

Einfluss der Herstellungstechnik auf die Wirtschaftlichkeit von UHPC unter Verwendung eines Pre-Pact Verfahrens

Sieglinde Krieger, Sandra Ofner und Martin Schneider

FH Kärnten

Abstract. UHPC ist ein innovativer Baustoff im Massivbau, der eine vielfach höhere Betondruckfestigkeit von Normalbeton aufweist (>150 MPa). Diese Tatsache ist auf eine wesentlich feinere Mischungszusammensetzung zurückzuführen, mit welcher eine sehr hohe Packungsdichte erreicht wird. Durch seine nahezu Kapillarporenfreie Struktur weist UHPC eine hohe Resistenz gegenüber Chlorideindringung und Tausalzbelastung auf, wodurch eine bis zu fünffach höhere Dauerhaftigkeit gegenüber Normalbeton erzielt werden kann. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit ist es möglich Querschnitte schlanker auszuführen und somit Betonvolumina zu reduzieren. Berücksichtigt man die Einsparung von Beton und die erhöhte Dauerhaftigkeit ergibt sich bei Verwendung von UHPC eine geringere ökologische Belastung für die Umwelt [1].

Jedoch ist zu erwähnen dass die UHPC Mischung um ein vielfaches teurer ist als Normalbeton. Anhand der vorliegenden Arbeit werden nun Ergebnisse zu Betrachtungen hinsichtlich des größtmöglichen Austausches von Gesteinskörnungen in der UHPC Mischung aufgezeigt. Diese untersuchen verschiedene Einbringungsvarianten der Betonmatrix mit unterschiedlichen Substitutionsmaterialien bis hin zu simulierten Bauteilverhalten unter Biegebeanspruchung. Zudem werden die Kosten der Mischungen mit den substituierten Gesteinskörnungen der Referenzmischung ohne Substitution gegenüber gestellt [2], [3].

Keywords: UHPC, Pre-Pact Verfahren, Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit

1 Einleitung

In der EU verursacht die Bauindustrie rd. 40 % des totalen Energieverbrauchs [4], wobei in Mitteleuropa sogar ca. 70 % des Materialflusses dem Bausektor zugeschrieben werden [5]. Bei der Betrachtung dieser Fakten zeigt sich eindeutig, wie wichtig es ist, das Thema Nachhaltigkeit in der Bauindustrie immer mehr an Bedeutung zu zuschreiben. Noch gravierender zeigt sich dies in der Tatsache, dass der weltweite Materialfluss an Beton bei rund 25 Gewichtsteilen und der Zementverbrauch hierbei bei etwa 3,6 Gewichtsteilen liegt, sowie dass die Zementindustrie jährlich bis zu 5 % wächst [3], [4].

2 UHPC

UHPC ist ein innovativer Baustoff im Massivbau, der eine vielfach höhere Betondruckfestigkeit von Normalbeton aufweist (>150 MPa) [6]. Dies wird u.a. durch eine korn- und bindemitteloptimierte, meist feinere Mischungszusammensetzung erzeugt (unter anderem Zement, Mikrosilika und Quarzmehl [1]), mit welcher eine sehr hohe Packungsdichte erreicht wird. Weiterhin bilden betontechnologische Maßnahmen die Grundlage, um eine Verarbeitbarkeit dieses High-Tech Produktes bei extrem niedrigem Wasser/Bindemittelwerte und Wasser/Mehlkorngehalt zu gewährleisten. Die Summe dieser Maßnahmen sorgt im Endeffekt für ein extrem dichtes und festes Betongefüge im erhärteten Zustand. Durch seine nahezu kapillarporenfreie Struktur weist UHPC eine hohe Resistenz gegenüber Chlorideindringung und Tausalzbelastung auf, wodurch eine bis zu 5-fach höhere Dauerhaftigkeit gegenüber Normalbeton erzielt werden kann [7]. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit ist es möglich Querschnitte schlanker auszuführen und somit Betonvolumina zu reduzieren. Berücksichtigt man die Einsparung von Beton und die erhöhte Dauerhaftigkeit ergibt sich bei Verwendung von UHPC eine geringere ökologische Belastung für die Umwelt [1], [8]. Der Nachteil der hohen Druckfestigkeit ist das spröde Verhalten der Betonmatrix unter Belastung. Dafür werden Stahlfasern in die Mischung eingebracht und das Material wird somit duktiler und kann Zugspannungen abtragen [9]. Die Produktionskosten von UHPC sind im Vergleich zu NSC 8-fach höher [2].

