

UHPC mit Textilbewehrung- ein nachhaltiger Verbundbaustoff

Sandra Ofner, Bernhard Hofer und Norbert Randl

FH Kärnten

Kurzfassung. Beton ist das meistgenutzte Baumaterial weltweit. Ultra High Performance Concrete (UHPC) ist ein High- Tech Baumaterial, das nicht nur eine wesentlich höhere Druckfestigkeit als Normalbeton (NSC) aufweist, sondern auch eine deutlich bessere Dauerhaftigkeit. Die hohe Druckfestigkeit ($> 150\text{MPa}$) ist unter anderem auf das dichte Gefüge der Feinkornmischung zurückzuführen, welches es auch erlaubt schlanke Bauteile zu bauen und somit in Vergleich zu NSC Querschnittsfläche und somit Betonvolumina einzusparen. Durch die hohe Dichte der Matrix ist UHPC nahezu kapillarporenfrei und ist somit resistenter gegen Chloridpenetration und Frost- Tausalz- Belastungen. Ein großer Nachteil an UHPC ist, dass das Material aufgrund der feinen und dichten Betonmatrix sehr spröde ist und es im Fall von Druckbelastungen zu Abplatzungen kommen kann. Diese Tatsache wurde weitestgehend mit der Zugabe von Stahlfasern behoben und UHPFRC (fiber reinforced) ist duktiler und kann geplant Zugkräfte abtragen. Dabei sind jedoch die Faserverteilung und deren Orientierung von großer Bedeutung, was sehr von der zu betonierenden Bauteilgeometrie und auch dem Einfüllvorgang abhängt. Das an der FH Kärnten laufende Projekt, welches hier vorgestellt wird, kombiniert UHPC mit Textilbewehrung. Dabei werden nicht nur die materialspezifischen Möglichkeiten besser ausgenutzt, sondern auch folgende positive Effekte kreiert: eine genaue Position der Bewehrungslage kann definiert werden und somit der innere Kraftfluss bestens aufgefangen werden; Textilbewehrung ist nicht korrosiv und der ökologische Input ist geringer als im Fall von Stahlfasern; und es ist auch leichter UHPC von der Textilbewehrung zu trennen als von Stahlfasern, was den Wiederverwertungsprozess wesentlich vereinfacht.

Schlagwörter: UHPC, Textilbewehrung, Verbundmaterial, nachhaltig, ressourcensparend.

1 Einleitung

In der EU verursacht die Bauindustrie rd. 40 % des totalen Energieverbrauchs [1]. In Mitteleuropa werden ca. 70 % des Materialflusses dem Bausektor zugeschrieben [2]. Diese Fakten zeigen wie wichtig es ist, dass das Thema Nachhaltigkeit in der Bauindustrie immer mehr an Bedeutung gewinnt. Der effiziente Umgang mit Ressourcen und den daraus gewonnenen Baumaterialien, sowie Konzepte zur Wiederverwertung müssen in Zukunft ein wichtiger Bestandteil in allen Planungen sein.

Nicht zuletzt die Fakten, dass der weltweite Materialfluss an Beton bei rd. 25 Gt [3] und der Zementverbrauch hierbei bei etwa 3.6 Gt [4] liegt, sowie dass die Zementindustrie jährlich bis zu 5 % wächst [4], sollten ausschlaggebend für eine zukunftsorientierte Konzeptionierung von Bauprojekten sein.

2 UHPC

Ultra High Performance Concrete wird seit den 1990er Jahren erforscht und erreicht eine 4 bis 6-fache Druckfestigkeit von NSC (> 150 MPa) [5]. Diese Druckfestigkeit ist zurückzuführen auf die sehr feine Betonzusammensetzung, welche unter anderem aus Zement, Mikrosilika und Quarzmehl besteht [6]. Diese feine Zusammensetzung und die damit einhergehende hohe Druckfestigkeit ermöglicht es nicht nur Querschnittsfläche und somit Betonvolumina im Vergleich zu NSC einzusparen, sondern macht auch UHPC aufgrund der fast kapillarporenfreien Struktur nahezu resistent gegen Chloridpenetration und Frost-Tausalz-Belastung. Der Nachteil von UHPC liegt im spröden Verhalten der Betonmatrix unter Belastung, welches unter anderem durch den hohen E-Modul hervorgerufen wird. Dafür werden Stahlfasern in die Mischung eingebracht und das Material wird somit duktiler und kann Zugspannungen abtragen [7]. Dabei ist nicht nur die Festigkeit der Betonmatrix bei der Erst-Rissbildung, sondern auch die Faserverteilung und deren Orientierung von großer Bedeutung, welche jedoch von der zu betonierenden Bauteilgeometrie, der Nähe der Fasern zur Schalhaut und auch der Einfüllmethode, abhängen [8].

