zugrunde gelegt und bei der Produktionskontrolle an Prismen $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ sollen mindestens 15 N/mm^2 nach 7 Tagen erreicht werden.



Bild 18: Herstellung von Maschinenbetten für holzverarbeitende Maschinen; oben: UHPC Maschinenbett; unten: fertige Maschine

Tafel 3: Druckfestigkeiten der in unterschiedlichen Mixchern hergestellten UHPC-Prüfkörper nach Lagerung unter Wasser (Grobkornmischung nach Tafel 1 mit 60 kg/m^3 Mikrostahlfasern)

	Trommelmischer	Tellermischer
Mischdauer [min]	8	
Prismendruckfestigkeit nach 28 d [N/mm^2]	188,0	177,3
Würfeldruckfestigkeit nach 28 d [N/mm^2]	155,0	149,1



Bild 19: Portalfräsmaschine chinesischer Produktion (Fa. Yonghua, China, Fotos Rottler)

Die selbstverdichtende Betonmischung ist äußerst robust und kommt inzwischen bei verschiedenen Herstellern weltweit mit lokaler Gesteinskörnung erfolgreich zum Einsatz.

Neben der Homag Gruppe setzen heute Weltmarktführer von Werkzeugmaschinen aus der Metallbearbeitung UHPC als kostengünstigen und technisch sehr attraktiven Werkstoff ein. In China wurde 2016 ein neues Werk für die Produktion von Maschinenbetten aus Nanodur® UHPC eröffnet. Die ersten Elemente einer großen Portalfräsmaschine wurden allerdings in Deutschland bei Sudholt-Wasemann gefertigt (Bild 19).

Bei Austausch der Gesteinskörnungen Sand und Splitt in der zuvor beschriebenen Grobkornmischung durch industriell aufbereitetes getempertes Material lässt sich der ohnehin sehr hohe E-Modul des UHPC von rund 50000 N/mm² auf über 80000 N/mm² steigern und liegt damit über dem von Aluminium mit 70000 N/mm².

Besonders interessant sind diese Materialeigenschaften für Maschinenbauteile mit sehr hohen Anforderungen an Steifigkeit und Schwingungsdämpfung. Eine erste Anwendung war ein Messtisch mit einbetonierter Bearbeitungsfläche aus Edelstahl für

das spanische Forschungsinstitut Leit-IK4. Nanodur®-Beton E80 wurde in Verbindung mit der später noch beschriebenen Klebetechnik mit dem Innovationspreis der Zulieferindustrie 2016 der 60. Betontage in Neu-Ulm ausgezeichnet.

Nanodur® Compound 5941 ist mittlerweile in den Qualitätssicherungsplänen zahlreicher Werkzeugmaschinenbetten fest verankert und damit für die Lebensdauer der jeweiligen Modelle verbindlich. Grundsätzlich eignen sich für die Anwendung im Maschinenbau aber auch alle anderen zuvor beschriebenen Bindemittelkonzepte. Eine weitere Reduzierung des Portlandzementklinkers würde sich zudem positiv auf das für die Formstabilität von Maschinenbetten und die Positionierung von Einbauteilen entscheidende Schwinden des UHPC auswirken.

5.2 Fischzuchtbecken mit spezieller Klebetechnik

Ausgehend von dem Prototyp eines geklebten Bassins als Messexponat auf der EuroTier 2012 begann die Benno Drössler GmbH zusammen mit Green Aqua Farming GmbH mit der Entwicklung von Fischzuchtanlagen als modulare Konstruktion aus miteinander

verklebten UHPC Einzelementen in beliebiger Größe (Bild 20). In Grevesmühlen wurde dann erstmals eine doppelstöckige Garnelenzuchtanlage von 35 m Länge und 5 m Breite mit der zuvor beschriebenen UHPC Grobkornmischung mit Nanodur® Compound 5941 ausgeführt. Die Elemente mit nur 6 cm Wanddicke wurden ohne Bewehrung hergestellt – die unteren bereits mit integrierten Stützen für die oberen. Nach Positionierung der unteren Beckenelemente auf vorbereiteten Betonbalken wurden die oberen Elemente auf Trägern und Querriegeln aus hochfestem Normalbeton aufgelegt. Nach Abschluss der Montage erfolgte der Verschluss der Stöße durch Einkleben von Laschen mit Reaktionsharzklebstoff. Zur Abdichtung der Fugen zwischen Laschen und Beckenelementen kam ein hydraulischer Mörtel mit Trinkwasserzulassung zum Einsatz [15].