3 Substitution der UHPC-Matrix durch Gesteinskörnungen

Das Prinzip der Substitution der UHPC Matrix durch Gesteinskörnung beruht auf der homogenen Verteilung des UHPC-Mörtels im Beton, welcher somit an jeder Stelle durch gleich oder höherwertiges Grobkornmaterial ausgetauscht werden kann. Ausgewählt wurden hierbei die in Table 1 aufgelisteten Gesteinssorten mit den zugehörigen Eigenschaften.

Table 1. Gesteinseigenschaften für Basalt 2/4, Basalt 4/8 und Diabas 8/16

Eigenschaft	Splitt 2/4 Basalt	Splitt 4/8 Basalt	Splitt 8/16 Diabas
Rohdichte [g/cm ³]	2,90-3,05	2,90-3,05	2,80-2,90
Druckfestigkeit [MPa]	250-400	250-400	180-250
Wasseraufnahme [%]	0,9	0,9	0,9

3.1 Vorversuche hinsichtlich der zu erreichenden Druckfestigkeit

Der gesamte Prüfplan umfasste insgesamt 18 Mischungsvariationen. In vorliegender Arbeit werden auszugsweise 7 Mischungen aufgezeigt und verglichen siehe Table 2. In den Mischungsvariationen Bas. 3-6 wurden die Mischungen hinsichtlich der erreichten Druckfestigkeit sowie Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß) verglichen, dabei ist ersichtlich, dass bei allen vier Variationen ein ausreichendes Ausbreitmaß rund 30 cm

erreicht werden kann, jedoch wurde bei der Substitution von 100 l mit Basalt 4/8 mm in Kombination mit 2 % Stahlfasern eine Separierung der Gesteinskörnung von der umgebenen Betonmatrix bei Zugabe von Fließmittel beobachtet. Die Mischungen Pre. 2-4 untersuchen das Einsatzgebiet von Substitutionsgemischen in der Fertigteile Industrie. Wie in Table 2 ersichtlich wurden hierbei keine Stahlfasern beigemischt, sondern es wird davon ausgegangen, dass der UHPC mit normaler Stahlbewehrung kombiniert wird (Mindestbewehrung 4 % des Bauteilquerschnittes). Die Einbringung erfolgte hierbei schichtweise, wobei immer zuerst das Substitutionsgestein eingebracht und anschließend von UHPC Matrix umhüllt wurde. Pre. 2 wurde in zwei Schichten, Pre. 3 in drei Schichten und Pre. 4 in einer Schicht betonierte.

Table 2. Betonrezeptur für Bas 3 bis 6 und Pre 2 bis 4

Rezeptur	Bas-3 [kg/m ³]	Bas-4 [kg/m ³]	Bas-5 [kg/m ³]	Bas-6 [kg/m ³]	Pre-2 [kg/m ³]	Pre-3 [kg/m ³]	Pre-4 [kg/m ³]
Subst. Volumen	100	100	100	100	345	261	261
Zement	850	850	850	850	553,8	627,9	627,9
Silikastaub	143	143	143	143	93,2	105,6	105,6
Quarzmehl	245	245	245	245	159,6	181	181
Basalt 2/4	297	-	297	-	-	-	-
Basalt 4/8	-	297	-	297	1000	750	750
Quarzsand	599,7	599,7	599,7	599,7	563,6	639	639
Wasser	195	195	195	195	127,1	144	144
Fließmittel	20	20	20	20	13	14,8	14,8
Stahlfasern 15/0,20 mm	78,5	78,5	157	157	-	-	-

Die Ergebnisse der Vorversuche sind in Fig. 1 zu sehen.

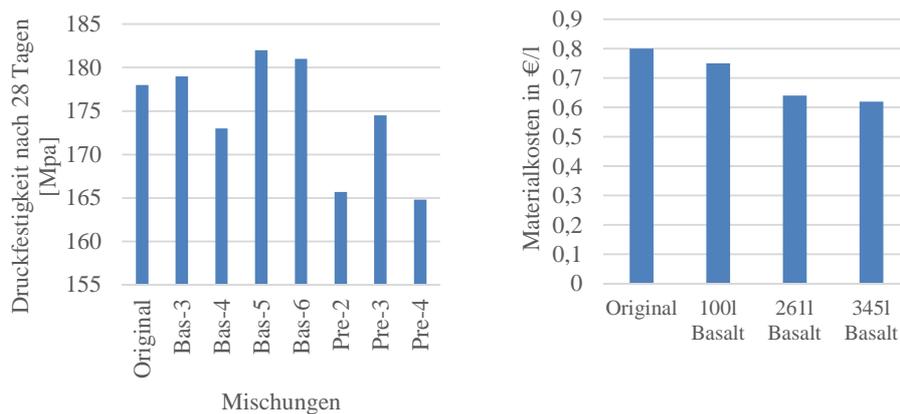


Fig. 1. Abb. Links zeigt die erreichten Druckfestigkeiten; Abb. Rechts zeigt die Materialkosten im Verhältnis zu der verwendeten Basalt Substitution

Die Abbildung links zeigt, dass das Substitutionsvolumen von 100 l keinen Einfluss auf die Druckfestigkeit hat. Abbildung rechts zeigt, dass ein Substitutionsvolumen von 345 l eine Kostenersparnis von rund 0,2 €/l möglich macht. Dabei kann darauf hingewiesen werden, dass bei Einsatz von günstigeren Gesteinskörnungen zur Substitution, ein größeres Einsparungspotenzial möglich ist.

