

# Eigenschaften von wärmebehandeltem ultra-hochfestem Beton (UHPC)

## Motivation

Ultrahochfester Beton (UHPC) zeichnet sich im Vergleich zum Normalbeton durch eine stark erhöhte Druckfestigkeit aus (> 150 MPa). Diese aus dem besonders dichten Betongefüge resultierende Eigenschaft wirkt sich darüber hinaus auch auf den Widerstand und die Dauerhaftigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen, wie z. B. Feuchte, Salzlösungen, Karbonatisierung, Frost, etc. aus. Durch eine geeignete Wärmebehandlung lassen sich die Eigenschaften von UHPC weiter optimieren, da hierdurch das Materialgefüge und die Phasenzusammensetzung positiv beeinflusst werden können.

Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss einer Wärmebehandlung bei kontrollierten und variierbaren Druckbedingungen auf die Betoneigenschaften zu klären. Hierzu wird die Festigkeit, die Phasenentwicklung und das Gefüge verfolgt. Aus den Ergebnissen lassen sich Rückschlüsse zu den entsprechenden Materialeigenschaften unter den gewählten Erhärtungsbedingungen machen und somit die Mischungszusammensetzung und die Erhärtungsbedingungen optimieren.

## Methodischer Ansatz

- Herstellung verschiedener Mischungen und Probekörpergeometrien
- Erhärtung bei 20 °C (28 d), 90 °C (2 d) und 250 °C (2 d)
- Bestimmung der mechanischen Kennwerte nach Ablauf des Erhärtungszeitraums: Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und E-Modul
- Analyse des Mikrogefüges und der Phasenzusammensetzung mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM), Focused Ion Beam (FIB)/ Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) und Röntgendiffraktometrie (XRD)

## Rezepturentwicklung

Die Rezepturen für UHPC unterscheiden sich deutlich von Normalbetonmischungen. Hierbei werden in Weiterführung der klassischen Bontechnologie, analog zu den Gesteinskörnungskurven nach Fuller, für die Mehlkorndfraktion Optimierungskurven angestrebt, die einen von 0,5 abweichenden Exponenten haben. Über Modifikationen der Andreasen-Gleichung (1) z. B. nach der Gleichung von Dinger/Funk (2) mit variierenden Exponenten zur Erzielung möglichst dichter Kompaktionen, wurden Versuchsmischungen erstellt (Tab. 1). Als Hochleistungsverflüssiger kommt ein Polycarboxylatether (PCE) zum Einsatz.

$$K_{PD} = \left( \frac{D}{D_G} \right)^n \cdot 100 \quad (1)$$

K<sub>PD</sub> = Kumulierter prozentualer Durchgang  
D = betrachteter Durchmesser  
D<sub>G</sub> = Größtkorndurchmesser  
D<sub>K</sub> = Kleinstkorndurchmesser  
n = Verteilungsmodul

$$K_{PD} = \left( \frac{D^n - D_K^n}{D_G^n - D_K^n} \right) \cdot 100 \quad (2)$$

## Vorläufige Ergebnisse

- Der UHPC hat bei moderaten Zementgehalten von max. 500 kg/m<sup>3</sup> nach 2 d Wärmebehandlung bei 250 °C Druckfestigkeiten bis 200 MPa
- Die Probekörpergeometrie und Größe der untersuchten Proben hat keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit
- Der bei 250 °C erhärtete UHPC zeigt im Vergleich zu den bei 20 und 90 °C behandelten Proben ein besonders dichtes Zementsteingefüge
- Im UHPC (250 °C) wurde Calciumhydroxid vollständig aufgebraucht; die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der CSH-Phasen sind damit bei diesen Proben deutlich niedriger als bei den bei 20 °C erhärteten
- Im UHPC (250 °C) wurde Xonotlit als kristallines Reaktionsprodukt durch XRD und Elektronenbeugung nachgewiesen

