

ZUSAMMENFASSUNG ZUR DISSERTATION

# **Ultrahochfester Beton – Hydratation, Gefügeentwicklung und Dauerhaftigkeit**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaft (Dr. rer.nat.)

am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde an der  
Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

**Claudia Pfeifer**

(interner Doktorand)

Mentor: Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark

Blaustein, 29.03.2015

## **Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit**

1. Die kontinuierlichen Weiterentwicklungen der Betontechnologie bringen mit Ultrahochfesten Beton (UHFB; engl. Ultra-High Performance Concrete) eine neue Klasse von Betonen hervor. In Deutschland ist die Anwendung von UHFB noch nicht in technischen Richtlinien erfasst, weshalb im Falle einer Anwendung eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich ist. Zur Erstellung eines Regelwerks sind u.a. stoffliche Kenntnisse über den Werkstoff UHFB notwendig. Das übergreifende Ziel der Arbeit ist es, ein grundlegendes Verständnis für die chemischen, physikalischen und mikrostrukturellen Prozesse von der Hydratation bis zur Dauerhaftigkeit zu erhalten.
2. Die charakteristischen Eigenschaften von UHFB lassen sich auf folgende drei materialtechnologische Entwicklungen zurückführen: eine optimierte dichte Kornpackung, einen sehr niedrigen Wasser-Zement Wert (w/z-Wert) sowie dem Einsatz von hochfeinen mineralischen Feinstoffen (Silicastaub) und hochwirksamen Fließmitteln. Noch ist nicht umfassend geklärt, in welchem Umfang Wechselwirkungen zwischen Zement, Betonzusatzstoffen und Fließmitteln bei extrem niedrigen w/z-Werten auftreten. Eines der Hauptziele der Arbeit ist es deshalb, die komplexen Hydratations- und Reaktionsvorgänge im Frischbeton (Zeitraum <24 Stunden) zu verstehen.
3. Eines der Hauptkennzeichen von UHFB ist ein extrem dichtes Gefüge. Welche Nano- und Mikrostruktur sich im erhärteten Festbeton ausbildet und wie sich eine Wärmebehandlung auf die Mikrostruktur und den mineralogischen Phasenbestand von UHFB auswirkt, sind Fragen, denen im Rahmen dieser Arbeit nachgegangen wird.
4. Ebenso besteht Unklarheit darüber, welche strukturellen Veränderungen im Festbeton und an Stahlfasern auftreten, wenn Fluide durch Mikrorisse in den Festbeton eindringen. Auch ist nicht bekannt, welche Auswirkungen Risse und die Penetration von Fluiden auf die Dauerhaftigkeit von UHFB haben.
5. Der Zementgehalt im UHFB ist gegenüber konventionellen Betonen um das 2- bis 3-fache höher. Ein partieller Austausch von Zement mit weniger energieintensiven Materialien (z.B. Hüttensand) ist von zentraler Notwendigkeit, um die Nachhaltigkeit von UHFB weiter zu verbessern. Allerdings fehlt bislang eine gezielte Betrachtung der latent hydraulischen sowie der puzzolanischen Reaktionsvorgänge bei sehr niedrigen w/z-Werten. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde der Hydratationsgrad von Hüttensandmehl bzw. Reaktionsgrad von Silicatstaub bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen analysiert. Auch besteht noch Unklarheit darüber, wie diese Materialien bzw. ihre Hydratationsprodukte die Struktur des Festbetons beeinflussen.

## **Stand der Wissenschaft**

6. UHFB zeichnet sich gegenüber Normal- und Hochfestenbeton durch ein extrem dichtes Gefüge, sehr gute mechanische Eigenschaften sowie verbesserte Dauerhaftigkeit aus. Dies ist auf eine stark verminderte Kapillarporosität zurückzuführen, welche maßgeblich durch einen sehr geringen Wasser-Zement Wert (<0,25) erzielt wird. Auf-

grund des geringen Wassergehaltes liegen im erhärteten Beton noch große Mengen an unreaktierten Klinkerbestandteilen vor.

7. Im UHFB werden hohe Anteile an reaktiven Feinstoffen wie Silicastaub eingesetzt. Sie wirken als Füllstoffe im Feinstkornbereich bzw. bilden zusammen mit Calciumhydroxid zusätzliche festigkeitsbildende C-S-H Phasen. Nach jetzigem Kenntnisstand ist die puzzolanische Reaktion im UHFB ein äußerst langsamer Prozess mit nur geringem Reaktionsumsatz.
8. Der Widerstand von UHFB wird nach bisherigem Kenntnisstand aufgrund der geringen Porosität und dem damit einhergehenden dichten Gefüge gegenüber schädigenden Gasen und Flüssigkeiten als hoch angesehen. Bislang beschränken sich die Untersuchungen mehrheitlich auf die Auswirkungen an der Betonoberfläche. Der Einfluss klimatischer Beanspruchung auf die Dauerhaftigkeit von UHFB wurde bisher nicht betrachtet.