3.2 Bauteilversuche

Aufbauend auf die Vorversuche, wird in diesem Abschnitt untersucht, wie sich die Substitutionsmischung in Stützen verhält und unter Biegebeanspruchung. Hierbei werden Stützenstummel (150x150x700 mm) simuliert, und die Einbringung Schichtweise in horizontaler und vertikaler Lage variiert. Zu Vergleichszwecken werden eine Mischung mit Stahlfasern ohne Aggregat Substitution (UHPFRC) und eine Mischung mit beigemengter Aggregat substitution (UHPC Mix) hergestellt. Die Mischungskomponenten können der Table 3 entnommen werden. Die eingebundene Mindestbewehrung wurde mit 4 % des Bauteilquerschnittes angenommen werden, womit eine praxisnahe Einsatzsituation nachgestellt wird. Die erzeugten Bauteile wurden im Drei-Punkt-Biegeversuch auf Biegung getestet, womit festgestellt werden soll wie sich die Substitution auf das Tragverhalten auswirkt.

Table 3. Rezepturen der untersuchten Betone

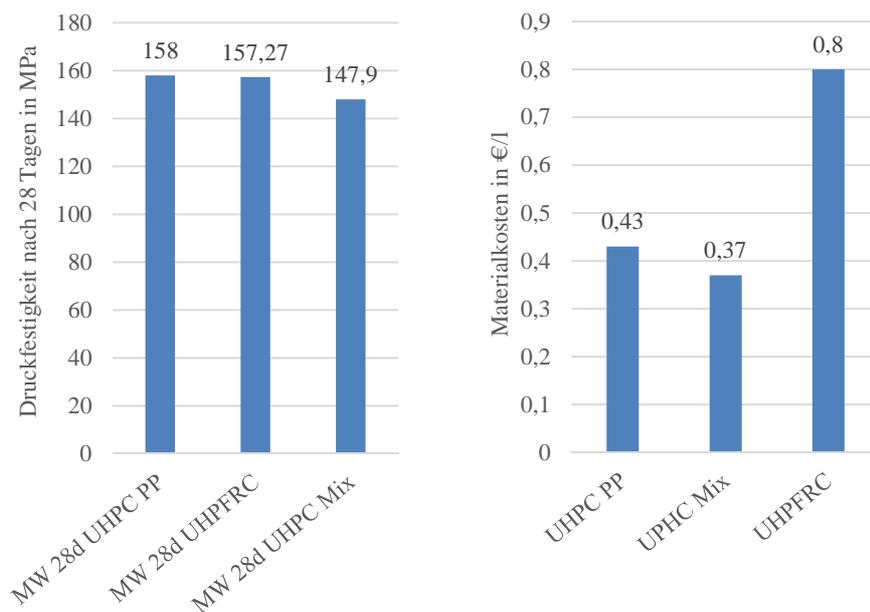
Rezeptur	UHPC PP [kg/m ³]	UHPFRC [kg/m ³]	UHPC Mix [kg/m ³]
Diabas Subst. Volumen	460,49	-	529,96
Zement	644,25	850	644,25
Silikastaub	108,39	143	108,39
Quarzmehl	185,7	245	185,7
Quarzsand	655,47	864,8	655,47
Wasser	147,8	195	147,8
Fließmittel	15,16	20	15,16
Stahlfasern 15/0,20 mm	-	157	-

Table 4 zeigt die erreichten Traglasten der unterschiedlichen Kombinationen auf, dabei ist ersichtlich, dass die Mischungen ohne Stahlfasern eine geringere Biegezugfestigkeit aufweisen als UHPFRC. Dies ist unter anderem darauf zurück zu führen, dass UHPC bedingt durch die hohe Packungsdichte und die damit einhergehende Sprödigkeit unter Druckbeanspruchung eine geringere Kapazität zur Aufnahme von Zugkräften aufweist.