5.3 Konstruktive Brückenverstärkung

Auf Initiative der technischen Universität Graz wurde 2014 bei einem Pilotprojekt die Praxistauglichkeit einer Verstärkung von Brücken mit UHPC erfolgreich erprobt. 40 m³ UHPC mit Nanodur® Compound 5941 wurden in einem Transportbetonwerk aufbereitet und als Ort beton eingebaut. Ziel war eine Tragfähigkeitserhöhung mit gleichzeitiger Abdichtung als Ersatz für den bituminösen Belag (Bild 21). Anders als bei den zuvor beschriebenen Anwendungen kam hier nicht die selbstverdichtende Grobkornrezeptur zum Einsatz, sondern die Sieblinie musste für einen Einbau bei bis zu 4,5 % Gefälle optimiert werden.

- 950 kg/m³ Nanodur® Compound 5941
- 1420 kg/m³ Quarzsand 0,6/1,2 und Basaltdedelsplitt 2/4
- 90 kg/m³ Stahlfasern 13/20
- 146 kg/m³ Wasser
- 14 kg/m³ Fließmittel und Verzögerer

Mit dieser Mischung wurden an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge Druckfestigkeiten von 146 N/mm² nach 28 und 172 N/mm² nach 98 Tagen sowie eine Biegezugfestigkeit von 11,5 N/mm² an 150 mm × 150 mm × 700 mm Balken im 4-Punkt-Versuch erzielt. Der E-Modul erreichte 52000 N/mm² [16].



Bild 20: Fischzuchtbecken aus miteinander verklebten UHPC-Platten.





Bild 21: Arbeiten zur Brückenverstärkung mit UHPC an der Steinbachbrücke, Österreich

6 Schlussbetrachtung

6.1 Anwendung im konstruktiven Bau

Infolge notwendiger und sehr aufwändiger Zustimmungen im Einzelfall wird UHPC in Deutschland bislang kaum als konstruktiver Werkstoff eingesetzt, obwohl er bei langfristiger Betrachtungsweise insbesondere aufgrund seiner hohen Dauerhaftigkeit auch wirtschaftlich sehr interessant wäre. So sind derzeit nur Sonderanwendungen auf Basis der speziellen Eigenschaften des UHPC wirtschaftlich umsetzbar.

6.2 Normung – Überwachung für Normbezeichnung

Nach geltenden Normen enden die Festigkeitsklassen bei einem C100/115, wobei nur bis zum C80/95 ohne zeit- und kostenaufwändige Zustimmung im Einzelfall gearbeitet werden darf. UHPC ist also aktuell nicht bauaufsichtlich geregelt und die Erarbeitung der Richtlinie des DAfStb noch nicht abgeschlossen.

Auf der Bindemittelseite sind Compounds aus Zement und feiner Gesteinskörnung ebenfalls nicht geregelt und leider gibt es dazu aktuell auch keine Ansätze. Dies wäre allerdings dringend erforderlich, denn nur mit trockener Aufbereitung in Intensivmischern im Zementwerk kann die homogene Verteilung der für UHPC unverzichtbaren Feinbestandteile zielsicher erreicht werden, ohne in der späteren Nassbetonmischung auf spezielle Mischtechnik angewiesen zu sein. Bei der Qualitätssicherung im Maschinenbau wird seit 2010 die Prüfung des Nanodur® Compounds 5941 als Zement nach EN 196 bei w/z 0,5 mit Normsand erfolgreich praktiziert. Die Festigkeitsvorgaben von 15 N/mm² nach 2 Tagen und 40 N/mm² nach 28 Tagen werden mit dem „Mörtel“ aus 59 M.-% Zement und 41 M.-% Quarzfeinsand zielsicher eingehalten. Die Festigkeiten der UHPC-Grobkornmischung an Prismen mit den Abmessungen 4 cm × 4 cm × 16 cm nach 7 Tagen liegen immer oberhalb von 15 N/mm² Biegezug- und 120 N/mm² Druckfestigkeit bei E-Moduln von mehr als 45000 N/mm².

Für UHPC mit extrem dichtem Gefüge und der nachweislich höheren Qualität

gegenüber Normalbeton sollten diese Parameter zur Überwachung eigentlich ausreichen und so die Einführung dieses neuen Werkstoffs erleichtern. Im Falle von Nanodur® Compound 5941 und den in den Projekten erarbeiteten Bindemittelkonzepten werden ausschließlich langjährig bewährte Zementhauptbestandteile eingesetzt. Die synthetischen Oxide werden nur in der frühen Erhärtungsphase zur Hydratationssteuerung der Feinstzementkomponenten zur Erzielung einer dichten Packung verwendet.