3 Beton mit Textilbewehrung

Alkali resistentes (AR) Glas und Carbon sind die üblicherweise verwendeten Materialien in Verbindung mit Beton. Diese Materialien weisen nicht nur eine sehr hohe Zugfestigkeit auf, sondern zeigen auch eine ausreichende Bruchdehnung sowie eine geringe Relaxation. Zudem ist die Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion in alkalischem Milieu und in Beton ein positiver Aspekt [9] [10]. Textile Bewehrung kann in Kraftflussrichtung positioniert werden und beeinflusst das Versagensmuster mit deren Duktilität und Verformungsmöglichkeit [9] [11].

Textilbewehrung besteht aus vielen einzelnen Fasern (Filamenten). Diese werden gebündelt und bilden einen Roving. Diese Rovings werden in deren endgültige Form als Bewehrung gewebt [11]. Der Nachteil dieser Bewehrungsform ist, dass die Betonmatrix nicht in das Innere der Rovings eindringen und somit der innere Kern der Filamente nicht aktiviert werden kann um aktiv an der Lastabtragung mitzuwirken. Dafür hat sich das Prinzip der Tränkung etabliert. Dabei werden Tränkungsmaterialien wie Styrene-Butadiene (SB) oder auch Epoxy (EP) verwendet, welche die Filamente zusammenkleben und somit die gesamte Querschnittsfläche des Rovings aktivieren [12].

In Bezug auf den Ressourcenverbrauch ist zu erwähnen, dass beim Einsatz von Textilbewehrung, aufgrund dessen, dass diese nicht korrodiert, eine geringere Betondeckung angesetzt werden und somit kann Querschnittsfläche eingespart werden. Weitere Untersuchungen wie z.B. der Vergleich von Fassadenpanelen aus hochfestem Beton in

[13] zeigen auf, dass es nicht nur möglich ist sehr schlanke und somit leichte Bauteile herzustellen, welche auch eine optimale Ausnutzung der materialspezifischen Eigenschaften aufweisen, sondern dass allumfassend der Einsatz von hochfestem Beton mit Textilbewehrung einen geringeren ökologischen Impact mit sich bringt als der Einsatz von NSC mit Stahlbewehrung [13].

Nicht zuletzt kann die bessere Recyclingfähigkeit der Kombination von Beton mit Textilbewehrung im Vergleich zu NSC mit Stahlbewehrung erwähnt werden [14].

4 Kombination von UHPC mit Textilbewehrung

Das derzeit laufende Projekt umfasst die Untersuchung von Normalbeton, hochfestem Beton und ultrahochfestem Beton in Kombination mit 8 verschiedenen Textilbewehrungen aus 2 verschiedenen Materialien (AR Glas und Carbon), welche dabei verschiedene Achsabstände zwischen den Rovings (21, 25 und 38 mm), sowie unterschiedliche Querschnittsflächen der Rovings (5,42 und 1,81 mm²), aufweisen. In dem vorliegenden Artikel werden auszugsweise die Kombinationen von NSC und UHPC (Materialkennwerte siehe **Tabelle 1**) mit 2 Carbon Textilbewehrungstypen (21 und 38 mm Achsabstand zwischen den Rovings) erläutert. Die benutzten Textilien sind mit Epoxy getränkt (Materialkennwerte siehe **Tabelle 2**).

Tabelle 1. Materialeigenschaften der eingesetzten Betone

Beton- klasse	Druckfestigkeit nach 28d [MPa]	Spaltzugfestigkeit nach 28d [MPa]	E Modul nach 28d [MPa]	Druckfestigkeit zum Testzeitpunkt [MPa]
NSC	68,2	5,9	27.500	70,5
UHPC	162,2	6,5	41.870	165,3

Tabelle 2. Materialeigenschaften der eingesetzten Textilien [15]

Textil	Querschnitts- fläche Roving [mm ²]	Achsabstand zwischen Rovings [mm]	Querschnitts- fläche Bewehrung [mm ² /m]	E Modul [MPa]	Char. Zug- festigkeit [MPa]
Solidian GRID Q142/142-CCE- 38	5,42	38	142	180.000	2.200
Solidian GRID Q85/85-CCE-21	1,81	21	85	220.000	2.500

