



Diskussion der Zusammensetzung und der Eigenschaften von UHPC

Ultra-Hochfester Beton: Perspektive für die Betonfertigteil- industrie

Ultra-Hochfester Beton (UHPC) ist ein besonders gefügedichter Beton mit einer Druckfestigkeit über 150 N/mm². Er kann sowohl als Feinbeton mit einem Zuschlaggrößtkorn von nur 0,5 mm als auch mit einem Größtkorn bis zu 16 mm hergestellt werden. Je nach Zusammensetzung und Herstellverfahren werden zielsicher Druckfestigkeiten zwischen rd. 180 und 230 N/mm² erreicht. Die Zugfestigkeit von Ultra-Hochfestem Beton mit Stahlfasern kann bis zu rd. 15 N/mm², die Biegezugfestigkeit bis zu rd. 50 N/mm² betragen. UHPC weist praktisch keine Kapillarporen mehr auf. Mit entsprechend wirksamen Verflüssigern kann er im gesamten Konsistenzbereich von erdfucht bis praktisch selbstverdichtend hergestellt werden.

Die hohe Leistungsfähigkeit beruht im Wesentlichen auf vier Faktoren

einem niedrigen Wasser-Zementwert zwischen rd. 0,20 und 0,30,

- ▶ einem hohen Feststoffgehalt des Zementsteins durch Zugabe geeigneter mineralischer Zusatzstoffe,
- ▶ einer hohen Packungsdichte des Feststoffs sowohl im Zementstein als auch des Grobzuschlages, verbunden mit einem niedrigen Wasseranspruch des Frischbetons und einer

besonders niedrigen Porosität des Festbetons und

- ▶ geeigneten Maßnahmen für eine ausreichende Duktilität bei Druck-, Zug- oder Biegezugbeanspruchung.

Ultra-Hochfester Beton ist ein Hightech-Werkstoff, der es ermöglicht, mit Beton hoch tragfähige, dabei besonders leichte und filigrane Bauwerke zu erstellen, wie sie bislang in erster Linie dem Stahl vorbehalten waren. Rohstoffe und Energie werden eingespart und infolge des geringeren Eigengewichtes sind weitere Spannweiten möglich, z. B. bei Brücken, Parkdecks etc. Um die hohe Leistungsfähigkeit und die besonderen Stoffeigenschaften des

Discussion of the composition and the properties of UHPC

Ultra-high performance concrete: Perspective for the precast concrete industry

Ultra-high performance concrete (UHPC) is a concrete with specially closed structure with a compressive strength of over 150 N/mm². It can be produced both as fine-grained concrete with a maximum particle size of only 0.5 mm, or also with a maximum particle size of up to 16 mm. Depending on the composition and the production method used, compressive strengths of between 180 and 230 N/mm² can be reliably achieved. The tensile strength of steel-fiber reinforced UHPC can amount up to around 15 N/mm², the flexural tensile strength up to around 50 N/mm². UHPC has virtually no capillary pores. With appropriately effective superplasticizers it can be produced practically self-compacting in the entire consistency range from earth-moist to practically self-compacting.

The high performance of UHPC is essentially due to four factors:

- ▶ a low water/cement ratio of between around 0.20 and 0.30,
- ▶ a high solids content in the hardened paste achieved with suitable mineral additions,
- ▶ a high packing density of the solid, both in the hardened paste and in the aggregates in conjunction with a fresh concrete with low water demand and a hardened concrete of particularly low porosity and
- ▶ suitable measures for achieving adequate ductility when subjected to compression, tension or bending.

UHPC is a high-tech material with which lightweight filigree structures of very high loadbearing capacity can be erected, as was previously feasible only by other means, in particular steel. Raw materials and energy are saved, and the low self-weight permits greater spans, for example for bridges, parking decks etc. In order to be able to exploit the high performance capability and the special materials properties of UHPC, the design and construction must be especially adapted to this concrete. At Kassel University, both the materials and structural prerequisites for full-scale application were created, not only for bridge construction, but also for slabs and columns.

The environment of precast plants offers particularly favorable conditions for on-target production and application of UHPC. In these plants, the production process can be carefully adjust-



Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schmidt, Jahrgang 1947, 1967–1973 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Hannover, Fachrichtung konstruktiver Ingenieurbau, 1973–1978 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der TU Hannover, dort 1977 Promotion zum Dr.-Ing. 1978–1989 Wiss. Referent am

Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf, 1989 bis 1993 Leiter der Bauberatung und der Abteilung Umwelttechnik der Forschung, Entwicklung und Beratung (FEB) der Heidelberger Zement AG in Leimen. Vom 1.1.1993 bis zum 31.12.1997 Direktor der Heidelberger Zement AG, Leiter der zentralen Forschung, Entwicklung und Beratung in Leimen bei Heidelberg. Seit 1.1.1998 selbstständiger, öffentl. bestellter und vereidigter Sachverständiger in Heidelberg. Inhaber der Fa. SCHMIDTCONSULT, Ingenieurbüro für Bauwesen mit Schwerpunkt Baustoff- und Betontechnologie und Innovationsberatung. Seit 1.10.1999 Univ.-Professor an der Universität GH Kassel, Leiter des Fachgebietes Baustoffkunde, Direktor der Amtl. Baustoff- und Betonprüfstelle der Universität Kassel.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling, Jahrgang 1959, 1978–1983 Studium des Bauingenieurwesens an der TH Darmstadt, 1983–1988 Wiss. Mitarbeiter am Institut für Massivbau der TH Darmstadt, seit 1988 Beratender Ingenieur. Seit 1997 Prüfingenieur für Baustatik der Fachrichtungen Massivbau und Metallbau sowie Professor für Massivbau an der Universität Kassel, Gesellschafter des Ingenieurbüros IBB Fehling+Jungmann, Kassel/Fulda.

UHPC ausnutzen zu können, müssen die Bemessung und die Konstruktion darauf abgestimmt werden. Sowohl die stofflichen als auch die konstruktiven Voraussetzungen für die großtechnische Anwendung im Brückenbau, aber auch für Platten und Stützen wurden an der Universität Kassel geschaffen. Fertigteilwerke bieten für die zielsichere Herstellung und Anwendung von UHPC besonders günstige Voraussetzungen. Zum einen ist der Herstellprozess dort sehr gezielt einstell- und kontrollierbar. Längere Transportzeiten, Witterungs- und andere baustellentypische Einflüsse entfallen weitgehend. Zum anderen sind bereits nach wenigen Tagen besonders hohe Festigkeiten möglich, wenn UHPC nach ausreichend langer Vorlagerung bei bis zu rd. 90 °C warmbehandelt wird.

Ausgangsstoffe

Typische Ausgangsstoffe für die Herstellung von UHPC sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Als Zuschlag für Feinbeton sind mehlkornarme Natur- oder Brechsande nach DIN 1164 mit einem Größtkorn von 0,5 bis 2 mm geeignet. Um die hohe Festigkeit des Zementsteins ausnutzen zu können, sollte der Zuschlag über 2 mm eine möglichst hohe Gesteinsfestigkeit von 100 N/mm², eine günstige Kornform und einen besonders guten Verbund zum Zementstein aufweisen, wie z. B. gebrochener Basalt, andere Felsgesteine oder gebrochene Kiese mit entsprechenden Eigenschaften.

Die angestrebte Festigkeit kann bei entsprechender Optimierung der Betonzusammensetzung sowohl mit geeignetem Portland- als auch mit Hochofenzement der Festigkeitsklassen 42,5 oder 52,5 nach DIN EN 197 erreicht werden. Zu bevorzugen sind möglichst schwindarme Zemente mit niedrigem C₃A-Gehalt, d. h. in erster Linie HS-Zement nach DIN 1164. Der Wasseranspruch des Zementes sollte zudem möglichst niedrig sein.

Mikrosilica – hochfeine amorphe Kieselsäure – wirkt zweifach: Zum einen füllt es als äußerst feines Pulver mit einem Blaine-Wert von über 100.000 cm²/g die Hohlräume zwischen den übrigen Feststoffpartikeln des Zementleims- und des Zementsteins. Im Frischbeton verdrängt es dabei das sonst darin befindliche Wasser, es wirkt praktisch wie ein Verflüssiger. Zu große Zugabemengen können allerdings dazu führen, dass der Beton zäh und klebrig wird. Der Festbeton wird durch die Porenfüllung fester. Außerdem reagiert die leicht lösliche Kieselsäure mit Bestandteilen des Zementes und bildet zusätzliche Reaktionsprodukte, die die Dichtigkeit und Festigkeit des Betons zusätzlich erhöhen. Mikrosilica für UHPC sollte sehr rein sein und wenig Kohlenstoff enthalten. Mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt steigt der Wasseranspruch des Silicastaubes an und die verflüssigende Wirkung geht zurück.

Weitere inerte Füllstoffe wie Quarz-, Kalkstein- oder Basaltmehl dienen ebenfalls dazu, das Gefüge dichter zu gestalten: Ihre Korngröße und ihre Kornzusammensetzung müssen so gewählt und aufeinander abgestimmt werden, dass die Packungsdichte aller mehlfeinen Bestandteile des Zementsteins möglichst groß und der verbleibende Hohlraumgehalt möglichst klein werden. Ein Maß für die Packungsdichte ist neben dem rechnerischen oder dem gemessenen Hohlraumgehalt des Mehlkorns das Wasser-Feststoff-Verhältnis des Leims.

Durch die Zugabe der Feinststoffe erhöhen sich zudem der gesamte Leimgehalt (Zement, Mikrosilica, Gesteinsmehle, Zusatzmittel und Wasser) und seine dynamische Viskosität. Die leimgefüllten Abstände zwischen den groben Zuschlägen erhöhen sich, die Blockadeneigung nimmt ab.

Für ausreichend verarbeitbaren Ultra-Hochfesten Beton sind leistungsfähige Fließmittel auf Polycarboxylatbasis erforderlich. Zu beachten ist, dass diese Mittel mit verschiedenen Zementen unterschiedlich wirken können. Sie dürfen zudem das Erstarren und das Erhärten des Betons nicht wesentlich verzögern.

Eine ausreichende Menge von mindestens 2,5 Vol.-%, feiner, gleichmäßig verteilter Drahtfasern dient dazu, den sonst sehr spröden Beton duktiler zu machen. Außerdem werden seine

ed and controlled and longer transport distances, the effects of the weather, and other influences that typically occur on construction sites are eliminated. In addition to that, outstandingly high strengths can be achieved under factory-controlled conditions when UHPC is cured at around 90 °C following appropriate prestorage.