### **Eingesetzte Methoden**

9. Im ersten Untersuchungsteil wurde die frühe Hydratation von UHFB <24 Stunden untersucht. Der Einfluss von Betonzusatzstoffen und Fließmitteln auf den Hydratationsverlauf, d.h. Hydratationskinetik, wurde mittels isothermer WärmeleitungsKalorimetrie erfasst. Die Beschreibung der frühen Hydratation sowie die Ausbildung des Mikrogefüges erfolgte anhand eines unter atmosphärischen Bedingungen arbeitenden Rasterelektronenmikroskops (ESEM).
10. Im zweite Untersuchungsteil wurde die Mikrostruktur von UHFB >24 Stunden untersucht. Das Mikrogefüge im Festbeton sowie die Auswirkungen einer Warmbehandlung auf die Mikrostruktur wurden mittels ultrahochauflösender Rasterelektronenmikroskopie (NovaNanoSEM 230, FEI) charakterisiert. Zusätzlich wurde energie-dispersive Röntgenspektroskopie zur Phasenidentifikation und digitale Bildanalyse zur quantitativen Bestimmung des unhydratisierten Klinkerphasengehalts bzw. des Porenraums eingesetzt. Begleitend dazu wurden röntgendiffraktometrische Untersuchungen durchgeführt.
11. Im dritten Untersuchungsteil wurde den puzzolanischen und latent hydraulischen Reaktionen im UHFB nachgegangen. Zur Quantifizierung des Reaktionsgrads von Silicastaub bzw. des Hydratationsgrads von Hüttensandmehl wurden selektive Lösungsverfahren auf Basis von Salpetersäure bzw. Ethylendiamintetraacetat angewendet. Außerdem kamen rasterelektronenmikroskopische, mineralogische und dynamisch thermische Analysen zum Einsatz.
12. Im vierten Untersuchungsteil wurde das Langzeitverhalten von UHFB unter wechselnden klimatischen Bedingungen in einer Klimasimulationskammer untersucht. Die Mikrostruktur von UHFB wurde mittels rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen auf strukturelle Veränderungen überprüft.

## Wesentliche Ergebnisse

13. Abweichend zur Hydratation im Normalbeton weisen die Hydratphasen im UHFB eine stark verringerte Kristallgröße auf, was auf den signifikant verminderten Wassergehalt im UHFB sowie Packungsdichte zurückzuführen ist (28d: Ettringit max. 600 nm, C-S-H ~300 nm).
14. Die hohen Festigkeiten im UHFB werden aus einer Kombination von hoher Packungsdichte, extrem starker Verzahnung der kurzadeligen C-S-H Phasen in den Nanozwischenräumen und einem nahezu kapillarporenfreien Gefüge erzeugt. Im Normalbeton werden die Festbetoneigenschaften im Wesentlichen durch die Verzahnung der spitzadeligen, büschelförmigen C-S-H Phasen hervorgerufen.
15. Anders als im Normalbeton ist die Bruchausbreitung im UHFB intragranular. Hollow shells lassen sich erstmals in dieser Deutlichkeit im jungen Zementstein an Bruchflächen abbilden. Bruchflächen quer durch hydratisierende Klinkerkörner lassen den Schluss zu, dass es sich bei den als „inner product“ bezeichneten inneren C-S-H Phasen um eine Lösungsstruktur des hydratisierenden Klinkerkorns handelt.
16. Bei geringen w/z-Werten wird die puzzolanische Reaktion im UHFB maßgeblich von den Lagerungsbedingungen beeinflusst. Eine Wärmebehandlung beschleunigt die puzzolanische Reaktion sowie die Zementhydratation signifikant und erzeugt gleichzeitig ein dichtes Gefüge in der Bindemittelmatrix. Die Abdichtung des Gefüges sowie ein Wassermangel unterbinden einen weiteren Ablauf der puzzolanischen Reaktion und Zementhydratation.
17. Im Fall von Hüttensandmehl bewirkt die Wärmebehandlung eine vorzeitige Beendigung der latent hydraulischen Reaktion. Durch die beschleunigte Hydratation des Portlandzementes wird das Wasser stark gebunden und steht der langsamer ablaufenden latent hydraulischen Reaktion nicht mehr zur Verfügung.
18. Durch Anwendung eines ultrahochauflösenden Rasterelektronenmikroskops ist es erstmals in dieser Deutlichkeit gelungen, im UHFB die Lösungsstrukturen von Silicastaubpartikel in Folge der puzzolanischen Reaktion zu visualisieren.
19. Vorsätzlich eingebrachte Mikrorisse erzeugten nach wechselnder Trocknung, Durchfeuchtung sowie Frost- und Tauwechseln keine gesteigerte Durchlässigkeit des Betons. Vielmehr wurde bei Rissweiten von  $> 10 \mu\text{m}$  eine nahezu vollständige Verfüllung bzw. Ausheilung der Mikrorisse durch Calciumcarbonat beobachtet.
20. Auch Portlandzemente mit üblichen  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalten zeigen keine negativen Folgen für die Dauerhaftigkeit von UHFB. Schwierig ist deren Einsatz hinsichtlich des Erzielens einer zufrieden stellenden Verflüssigung und ausreichenden Verarbeitung.
21. Abschließend bleibt festzuhalten, dass UHFB eine hohe Beständigkeit gegenüber wechselnden klimatischen Bedingungen aufweisen und nur in oberflächennahen Bereichen geringfügige Veränderungen des Gefüges durch Reaktionsprodukte der Stahlfaserkorrosion festgestellt wurden.