5 Dehnkörperversuche

Um zu untersuchen, wie sich die unterschiedlichen Betone in Kombination mit der Textilbewehrung unter Zugbeanspruchung verhalten, wurden Dehnkörperversuche nach

[16] [17] durchgeführt. Dabei wurden Prüflinge mit 600 mm Länge, 120 mm Breite und 15 mm Dicke hergestellt. Das Textil wurde in der Mitte der Dicke eingebracht und dessen Lage mit einer zweiteiligen Schalung gesichert. Der Kettfaden der Textilie war in longitudinaler und somit der Lasteinbringungsrichtung ausgerichtet.

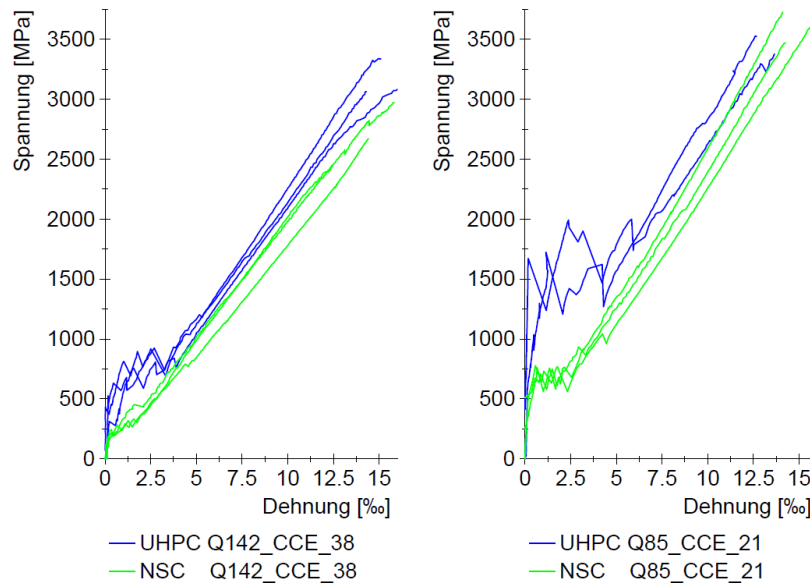


Abbildung 1. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus den Dehnkörperversuchen; links: Textil mit 21 mm Achsabstand zwischen den Rovings, rechts: Textil mit 38 mm Achsabstand zwischen den Rovings [18]

Abbildung 1 links zeigt die Spannungs- Dehnungsbeziehung der untersuchten Kombinationen mit Carbontextil, welches einen Achsabstand der Rovings von 21 mm aufweist. Der Versuchsverlauf gliedert sich in drei Abschnitte: erstens der linear-elastische Verlauf mit dem E Modul des Verbundwerkstoffes, zweitens die Rissbildungsphase und in der dritten Phase übernimmt das Textil die Lastabtragung in den gerissenen Bereichen mit dem E Modul der Textilbewehrung. Wie ersichtlich, hat die Kombination mit UHPC eine Spannung im Textilquerschnitt von rd. 1700 MPa erreicht, wohingegen die Versuchskörper mit NSC nur rd. 700 MPa erreichten. In der Rissbildungsphase kann beobachtet werden, dass im Fall von UHPC die Abfälle der Spannung wesentlich größer sind als bei NSC. In der Abschlussphase, wo nur das Textil die Lastabtragung übernimmt, ist in beiden Kombinationsvarianten dieselbe Steifigkeit zu beobachten. Dies bedeutet, dass die Abfälle in der Rissbildungsphase keinen Einfluss auf die letztliche Wirkung der Textilbewehrung haben.

Abbildung 1 rechts zeigt die Spannungs- Dehnungsbeziehung der untersuchten Kombinationen mit Carbontextil, welche einen Achsabstand zwischen den Rovings von 38mm aufweisen. Die Ergebnisse sind ähnlich den Versuchen mit den größeren

Achsabständen zwischen den Rovings. Die Versuchskörper mit UHPC erreichten eine maximale Spannung im Textilquerschnitt von rd. 700 MPa und die Tests mit NSC rd. 250 MPa.

6 Ausziehversuche

Um die Verbundqualität der unterschiedlichen Kombinationen zu untersuchen, wurden Ausziehversuche nach [19] durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein einzelner Roving getestet. Die Versuchskörper haben dieselben Dimensionen wie im Abschnitt davor, jedoch wurde der zu testende Roving vor dem Betonieren oberhalb der später eingebrachten Sollbruchstellen abgeschnitten, um das Testen des einzelnen Rovings zu ermöglichen.

