

# Concrete Plant + Precast Technology Betonwerk + Fertigteil-Technik

Reprint from/Sonderdruck aus BFT INTERNATIONAL 05/2009

bau||verlag  
We give ideas room to develop



---

**From Mikrodur to Nanodur technology**  
**Standard cement for practice-oriented manufacture of UHPC**

**Von der Mikrodur- zur Nanodur-Technologie**  
**Normzement zur praxisgerechten Herstellung von UHPC**

---

Thomas Deuse, Ditmar Hornung, Martin Möllmann

# From Mikrodur to Nanodur technology Standard cement for practice-oriented manufacture of UHPC

## Von der Mikrodur- zur Nanodur-Technologie Normzement zur praxisgerechten Herstellung von UHPC

### Autoren



Dipl.-Ing. Thomas Deuse  
Studium Bauingenieurwesen  
in Siegen und anschließend  
zwei Semester eines wirt-  
schaftswissenschaftlichen  
Zusatzstudiums in Gummers-  
bach; Bauleiter und Projekt-  
leiter (Gartenmann, Peri);  
Anwendungstechnik anorga-  
nische Chemieprodukte  
(Degussa); bautechnischer  
Berater (Ceca Klebstoff  
GmbH); seit 1996 bei der  
Dyckerhoff AG in Wiesbaden,  
zunächst als Produktmanager  
Spritzzement, dann Verkaufs-  
leiter Spezialtief- und Straßen-  
bauprodukte; seit 2005  
zuständig für Produktmanage-  
ment und -marketing im Be-  
reich Bindemittel und Zement.  
[thomas.deuse@dyckerhoff.com](mailto:thomas.deuse@dyckerhoff.com)

The manufacture of UHPC has until now been extremely difficult and complex and can hardly be mastered in conventional precast plants – in ready-mixed concrete plants, nearly impossible to achieve. Dyckerhoff has now developed a cement according to the standards that considerably facilitates the manufacture of UHPC and permits moreover the use of conventional mixing plants and even the usual aggregates. The following article focuses on successfully executed high performance concrete projects. Using selective special pozzolans, this conception has now been further developed into the first special cement, Nanodur® CEM II/B-S 52,5 R, for UHPC without silica fume.

### History of high performance concretes with silica fume

High performance concretes made with silica fume, based on the model of high density, established themselves in the past decades long before UHPC. Starting point was the need for an appropriate use for electro-filter dusts from the ferro-silica industry in Scandinavia. These industrial by-products, due to the complicated batching they require, are commonly used in concrete production as so-called slurry with 50% solids. For reasons of quality assurance, the batching equipment for this must be integrated into the plant control system. Only a homogenous distribution of the additives results in a dense and durable structure of the hardened cement paste with very good mechanical properties.

### High performance concretes with Dyckerhoff Mikrodur® technology

Today, high performance concrete can also be manufactured without silica fume with modern cement technology. Dyckerhoff has been manufacturing ultrafine cement constituents separately from Portland cement clinkers and granulated blastfurnace slag for 15 years. In the course of recent years, these ultrafine Mikrodur particles are increasingly used for controlling the cement properties. The Dyckerhoff Premium Cements are cements with special product performance that meet the specifications of the relevant standards, e.g. regarding the development of strength and the resistance to aggressive media. The improvement of cement through Mikrodur is based on a densely packed structure of reactive constituents. The combination of high-quality standard cements and ultrafine cement particles enables a targeted adjustment of properties through granulometric optimization. This is reflected in the wide range of Premium Cements offered by Dyckerhoff.

With Veridur®, for example, high performance bright-colored fair-faced concrete can be manufactured. At the

Die Herstellung von UHPC war bislang extrem aufwändig und in konventionellen Fertigteilwerken kaum zu bewerkstelligen – in Transportbetonwerken nahezu unmöglich. Dyckerhoff hat jetzt einen Normzement entwickelt, der die Herstellung von UHPC deutlich erleichtert. Darüber hinaus gestattet die Verwendung konventioneller Mischanlagen und sogar der üblichen Gesteinskörnung. Im folgenden Beitrag wird über erfolgreich ausgeführte Hochleistungsbetone in der Praxis berichtet. Durch Auswahl besonderer Pozzolane wurde diese Konzeption jetzt zum ersten anwendungsfertigen Spezialzement Nanodur® CEM II/B-S 52,5 R für UHPC ohne Silicastaub weiterentwickelt.

### Historie der hochfesten Betone mit Silicastaub

Lange vor UHPC haben sich nach dem Modell der dichten Packung in den letzten Jahrzehnten hochfeste Betone mit Silicastaub etabliert. Ausgangspunkt war die Notwendigkeit zum sinnvollen Einsatz der Elektrofilterstäube aus der Ferrosiliciumindustrie in Skandinavien. Infolge aufwändiger Dosierung werden diese industriellen Nebenprodukte üblicherweise als so genannte Slurry mit 50 % Feststoff bei der Betonherstellung eingesetzt. Aus Gründen der Qualitätssicherung müssen die Dosieranlagen elektronisch in die Anlagensteuerung eingebunden werden. Bei homogener Verteilung des Zusatzstoffs entsteht ein dichtes dauerhaftes Zementsteingefüge mit sehr guten mechanischen Eigenschaften.

### Hochleistungsbetone mit Dyckerhoff-Mikrodur®-Technologie

Heute lassen sich Hochleistungsbetone auch ohne Silicastaub mit moderner Zementtechnologie herstellen. Seit über 15 Jahren produziert Dyckerhoff ultrafeine Zementbestandteile getrennt aus Portlandzementklinkern und Hüttensanden. In den letzten Jahren werden diese ultrafeinen Mikrodurteilchen zunehmend zur Steuerung der Zementeigenschaften genutzt. Die Dyckerhoff-Premiumzemente sind Normzemente mit besonderer Leistungsfähigkeit, z. B. hinsichtlich Festigkeitsentwicklung und Widerstand gegen aggressive Medien. Die Vergütung von Zement durch Mikrodur basiert auf einem dicht gelagerten Gefüge aus reaktiven Bestandteilen. Diese Kombination aus hochwertigen Normzementen und Feinstzementteilchen ermöglicht die gezielte Einstellung von Eigenschaften durch granulometrische Optimierung. Das spiegelt sich im Angebotsspektrum der Premiumzemente von Dyckerhoff wider, wo man verschiedene Bindemitteltypen anbietet.

So kann man mit Veridur® hochfesten hellen Sichtbeton herstellen. Beim Lufthansa Aviation Center am



Graphik: E.ON

Fig. 1 Natural draft cooling tower Datteln.

Abb. 1 Naturzugkühler Datteln.

Table 1 Concrete mix design NZK Datteln.

Tabelle 1 Betonrezeptur NZK Datteln.