Constituent materials

Typical constituent materials for the production of UHPC are summarized in **Table 1**. Natural sands or crushed sands with low powder content and a maximum particle size of 0.5 to 2 mm to DIN 1164 are suitable aggregates for fine-grained concrete. In order to make use of the high strength of the hardened paste, aggregate of 2 mm with high rock strength, if possible 100 N/mm², a favorable granular shape and an especially good bond to the hardened paste, such as for example crushed basalt, other types of rock with appropriate properties should be used. The aimed for strength can be achieved with an optimized mix composition with both suitable Portland or also blastfurnace cement of strength classes 42,5 or 52,5 to DIN EN 197. Preference should be given to low-shrinkage cements with a low C₃A content, i.e. primarily HS cement (with a high sulfate resistance) to DIN 1164. The water requirement of the cement should moreover be as low as possible.

Microsilica – ultrafine amorphous silica – is effective in two ways: first of all, being an extremely fine powder with a Blaine value of over 100.000 cm²/g, it fills the cavities between the other solid particles of the cement paste and the hardened paste. In fresh concrete, it displaces in this way the water in the pore and functions practically as a superplasticizer. Excessive amounts of microsilica can however make the concrete viscous and sticky. The filled pores add strength to the hardened concrete. The easily soluble silica reacts moreover with constituents of the cement and forms additional reaction products that further increase the concrete's density and strength. Microsilica used in UHPC should be very pure and contain little carbon. The water requirement of the silica dust increases with increasing carbon content, and the liquefying effect decreases. Further inert fillers such as quartz, limestone or basalt powder also contribute to a closer structure: Their particle size and granular composition should be chosen and adjusted to each other in such a way that the packing density of all powder-fine constituents of the hardened paste is as high as possible, and the remaining void content as low as possible. A measure for the packing density, apart from the calculated or measured void content of the powder, is the water-solids ratio of the paste.

The addition of powders increases moreover the entire paste content (cement, microsilica, rock powders, additions and water) as well as its dynamic viscosity. The voids filled with



Dipl.-Ing. Thomas Teichmann, Jahrgang 1975, Abschluss Diplom-Studiengang Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar, 2001. Seit 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens.



Dipl.-Ing. Kai Bunje, Jahrgang 1965, 1995 Abschluss als Diplomingenieur an der TU Darmstadt, Fachrichtung Konstruktiver Ingenieurbau, 1995–1997 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Bouwkamp, Fehling + Partner, 1998–2000 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Fehling + Jungmann GmbH. Seit 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Massivbau der Universität Kassel.



Dipl.-Ing. Roland Bornemann, Jahrgang 1969, Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Kassel, Mitarbeiter im Konstruktionsbüro Fehling + Jungmann 1998–2000. Seit 2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel.



Tabelle 1. Eigenschaften von Ausgangsstoffen für UHPC [2]
Table 1. Properties and constituent materials for UHPC [2]

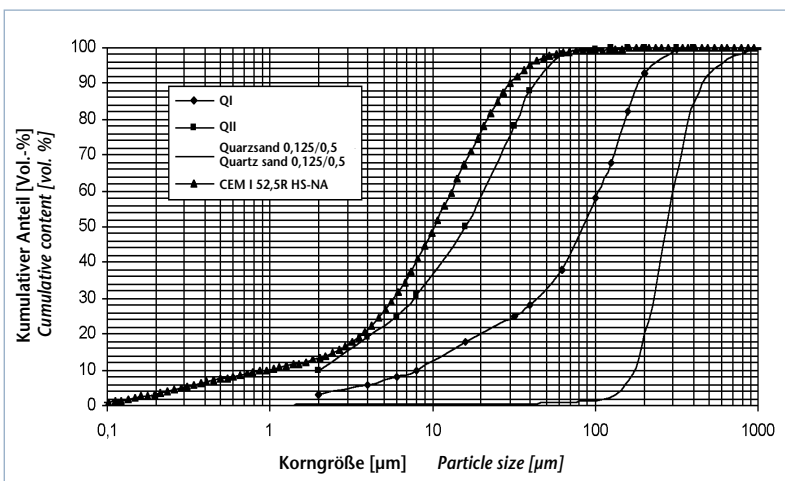
	Gehalt SiO ₂ SiO ₂ content	Größt- korn Max. particle size	Roh- dichte Density	Spez. Oberfläche (Blaine) Spec. surface area (Blaine)	Kornanteil < 0,125 mm Particle content < 0.125 mm	Kornanteil < 0,09 mm Particle content < 0.09 mm	Lagepara- meter d' Storage parameter	Steigungs- maß n n-value
	[M.-%]	[µm]	[kg/dm ³]	[cm ² /g]	[M.-%]	[M.-%]	[µm]	
Sand 0,125/0,5 Sand	99.5	500	2.65	100	1	0.3	320	3.10
Basalt Basalt	–	8000	3.06	–	–	–	–	–
Zement CEM I 52,5 R HS Cement CEM I 52,5 R HS	–	50	3.1	4530	100	100	12	1.00
Mikrosilica MI ¹⁾ Microsilica MI ¹⁾	94.0	1	2.20	20 x 10 ⁴	100	100	–	–
Mikrosilica MII ¹⁾ Microsilica MII ¹⁾	98.3	1	2.20	20 x 10 ⁴	100	100	–	–
Quarzmehl QI Quartz powder QI	99	300	2.65	1000 ¹⁾	68	55	110	0.94
Quarzmehl QII Quartz powder QII	99	60	2.65	3800 ¹⁾	99.9	99	20	1.04
Drahtfasern Wire fibers	–	–	7.85	–	–	–	–	–
Polypropylenfasern Polypropylene fibers	–	–	0.92	–	–	–	–	–
Fließmittel Plasticizer	–	–	1.05	–	–	–	–	–

¹⁾ Herstellerangaben
¹⁾ Data supplied by manufacturer

Zug- und seine Biegezugfestigkeit weiter verbessert, wenn die Fasern überwiegend in Zugrichtung orientiert sind. Bewährt haben sich 6 bis 9 mm lange Fasern, mit einem Durchmesser von 0,15 mm.

Etwa 0,3 bis 0,6 Vol.-% Polypropylenfasern verhindern, dass der sehr dichte UHPC im Brandfall auf Grund des möglicherweise sehr hohen inneren Dampfdruckes schlagartig versagt. Die Kornzusammensetzung der verwendeten Feinstoffe und ihre Feinheit sind in Bild 1 dargestellt. Zement wird üblicherweise mit dem sog. Lageparameter im RRSB-Netz und mit dem Steigungsmaß n charakterisiert, um seine technischen Eigenschaften zu beschreiben. Die entsprechenden Werte wurden auch für die übrigen Feinstoffe näherungsweise ermittelt und in Tabelle 1 mit angegeben.

Bild 1. Kornzusammensetzung Quarzmehl, Quarzsand, Zement
Fig. 1. Particle composition quartz powder, quartz sand, cement



paste between the coarse aggregates increase, the inclination to blockage decreases.

To attain an UHPC of sufficient workability, highly effective superplasticizers based on polycarboxylate are required. Consideration should be given to the fact that these agents may have different effects on different cements. They should moreover not essentially delay the setting and hardening of the concrete.

A sufficient amount of at least 2.5 vol. % of fine, uniformly distributed wire fibers makes the otherwise very brittle concrete more ductile. In addition, its tensile and bending strength are further increased when the fibers are mainly oriented in the direction of tension. Fibers of 6 to 9 mm length with a diameter of 0.15 mm have brought good results.

Fibers with around 0.3 to 0.6 vol. % of polypropylene prevent sudden collapse of very dense UHPC in the event of fire, as could occur in the presence of high interior steam pressure.

The granular composition of the powders used and their fineness are shown in Figure 1. Cement is commonly characterized by the position parameter of the RRSB distribution and by an n-value to describe its technical properties. The analogous values were also determined for the other fines by way of approximation, as given in Table 1.

Concrete composition

UHPC can be manufactured in many varieties to adapt it to the given application. In Table 2, various fine- and coarse-grained concrete types with a maximum particle size of 0.5 mm (M) and 8 mm (B) have been compiled. Concrete with a larger maximum particle size and with well-graded aggregate requires, due to the lower void content of the aggregate, less binder paste for achieving comparable processing and hardened concrete properties.



Betonzusammensetzung

Ultra-Hochfester Beton lässt sich in vielen Varianten herstellen und so gezielt auf die jeweilige Anwendung anpassen. In Tabelle 2 sind verschiedene Fein- und Grobbetone mit einem Größtkorn des Zuschlages von 0,5 mm (M) und 8 mm (B) zusammengestellt. Beton mit größerem Größtkorn und mit gut korngestuftem Zuschlag benötigt auf Grund des geringeren Hohlraumgehalts des Zuschlages weniger Bindemittel zum Erzielung vergleichbarer Verarbeitungs- und Festbetoneigenschaften.

In Tabelle 2 ist unterschieden zwischen UHPC, der nach der Herstellung unter Wasser gelagert wurde und solchem, der

In Table 2 a distinction is made between UHPC that after production was stored in water and UHPC subjected to curing at 90 °C, following two days of preliminary moist storage. The compressive strength of the heat-treated concrete was always higher than that achieved with water storage and was more over fully available immediately after curing.

One of the characteristics of UHPC is its low water-binder ratio of around 0.20 to 0.25. Suitable binders are cement and microsilica as well as, possibly, fly ash. Microsilica is used in the same way as cement with a k-factor of 1.0 to EN 206.

Microsilica fills the especially small voids between the other ultrafine particles in the fresh concrete. It displaces the rheologically ineffective water otherwise required to fill the voids. At a constant water content, this will make the concrete softer.

Tabelle 2. Zusammensetzung und Eigenschaften Ultra-Hochfester Betone nach [2]
Table 2. Composition and properties of UHPC to [2]

UHPC UHPC		M 1	M 1Q	M 2Q	B 1	B 1Q	B 2Q	B 3Q
Zement Cement	kg/m ³	900	733	832	800	630	723	580
Sand Sand	kg/m ³	1016	1008	975	440	433	425	354
Basalt 2/8 Basalt 2/8	kg/m ³	–	–	–	870	867	850	711
Mikrosilica Microsilica	kg/m ³	225	230	135	200	197	118	177
Stahlfasern 2,5 Vol.-% Steel fibers 2.5 vol. %	kg/m ³	192	192	192	192	192	192	194
Quarz I Quartz I	kg/m ³	–	183	207	–	158	181	325
Quarz II Quartz II	kg/m ³	–	–	–	–	–	–	131
Vol.-% Feinstoff < 0,125 mm Vol. % fines < 0.125 mm	l/m ³	387	405	403	344	350	350	439
Fließmittel Plasticizer	kg/m ³	28.2	28.6	29.4	25.0	24.7	25.6	30.4
Wasser Water	l/m ³	185	161	166	165	151	157	141
(w/z) w/b ¹⁾ w/c w/b ¹⁾	–	(0.23) 0.18	(0.24) 0.19	(0.22) 0.19	(0.23) 0.18	(0.27) 0.20	(0.24) 0.21	(0.28) 0.21
Vol.-% Wasser und Feinstoff < 0,125 mm Vol. % water and fines < 0.125 mm	l/m ³	600	595	598	534	526	533	600
Ausbreitmaß Slump	Cm	55	55	65	55	55	65	65
Druckfestigkeit 28d in Wasser 20° C Compressive strength 28d in water 20 °C	MN/m ²	– – –	148–152 (150) ² (163) ³	– – –	127–142 (135) ²	155–172 (164) ² (201) ³	– – –	– – –
Druckfestigkeit nach 90° C Wärmebehandlung (2 Tage) Compressive strength following heat curing at 90 °C (2 days)	255	152–158 (155) ²	184–206 (195) ²	182–203 (189) ²	182–184 (183) ²	192–210 (205) ²	191–202 (194) ²	