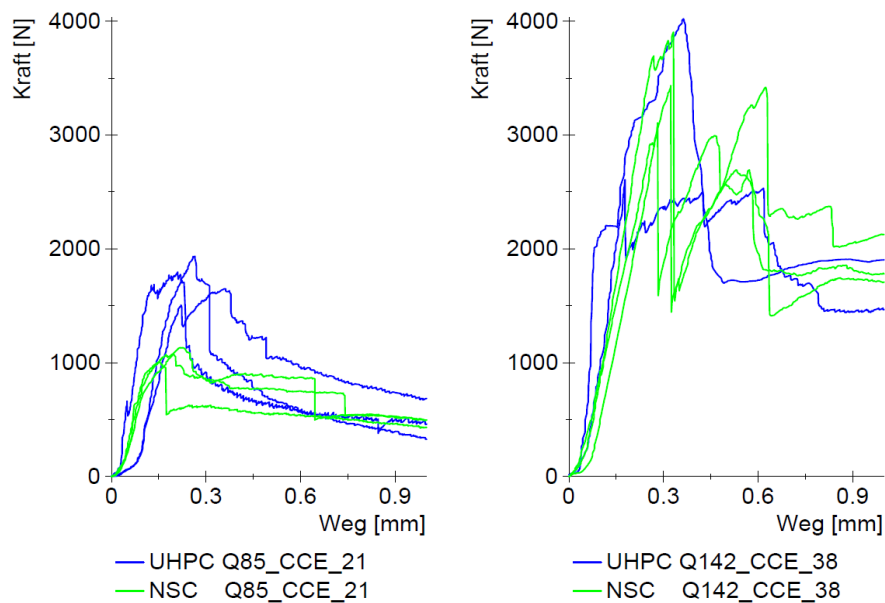


Abbildung 2. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse aus den Ausziehversuchen; links: Textil mit 21 mm Achsabstand zwischen den Rovings, rechts: Textil mit 38 mm Achsabstand zwischen den Rovings [18]

Abbildung 2 links zeigt das Kraft- Verformungsverhalten der unterschiedlichen Kombinationen mit 21 mm Achsabstand zwischen den Rovings. Es ist ersichtlich, dass bei der Verwendung von UHPC ein höheres Lastniveau (Unterschied von rd. 800N) erreicht wird und man somit von einer höheren Verbundfestigkeit sprechen kann. Nach dem Erreichen der maximalen Traglast war ein plötzlicher Lastabfall zu beobachten.

Abbildung 2 rechts zeigt das Kraft- Verformungsverhalten der unterschiedlichen Kombinationen mit 38 mm Achsabstand der Rovings. Verglichen mit der Rasterweite

von 21 mm ist ersichtlich, dass die Lastabfälle nach dem Erreichen der maximalen Auszugskraft wesentlich größer und die erreichte Traglast höher sind. Dies ist auf die größere Querschnittsfläche der Rovings zurückzuführen, weshalb es hier auch anstelle eines Auszugs des Rovings zu einem Längsspalt der Betonmatrix kam. Die erreichten Lastniveaus von UHPC und NSC unterscheiden sich deshalb hier nicht. Es kann jedoch eine höhere Anfangssteifigkeit des Verbundquerschnittes im Fall von UHPC beobachtet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Kombination von Normalbeton (NSC) und Ultrahochfestem Beton (UHPC) mit Textilbewehrung. UHPC hat eine sehr hohe Druckfestigkeit aufgrund dessen hoher Packungsdichte. Somit können nicht nur Querschnittsflächen und Betonvolumina eingespart werden, sondern die Betonmatrix ist auch fast kapillarporenfrei und damit nahezu resistent gegen Chlorideindringung und Frost-Tausalz-Beanspruchung. Dies führt dazu, dass UHPC eine deutlich höhere Dauerhaftigkeit aufweist als NSC. Die Kombination mit Textilbewehrung zeigt einen geringeren ökologischen Impact als NSC mit Stahlbewehrung [20]. Auch die Wiederverwertung ist bei der Verwendung von Textilbewehrung deutlich besser, da die Trennung des Textils von der Betonmatrix einfacher ist.