Concrete-technological data of natural draft cooling tower Datteln		
Betontechnische Daten Naturzugkühler Datteln		
Strength class Festigkeitsklasse		C60/75
Exposure class Expositions-klasse		XC4, XF3, XA3
Consistency Konsistenz		F5
Dyckerhoff VARIODUR 30 CEM II/B-S 52,5 R	[kg/m <sup>3</sup> ]	270
Aggregate Gesteinskörnung	[kg/m <sup>3</sup> ]	1913
Addition Zusatzstoff	[kg/m <sup>3</sup> ]	80
Superplasticizer (FM) Fließmittel	[%]	4
w/c ratio w/z-Wert		0.43
Slump value after 10 min Ausbreitmaß nach 10 min.	[mm]	620
Compressive strength 28 d Druckfestigkeit 28 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	95



Dr.-Ing. Ditmar Horning  
Studium und Promotion an der Technischen Universität Dresden; 1975–1990 Tätigkeit im Zementwerk Deuna/Thüringen in verschiedenen technischen Leitungsfunktionen; 1991–2004 verantwortlich für Produktqualität, Produktentwicklung, Produktanwendung bei der Deuna Zement GmbH (Dyckerhoff AG), Schwerpunkte Rheologie von Baustoffmischungen, Kompositzemente mit Hüttensand- und Kalksteinmehlen; seit 2005 Leiter Produktprogramm-entwicklung und Anwendungsberatung Zement bei der Dyckerhoff AG.  
[ditmar.horning@dyckerhoff.com](mailto:ditmar.horning@dyckerhoff.com)

Lufthansa Aviation Center at the Frankfurt airport, uniformly colored columns of high performance concrete C 60/75 and normal concrete C 45/55 were erected. With Velodur®, early-strength ready-mixed concretes for repairing traffic areas can be made [1]. But Variodur® offers the widest spectrum of application. The natural draft cooling tower for the E.ON power station, Kraftwerk Datteln (Germany), for example, currently under construction is erected with Variodur® 30 CEM II/B-S 52,5 R (Fig. 1, Table 1). The extremely dense structure of the hardened cement paste here obviates the need for a coating to protect the structure from the aggressive constituents of the flue gas. The high durability is achieved with ultrafine blastfurnace slag particles whose dosage depends on the ultimate requirements made on the structure.

“Hollandse Brug” is the name of the bridge that connects the A 6 Amsterdam Expressway with the city of

Flughafen Frankfurt entstanden farbgleiche Stützen aus hochfestem Beton C 60/75 und Normalbeton C 45/55. Mit Velodur® können frühhochfeste Transportbetone zur Instandsetzung von Verkehrsflächen eingesetzt werden [1]. Das breiteste Anwendungsspektrum aber bietet Variodur®. So wird aktuell der Beton für den Naturzugkühler des E.ON-Kraftwerks Datteln mit Variodur 30 CEM II/B-S 52,5 R hergestellt (Abb. 1, Tab. 1). Durch das extrem dichte Zementsteingefüge ist hier keine Beschichtung mehr notwendig, um die Konstruktion vor den aggressiven Bestandteilen der Rauchgase zu schützen. Die hohe Beständigkeit wird durch ultrafeine Hüttensandpartikel erreicht, deren Dosiermenge von der späteren Anforderung an das Bauwerk abhängt.

„Hollandse Brug“ ist der Name der Brücke, die im Zuge der Autobahn A 6 Amsterdam mit der erst 1975 gegründeten Stadt Almere auf dem Flevolandpolder verbind-



Dipl.-Bau-Ing. und Dipl.-Wirtsch.-Ing. Martin Möllmann  
Jg. 1960; Studium Bauingenieurwesen, Schwerpunkt Betontechnologie mit Erwerb des E-Scheins; nach Diplomierung zum Bauingenieur anschließend abgeschlossenes Studium des Wirtschaftsingenieurwesens, Ausrichtung Marketing und Vertrieb; 1986 einjähriges Berufspraktikum auf verschiedenen Hoch- und Tiefbaustellen der Walter-Bau-Gruppe; 1987 Wechsel nach Walluf zu den Chemischen Werke Brockhues AG; seit 1991 Dyckerhoff AG Wiesbaden, heute verantwortlich im Geschäftsbereich Deutschland/Westeuropa für die Bereiche Produktmarketing und für den Vertriebsbereich Weisszement.  
[martin.moellmann@dyckerhoff.com](mailto:martin.moellmann@dyckerhoff.com)



Fig. 2 Repair of the Hollandse Brug.

Abb. 2 Instandsetzung Hollandse Brug.

Table 2 Almere concrete-technological data.

Tabelle 2 Betontechnische Daten Almere.

Concrete-technological data Hollandse brug Almere			there shold value Grenz- wert
Betontechnische Daten Hollandse brug Almere			
Exposure class Expositions-klasse		XC4, XD3, XA3	
Consistency Konsistenz		F4	
Dyckerhoff VARIODUR 50 CEM III/A 52,5 N-HS/NA	[kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 340	≥ 340
Fly ash Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ]	≥ 50	
w/c ratio w/z-Wert			≤ 0.45
Residual moisture after 72 h Restfeuchte nach 72 h	[%]	< 2.5	≤ 2.5
Early strength after 48 h Frühfestigkeit nach 48 h	[N/mm <sup>2</sup> ]	40	≥ 35
Compressive strength 7 d Druckfestigkeit nach 7 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	65	
Compressive strength 28 d Druckfestigkeit 28 d	[N/mm <sup>2</sup> ]	80	
Scaling CDF test Abwitterung CDF-Test	[g/m <sup>2</sup> ]	348	1,500

Almere on the Flevolandpolder in Holland that was founded as recently as in 1975. The reinforced-concrete bridge of 350 m length is currently provided with a new bridge slab made with a special concrete with Variodur 50 CEM III/A 52,5 N-HS/NA (Fig. 2, Table 2). The repair measure provides for a concrete slab of 17 cm thickness for the existing bridge construction that will be coated with 8-mm epoxy resin for additional surface protection. The requirements made on the concrete after 48 hours, with a blastfurnace slag content of at least 50% in the cement, were a high tensile-bond strength and a rapid compressive strength of > 35 MPa as well as a residual moisture of < 2.5% for installing the epoxy-resin coating. In addition, a high resistance to freeze-thaw with de-icing salt (exposure class XF4), low-shrinkage setting and freedom from cracks were specified. The combination of these properties is impossible to achieve with conventional cements.

But durability and resistance to wear are not the only properties that distinguish the Premium Cement Variodur 50 CEM III/A 52,5 N-HS/NA. A particularly interesting area of application is high performance mass concrete that is virtually impossible to achieve with conventional cements. The concrete-technological achievement in constructing the foundation of the “Kranhaus<sup>Plus</sup>” in Cologne (Germany) was in particular the development of a high performance concrete of consistency F5 in which the heat that develops due to the hydration of the cement could be kept as low as possible in order to prevent the occurrence of possible thermal stresses and cracks in the structure. The temperature taken in the core of the foundation measuring 24 m x 10 m x 1.60 m after 48 hours was 56°C, the difference to the rim zones amounting to less than 15 K (Fig. 3, Table 3).

Premium Cements with Mikrodur technology have successfully established themselves in practice in the past four years and offer problem solutions that used to be considered unthinkable with conventional cements. These positive experiences gave rise to the idea to develop the successful principle further for application in Ultra High Performance Concrete UHPC whose manufacture is currently extremely difficult.

det. Die 350 m lange Stahlbetonbrücke erhält aktuell eine neue Brückenplatte aus einem Spezialbeton mit Variodur 50 CEM III/A 52,5 N-HS/NA (Abb. 2, Tab. 2). Die Instandsetzung sieht auf der vorhandenen Brückenkonstruktion eine 17 cm dicke Betonplatte vor, die für zusätzlichen Oberflächenschutz mit 8 mm Epoxidharz beschichtet wird. Die Anforderungen an den Beton nach 48 Stunden waren bei mindestens 50 % Hüttensandanteil im Zement eine hohe Haftzug- und schnelle Druckfestigkeit von > 35 MPa sowie eine Restfeuchte < 2,5 % für den Auftrag des Epoxidharzes. Zusätzlich waren hoher Frost-Tausalz-Widerstand (Expositionsklasse XF4), schwindarmes Abbinden und Rissfreiheit gefordert. Die Kombination dieser Eigenschaften ist mit herkömmlichen Zementen so nicht möglich.

Aber nicht nur hohe Beständigkeit und Verschleißfestigkeit zeichnen den Premiumzement Variodur 50 CEM III/A 52,5 N-HS/NA aus. Ein besonders interessantes Anwendungsgebiet ist der mit konventionellen Zementen kaum herstellbar hochfeste Massenbeton. Beim Bau der Fundamente des „Kranhaus<sup>Plus</sup>“ in Köln bestand die betontechnologische Leistung insbesondere darin, einen hochfesten Beton mit der Konsistenz F5 zu entwickeln, bei dem die auftretende Wärmeentwicklung infolge der Hydratation des Zementes gering gehalten werden konnte, um so mögliche Temperaturspannungen und Risse im Baukörper zu vermeiden. Im Kern des 24 m x 10 m x 1,60 m mächtigen Fundaments wurde nach 48 Stunden eine Temperatur von 56 °C gemessen, wobei die Differenz zu den Randzonen weniger als 15 K betrug (Abb. 3, Tab. 3).