¹⁾ Unter Berücksichtigung des Fließmittels (60 % Wassergehalt)

²⁾ Mittelwert aller Probekörper

³⁾ Mittlere Druckfestigkeit aller Probekörper mit 4 Vol.-% Stahlfasern

¹⁾ Taking the plasticizer into consideration (60 % water content)

²⁾ Mean value of all test specimens

³⁾ Mean compressive strength of all test specimens with 4 vol. % steel fibers

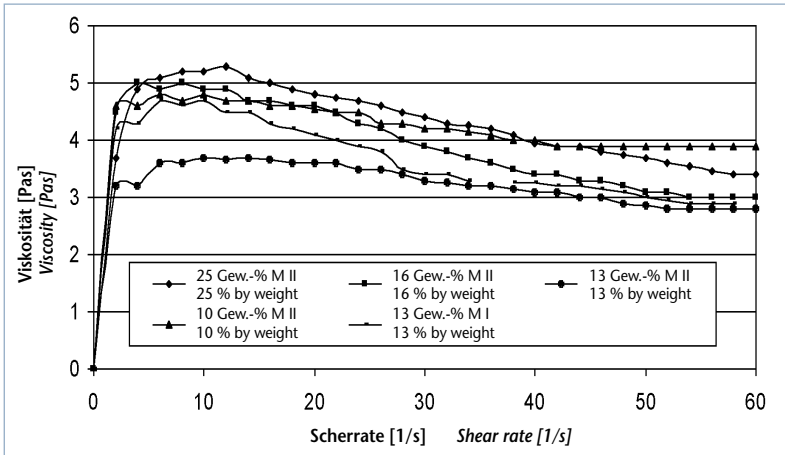


Bild 2. Viskosität von Zementleimpasten bei Zugabe unterschiedlicher Mengen an Mikrosilica und Mikrosilicaarten (MI und MII) nach Tabelle 1
Fig. 2. Viscosity of cement paste when adding different amounts of microsilica and micro silica types (MI and MII) to Table 1

Bild 3. Druckfestigkeit der UHPC nach Tabelle 2 in Abhängigkeit vom Wasser-Feststoffverhältnis des Bindemittelleims [2]
Fig. 3. Compressive strength of UHPC to Table 2, depending on the water-solids ratio of the binder paste [2]

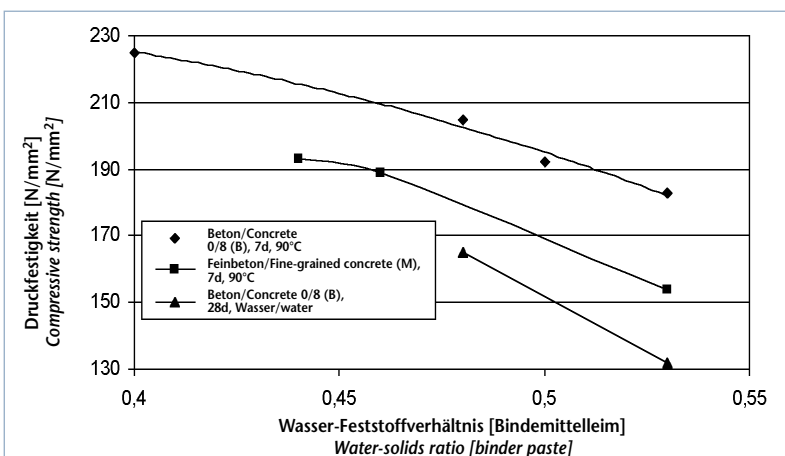
nach einer 2-tägigen feuchten Vorlagerung bei 90 °C wärmebehandelt wurde. Die Druckfestigkeit der wärmebehandelten Betone war immer höher als bei Wasserlagerung und stand zudem bereits unmittelbar nach dem Ende der Beheizung in vollem Umfang zur Verfügung.

Ein Kennzeichen des UHPC ist sein niedriger Wasser-Bindemittelwert von etwa 0,20 bis 0,25. Bindemittel sind dabei Zement und Mikrosilica sowie ggf. geeignete Flugaschen. Wie in EN 206 wird Mikrosilica wie Zement mit dem k-Faktor 1,0 angesetzt.

Mikrosilica füllt im Frischbeton die besonders kleinen Hohlräume zwischen den sonstigen Feinstkornpartikeln. Es verdrängt das sonst zur Füllung dieser Hohlräume erforderliche, rheologisch unwirksame Wasser. Bei gleichbleibendem Wassergehalt wird der Beton dadurch weicher. Dieser positive Effekt tritt allerdings nur so lange ein, bis der feine Porenraum zwischen den restlichen Feinkornpartikeln gefüllt ist. In Bild 2 ist die mit dem Rotationsviskosimeter gemessene Viskosität von Bindemittelleimen aus Zement und Quarzmehl mit unterschiedlichen Mengen an Mikrosilica dargestellt. Mit 13 M.-% hochreinem Mikrosilica II nach Tabelle 1 wurde der Bindemittelleim optimal verflüssigt, mit 10 oder 25 M.-% war er dagegen deutlich steifer.

Ein Vergleich der Feinbetone M 1Q und M 2Q in Tabelle 2 bestätigt diesen Effekt: Bei gleichbleibendem w/z-Wert sowie mit annähernd gleicher Leim- und Fließmittelmengen war der Beton M 2Q mit 135 kg/m² Mikrosilica sehr fließfähig (Ausbreitmaß a = 65 cm, Konsistenzklasse F 6 nach DIN EN 206). Mit 230 kg/m² Mikrosilica war er dagegen deutlich steifer (a = 55 cm, Konsistenzklasse F 4). Die Druckfestigkeit war in beiden Fällen etwa gleich.

Im Einzelfall kann mit dem Verfahren nach Puntke [17] abgeschätzt werden, wie groß der Hohlraum im Feinteilgefüge ist, der gefüllt werden soll und inwieweit er durch Zugabe von



The positive effect, however, prevails only until the fine voids between the remaining ultrafine particles are filled. In Figure 2, the viscosity of binder pastes made of cement and quartz powder, measured by rotation viscometer is shown with different amounts of microsilica. The binder paste was optimally liquefied with a mass percentage of 13 of ultra-pure microsilica II to Table 1; with a mass percentage of 10 or 25, it was noticeably stiffer.

A comparison between the fine-grained concrete M 1Q and M 2Q in Table 2 confirms this effect. At a constant w/c ratio and with approximately identical amounts of paste and superplasticizer, concrete M 2Q containing 135 kg/m² microsilica was highly flowable (slump a = 65 cm, consistency class F 6 to DIN EN 206). Made with 230 kg/m² microsilica it was clearly stiffer (a = 55 cm, consistency class F 4). The compressive strength was the same in both cases.

On a case-to-case basis, using the Puntke procedure [17], the void content in the fine particle structure that must be filled can be estimated, as well as the extent to which it will actually be filled after adding suitable ultrafines. With the rotation viscometer, the effect on the consistency achieved by changing the granular composition and the water-ultrafines value can be directly recorded – at least for fine-grained concrete.

With inert ultrafines with a low water requirement and whose particles have been adjusted – in this case quartz powders of different fineness to Table 1 – the cement content can also be noticeably reduced, while still achieving a higher compressive strength, as a shown by comparing mixes M 1 and M 1Q.

With UHPC it is therefore no longer sufficient to base the mix composition on the relationship between the w/c ratio and the compressive strength, as is the case with normal concrete. Of relevant influence is also the volume-related water-ultrafines value w/f of the binding agent.

Ultrafines are for this purpose all inert and reactive mineral constituents with a particle size of below 0.25 mm. The water-ultrafines ratio w/f is also an indirect measure for the granular composition of the ultrafines mix as well as for the remaining void content between the particles that must be filled with water, and as such for the packing density of the ultrafines. The w/f ratio is the actual basis for all optimization steps for UHPC.

With the concrete types shown in Figure 3, everything else being about equal, the compressive strength, for example, increased by up to around 26 %, when the water-ultrafines ratio was reduced from 0.55 to 0.44 through the addition of particle-optimized quartz powder, with the same effective w/c ratio.

Making proper use of the effect of the w/f ratio, the hitherto very high cement content required for UHPC can be reduced. Figure 4 shows the results of oriented tests. At a constant water-ultrafines ratio w/f of 0.52, in an UHPC with a maximum particle size of 8 mm, 370 kg cement were replaced by approx. 320 kg of inert quartz powder II to Table 1 of similar granular composition, see Figure 1. In this way, the cement content was reduced from 890 to only 520 kg/m². The w/c ratio increased from an initial 0.20 to 0.34, without a reduction in compressive strength. In these tests this happened only when a w/c ratio of around 0.40 was exceeded. To what extent the higher w/c ratio affects the durability of UHPC is currently under investigation.

Within the scope of a research project financed by the German Research Association, comprehensive investigations into the properties of fresh and hardened concrete were carried out on the concrete types compiled in Table 2, in particular with regard to their durability. The essential findings are summarized in the following.



passendem Feinstkorn tatsächlich gefüllt wird. Mit dem Rotationsviskosimeter kann – zumindest bei Feinbetonen – unmittelbar erfasst werden, wie sich die Konsistenz durch die Veränderung der Kornzusammensetzung und des Wasser-Feinststoffwertes auswirkt.

Inerter, kornangepasster Feinststoff mit niedrigem Wasseranspruch – im vorliegenden Fall unterschiedlich feine Quarzmehle nach **Tabelle 1** – ermöglichen es auch, den Zementgehalt deutlich zu senken und dennoch eine höhere Druckfestigkeit zu erzielen, wie ein Vergleich der Mischungen M 1 und M 1Q zeigt.

Es genügt deshalb bei UHPC nicht mehr, der Mischungszusammensetzung den Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Druckfestigkeit zu Grunde zu legen, wie dies bei Normalbeton üblich ist. Maßgeblichen Einfluss hat zusätzlich der volumenbezogene Wasser-Feinstteilwert w/f des Bindemittelleims.

Feinstteile sind dabei alle inerten und reaktiven mineralischen Bestandteile mit einer Korngröße unter 0,25 mm. Der Wasser-Feinstteilwert w/f ist auch ein indirektes Maß für die Kornzusammensetzung des Feinstteilmisches sowie für den von Wasser zu füllenden Resthohlraum zwischen den Partikeln und damit für die Packungsdichte der Feinstteile. Er bildet die eigentliche Grundlage für alle Optimierungsschritte bei UHPC. Bei den in **Bild 3** dargestellten, sonst vergleichbaren Betonen nach **Tabelle 2** stieg beispielsweise die Druckfestigkeit bei gleichem wirksamen w/z-Wert um bis zu rd. 26 % an, wenn der Wasser-Feinstteilwert durch Zugabe von kornoptimalem Quarzmehl von 0,53 auf 0,44 verringert wurde.