Alle zuvor beschriebenen Zemente bzw. Zementanteile in den Compounds sind nach dem Entwurf prEN197-1:2014(D) [17] normfähig:

- Nanodur® Compound 5941 als CEM II/B-S 52,5
- TP H-House Compound 5941 als CEM II/C-M (S-LL) 52,5
- C³ BMK-D5-1 als CEM VI (S-LL) 52,5 (C³-Projekt)

Diese Produkte werden aufgrund ihrer durch die Herstellung bedingten hohen Preise und besonderen Eigenschaften aber nur bei außergewöhnlichen Anforderungen im Objektgeschäft eingesetzt. Da es sich um Mischprodukte handelt, erfolgt die Herstellung immer erst direkt bei Abholung und es existiert keine Vorhaltung im Silo. Die notwendige Überwachung kann ohne größeren Aufwand also nur bei laufendem Versand erfolgen. Zur ständigen Aufrechterhaltung der Normbezeichnung muss aber fortlaufend überwacht werden.

Damit ist nachvollziehbar, dass die technisch mögliche Anmeldung von Normzeichnungen für neue Produkte mit anfangs sehr geringen Versandmengen für den Hersteller nicht interessant ist. Allerdings gibt es ohne Normbezeichnung kein Einsatz im bauaufsichtlich relevanten Bereich. Dies ist eine zusätzliche Hürde beim Einsatz im bauaufsichtlich ebenfalls unregulierten Hochleistungsbeton. Hier besteht dringend Handlungsbedarf, um die mit hohem finanziellem Aufwand seitens der öffentlichen Fördergeldgeber und der Industrie entwickelten Hochleistungswerkstoffe schnell in die Anwendung zu bringen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projektes OLAF (FKZ 03X0066A) und des C³-Basisprojektes B2 (FKZ 03ZZ0303E) sowie bei der EU-Kommission im Rahmen des Projektes H-House (GA 608893).

Literatur

- [1] Schmidt, M. et al.: Forschungsbericht DFG FE 497/1-1. Unidruckerei der Universität Kassel, Kassel 2005.
- [2] Sachstandsbericht „Ultrahochfester Beton“. DAfStb Heft 561, Berlin 2008.
- [3] Alßbrock, O.; Böing, R.; Rothenbacher, W.; Stein, K.; Winzer, R.: Praxistest ultrahochfester Beton im Transportbetonwerk. beton 63 (2013) H. 6, S. 226–231.
- [4] Deuse, Th.; Mutke, S.; Parker, F.; Quaschnig, D.; Wulff, M.: Nanotechnisch optimierte Bindemittel für die Herstellung von anwendungsfreundlichem Hochleistungs-beton; Teil 1. beton 68 (2018) H. 6, S. 210–219.
- [5] Fontana, P. et al.: Wärmebehandlung und Autoklavierung von UHPC. Betonwerk und Fertigteiltechnik (2011) H. 10.
- [6] Lehmann, Chr. Neue Perspektiven für Ultra-Hochleistungs-beton durch gezielte Beeinflussung des Nanogefüges. Technische Universität Berlin, Berlin 2013.
- [7] OLAF: Abschlussbericht BMBF Projekt OLAF (FKZ 03X0066B Evonik). TIB-Hannover, Hannover 2012.
- [8] Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB). Bundesamt für Wasserbau, Karlsruhe 2012.
- [9] Ausführungsvorschriften zu §7 des Berliner Straßengesetzes über Geh- und Radwege. Amtsblatt für Berlin Heft 25, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Berlin 2013.
- [10] Alkaysi, M. et al.: Effects of silica powder and cement type on durability of ultra high performance concrete (UHPC). Cement and Concrete Composites 66 (2016.)
- [11] Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2012.
- [12] Piérard, J. et al.: Durability Evaluation of Different Types of UHPC. Proceedings of the Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete. Marseille, 2013.
- [13] Haist, M. et al.: Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), H. 10.
- [14] Sagmeister, B.: Maschinenteile aus zementgebundenen Beton. Beuth Verlag, Berlin 2017.
- [15] Deuse, Th. et al.: Hochleistungsbeton mit Klebeverbindung. Betonwerk International (2014) H. 6.
- [16] Hadi, P. et al.: Anwendung von UHPC als direkter befahrener Aufbeton bei der Integralisierung eines bestehenden Brückenbauwerks in Österreich. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015) H. 2.
- [17] Entwurf DIN EN 197-1:2014-07 „Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“ Beuth Verlag, Berlin 2014.