Premiumzemente mit Mikrodur-Technologie haben sich in den letzten vier Jahren erfolgreich in der Praxis etabliert und bieten Problemlösungen, die so mit herkömmlichen Zementen bislang nicht denkbar waren. Aus diesen positiven Erfahrungen entstand nun die Überlegung, das erfolgreiche Prinzip für den aktuell nur unter großen Schwierigkeiten herstellbaren Ultra High Performance Concrete UHPC weiterzuentwickeln.

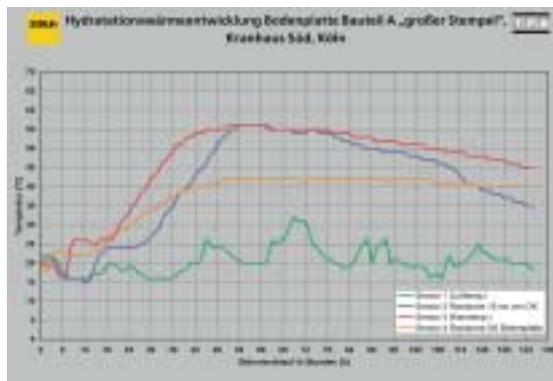


Fig. 3 Temperature course of the Cologne Kranhaus [2].

Abb. 3 Temperaturverlauf Kranhaus Köln [2].

Table 3 High performance mass concrete.  
Tabelle 3 Hochfester Massenbeton.

Concrete-technological data Kranhaus Süd	
Betontechnische Daten Kranhaus Süd	
Strength class/Festigkeitsklasse	C60/75
Exposure class/Expositionsklasse	XC4(WU), XD3, XF3, XA3
Consistency/Konsistenz	F5
<b>Dyckerhoff VARIODUR 50</b> CEM III/A 52,5 N-HS/NA	[kg/m <sup>3</sup> ] 280
Rhine sand/Rheinsand 0/2	[kg/m <sup>3</sup> ] 714
Rhine gravel/Rheinkies 2/8	[kg/m <sup>3</sup> ] 470
Rhine gravel/Rheinkies 8/16	[kg/m <sup>3</sup> ] 695
Fly ash/Flugasche	[kg/m <sup>3</sup> ] 100
Superplasticizer (FM) Fließmittel	[%] 2.4
w/c ratio/w/z-Wert	0.45
Compressive strength 2 d Druckfestigkeit 2 d	[N/mm <sup>2</sup> ] 36
Compressive strength 3 d Druckfestigkeit 3 d	[N/mm <sup>2</sup> ] 56
Compressive strength 7 d Druckfestigkeit 7 d	[N/mm <sup>2</sup> ] 72
Compressive strength 91 d Druckfestigkeit 91 d	[N/mm <sup>2</sup> ] 85

### Ultra High Performance Concrete

The only larger-scale UHPC structure in Germany is the Gärtnerplatz Bridge in Kassel. The 8-cm thick bridge slab that can support vehicle traffic as well as the upper chords for this project were manufactured as precast parts in a highly complicated process [3]. The UHPC used here and the UHPC mix designs in the literature contain large amounts of very fine-particled quartz and silica fumes and, compared to normal concrete, double or triple the amount of cement. Very little water is added to the mix, typically only approx. 20% of the cement weight. However, for complete hydration of the binder, at least 25% of the cement weight is needed and the follow-up reaction with the silica fume that increases the strength also needs water. This indicates that parts of the cement and the additions remain unhydrated and serve merely as aggregate. The dust-fine particles are moreover problematic for occupational health and safety, are extremely complex to handle and difficult to homogenize. UHPC as material is fascinating, but can be applied only with the greatest difficulties under the prevailing technical conditions, even in precast construction.

### High density and pozzolanic reaction

Portland cements in combination with silica fume are typically used in high performance concrete production. The aim is here to realize the highest possible density already in the dry phase that, after the addition of water, leads to densely packed cement paste. In addition, the silicon dioxide  $\text{SiO}_2$  from the silica fume reacts with the calcium hydroxide  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  that is released 6 to 8 hours later by the cement reaction to additional calcium silica hydrate phases (C-S-H). This process is also known as pozzolanic reaction.

### Ultra High Performance Concrete

Das einzige größere UHPC Bauwerk in Deutschland ist die Gärtnerplatzbrücke in Kassel. Die 8 cm dicke und befahrbare Brückenplatte sowie die Obergurte wurden hier unter hohem Aufwand als Fertigteile hergestellt [3]. Die hier verwendeten wie auch die aus der Literatur bekannten UHPC-Rezepturen enthalten große Mengen sehr feinteiliger Quarz- und Silicastaube und gegenüber normalem Beton die 2- bis 3-fache Menge an Zement. Dabei wird sehr wenig Wasser zugegeben, üblicherweise nur rund 20 % vom Zementgewicht. Zur vollständigen Hydratation des Bindemittels sind aber mindestens 25 % notwendig und auch die festigkeitssteigernde Folge-reaktion mit dem Silicastaub benötigt Wasser. Daraus ist ersichtlich, dass Teile des Zements und der Zusätze unhydratisiert verbleiben und lediglich als Gesteinskörnung dienen. Die staubfeinen Stoffe sind zudem problematisch in Bezug auf den Arbeitsschutz, extrem aufwändig in ihrer Handhabung und schwierig zu homogenisieren. UHPC ist als Werkstoff faszinierend, aber unter den gegebenen technischen Voraussetzungen selbst im Betonfertigteilebau nur unter größten Schwierigkeiten einsetzbar.

### Dichte Packung und pozzolanische Reaktion

Zur Herstellung von Hochleistungsbetonen sind Portlandzemente in Kombination mit Silicastaub üblich. Ziel ist dabei, bereits in der trockenen Phase eine möglichst dichte Packung zu realisieren, die nach Wasserzugabe zu einem dicht gelagerten Zementleim führt. Darüber hinaus reagiert das Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$  aus dem Silicastaub mit dem nach 6 bis 8 Stunden aus der Zementreaktion freigesetzten Calciumhydroxid  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  zu zusätzlichen Calciumsilikathydrat-Phasen (C-S-H). Dieser Vorgang ist auch als pozzolanische Reaktion bekannt.

Silica components as pozzolans in UHPC Silicakomponenten als Puzzolane in UHPC		FeSi production FeSi Produktion		Synthetic products Syntheseprodukte		
		Filter ashes Filteraschen		targeted production gezielte Produktion		
Description Bezeichnung		Silica fume Silicastaub	Silica fume suspension Silicastaub Suspension	Nanosilica Nanosilica Silica sol Kieselsol	Precipitated silica Fällungskieselsäure	Fumed silica Pyrogenic Kieselsäure
Trade name (examples) Handelsname (Beispiele)		Microsilica	Silicoll	Köstrosol	Sipernat	Aerosil
$\text{SiO}_2$ content $\text{SiO}_2$ -Gehalt	[%]	85–98	max. 49	max. 49.8	> 98	> 99
Primary particle size Primärteilchengröße	[nm]	100–300	100–300	5–150	5–100	5–50
Secondary particle size Sekundärteilchengröße	[ $\mu\text{m}$ ]	30 % > 1	15 % > 1	colloidally distributed kolloidal verteilt	3–100	< 0.2
Surface-active OH groups Oberflächenaktive OH-Gruppen		no/nein	no/nein	yes/ja	yes/ja	yes/ja
Specific surface BET Spezifische Oberfläche BET	[ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	18–20	18–20	150–180	50–750	50–400
Aggregate shape Aggregatform		Powder Pulver	Suspension*	Suspension*	Powder Pulver	Powder Pulver
Production method Produktionsweise		pyrogenic pyrogen	wet nass	wet nass	wet nass	pyrogenic pyrogen
Production Herstellung		Filter dust Filterstaub	Dispersion Dispergierung	Precipitation Fällung	Precipitation Fällung	Flame hydrolysis Flammhydrolyse

\*process-related max. 50% solid!/\*herstellbedingt max. 50 % Feststoff!