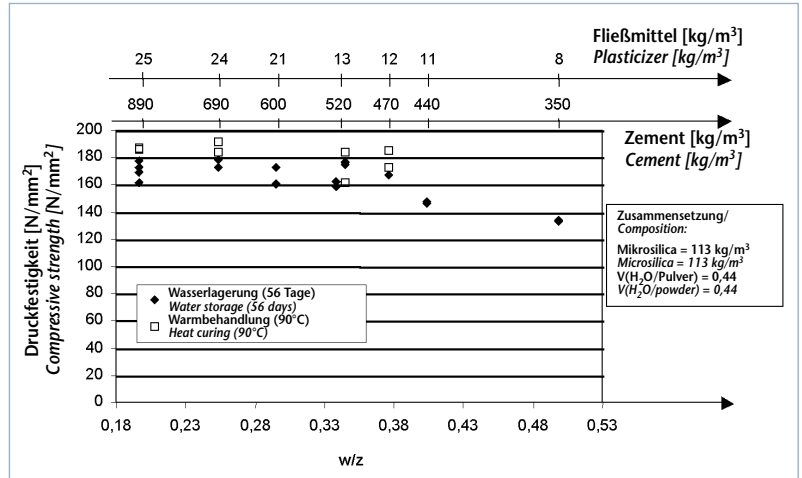
Das Wissen um den w/f-Wert ermöglicht es zudem, den bislang noch sehr hohen Zementgehalt von UHPC zu verringern. **Bild 4** zeigt die Ergebnisse orientierender Versuche. Bei einem gleichbleibenden Wasser-Feinstteilwert w/f von 0,52 wurden in einem UHPC mit 8 mm Größtkorn 370 kg Zement durch rd. 320 kg inertes Quarzmehl II nach **Tafel 1** mit ähnlicher Kornzusammensetzung ersetzt, siehe **Bild 1**. Der Zementgehalt sank dadurch von 890 auf nur noch 520 kg/m³. Der w/z-Wert stieg von anfänglich 0,20 auf 0,34 an, ohne dass die Druckfestigkeit kleiner wurde. Bei diesen Versuchen war dies erst der Fall, wenn ein w/z-Wert von etwa 0,40 überschritten wurde. Inwiefern der höhere w/z-Wert die Dauerhaftigkeit von UHPC beeinflusst, wird derzeit untersucht.

An den in **Tabelle 2** zusammengestellten Betonen wurden in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Forschungsvorhaben umfangreiche Untersuchungen zu den Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere auch zur Dauerhaftigkeit dieser neuen Betone durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst.

Festbeton

Porosität

Durch den sehr niedrigen Wasser-Bindemittelwert von nur rd. 0,20 und die dichte Feststoffpackung in der Matrix sinkt die Gesamtporosität (Luftporen + Kapillarporen + Gelporen) von selbstverdichtendem oder praktisch vollständig verdichtetem Ultra-Hochfestem Beton auf nur noch rd. 4 bis 6 Vol.-%. **Bild 5** zeigt die im Quecksilberdruckporosimeter gemessene Porenradienverteilung des bereits hochwertigen Zementsteins eines Betons der Festigkeitsklasse B55 im Vergleich zu denjenigen zweier Ultra-Hochfester Feinbetone (Druckfestigkeit rd. 200 N/mm²). Die für Stofftransporte verantwortlichen Kapillarporen fehlen praktisch ganz. Dies ist der eigentliche Grund dafür, dass sachgerecht hergestellter UHPC einen besonders hohen Widerstand gegen Carbonatisierung und gegen das Eindringen von Chloridionen und gegen Frost- und Frost-Tausalz-Angriff aufweist.



Hardened concrete

Porosity

Due to the very low average water-binding paste ratio of only around 0.20 and the dense packing of the solids in the matrix, the overall porosity (air voids + capillary pores + gel pores) of self-compacting or practically completely compacted UHPC is reduced to only around 4 to 6 vol. %. **Figure 5** shows the pore radii distribution measured in the mercury penetration porosimeter of the already high-quality cement paste of a concrete of strength class B55 compared to the values obtained on two types of fine-grained UHPC (compressive strength around 200 N/mm²). The capillary pores responsible for transporting solids are to all practical purposes non-existent. This is the real reason why properly manufactured UHPC has a particularly high resistance to carbonization and penetration of chloride ion, as well as to attacks of frost and frost/de-icing salt.

Shrinkage

With normal concrete, dry shrinkage makes the largest contribution to deformation due to shrinkage. Autogeneous shrinkage, also referred to as plastic shrinkage, contributes only a small part. With UHPC, the contribution of plastic shrinkage is noticeably higher, due to the high cement content and the very low water content, whereas the contribution of dry shrinkage diminishes.

Oriented investigations recorded overall shrinkage of around 0.7 to 1.9 mm/m, depending on the type and quantity of cement after 56 days of storage in the laboratory (20 °C/ 65 % rel. hum.).

Strength and deformation properties

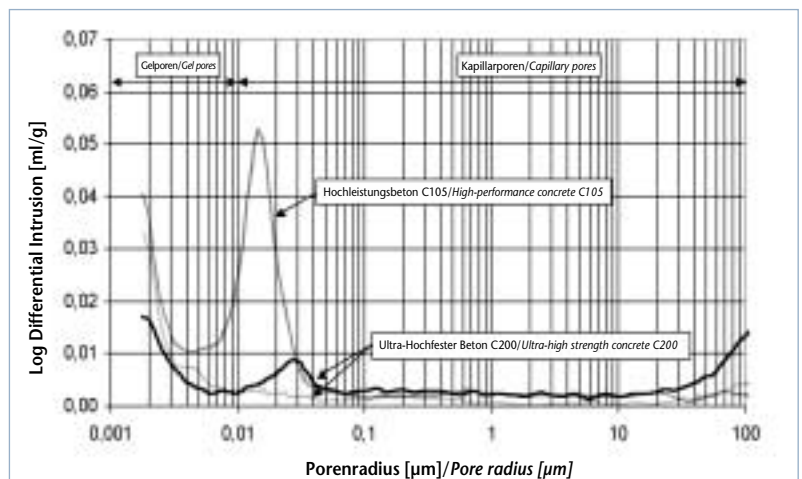
The characteristic parameter for the load capacity of concrete is typically its compressive strength. In addition to that, knowl-

Bild 4. Druckfestigkeiten von UHPC mit unterschiedlichem Zementgehalt und w/z-Wert bei konstantem w/f-Wert des Bindemittelleims [5]

Fig. 4. Compressive strengths of UHPC with different cement contents and w/c ratio at a constant w/f ratio of the binder paste [5]

Bild 5. Vergleich der Porenverteilung UHPC und B 55 (Zementleim)

Fig. 5. Comparison of pore distribution UHPC and B 55 (cement paste)



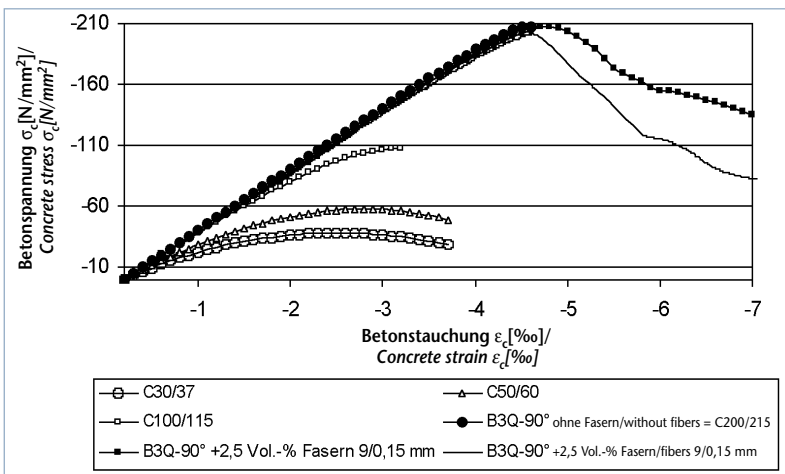


Bild 6. Spannungs-Stauchungskurve bei UHPC ohne und mit Stahlfasern
Fig. 6. Stress-punching-shear curve in UHPC with and without steel fibers

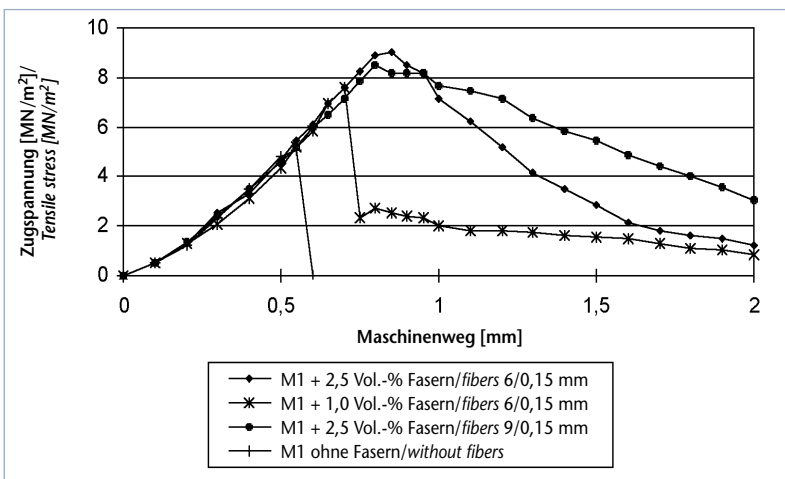
Schwinden

Bei Normalbeton hat das Trocknungsschwinden den größten Anteil an der Schwindverformung. Dem autogenen Schwinden, auch Schrumpfen genannt, kommt ein nur relativ kleinerer Anteil zu. Bei Ultra-Hochfesten Betonen ist der Anteil des Schrumpfens wegen des hohen Zementgehaltes und des sehr niedrigen Wassergehaltes deutlich größer und der Anteil des Trocknungsschwindens nimmt demgegenüber ab. Orientierende Untersuchungen ergaben in Abhängigkeit von der Zementart und der Zementmenge nach 56 Tagen Laborlagerung (20 °C/65 % r. F.) ein Gesamtschwindmaß von rd. 0,7 bis 1,0 mm/m.