## Schlussfolgerungen und Ausblicke

- Die Wärmebehandlung von UHPC kann die Druckfestigkeit wesentlich erhöhen. Die Optimierung dieses Prozesses z. B. bei erhöhten Drücken erzeugt vollkommen neue Phasenzusammensetzungen mit besseren Materialeigenschaften
- Die Wärmebehandlung bei hohen Wasserdampfdrücken ist geplant, da hier weitere Gefügeeekte zu erwarten sind

		Mischung 1	Mischung 2	Mischung 3
Sand 0 - 2 mm	kg/m <sup>3</sup>	1447	1408	1550
Zement		448	425	500
Mikrosilica		146	79	150
Quarzmehl		274	355	330
Wasser		123	116	144
FM		30	58	28
w/z	-	0,32	0,37	0,38
w/b	-	0,24	0,31	0,30
Leimgehalt < 125 µm	M.-%	45,6	44,3	46,4

Tab. 1: Mischungsentwurf für die untersuchten UHPC.

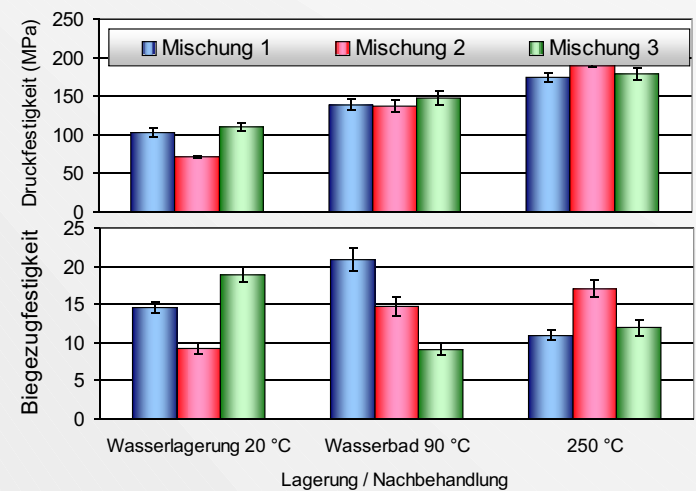


Abb. 1: Die Wärmebehandlung erhöht signifikant die Druckfestigkeit (für 250 °C). Die Biegezugfestigkeit wird durch die Wärmebehandlung (250 °C) i. A. verschlechtert.

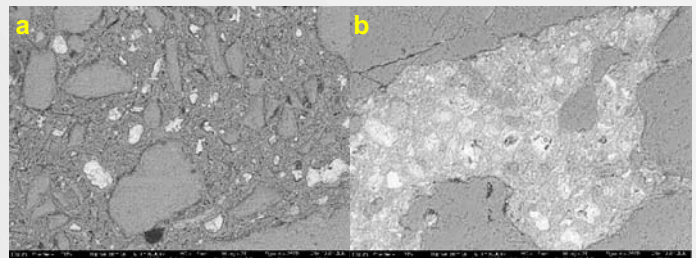


Abb. 2: Vergleich der Zementsteingefüge im REM normalerhärtet (20 °C) Bild (a) und wärmebehandelt (250 °C) Bild (b). Eine deutlich dichtere Gefügeausbildung für Bild (b) 250 °C ist am geringen Anteil an dunklen Bestandteilen zu erkennen. Calciumhydroxid ist hier vollständig aufgebraucht.

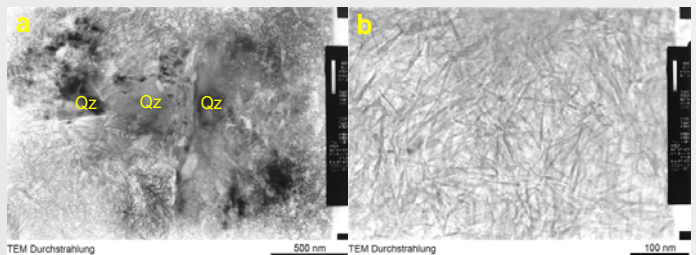


Abb. 3: Mikrogefüge des Zementsteins unter dem TEM. Bild (a) Übersicht über einen Bereich mit Quarz-partikel (Qz). Bild (b) ist ein Ausschnittsdetail aus Bild (a). Sichtbar sind einzelne Fasern von CSH-Phasen.