Table 4 Reactive  $\text{SiO}_2$  materials.

Tabelle 4 Reaktive  $\text{SiO}_2$ -Stoffe.

Silica fume, separated in electric filters during the production of ferro-silica, is the best known pozzolan, second only to fly ash. The spherical primary particles with particle sizes of between 100 and 300 nm then form agglomerates of which approx. 30% > than 1  $\mu\text{m}$ . In UHPC, the batching of silica fume lies within a range of between 10 to 25% of the cement weight. This leads to risks: "From investigations of concrete mixes with very high pozzolan contents it is known that the pH values of the pore solution following complete reaction with the calcium hydroxide reserve, due to the reaction with the silica fume, can also fall below 12.5, carrying at least the potential risk of instable calcium silicate phases, softening of the concrete and depassivation of the reinforcing steel" [4].

UHPC is typically manufactured with very low w/c ratios in the range of 0.20. The silica fume suspensions that have established themselves in concrete construction practice have a process-related water content of 50%. The same applies to the synthetic nanosilica (silica sol) obtained through a precipitation reaction. In UHPC, for example, at a cement content of 700 kg/m<sup>3</sup> and a batching of 17% solid-state silica, a water amount of approximately 120 kg/m<sup>3</sup> would be added. Accordingly, neither nanosilica nor a silica fume suspension can be used in UHPC as SiO<sub>2</sub> components alone (Table 4).

### Synthetic silicas

Instead of the currently practiced procedure in the manufacture of UHPC using comparatively coarse cement with nanoscale silica fume powder – both in excessive amounts – nanostructured synthetic silica powders can also be used for the pozzolanic reaction. Due to the much higher reactivity of these syntheses products, particularly in connection with ultrafine cements, the amount added, compared to silica fume, can be drastically reduced and the pozzolanic reaction desired for compacting the structure lowered to a minimum. In this way, the calcium hydroxide reserves are retained.

Evonik Degussa GmbH, for example, has been manufacturing synthetic silicas with constant chemical-physical data on an industrial scale for decades. Production engineering distinguishes between fumed silicas, obtained by flame hydrolysis (e.g. Aerosil®) and precipitated silicas that result in a wet-chemical precipitation process (e.g. Sipernat®). Primary particles in the range of a few nanometers arise from both processes – 5 to 50 nm with fumed respectively 5 to 100 nm with precipitated silicas [5]. In the production process these primary particles instantly form aggregates – bonded through solid bridges – that subsequently agglomerate. These agglomerates can then through shear-intensive working into other materials once again be dispersed to aggregates. The aggregate size of synthetic fumed silica lies below 200 nm, for synthetic precipitated silica however already clearly in the micrometer range [6]. Korpa and Trettin investigated the pozzolanic reaction through comparative measurements of the change of the pH value over time on mixtures of Ca(OH)<sub>2</sub> with silica fume, respectively Aerosil® [7]. The reaction of the synthetic silica here sets in already after a good hour, while for the silica fume only a marginal effect could be observed after six hours (Fig. 4).

### Dyckerhoff Nanodur for UHPC

Dyckerhoff took up these difficulties in the manufacture of UHPC and succeeded in developing a special binder.

Heute ist neben der Flugasche das bekannteste Puzzolan Silicastaub, der bei der Produktion von Ferrosilicium in Elektrofiltern abgeschieden wird. Die kugelförmigen Primärteilchen mit Korngrößen zwischen 100 und 300 nm bilden dann Agglomerate, von denen rund 30% > als 1  $\mu\text{m}$  sind. In UHPC bewegt sich die Dosierung von Silicastaub in einem Bereich von 10 bis 25 % des Zementgewichts. Dadurch gibt es Risiken: „Durch Untersuchungen an Betonmischungen mit sehr hohen Puzzolangehalten ist bekannt, dass die pH-Werte der Porenlösung bei vollständiger Reaktion mit der Calciumhydroxid-Reserve durch die Reaktion mit dem Silicastaub auch unter 12,5 absinken können, wodurch zumindest potenziell das Risiko der Instabilität der Calciumsilikatphasen, der Entfestigung des Betons und der Depassivierung des Betonstahls gegeben ist“ [4].

UHPC wird üblicherweise mit sehr niedrigen w/z-Werten im Bereich von 0,20 hergestellt. Die im Betonbau etablierten Silicastaubsuspensionen weisen herstellungsbedingt einen Wassergehalt von 50 % auf. Dasselbe trifft auch auf die synthetisch durch eine Fällungsreaktion gewonnenen Nanosilica (Kieselsole) zu. In UHPC würde so z. B. bei einem Zementgehalt von 700 kg/m<sup>3</sup> und einer Dosierung von 17 % Silicafeststoff eine Wassermenge von rund 120 kg/m<sup>3</sup> eingetragen. Dies bedeutet, dass weder Nanosilica noch Silicastaubsuspension als alleinige SiO<sub>2</sub>-Komponenten in UHPC einsetzbar sind (Tab. 4).

### Synthetische Kieselsäuren

Anstelle der aktuell praktizierten Vorgehensweise bei der Herstellung von UHPC aus vergleichsweise grobem Zement mit nanoskaligem Silicastaubpulver – beide mit überhöhten Dosierungen – lassen sich für die pozzolane Reaktion aber auch nanostrukturierte synthetische Kieselsäurepulver einsetzen. Infolge der sehr viel höheren Reaktivität dieser Syntheseprodukte, vor allem in Verbindung mit Feinstzementen, lassen sich die Dosiermenge gegenüber Silicastaub drastisch reduzieren und die zur Verdichtung des Gefüges gewünschte pozzolane Reaktion auf ein Mindestmaß beschränken. Auf diese Weise bleiben Calciumhydroxid-Reserven erhalten.

Seit Jahrzehnten stellt z. B. Evonik Degussa GmbH großtechnisch synthetische Kieselsäuren mit konstanten chemisch-physikalischen Daten her. Produktionstechnisch unterscheidet man zwischen pyrogenen Kieselsäuren, die durch Flammhydrolyse gewonnen werden (z. B. Aerosil®) und gefällten Kieselsäuren, die in einem nasschemischen Fällungsverfahren entstehen (z. B. Sipernat®). Bei beiden Prozessen bilden sich Primärpartikel im Bereich weniger Nanometer – 5 bis 50 nm bei pyrogenen bzw. 5 bis 100 nm bei gefällten synthetischen Kieselsäuren [5]. Diese Primärpartikel bilden im Herstellungsprozess sofort über Feststoffbrücken verbundene Aggregate, die anschließend agglomerieren. Diese Agglomerate können durch scherintensive Einarbeitung in andere Materialien dann wieder zu Aggregaten dispergiert werden. Die Aggregatgröße liegt bei den pyrogenen Kieselsäuren unterhalb 200 nm, bei den synthetischen Fällungskieselsäuren jedoch schon deutlich im Mikrometerbereich [6]. Korpa und Trettin untersuchten die pozzolane Reaktion durch vergleichende Messung der zeitlichen Veränderung des pH-Wertes an Mischungen aus Ca(OH)<sub>2</sub> mit Silica fume bzw. Aerosil® [7]. Die Reaktion der synthetischen Kieselsäure beginnt dabei schon nach gut einer Stunde, während bei Silica fume auch nach sechs

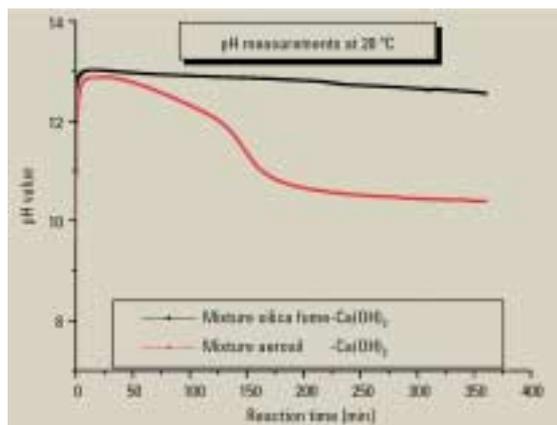


Fig. 4 Pozzolanic reactivity [7].