Festigkeits- und Verformungseigenschaften

Der charakteristische Kennwert für die Tragfähigkeit von Beton ist üblicherweise seine Druckfestigkeit. Daneben sind Kenntnisse über seine Zug- und Biegezugfestigkeit erforderlich. Neben der Festigkeit ist die ausreichende Zähigkeit (Duktilität) eines Baustoffes ein entscheidendes Bemessungs- und Konstruktionskriterium. In den Bildern 6 bis 8 ist das an unterschiedlichen Laborprüfkörpern gemessene Festigkeits- und Verformungsverhalten von UHPC mit und ohne Stahlfasern bei Druck- oder Zugbeanspruchung dargestellt. Ultra-Hochfester Beton verformt sich bei Druck- und Zugbeanspruchung bis zum Bruch immer nahezu ideal elastisch, d.h. es ist ein spröder Werkstoff mit einem im Vergleich zu Normalbeton deutlich höheren Elastizitätsmodul zwischen rd. 50.000 und rd. 55.000 N/mm². Wegen seiner hohen Festigkeit speichert er zudem sehr viel Energie und versagt deshalb schlagartig, wenn die Festigkeit überschritten wird. Seine hohe Festigkeit könnte deshalb aus Sicherheitsgründen nur teilweise ausgenutzt werden und/oder er wäre nur für wenige konstruktive Anwendungen geeignet.

Bild 7. Spannungs-Dehnungskurve von UHPC mit und ohne Fasern im einaxialen Zugversuch
Fig. 7. Stress-strain curve in UHPC with and without fibers subjected to uniaxial tensile testing



edge of its tensile and flexural tensile strength is required. Apart from strength, adequate toughness (ductility) of a building material is a decisive design and construction criterion. In Figures 6 to 8, the strength and deformation behavior of UHPC with or without steel fibers under compression or tension loading measured on different laboratory specimens is shown. The deformation of UHPC under compression or tension loading up to the point of failure always takes place nearly ideally elastic, i.e. it is a brittle material with a compared to normal concrete clearly higher modulus of elasticity ranging from around 50,000 to 55,000 N/mm². Due to its high strength, it moreover stores much more energy and will therefore fail suddenly upon exceeding the ultimate strength. Its high strength could therefore, for reasons of safety, be only partially exploited and/or would be suitable for only a few structural applications.

For this reason, fine wire fibers are added to UHPC for many applications. Figure 6 illustrates on the example of a cylinder under compression (D/H = 150/300 mm) how the structural behavior is improved by around 4.5 % upon exceeding the compressive strength at an elongation of failure typical of UHPC. The compressive strength itself is practically not increased by the fibers. The results of centric tensile tests in Figure 7, which were performed on notched prisms 160 x 40 x 40 mm of the fine-grained concrete M1Q of Table 2 show, however, that the wire fibers used here increase both tensile strength and ductility beginning at a quantity of 2.5 vol. %, thus durably improving the safety of the construction material against sudden failure under excessive loading. That this is not only the case with small prisms is shown in Figure 8: The strength and the fracture toughness of beams 700 x 150 x 150 mm subjected to bending were also much improved. Here, longer fibers turned out to be more effective than shorter ones of identical diameter (Table 1). The fibers are bound into the hardened cement paste much more firmly than is the case with normal concrete and are therefore especially effective. While the fibers in normal concrete are pulled out of the matrix as the deformation increased, in UHPC they are partly loaded to the point of fracture, as can be seen in Figure 9. The fracture patterns of test cylinders under compression shown in Figures 10 and 11 with and without fibers, once again illustrate the effectiveness of the fibers.

Fatigue behavior under pulsating load

Given the numerous possible applications, UHPC is frequently subjected to pulsating or alternating loading as occur for example with bridges, in the poles of wind power plants and heavily trafficked roads. For the proper design and construction of the material knowledge of for how long UHPC can be loaded when subjected for longer periods of time to pulsating load to prevent it from becoming fatigued and premature failure.

Figure 12 shows the results of test cylinders (H = 300 mm, D = 150 mm) made of a mixture of B3Q-90° to Table 2 subjected to compression and pulsating load tests. They were loaded in a 6.3 MN hydro pulse plant at a constant minimum stress of (σ_{\min} = 5 % and a maximum load of between 85 % and around 45 % of the static compressive strength (f_c = 190 to 200 N/mm²).

The results show that the behavior under continuous vibration, similar as is the case with normal concrete, can be approximated to the Wöhler diagram (Fig. 12). The oscillation width is applied over the relevant number of alternate load cycles in logarithmic presentation. Resistance to pulsating stress is in general defined as the stress at which the 2 x 10⁶ load cycles are achieved without signs of imminent failure due to rupture.

While the test specimen loaded with around 65 % of the static compressive strength (oscillation width 0.60) failed after around 10⁵ load cycles, there were no signs of possible failure

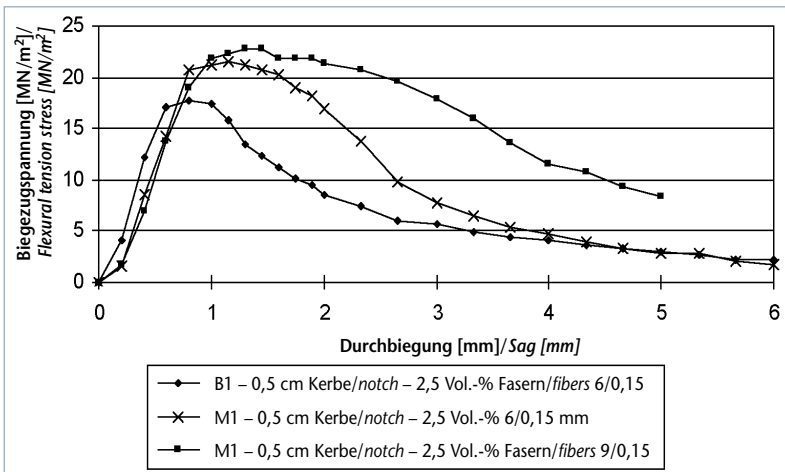


Bild 8. Spannungs-Dehnungskurve von UHPC mit und ohne Fasern im Biegezugversuch
Fig. 8. Stress-strain curve in UHPC with and without fibers in a bending test

Aus diesem Grund werden Ultra-Hochfestem Beton für verschiedene Anwendungen feine Drahtfasern zugegeben. **Bild 6** zeigt am Beispiel eines auf Druck beanspruchten Zylinders ($D/H = 150/300$ mm), wie das Tragverhalten nach Überschreiten der Druckfestigkeit bei einer für UHPC üblichen Bruchdehnung von rd. 4,5 ‰ verbessert wird. Die Druckfestigkeit selbst wird durch die Fasern praktisch nicht erhöht. Die in **Bild 7** dargestellten Ergebnisse von zentrischen Zugversuchen an gekerbten Prismen $160 \times 40 \times 40$ mm, hergestellt aus dem Feinbeton M1Q in **Tabelle 2**, zeigen dagegen, dass die hier verwendeten Drahtfasern etwa ab einer Menge von 2,5 Vol.-% sowohl die Zugfestigkeit als auch die Duktilität und damit die Sicherheit des Baustoffes gegen schlagartiges Versagen bei Überbeanspruchung nachhaltig verbesserten. Dass dies nicht nur an kleinen Prismen der Fall ist, zeigt **Bild 8**: Auch die Festigkeit und die Bruchzähigkeit biegebeanspruchter Balken $700 \times 150 \times 150$ mm wurden wesentlich verbessert. Längere Fasern waren dabei wirksamer als kürzere mit gleichem Durchmesser (**Tabelle 1**).

Die Fasern sind sehr viel fester in den Zementstein eingebunden als bei Normalbeton und dadurch besonders wirksam. Während sie dort mit zunehmender Verformung des gerissenen Querschnittes immer aus der Matrix herausgezogen werden, werden sie im UHPC teilweise bis zum Bruch beansprucht, wie **Bild 9** zeigt. Die in den **Bildern 10** und **11** wiedergegebenen Bruchbilder von druckbelasteten Prüfzylindern mit und ohne Fasern verdeutlichen noch einmal die Wirksamkeit der Fasern.

Ermüdungsverhalten bei Dauerschwellbelastung

Bei zahlreichen möglichen Anwendungen ist UHPC häufig wiederholten Schwell- oder Wechselbeanspruchungen ausgesetzt, wie z. B. bei Brücken, in Masten von Windkraftanlagen, in hochbelasteten Fahrbahnen etc. Für die stoffgerechte Bemessung und Konstruktion muss deshalb bekannt sein, wie hoch UHPC bei einer lang anhaltenden Schwellbeanspruchung beansprucht werden darf, damit er nicht ermüdet und vorzeitig versagt.

In **Bild 12** sind als Beispiel die Ergebnisse von Druck-Schwellversuchen an Prüfzylindern ($H = 300$ mm, $D = 150$ mm) aus der Mischung B3Q-90° nach **Tabelle 2** dargestellt. Sie wurden in einer 6,3 MN Hydropulsanlage mit einer konstanten minimalen Unterspannung von ($\sigma_u = 5$ % und mit einer Oberlast zwischen 85 % und rd. 45 % der statischen Druckfestigkeit ($f_c = 190$ bis 200 N/mm²) belastet.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Dauerschwingverhalten ähnlich wie bei Normalbeton annähernd in einer Wöhlerlinie darstellen lässt (**Bild 12**). Aufgetragen ist die Schwingbreite über der zugehörigen Lastwechselzahl in logarithmischer Darstellung. Als Dauerschwellfestigkeit ist im Allgemeinen die Spannung definiert, bei der 2×10^6 Lastwechsel erreicht werden, ohne dass sich ein (Bruch-)Versagen ankündigt.



Bild 9. Drahtfaser in UHPC – Matrix Bildbreite 1,7 mm
Fig. 9. Wire fibers in a UHPC matrix, frame width 1.7 mm

at a related oscillation width of 0.45, even after $5 \cdot 10^6$ load cycles. The test was stopped. This could imply that UHPC subjected to pulsating load behaves in a similar way as normal concrete for which the resistance to continuous pulsating load is at least around 50 % of the static strength. However, further tests are planned here for more reliability, among others also multi-stage loading tests.

Durability

Frost and frost/de-icing salt resistance

Concrete used for external components must have a sufficiently high frost resistance. For bridges, park decks and other transport structures a sufficiently high resistance to frost and de-icing salt is required.

The resistance of normal concrete to attacks of frost and frost/de-icing salt increases as the w/c ratio is decreased, reducing thus the capillary pore content. The capillary pore content of UHPC, given its very low w/c ratio of only 0.30 or less and the higher content of solids in the hardened cement paste of around 1.5 to 2 vol. % is markedly smaller than with normal concrete and also still lower than with high-strength concrete, for which around 4 to 6 vol. % are typically recorded.

Figure 13 shows the area of mass loss usually determined on test specimens of normal concrete with air voids, or on HPC when tested by CDF process. With the UHPC tested to **Table 2**, at a maximum of 200 g/m² after 28 days and 290 g/m² following 56 freeze-thaw cycles, it was significantly lower as with these types of concrete and also considerably below the guide value of max. 1500 g/m² assumed for this test. [13].