Untersucht werden das Verbundverhalten zwischen der Betonmatrix mit der Textilbewehrung und das Verhalten der Materialkombination unter ein-axialer Zugbeanspruchung mit sogenannten Dehnkörpern. Verglichen mit der Kombination aus NSC und Textil, zeigt die Verbindung mit UHPC folgende Fakten auf:

- UHPC hat eine höhere Zugfestigkeit und somit sind die erreichten Erststärkungen 2-3 Mal höher,
- die Verbundfestigkeit zwischen UHPC und den Textilien ist höher,
- die Kombination UHPC mit Textil zeigt eine höhere Anfangssteifigkeit,
- in der Rissbildungsphase wurden größere Lastabfälle beobachtet, was jedoch keinen Effekt auf das Lastabtragungsverhalten im letzten Abschnitt des Versuches hatte.

Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für weitere Untersuchungen, z.B. für die strukturelle Applikation von UHPC verstärkt mit Textilien. Die weiteren Schritte im laufenden Projekt umfassen die Betrachtung der Rissbreitenlimitation unter Gebrauchslastzustand und des Biegeverhaltens.

Danksagung

Die Autoren möchten dem Textilhersteller Solidian für die großzügige Bereitstellung der Textilien danken.

Anhang

Literaturverzeichnis

1. 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.
2. 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.
3. Sakai K., Noguchi T., The Sustainable Use of Concrete, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013.
4. Weizsäcker E.-U., Hargroves K., Smith M., Faktor fünf – Die Formel für nachhaltiges Wachstum, Droemer Verlag; München, 2010.
5. Richard P., Cheyrezy M., Compostion of Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25, Nr. 7, pp. 1501–1511, 1995.
6. 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.
7. Fehling E., Schmidt M., Teichmann T., Bunje K., Bornemann R., Middendorf B., Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung ultrahochfester Betone (UHPC), DFG-Forschungsbericht FE 497/1-1, Structural Materials and Engineering Series, Kassel University Press, 2005.
8. (AFGC), Association Francaise de Genie Civil, Documents scientifiques et techniques: Betons fibres a ultra-hautes performances (Recommandations provisoires), January 2002.
9. Bruckermann O., Zur Modellierung des Zugtragverhaltens von textilbewehrtem Beton, Dissertation, RWTH Aachen, 2007.
10. Jesse F, Schickanz K, Curbach M., Obtaining characteristic material strength of Textile Reinforced Concrete (TRC) from laboratory tests. In: Djausal A, Alami F, Naaman AE (ed.) 9th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composites (Ferro-9), Bali, Indonesia, pp 305–318, May 2009.
11. Brameshuber W., RILEM Technical Committee, Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete- Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete, Materials and Structures (2016) 49:4923-4927, DOI 10.1617/s11527-016-0839-z, 2016.
12. Kulas C. H., Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile, RWTH Aachen, 2013.
13. Hajek P., Novotna M., Chira A., Fiala C., Vlach T., Laiblova L., Challenge of textile reinforced high performance concrete for sustainable construction, Concrete- Innovation and Design, fib Symposium, Copenhagen, May 18–20,2015.
14. Kortmann J., Abbruch, Rückbau und Recycling von C³-Bauteilen, Carbon- und Textilbetontage 2017, Dresden, 2017.
15. solidian GmbH, Ebene Textile Bewehrungen, [online], <https://www.solidian.com/produkte/ebene-bewehrung/>, [2017-12-21]
16. Brameshuber W., RILEM Technical Committee, Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete- Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile

- reinforced concrete, *Materials and Structures* (2016) 49:4923-4927, DOI 10.1617/s11527-016-0839-z, 2016.
17. Curbach M., Jesse F., *Eigenschaften und Anwendungen von Textilbeton*, *Beton- und Stahlbetonbau* 104, Heft 1, pp. 9–16, 2009.
 18. Ofner, S., Randl, N., Meszöly, T., Hofer, B.: „Textile Reinforcement In Ultra High Performance Concrete- A Sustainable Material Composition”; 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, ISBN 978-619-7408-29-4 / ISSN 1314-2704, Vol. 17, Issue 63, 683-694 pp; DOI: 10.5593/sgem2017H/63/S26.086, 2017
 19. Portal N. W., Perez I. F., Thrane L. N., Lundgren K., Pull-out of textile reinforcement in concrete, *Construction and Building Materials* 87 (2014) 63–71, 0950-0618/© 2014 Elsevier, 2014.
 20. Portal N. W., Lundgren K., Wallbaum H., Malaga K., Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(7): 04014207, DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001160. ©2014 American Society of Civil Engineers, 2015.