Abb. 4 Puzzolanische Reaktivität [7].

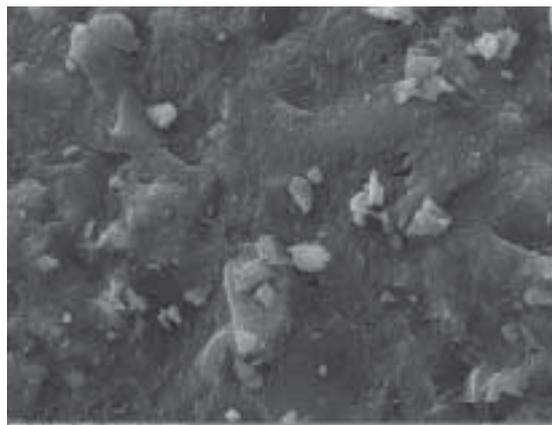


Fig. 5 SEM mortar with Nanodur®.

Abb. 5 REM-Mörtel mit Nanodur®.

Based on the Mikrodur technology, additional nanostructured synthetic silicas have now been supplemented for targeted triggering of still higher strengths. The result is Dyckerhoff Nanodur, the first ready-to-use cement according to the standards for practice-oriented manufacture of UHPC. In 2008, Nanodur was awarded within the scope of the 52. BetonTage in Ulm the Innovation Prize of the Supplier Industry.

Product development began with investigations on mortar mixes containing 40% cement and 60% fine quartz sand (Fig. 5). The compressive prism strengths ranged at approx. 150 N/mm<sup>2</sup> and the bending tensile strengths > 20 N/mm<sup>2</sup> in the three-point bending test. The first practicable application took place in a mortar of this kind with Nanodur white CEM II/B-S 52,5 N. With this product, students of the Siegen University constructed a boat for the Dutch Beton Kanoer Race 2007, where it placed second over the long distance. Further tests with Nanodur grey CEM II/B-S 52,5 R were carried out with the reference mix M2Q [8] to compare the performance of the binder only. For this purpose, the silica fume in the Nanodur mix was substituted with an equal volume of quartz powder and/or sand. The compressive and the bending tensile strengths of the Nanodur mix were nearly equal and/or higher than the reference mix with silica fume (Table 5).

Stunden nur ein marginaler Effekt zu beobachten ist (Abb. 4).

### Dyckerhoff Nanodur für UHPC

Dyckerhoff hat diese Schwierigkeiten bei der UHPC-Herstellung aufgegriffen und ein besonderes Bindemittel entwickelt. Basierend auf der Mikrodur-Technologie werden jetzt zusätzlich nanostrukturierte synthetische Kieselsäuren zur gezielten Ansteuerung von noch höheren Festigkeiten ergänzt. Das Ergebnis ist Dyckerhoff Nanodur, der erste anwendungsfertige Normzement für eine praxisgerechte Herstellung von UHPC. Nanodur erhielt 2008 im Rahmen der 52. BetonTage in Ulm den Innovationspreis der Zulieferindustrie.

Die Produktentwicklung begann mit Untersuchungen an Mörtelmischungen aus 40 % Zement und 60 % Quarzfeinsand (Abb. 5). Die Prismendruckfestigkeiten bewegten sich im Bereich um 150 N/mm<sup>2</sup> und die Biegezugfestigkeiten > 20 N/mm<sup>2</sup> im Dreipunktversuch. Der erste Praxiseinsatz erfolgte in einem solchen Mörtel mit Nanodur weiß CEM II/B-S 52,5 N. Studenten der Universität Siegen konstruierten damit für das niederländische Beton Kanoer Race 2007 ein Boot, das auf der Langstrecke den 2. Platz belegte. Weitere Versuche mit Nanodur grau CEM II/B-S 52,5 R wurden in der Referenzmischung M2Q [8] durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des

Mix design Rezeptur	M2Q original	M2Q without SF ohne SF	Hardened concrete storage at 20°C Festbeton Lagerung bei 20 °C	M2Q original	M2Q without SF ohne SF
Nanodur CEM II/B-S 52,5 R	–	832	Compressive strength Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ] (σ) <sup>***</sup>	[N/mm <sup>2</sup> ] (σ) <sup>***</sup>
CEM I 52,5 R-HS/NA	832	–	Prism/Prisma* $R_{D7}$	122.6 (2.0)	125.2 (1.3)
Silica fume/Silicastaub SF	135	–	Prism/Prisma* $R_{D28}$	154.1 (5.9)	154.1 (4.1)
Quartz powder W 12/Quarzmehl W 12	207	288	Cube/Würfel** $R_{D7}$	116.3 (3.1)	125.1 (3.8)
Sand H 33	975	1056	Cube/Würfel** $R_{D28}$	160.5 (2.7)	158.1 (7.9)
Water (without content from superplasticizer)/Wasser (ohne Anteil aus FM)	166	179	Bending tensile strength Biegezugfestigkeit	(3-point) (3-Punkt)	(3-point) (3-Punkt)
W/c ratio/w/z-Wert	0.22	0.24	Prism/Prisma* $R_{B27}$	15.4 (0.4)	20.7 (0.9)
Superplasticizer to binder FM auf Bindemittel	4.2%	4.2%	Prism/Prisma* $R_{B28}$	21,2 (1.4)	21.5 (2.4)

\*prism/Prisma 4x4x16    \*\*cube/Würfel 10x10x10    \*\*\*standard deviation/Standardabweichung

Table 5 Reference mix M2Q with and without silica fume.

Tabelle 5 Referenzmischung M2Q mit und ohne Silicastaub.



Fig. 6 UHPC with Nanodur.

Abb. 6 UHPC mit Nanodur.

### Application in precast products

Apart from the substitution of the silica fume, the reduction of the high cement content in UHPC was another target specification for Nanodur. Accordingly, a mix design based on [8] adjusted to the cement was developed. The use of the premixed binder Nanodur makes the difficult handling of the silica fumes a thing of the past. Through the selective composition, all components of the binder, are moreover optimally used and the CO<sub>2</sub>-intensive Portland cement clinker content is markedly lowered compared to conventional UHPC. All dust-fine constituents are very well distributed during the intensive high-speed premixing process in the cement plant, enabling the manufacture of the UHPC in a closed system of a standard concrete mixing plant. First experiences in the manufacture of large size precast façade panels of only 2 cm thickness indicate a considerable potential (Fig. 6 and 7).

### Application in ready-mixed concrete

In ready-mixed concrete production – in contrast to precast concrete production – the use of moist raw materials directly from sand pits or quarries is the rule. Until recently, these raw materials were unsuitable for use as aggregates in conventional UHPC mix designs, due to their fluctuating water contents and their general insufficient fines contents. Fine particles, however, are indispensable for obtaining a dense structure. With the manufacture of Nanodur and fine quartz sand as a premix, the powder-fine particles were now exactly adjusted to the aggregate used in the ready-mixed concrete plant. In this way, all dry and very dust-intensive constituents are comprised in a binder that is delivered in the time-tested manner in silo trucks and automatically batched in the closed system of the ready-mixed concrete plant. At the end of 2008, three charges totaling 2.25 m<sup>3</sup> UHPC were manufactured fully automatically in a total mixing time of 30 minutes in a Dyckerhoff ready-mixed concrete plant for the first time using such a Nanodur Compound (Fig. 8 and 9). The reactive binder content of the Nanodur Compound ranged at only 616 kg/m<sup>3</sup> – without additional silica fume. The strengths of the ready-mixed concrete without fibers corresponded to the strengths of the mix produced in the precast plant (Table 6).