This implies that both the high density and the high strength of the binder matrix contribute to the increase in frost and frost/de-icing salt resistance. Only very little moisture is able to penetrate into the concrete and more resistance is offered to the hydraulic pressure that builds up in the interior of the concrete in freezing temperatures than is the case with normal or HPC.

Carbonization

Carbonization with normal concrete depends essentially on the w/c ratio, the cement content and the type of cement used, as well as the curing measures. The lower the w/c ratio, the lower the porosity and the lower also the permeability for CO₂. The higher the amount of Ca(OH)₂ formed during hydration of the Portland cement clinker phase C₃S and C₂S, the more CO₂ is bound before the carbonation front advances further.

Figure 14 shows the carbonation rate of a normal concrete C55 compared to an UHPC with a maximum particle size of 8mm and a fine-grained concrete with a maximum particle size of 0.5 mm when stored in a laboratory climate (20 °C, 65 % rel. humidity). On UHPC a very low carbonation depth of around 0.3 to 0.5 mm was measured after six months. After 3 years, at a maximum of 2 mm, it ranged still clearly below that of a C55 with around 6 mm [16]. The carbonation depth of structural components stored protected on the exterior and unprotected on the exterior was up to 2.5 mm.

Resistance to chloride ions

Completely compacted UHPC has a very low overall porosity and very few capillary pores. This opposes the passage of pollutants. **Table 3** shows the composition and properties of 2 types of normal concrete with and without hydrophobing agent and an UHPC whose resistance to chloride diffusion was established in a comparative test.

Chloride diffusion was tested in a quick migration test [18]. Here, concrete disks of 3.5 cm thickness are installed between two chambers. One chamber contains water, the other a 10-% chloride solution. Chloride diffusion is accelerated by applying a DC voltage of 40 V over a period of 6 hours. The load transferred during this time is measured (**Bild 15**) and the penetra-

Während die mit einer Oberlast von rd. 65 % der statischen Druckfestigkeit (Schwingbreite 0,60) belasteten Prüfkörper nach rd. 10^5 Lastwechseln versagten, kündigte sich bei einer bezogenen Schwingbreite von 0,45 auch nach $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln noch kein Bruch an. Der Versuch wurde abgebrochen. Dies lässt vermuten, dass sich UHPC bei Dauerschwellbeanspruchung ähnlich verhält wie Normalbeton, bei dem die Dauerschwellfestigkeit mindestens rd. 50 % der statischen Festigkeit beträgt. Allerdings sind zur Absicherung noch weitere Versuche vorgesehen, unter anderem auch mit mehrstufiger Beanspruchung.

Dauerhaftigkeit

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Beton für Außenbauteile muss einen ausreichend hohen Frostwiderstand aufweisen. Bei Brücken, Parkdecks und anderen Verkehrsbauteilen ist zudem ein ausreichend hoher Widerstand gegen Frost- und Tausalz erforderlich.

Der Widerstand von Normalbeton gegen Frost- und Frost-Tausalz-Angriff steigt, wenn der w/z-Wert sinkt und dadurch der Kapillarporenanteil kleiner wird. Der Kapillarporenanteil von UHPC ist wegen des sehr niedrigen w/z-Wertes von nur noch 0,30 oder darunter und des höheren Feststoffanteils im Zementstein mit rd. 1,5 bis 2 Vol.-% deutlich kleiner als beim Normalbeton und auch noch kleiner als bei Hochleistungsbeton, bei dem üblicherweise rd. 4 bis 6 Vol.-% gemessen werden.

Bild 13 zeigt den Bereich des Masseverlustes, der üblicherweise an Prüfkörpern aus Normalbeton mit Luftporen oder aus Hochleistungsbeton bei Prüfung im CDF-Verfahren festgestellt wird. Bei dem geprüften UHPC nach **Tabelle 2** war er mit einem Maximum von 200 g/m² nach 28 und 290 g/m² nach 56 Frost-Tau-Wechseln signifikant kleiner als bei diesen Betonen und auch wesentlich kleiner als der für das Verfahren angenommene Richtwert von höchstens 1500 g/m² [13].

Zu vermuten ist, dass sowohl die hohe Dichtigkeit als auch die hohe Festigkeit der Bindemittelmatrix zur Erhöhung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes beiträgt. In den Beton dringt nur wenig Feuchtigkeit ein und gegen den beim Gefrieren im Inneren des Betons entstehenden hydraulischen Druck wird ein höherer Widerstand geleistet als bei Normal- oder Hochleistungsbeton.

Carbonatisierung

Die Carbonatisierung ist bei Normalbetonen im Wesentlichen vom w/z-Wert, dem Zementgehalt und der Zementart sowie von den Nachbehandlungsmaßnahmen abhängig. Je niedriger der w/z-Wert ist, desto geringer ist die Porosität und desto niedriger ist auch die Durchlässigkeit für CO₂. Je größer die Menge des bei der Hydratation der Portlandzementklinkerphasen C₃S und C₂S gebildeten Ca(OH)₂ ist, desto mehr CO₂ wird gebunden, bevor die Carbonatisierungsfront weiter voranschreitet.

Bild 14 zeigt den Carbonatisierungsfortschritt eines Normalbetons C55 im Vergleich zu einem Ultra-Hochfesten Beton mit einem Größtkorn von 8 mm und einem Feinkornbeton mit einem Größtkorn von 0,5 mm bei Lagerung im Laborklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte). Beim Ultra-Hochfesten Beton war erst nach einem halben Jahr eine sehr geringe Carbonatisierungstiefe von ca. 0,3 bis 0,5 mm messbar. Nach 3 Jahren lag sie mit maximal 2 mm deutlich unter der eines C55 mit rd. 6 mm [16]. Die Carbonatisierungstiefe von im Außenbereich geschützt und ungeschützt gelagerten Betonbauteile betrug bis zu 2,5 mm.

Widerstand gegen Chloridionen

Vollständig verdichteter Ultra-Hochfester Beton besitzt eine sehr geringe Gesamtporosität und sehr wenige Kapillarporen. Dadurch wird der Transport von Schadstoffen behindert. **Tabelle 3** zeigt die Zusammensetzungen und Eigenschaften

tion depth of the chloride ions established upon completion of the diffusion.

The normal concrete, as expected, experienced at 2.3 mm the highest penetration depths (C1). When a hydrophobing agent was added, the load transferred and the penetration depth decreased considerably (C2). In the UHPC, the chlorides penetrated less than 0.1 cm into the concrete. The amount of chloride transferred indicated that the test mix was highly resistant to chloride attack.

Fire resistance

Due to the very dense structure of UHPC, the vapor pressure that builds up in the interior of the concrete when subjected to high temperatures cannot be released to the outside through the pores. This may in some circumstances cause the concrete to fail suddenly.

In fire tests, the unloaded test specimens were tested for 45 to 90 minutes in accordance with the temperature curve specified in DIN 4102 [6]. Ultra-high strength mortar samples (M) failed completely during the test, whether or not they contained steel fibers (**Figure 17**). If, however, 0.6 vol. % of the polypropylene fibers shown in **Figure 16** was added, the damage was slight. For UHPC 0/8 mm with basalt aggregate, 0.3 vol. % was sufficient.

The reason for this is most likely that the polypropylene fibers melt at temperatures above around 170 °C. As shown in **Figure 17**, voids are created in the concrete in which the vapor is able to relax. Also, for UHPC, aggregates containing larger coarse particles, which largely consist of quartz, should be avoided. The non-linear elongation behavior (quartz inversion at 573 °C) can cause additional interior stress.

Production and processing

UHPC can be produced in conventional mixing plants with sufficient mixing effect, as available in precast plants. Preliminary tests are however required on a case-to-case basis to optimize the mixing process to the point that the ultrafine particles are homogeneously inter-mixed and the plasticizers completely saturated. Excessive mixing times of more than 3 minutes can sometimes have the effect that the fresh concrete becomes more heated up, thus limiting the processing time. This can be counter-acted by the usual measures employed for reducing the temperature of fresh concrete in high external temperatures.

UHPC can be processed in the entire consistency spectrum, from earth-moist to highly flowable and self-compacting. Highly flowable mixes with a high content of fine particles may however in some cases be less ductile than flow concrete or self-compacting normal concrete. In such cases it may be necessary to agitate the mix additionally and compact it lightly for complete de-aeration.



Bild 10. Schlagartig gebrochener Prüfcylinder aus UHPC ohne Stahlfasern
Fig. 10. Suddenly failed test cylinder of UHPC without steel fibers



Bild 11. Prüfcylinder mit 2,5 Vol.-% Stahlfasern
Fig. 11. Test cylinder with 2.5 vol.-% steel fibers

Bild 12. Wöhlerdiagramm UHPC B3Q-90° (mit Fasern)
Fig. 12. Wöhler diagram UHPC B3Q-90°(with fibers)

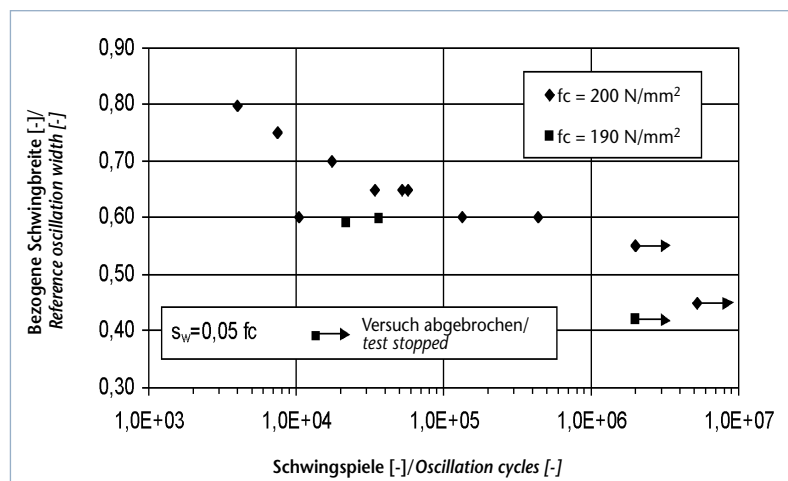




Tabelle 3. Zusammensetzung und Eigenschaften Ultra-Hochfester Betone im Chloridwiderstandstest
Table 3. Composition and properties of UHPC tested for chloride resistance

		C1	C2	UHPC
Zementart Cement type		CEM I 42.5R	CEM I 42.5R	CEM I 52.5R HS-NA
Zement Cement	[kg/m ³]	360	360	580
Wasser Water	[l/m ³]	180	180	162.5
w/z-Wert W/c ratio	[-]	0.50	0.50	0.28
Sand 0,125/0,5 Sand 0.125/0.5	[kg/m ³]	-	-	354
Basalt 2/16 Basalt 2/16	[kg/m ³]	-	-	711
Zuschlag 0/2 Aggregate 0/2	[kg/m ³]	740	740	-
Zuschlag 2/8 Aggregate 2/8	[kg/m ³]	600	600	-
Zuschlag 8/16 Aggregate 8/16	[kg/m ³]	470	470	-
Mikrosilica Microsilica	[kg/m ³]	-	-	177.0
Quarz I Quartz I	[kg/m ³]	-	-	325.0
Hydrophobierungsmittel Hydrophobing agent	[kg/m ³]	-	3.60	-
Übertragene Ladung Transmitted load	[As]	1736	216	21.6
Eindringtiefe Penetration depth	[cm]	2.3	0.9	< 0,1

Application

UHPC was used for the first time in 1997 for the construction of the Sherbrooke Footbridge [7] in Canada (Fig. 18) and for the conversion of the Cattenom nuclear power plant. This year, a footbridge leading to a soccer stadium in Korea was partially constructed of UHPC. In preparation for a larger bridge project, the 6 m-long self-supporting footbridge shown in Figure 19 was manufactured at Kassel University exclusively of heat-treated steel-fiber reinforced UHPC. The bridge was designed for an ultimate load of 5 kN/m². The actual bridge deck has a thickness of only 3 cm. Carbon fiber lamellas were glued to the underneath side of the lateral beams.