Table 4. Erreichte Traglasten der unterschiedlichen Mischungs- und Einbringungsvarianten

Mischungen / Einbringungsrichtung	Erreichte Traglasten
UHPC PP, horizontal	213,48 kN
UHPC PP, vertikal	212,85 kN
UHPC Mix, horizontal	160,45 kN
UHPC Mix, vertikal	201,14 kN
UHPFRC_1, horizontal	242,03 kN
UHPFRC_2, vertikal	235,46 kN

Fig. 2 links zeigt die erreichten Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Mischungen, dabei ist ersichtlich, dass alle drei Variationen rund 150 MPa erreichen und somit in die Klassifizierung UHPC fallen. Abbildung rechts zeigt die Einsparung der Materialkosten abhängig von der Mischungsva-riation. Dabei ist zu erkennen, dass bei der Mischung mit den im Vorfeld eingemischten Aggregaten eine Materialkostensparnis bis zu 0,42 €/dm³ möglich ist. Auch hierbei ist zu erwähnen, dass beim Einsatz von Kostengünstigeren Substitutionsmaterial weitere Einsparungen möglich sind.

**Fig. 2.** Abb. Links zeigt die 28 Tage Druckfestigkeiten [MPa]; Abb. Rechts zeigt die Materialkosten [€/l]

4 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht wie sich unterschiedliche Substitutionsgrade von Gesteinskörnungen auf das Verhalten von UHPC Mixturen hinsichtlich der Druckfestigkeit sowie unter Biegebeanspruchung auswirken, dabei wurden Basalt 2/4mm 4/8mm und Diabas 8/16mm eingesetzt. Die Einbringung der neuen Mischungen erfolgte in Lagen wobei das Gestein immer zuerst eingebracht und anschließend von der Betonmatrix ummantelt wurde.

Die Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Substitution von bis zu 500l/m^3 weist keinen wesentlichen Abfall der Druckfestigkeit zur Referenz Mischung auf.
- Die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß) erreicht rund 30cm, wobei bei der Verwendung Basalt 4/8mm eine Separation der Betonmatrix von den Substitutionsaggregaten aufgefallen ist.
- In den Bauteilversuchen wurde bei Verwendung der UHPC Mischungen ohne Fasern ein Abfall der Biegezugfestigkeiten festgestellt. Die unterschiedlichen Einbringungsvarianten horizontal und vertikal zeigen keine wesentlichen Unterschiede in der maximal aufnehmbaren Traglast auf.
- Bei einer maximalen Substitution von 500l/m^3 und einer Einsparung von $0,42\text{€/dm}^3$ ergibt sich rund 50% Einsparung zur Ausgangsmischung.
- Die Substitution von UHPC trägt zu einem geringeren ökologischen Impakt.

Anhang

Literaturverzeichnis

1. Randl N., Steiner T., Ofner S., Baumgartner E., Mészöly T., Development of UHPC mixtures from an ecological point of view, *Construction and Building Materials*, Vol. 67, Part C, pp. 373–378, 2014.
2. Schneider M., Ofner S., Steiner T., Druml P.: Economical Effect on Ultra-High Performance Concrete by Using of Coarse Aggregates in: *International Conference on Concrete Sustainability (ICCS16)*, Madrid, 2016.
3. Schneider M., Krieger S., Druml P., Ofner S.: Betrachtung wirtschaftlicher und nachhaltiger Aspekte UHPC pre-pact Verfahren, In: *BWi BetonWerk International*, ISSN: 1439-7706, Jg.20, Nr.4, S.50-56, 2017.
4. Racky P., Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von UHPC, *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, Heft 2, Ultra-Hochfester Beton, Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa, Tagungsbeiträge zu den 3. Kasseler Baustoff- und Massivbautagen, Kassel University Press GmbH, Kassel, 2003.
5. Aßbrock O., Becke A., Bernhofen T., Hauer B., Kaczmarek T., Lotz U., Tesch U., Wiens U., Nachhaltiges Bauen mit Beton; Fachbeitrag für Architekten, Planer und Bauherren, *Beton Marketing Deutschland GmbH*, Erkrath, 2011.
6. Richard P., Cheyrezy M., Composition of Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, Nr. 7, pp. 1501–1511, 1995.
7. Scheydt J. C.: Mechanismen der Korrosion bei ultrahochfestem Beton, *Scientific Publishing, Karlsruher Reihe Massivbau Baustofftechnologie Materialprüfung*, Heft 74, Karlsruhe, 2013
8. Müller H. S., Scheydt J. C.: Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von ultrahochfestem Beton. Ergebnisse von Laboruntersuchungen In: *beton* (2011), Nr. 9, S. 336-343.
9. Fehling E., Schmidt M., Teichmann T., Bunje K., Bornemann R., Middendorf B.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC). Forschungsbericht zum DFG Geschäftszeichen FE 497/1-1. *Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau*, Heft 1, Universität Kassel, kassel university press, 2005.