#### Advantages of UHPC with Nanodur:

» In precast plants considerably simpler and in ready-



Fig. 7 Façade panel 4.50 m x 1.85 m x 0.02 m

Abb. 7 Fassadenplatte 4,50 m x 1,85 m x 0,02 m.

Bindemittels vergleichend zu testen. Dabei ist in der Nanodur-Rezeptur der Silicastaub volumengleich durch Quarzmehl bzw. -sand ersetzt worden. Die Druck- und Biegezugfestigkeiten der Nanodur-Mischung waren dabei annähernd gleich bzw. höher als bei der Referenzmischung mit Silicastaub (Tab. 5).

### Anwendung bei Fertigteilen

Neben Ersatz des Silicastaubs war die Reduzierung der hohen Zementgehalte in UHPC eine weitere Zielvorgabe für Nanodur. In Anlehnung an [8] wurde deshalb eine auf den Zement abgestimmte Rezeptur entwickelt. Durch das vorgemischte Bindemittel Nanodur entfällt auf diese Weise die schwierige Handhabung der Silicastaube. Des Weiteren werden durch die gezielte Zusammensetzung alle Bindemittelkomponenten optimal ausgenutzt und der CO<sub>2</sub>-intensive Portlandzementklinkeranteil sinkt gegenüber konventionellem UHPC deutlich. Durch die im Zementwerk bereits stattfindende intensive hochtourige Vormischung sind alle staubfeinen Komponenten sehr gut verteilt und dies ermöglicht die Herstellung des UHPC im geschlossenen System einer normalen Mischanlage. Erste Erfahrungen im Fertigteilbau bei der Herstellung von nur 2 cm dicken extrem großformatigen Fassadenplatten deuten ein erhebliches Potenzial an (Abb. 6 und 7).

### Anwendung im Transportbeton

Im Gegensatz zur Fertigteilherstellung sind im Transportbeton feuchte Rohstoffe direkt aus Sandgruben oder Steinbrüchen die Regel. Diese Rohstoffe waren bislang für die konventionellen UHPC-Rezepturen infolge schwankender Wassergehalte und insgesamt zu weniger Feinanteile als Gesteinskörnung ungeeignet. Feinanteile sind aber für die Ausbildung eines dichten Gefüges unverzichtbar. Durch die Herstellung einer Vormischung aus Nanodur und Quarzfeinsand wurden jetzt die mehlfeinen Anteile exakt auf die im Transportbetonwerk vorhandene Gesteinskörnung abgestimmt. Auf diese Weise sind alle trockenen und sehr staubintensiven Bestandteile in einem Bindemittel zusammengefasst, das in bewährter Art und Weise im Silofahrzeug angeliefert und im geschlossenen System des Transportbetonwerks automatisch dosiert werden kann. Mit einem solchen Nanodur-Compound wurden Ende 2008 erstmals in einem Dyckerhoff-Transportbetonwerk drei Chargen mit insgesamt 2,25 m<sup>3</sup> UHPC innerhalb von 30 Minuten Gesamt-

(Photo/Foto: Thermodur)



Fig. 8 Trial concreting UHPC.  
Abb. 8 Probebetonage UHPC.

mischzeit vollautomatisch hergestellt (Abb. 8 und 9). Der reaktive Bindemittelanteil Nanodur lag bei nur 616 kg/m<sup>3</sup> – ohne zusätzlichen Silicastaub.

Dabei entsprachen die Festigkeiten des Transportbetons ohne Fasern denen der Mischung im Fertigteilwerk (Tab. 6).

**Vorteile von UHPC mit Nanodur:**

- » Im Fertigteilwerk deutlich einfachere und im Transportbeton überhaupt erst mögliche Herstellung von UHPC mit den dort vorhandenen Mischanlagen und Sanden
- » Gute Homogenität der Feinstoffe im UHPC durch hochtouriges Mischen der Nanodur-Rohstoffe bereits im Zementwerk
- » Staubarme Handhabung der Feinstkomponenten durch das Einmischen in den Zement innerhalb geschlossener Systeme im Zement- und Betonwerk
- » Automatische Dosierung wie bei herkömmlichem Zement über die vorhandenen Einrichtungen möglich
- » Vergleichsweise kurze Mischzeiten des UHPC (< 10 Minuten)
- » Einsatz der vor Ort vorliegenden Gesteinskörnung durch abgestimmtes im Zementwerk vorgemischtes Compound aus Nanodur und Gesteinsmehl
- » Optimale Ausnutzung des Bindemittels und dadurch neben Ressourcenschonung gegenüber konventionellem UHPC auch deutliche Reduzierung des CO<sub>2</sub>-intensiven Portlandzementklinkers

mixed concrete previously not even possible production of UHPC with the mixing systems and sands available

- » Good homogeneity of the ultrafine particles in the UHPC through high-speed mixing of the Nanodur raw materials already in the cement plant
- » Through intermixing with the cement, low-dust handling of the ultrafine components within closed systems in the cement plant and at the customer
- » Automatic batching the same as for conventional cement using the existing equipment possible
- » Comparatively short mixing times of the UHPC (< 10 minutes)
- » Use of the aggregate available at the site with compound of Nanodur and aggregate powder adjusted and premixed in the cement plant
- » Optimal utilization of the binder and therefore, apart from the preservation of resources compared to conventional UHPC also a marked reduction of the CO<sub>2</sub>-intensive Portland cement clinker
- » Nanodur, both on the basis of grey cement as CEM II/B-S 52,5 R and on the basis of white cement as CEM II/B-S 52,5 N complies with DIN EN 197

**Outlook**

According to DIN EN 206-1, concretes in the compressive strength class of maximal 95 N/mm<sup>2</sup> may currently be processed to the standard specifications. Concretes up to 105 and/or 115 N/mm<sup>2</sup> are also normatively regulated, but may be processed only with a general technical approval and/or individual approval. For high performance concretes, Dyckerhoff with its Premium Cements already now holds a unique position in the market. UHPC with Nanodur is now the next development step that makes possible compressive strengths in the range of 150 N/mm<sup>2</sup> and bending tensile strengths > 20 N/mm<sup>2</sup>.

Suitability tests in the lab Eignungsprüfungen im Labor			
Dyckerhoff Nanodur CEM II/B-S 52,5 R		Façade panel Fassadenplatte	Ready-mixed concrete Transportbeton
	[kg/m <sup>3</sup> ]	609	616**
Fine quartz sand < 0.5 mm Quarzfeinsand < 0,5 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	442	–
Fine quartz sand < 0.25 mm Quarzfeinsand < 0,25 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	426**
Fine quartz sand < 0.125 mm Quarzfeinsand < 0,125 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	402	–
Rhine sand 0/2 Rheinsand 0/2 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	426
Double-broken and double-screen basalt gravel 2/5 Basalt Edelsplitt 2/5 mm	[kg/m <sup>3</sup> ]	873	882
Steel fiber 020/9 Stahlfaser 020/9	[kg/m <sup>3</sup> ]	–	101
Water (without superolasticizer) Wasser (ohne FM)	[kg/m <sup>3</sup> ]	152	161
Superplasticizer (FM) Fließmittel	[% v. Z.]	3	3
Shrinkage reducer Schwingreduzierer	[% v. Z.]	1.25	–
w/c ratio (with FM) w/z-Wert (mit FM)	[–]	0.26	0.28
Compressive strength 28 d* Druckfestigkeit 28 d*	[N/mm <sup>2</sup> ]	155	195
Bending tensile strength 28 d* Biegezugfestigkeit 28 d*	[N/mm <sup>2</sup> ]	22	23
*Prism 4x4x16, test specimen stored 28 days below water at 20°C *Prisma 4x4x16, Prüfkörperlagerung 28 Tage unter Wasser bei 20 °C **Premixed Nanodur Compound/**Vorgemischtes Nanodur Compound			

Table 6 UHPC mix designs with Nanodur.  
Tabelle 6 UHPC-Rezepturen mit Nanodur.