Other possible areas of application for UHPC with and without fibers are:

- ▶ Highly loaded compression members (e.g. columns of circular cross-sections and steel mantle for confinement).
- ▶ Filigree, wide-spanning precast members (beams, slabs as used e.g. in parking structures and industrial buildings).
- ▶ Composite girders, strengthened girders and hybrid reinforced-concrete structures.
- ▶ Bridges with large spans (weight reduction).
- ▶ Applications instead of steel constructions in aggressive environments (e.g. in a marine environment: flood barriers, sheet piling profiles) for reducing permanent problems.

von 2 Normalbetonen mit und ohne Hydrophobierungsmittel und einen Ultra-Hochfesten Beton, deren Widerstand gegen Chloriddiffusion vergleichend geprüft wurde. Die Chloriddiffusion wurde mit einem Schnellmigrationstest geprüft nach [18]. Dabei werden Betonscheiben mit einer Dicke von 3,5 cm zwischen zwei Kammern eingebaut. In der einen Kammer ist Wasser, in der anderen eine 10-%ige Chloridlösung. Die Chloriddiffusion wird durch Aufbringen einer Gleichspannung von 40 V über einen Zeitraum von 6 Stunden beschleunigt. Gemessen wird die übertragene Ladungsmenge (Bild 15) und nach Diffusionsende die Eindringtiefe der Chloridionen. Der Normalbeton wies erwartungsgemäß mit 2,3 mm die höchste Eindringtiefen auf (C1). Wurde ein Hydrophobierungs-

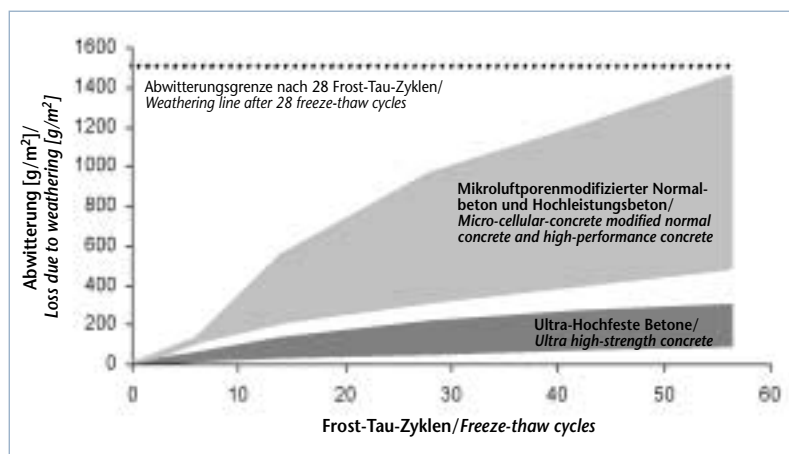
- ▶ Forming fiber-reinforced nodes of UHPC instead of cast iron solutions (e.g. for tree-like supporting structures).
- ▶ High-strength coatings (for reinforcing members or for wear coats).
- ▶ Tunnel segments.
- ▶ UHPC pipes for jacking pipelines.
- ▶ In highly loaded areas of structures, e.g. to increase the resistance to punching shear in horizontal floors.
- ▶ Rehabilitation and reinforcement of highly loaded industrial floors and transportation routes.

In particular in structures for which the self-weight of the columns is restricted, UHPC can be used to good advantage. With the same load capacity, considerably smaller cross-sections are possible than with normal or high-strength concrete to DIN EN 206. For arch bridges with wide spans, e.g., the standard normal massive structure can be replaced with steel tubes filled with UHPC either in the plant or at the site. These can then be as easily installed as steel parts. Bridge decks made of steel fiber UHPC can likewise be wholly or partly prefabricated, can be much thinner and may be able to be trafficked directly without additional cover.

For bridges spanning waterways, whose construction height may be restricted e.g. due to connections to existing roads or other local situations, the clear flow-through height may be increased due to the lower thickness of the structure.

The new building material UHPC is obviously more expensive than conventional or high-strength concrete, with or without steel fibers. The rough cost comparison between a massive arch bridge and an alternative construction of UHPC of equal loadbearing capacity show, however, that the total costs are in the end not higher, but lower than for conventional rein-

Bild 13. Vergleich der Abwitterung zwischen Normal-/Hochleistungsbetonen und UHPC
Fig. 13. Comparative weathering of normal/high-strength concrete and UHPC



mittel hinzugegeben, so verringerten sich die übertragene Ladungsmenge und die Eindringtiefe erheblich (C2). Beim Ultra-Hochfesten Beton UHPC drangen die Chloridionen weniger als 0,1 cm in den Beton ein. Ebenso wies die übertragene Ladungsmenge darauf hin, dass diese Betonmischung einen besonders hohen Widerstand gegen Chloridangriffe besitzt.

Brandwiderstand

Infolge der sehr dichten Gefügestruktur von UHPC kann sich der bei starker Hitzeeinwirkung im Inneren des Betons entstehende Dampfdruck nicht in Poren oder nach außen hin abbauen. Dadurch kann der Beton unter Umständen plötzlich versagen.

In Brandversuchen wurden unbelastete Probekörper 45 bis 90 Minuten nach der in DIN 4102 beschriebenen Einheitstemperaturkurve beansprucht [6]. Ultrahochfeste Mörtel (M) mit und ohne Stahlfasern versagten während der Brandbeanspruchung vollständig (Bild 17). Wurden dagegen 0,6 Vol.-% der in Bild 16 gezeigten Polypropylenfasern zugegeben, so waren sie nur noch gering geschädigt. Bei UHPC 0/8 mm mit Basaltzuschlag reichten dafür 0,3 Vol.-% aus.

Begründet werden kann dies damit, dass die Polypropylenfasern bei Temperaturen über rd. 170 °C schmelzen. Wie Bild 17 zeigt, entstehen im Beton Hohlräume, in denen sich der Dampf entspannen kann. Außerdem sollte bei UHPC mit größerem Grobkorn auf Zuschläge verzichtet werden, die zu einem großen Teil aus Quarz bestehen. Das nichtlineare Dehnungsverhalten (Quarzsprung bei 573 °C) kann zu zusätzlichen inneren Spannungen führen.

Herstellung und Verarbeitung

Ultra-Hochfester Beton kann in konventionellen Betonmischanlagen mit ausreichender Mischwirkung hergestellt werden, wie sie in Fertigteilwerken vorhanden sind. Es sind allerdings in jedem Einzelfall Vorversuche erforderlich, um den Mischungsablauf so zu optimieren, dass die Feinstteile homogen miteinander vermischt und das Fließmittel vollständig aufgeschlossen wird. Zu lange Mischzeiten von mehr als 3 Minuten können unter Umständen dazu führen, dass sich der Frischbeton stärker erwärmt und dadurch die Verarbeitungszeit eingeschränkt wird. Dem kann durch Maßnahmen entgegengewirkt werden, wie sie üblich sind, um bei hohen Außentemperaturen die Frischbetontemperatur herabzusetzen.

Ultra-Hochfester Beton lässt sich im ganzen Konsistenzspektrum von erdfeucht bis sehr fließfähig und selbstverdichtend herstellen und entsprechend verarbeiten. Sehr feinstkornreiche fließfähige Mischungen können allerdings unter Umständen zäher sein als Fließbeton oder als selbstverdichtender Normalbeton. Ist dies der Fall, so müssen sie ggf. zusätzlich bewegt und leicht verdichtet werden, um sie vollständig zu entlüften.

Anwendungen

Erstmals wurde Ultrahochfester Beton im Jahr 1997 beim Bau der Sherbrooke Footbridge [7] in Kanada (Bild 18) und beim Umbau des Atomkraftwerks Cattenom verwendet. In diesem Jahr wurde in Korea eine Fußgängerbrücke als Zugang zu einem Fußballstadion teilweise mit UHPC hergestellt. Als Vorbereitung für ein erstes größeres Brückenprojekt wurde in der Universität Kassel der in Bild 19 gezeigte, 6 m lange, freitragende Fußgängersteg hergestellt, der ausschließlich aus wärmebehandeltem Ultra-Hochfestem Stahlfaserbeton besteht. Die Brücke wurde auf eine Traglast von 5 kN/m² bemessen. Das eigentliche Brückendeck ist nur 3 cm dick. Als Zugbewehrung wurden unter die seitlichen, 10 cm hohen Stege Kohlefaserslamellen geklebt.

Weitere mögliche Einsatzgebiete für UHPC mit und ohne Fasern sind:

- ▶ Hochbelastete Druckglieder (z. B. Stützen mit Kreisquerschnitt und Stahlummantelung zur Umschnürung).

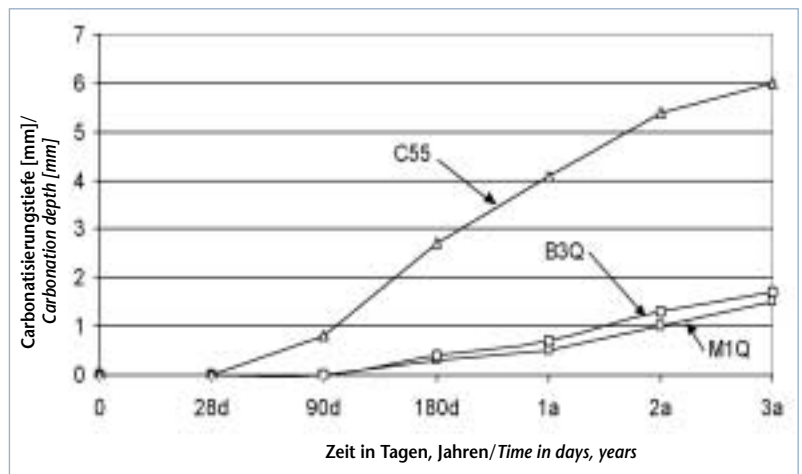


Bild 14. Carbonatisierungsfortschritt im Normklima

Fig. 14. Carbonation rate in standard climate

forced- or prestressed-concrete structures, because considerable quantities of construction material can be saved and because, an intelligent structural design that exploits the advantages of UHPC provided, moreover many more elements of the structure can be prefabricated and installed on the site comparatively easily and independent of the weather.

Summary

The technology of UHPC with a compressive strength of around 180 to 230 N/mm² has in the meantime been developed to the point that it can be manufactured to target specifications using suitable indigenous materials. At Kassel University, within the scope of a research project sponsored by the German Research Society, the essential fundamental relationships and properties of this material are now established to the point of industrial application. UHPC is particularly well suited for production in precast plants under factory-controlled quality-assured conditions and largely independent of the weather.

Bild 15. Übertragene Ladungsmenge und Eindringtiefe im Chloridwiderstandstest

Fig. 15. Transmitted loads and penetration depth in a chloride resistance test

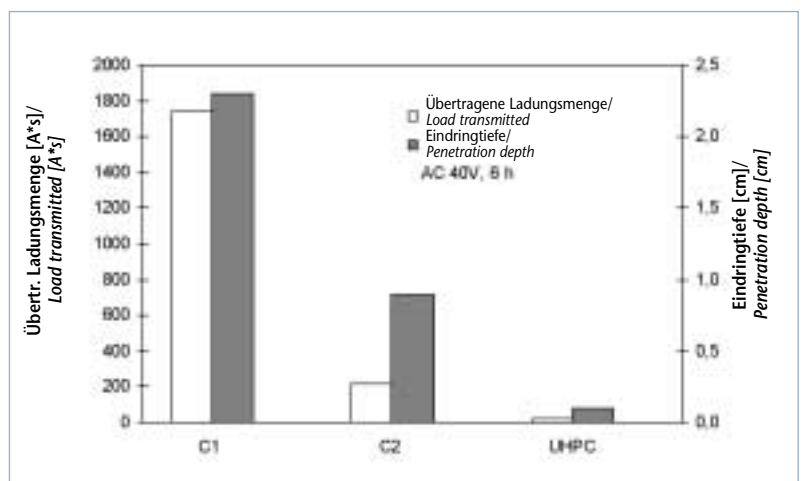




Tabelle 4. Vergleich der Massen und Kosten einer massiven Brücke aus Normalbeton und aus UHPC am Beispiel der Kylltalbrücke
Table 4. Comparison of quantities and costs of a massive normal concrete bridge and one of UHPC, on the example of the Kylltal Bridge

	Ausgeführte Version Completed version	Alternativ-Entwurf UHPC Alternative design UHPC
Überbau Superstructure	400 kN/m	400 kN/m
Bogen Arch	7m · (1,5 – 3,5 m); ca. 400 kN/m	4 Rohre Ø 609 mm; 40 kN/m 4 pipes Ø 609 mm; 40 kN/m
Kosten Costs	Bogen und Ständer: 3,32 Mio. EUR Arch and columns EUR 3.32 million	Bogen, Ständer + Diagonalen: 1,78 Mio. EUR Arch, columns + diagonals EUR 1.78 million



Bild 16. Intakte PP-Faser (4000-fache Vergrößerung, Bildbreite 30 µm)
Fig. 16. Intact PP fibers (enlarged by a factor of 4000, frame width 30 µm)

Bild 17. PP-Faserhohlung nach Brandbeanspruchung (1000-fache Vergrößerung, Bildbreite 120 µm)
Fig. 17. PP fiber following a fire test (enlarged by a factor of 1000, frame width 120 µm)

- ▶ Filigrane, weitgespannte Fertigteile (Balken, Platten, z. B. für Parkhäuser, Industriegebäude).
- ▶ Verbundträger, unterspannte Träger und Stahl-Beton-Hybridkonstruktionen.
- ▶ Brücken mit großen Spannweiten (Gewichtsreduktion).
- ▶ Anwendungen anstelle von Stahlkonstruktionen bei aggressiven Umweltbedingungen (zum Beispiel in mariner Umgebung: Flutbarrieren, Spundwandprofile) zur Reduktion von Dauerhaftigkeitsproblemen.
- ▶ Ausbildung faserbewehrter Knotenpunkte aus UHPC anstelle von Gussknoten (zum Beispiel bei baumartigen Unterstützungsstrukturen).
- ▶ Hochfeste Beschichtungen (bei Bauteilverstärkungen oder für Verschleißbeschichtungen).
- ▶ Tübbinge für den Tunnelbau.
- ▶ Rohre aus UHPC für das Vorpresse von Rohrleitungen.
- ▶ Bauelement für hochbeanspruchte Bereiche von Tragwerken, zum Beispiel zur Erhöhung des Durchstanzwiderstands bei Flachdecken.
- ▶ Instandsetzung und Verstärkung hoch beanspruchter Industriedecken und Verkehrswege.



Insbesondere bei Bauwerken, bei denen das Eigengewicht die Stützweite begrenzt, ist UHPC sehr vorteilhaft. Bei gleicher Tragfähigkeit sind deutlich kleinere Querschnitte möglich als mit bewehrtem

Normal- oder Hochfestem Beton nach DIN EN 206. Bei weitgespannten Bogenbrücken kann z.B. das sonst übliche massive Tragwerk durch vorgefertigte oder vor Ort mit UHPC gefüllte Stahlrohre ersetzt werden, die wie Stahlbauteile einfach zu montieren sind. Brückendecks aus Ultra-Hochfestem Stahlfaserbeton können ebenfalls ganz oder teilweise vorgefertigt werden, wesentlich dünner sein und unter Umständen ohne zusätzliche Deckschichten direkt befahren werden.

Bild 18. Sherbrooke Footbridge (Kanada). Quelle: University of Sherbrooke
Fig. 18. Sherbrooke Footbridge (Canada). Source: University of Sherbrooke



Bei Brücken über Gewässern, bei denen die Bauhöhe zum Beispiel durch Anschlüsse an vorhandene Straßen oder andere örtliche Gegebenheiten beschränkt ist, kann durch die geringe Dicke der Tragkonstruktion die lichte Durchflusshöhe vergrößert werden.

Der neue Baustoff UHPC ist mit und ohne Stahlfasern naturgemäß teurer als herkömmlicher oder Hochfester Beton. Der in **Tabelle 4** wiedergegebene überschlägliche Kostenvergleich zwischen einer ausgeführten, massiven Bogenbrücke und einer gleich tragfähigen alternativen Konstruktion aus UHPC zeigt aber, dass die Gesamtkosten letztendlich nicht höher, sondern eher niedriger sind als für Bauwerke aus herkömmlichem Stahl- oder Spannbeton, weil erhebliche Baustoffmengen eingespart werden können und weil bei intelligenter, stoffgerechter Bemessung und konstruktiver Gestaltung zudem wesentlich mehr Teile der Konstruktion vorgefertigt und vor Ort vergleichsweise einfach und witterungsunabhängig montiert werden können.

Zusammenfassung

Die Technologie des Ultra-Hochfesten Betons mit einer Druckfestigkeit von rd. 180 bis 230 N/mm² ist inzwischen soweit entwickelt, dass er mit geeigneten, örtlich vorhandenen Ausgangsstoffen gezielt hergestellt werden kann. Im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanzierten Forschungsvorhabens und mit Unterstützung der Industrie wurden an der Universität Kassel die wesentlichen grundlegenden Zusammenhänge und Eigenschaften dieses neuen Werkstoffs soweit abgeklärt, dass eine großtechnische Anwendung möglich ist. UHPC eignet sich besonders für die Herstellung von Betonfertigteilen in Fertigteilwerken unter gezielt steuerbaren, qualitätsgesicherten und weitgehend witterungsunabhängigen Produktionsbedingungen.

Michael Schmidt, Ekkehard Fehling, Thomas Teichmann, Kai Bunje, Roland Bornemann

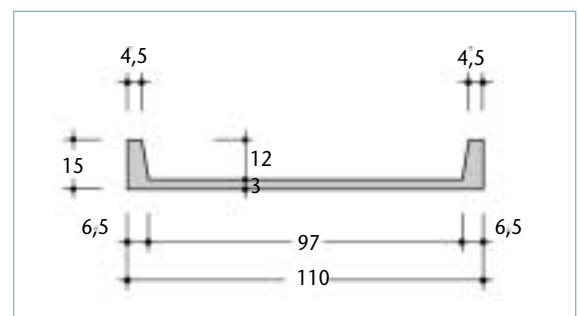


Bild 19. UHPC-Steg der Universität Kassel
Fig. 19. UHPC beam at Kassel University

LITERATUR

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Hochfester Beton – Sachstandsbericht. DAFStb, Heft 436, Berlin, 1994.
- [2] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Fehling, E.; Middendorf, B.: Ultra-Hochleistungsbeton UHPC-Herstellung, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten. In: Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 7, S. 458–467, 2001.
- [3] Richard, P.; Cheyrezy, M.: Composition of reactive powder concrete. In: Cement and Concrete Research 25, No. 7, S.1501–1511, 1995.
- [4] Bornemann, R.; Middendorf, B.; Schmidt, M.: Microstructure and durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC). In: Proc. 8th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Athens 2001.
- [5] Bornemann, R.; Schmidt, M.: The role of powders in concrete. In: Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of high strength/high performance concrete, Vol. 2, S. 863–872, Leipzig 2002.
- [6] Bornemann, R.; Schmidt, M.; Vellmer, C.: Feuerwiderstand ultra-hochfester Betone. Beton 52, Heft 9, S. 418–422, 2002.
- [7] Aitcin, P.; Richard, P.: The pedestrian/bikeway bridge of Sherbrooke. In: Proc. 4th International symposium on utilization of high strength concrete, S. 1399–1403, Paris 1996.
- [8] Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbelastung; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 144, 1962.
- [9] Gerhard, H. Ch.: Zur Betriebsfestigkeit im Stahlbeton- und Spannbetonbau; Dissertation, Darmstadt 1984.
- [10] Klausen, D.: Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung, Dissertation, Darmstadt 1978.
- [11] Holmen, J. O.: Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading. In: Fatigue of concrete structures. American Concrete Institute, S. 71–110, Detroit 1982.
- [12] Stark, J., Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Birkhäuser Verlag, Basel 2001.
- [13] Teichmann, Th., Bunje, K., Schmidt, M., Fehling, E.: Durability of Ultra High Performance Concrete (UHPC). Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Leipzig 2002.
- [14] Hillermeier, B.; Hüttl, R.: Säureresistenter Beton mit einstellbarer Festigkeit für den höchsten Kühlturm der Welt. In: Tagungsband 44. Ulmer Beton- und Fertigteiltage 2000, S.142–157.
- [15] Breit, W.: Säurewiderstand von Beton. In: Beton 52, Heft 10, S. 505–510, 2002.
- [16] Bunte, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton; DAFStb, Heft 436, Berlin, 1993
- [17] Puntke, W.: Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken. Beton 52, Heft 5, S. 242–248, 2002.
- [18] Tang, L.; Nilsson, L. O.: Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field. ACI Materials Journal 89, S. 49–53, 1992.