Fig. 9 Molded block of UHPC.

Abb. 9 Formstein aus UHPC.

The result will be noticeably more slender constructions with the same bearing capacity. Thanks to their dense structure, they will moreover be maintenance-free and especially durable.

The optimized use of materials will last but not least also contribute to resource preservation and a lower CO<sub>2</sub> emission. Dyckerhoff consistently continues on this path and is represented in several projects of the German Federal Ministry for Education and Research BMBF as the sole manufacturer of cement. The promotional program focuses on the subject: “Nanotechnology in construction – NanoTecture: Development of higher resources/energy savings and performance potentials as well as new functionalities” within the framework program “Materials innovation for industry and society – WING.”

*Thomas Deuse, Ditmar Hornung, Martin Möllmann*

» Nanodur entspricht sowohl auf Basis Grauzement als CEM II/B-S 52,5 R als auch auf Basis Weißzement als CEM II/B-S 52,5 N der Zementnorm DIN EN 197

### Ausblick

Nach der Norm DIN EN 206-1 können aktuell Betone maximal in der Druckfestigkeitsklasse bis 95 N/mm<sup>2</sup> standardmäßig ausgeführt werden. Ebenfalls normativ geregelt sind Betone bis 105 bzw. 115 N/mm<sup>2</sup>, allerdings nur mit bauaufsichtlicher Zulassung bzw. Zustimmung im Einzelfall. Bei Hochleistungsbetonen hat Dyckerhoff mit den Premiumzementen aktuell schon eine Alleinstellung im Markt. UHPC mit Nanodur ist jetzt der nächste Entwicklungsschritt, der Druckfestigkeiten im Bereich von 150 N/mm<sup>2</sup> und Biegezugfestigkeiten > 20 N/mm<sup>2</sup> ermöglicht. Das Ergebnis werden deutlich schlankere Konstruktionen bei gleicher Tragfähigkeit sein. Aufgrund des dichten Gefüges sind diese auch wartungsfrei und besonders dauerhaft.

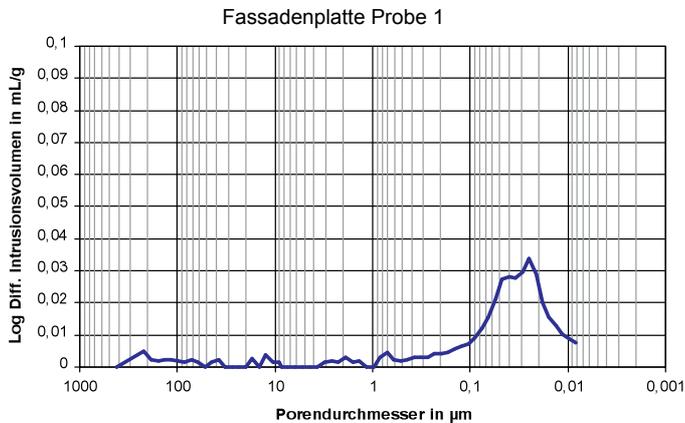
Nicht zuletzt trägt auch der bei UHPC optimierte Baustoffeinsatz zur Ressourcenschonung und zum geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoß bei. Dyckerhoff geht diesen Weg konsequent weiter und ist als einziger Zementhersteller in mehreren Projekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung BMBF vertreten. Das Förderprogramm trägt das Thema: „Nanotechnologie im Bauwesen – NanoTecture: Erschließung höherer Ressourcen-/Energieeinspar- und Leistungspotenziale sowie neuer Funktionalitäten“ innerhalb des Rahmenprogramms „Werkstoffinnovationen für Industrie und Gesellschaft – WING“.

### References/Literatur

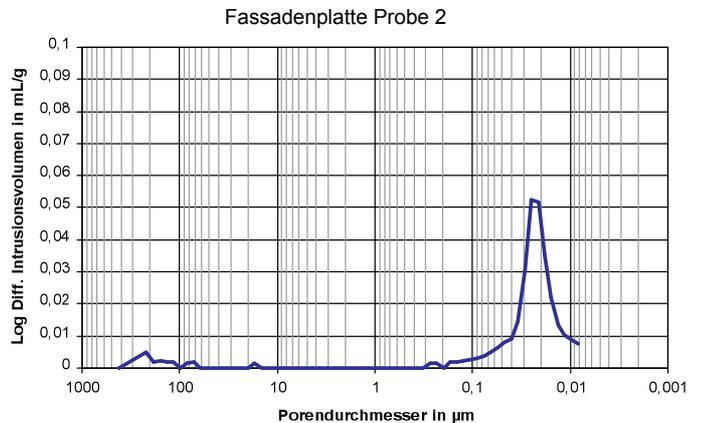
- [1] Deuse, T.; Schultz, W.; Strunge, J.: Spezialzemente für Hochleistungsbetone, BWI International, 1-2007
- [2] Temperaturmessungen Krankenhaus, TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH, Köln, 2007 (unveröffentlicht)
- [3] Schmidt, M.: Einsatz von UHPC beim Bau der Gärtnerplatzbrücke in Kassel, Beton, 6-2007
- [4] DFG Schwerpunktprogramm, Nachhaltiges Bauen mit Ultra-Hochfestem Beton (UHPC), Kassel, 2004
- [5] Evonik Degussa GmbH, Schriftenreihe „Fine Particles“ Nr. 11
- [6] Deuse, T.; Strunge, J.; Parker, F.: Nanostrukturierte Steuerungsgrößen in Normzement für ultrahochfeste Betone, Nanotechnologie aktuell 2008
- [7] Korpa, A.; Trettin, R.: Nanoscale pozzolans for improving ultra high performance cementitious binders, Cement International 1/2007
- [8] Forschungsbericht DFG FE 497/1-1, Kassel, 2005

# ...weitere Dyckerhoff Ergebnisse im Detail:

Grafische Darstellung: Porenverteilung



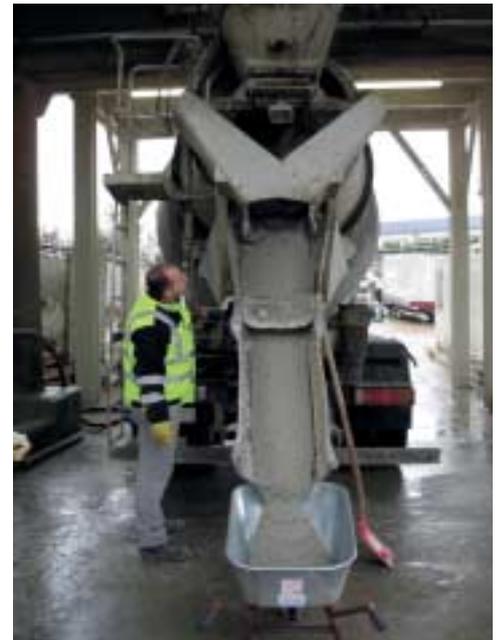
Grafische Darstellung: Porenverteilung



UHPC im Transportbeton			Labor	TB Werk	TB Werk
Nanodur CEM II/B-S 52,5 R		[kg/m³]	616	616*	620*
Quarzfeinsand < 0,25 mm		[kg/m³]	426	426*	428*
Rheinsand 0/2 mm		[kg/m³]	426	426	426
Basalt Edelsplitt 2/5 mm		[kg/m³]	882	882	879
Stahlfaser Stratec 015/9		[kg/m³]	-	-	101
Stahlfaser Stratec 020/9		[kg/m³]	101	-	-
Wasser (ohne FM)		[kg/m³]	161	161	163
Fließmittel Glenium 51		[% v.Z.]	3	3	2,25
w/z-Wert (mit FM)		[-]	0,28	0,28	0,28
Frischbetontemperatur		[°C]	29,6	14,3	16,6
Setzfließmaß 10 min	a <sub>30s</sub>	[mm]	590	630	580
Setzfließmaß 10 min	a <sub>60s</sub>	[mm]	650	710	620
Setzfließmaß 90 min	a <sub>30s</sub>	[mm]	n.b.	n.b.	530
Setzfließmaß 90 min	a <sub>60s</sub>	[mm]	n.b.	n.b.	590
Zylinderdruckfestigkeit 28d		[N/mm²]	n.b.	150,5	155,1
E-Modul 28d		[N/mm²]	n.b.	48.000	53.378
Würfeldruckfestigkeit 2d		[N/mm²]	n.b.	n.b.	82,5
Würfeldruckfestigkeit 7d		[N/mm²]	n.b.	113,6	125,7
Würfeldruckfestigkeit 28d		[N/mm²]	165,1	154,3	153,7
Würfeldruckfestigkeit 56d		[N/mm²]	n.b.	n.b.	169,3
Prismendruckfestigkeit 2d		[N/mm²]	n.b.	n.b.	94,5
Prismendruckfestigkeit 7d		[N/mm²]	166,3	125,3	156,8
Prismendruckfestigkeit 28d		[N/mm²]	195,5	156,4	177,4
Prismendruckfestigkeit 56d		[N/mm²]	n.b.	n.b.	185,8
4-Punkt-Biegezugfestigkeit 56d		[N/mm²]	n.b.	n.b.	17,7
Schwinden (Graf-Kaufmann) 7d		[mm/m]	n.b.	n.b.	-0,247
Schwinden (Graf-Kaufmann) 28d		[mm/m]	n.b.	n.b.	-0,331
Schwinden (Graf-Kaufmann) 56d		[mm/m]	n.b.	n.b.	-0,356

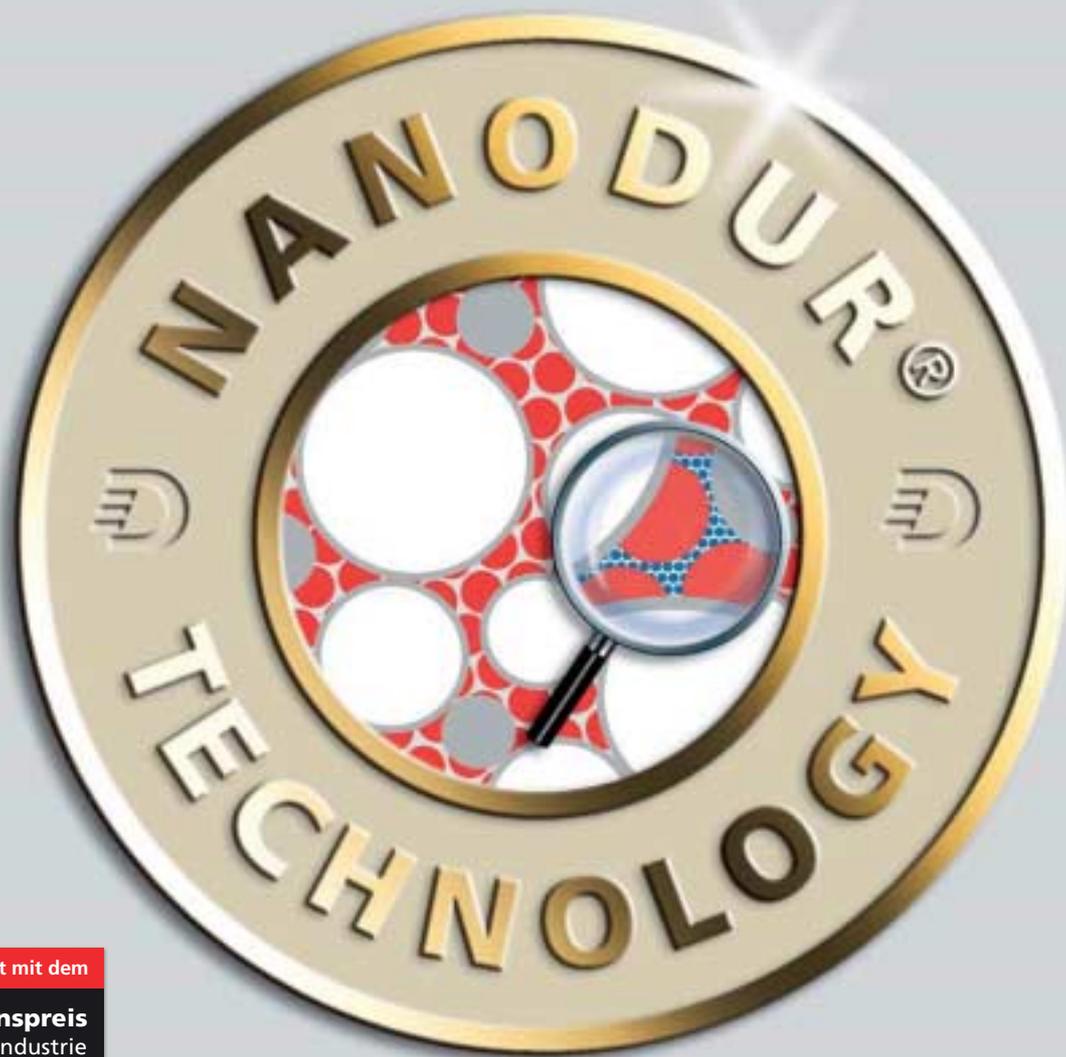
\*werkgemischtes Compound

## UHPC im Fahrmischer



Die in dieser Informationsschrift enthaltenen Angaben sind allgemeine Hinweise, die uns unbekannt chemische und/oder physikalische Bedingungen von Stoffen, mit denen unsere Produkte vermischt, zusammen verarbeitet werden, oder sonst in Berührung kommen (z.B. infolge unterschiedlicher Baustellenbedingungen) nicht berücksichtigen können. Sie sind deshalb unter Umständen für den konkreten Anwendungsfall nicht geeignet. Daher sind vor dem Einsatz unserer Produkte auf den Einzelfall bezogene Prüfungen und Versuche erforderlich. Die Angaben in dieser Informationsschrift beinhalten keine Beschaffenheitsgarantie. Mängel- und Schadenersatzansprüche aufgrund der in dieser Informationsschrift gemachten Angaben sind gem. § 444 BGB ausgeschlossen.

*This bulletin contains general information only. It cannot consider chemical and/or physical influences of substances unknown to us having any contact with our products at mixing or in any other way at work on the construction site. Hence the information is perhaps not suitable for the actual application. In this case individual tests considering the actual on-site conditions are necessary. The information in this bulletin cannot be seen as a quality guarantee. Indemnification and quality claims due to the information in this bulletin are explicitly excluded. Court of jurisdiction: Wiesbaden, Fed. Rep. of Germany.*



Ausgezeichnet mit dem

**Innovationspreis**  
der Zulieferindustrie  
Betonbauteile **2008**

## Premiumzement für Ultra High Performance Concrete (UHPC)

- Druckfestigkeiten von mehr als 150 MPa
- Biegezugfestigkeiten von mehr als 20 MPa
- Erfüllt die Anforderungen der Zementnorm

**Dyckerhoff NANODUR®**  
Ergebnis unserer neuesten Entwicklung

Dyckerhoff AG, Produktmarketing  
Postfach 2247, 65012 Wiesbaden, Germany  
Telefon +49 611 676-1181, Telefax +49 611 676-1181  
marketing@dyckerhoff.com www.dyckerhoff.de

**1** **Dyckerhoff**