

BETONTECHNIK

Anwendungen von UHPC auf Basis eines Spezialbindemittels in Bautechnik und Maschinenbau

SONDERDRUCK
BWI 12/01



- ABTC
- Abcic
- NATIONAL PRECAST
- NZCS
- aci
- CPA
- ICPI
- American Concrete Pipe Association
- BRITISH PRECAST
- OPCA
- PCI
- bibm

Betonanwendungen außerhalb des Bauwesens

Anwendungen von UHPC auf Basis eines Spezialbindemittels in Bautechnik und Maschinenbau

Nanodur® Compound 5941 ist ein Spezialbindemittel der Dyckerhoff AG für Ultra High Performance Concrete (UHPC). Die besonderen Eigenschaften ermöglichen den Einsatz von zementgebundenem Beton auch außerhalb des Bauwesens. Bautechnische Anwendungen werden an den Beispielen einer geklebten Treppe auf der Messe Bau in München, Garderobenstelen für das Bibelmuseum in Frankfurt und der Sichtbetonfassade des Bürogebäudes Ferchau in Gummersbach gezeigt. Beispiele aus dem Maschinenbau verdeutlichen, welche Anforderungen bei massiven Maschinenbetten und Gestellen erfüllt werden müssen und wie mit Betonelementen auf Basis des Nanodur Compound 5941 diese Herausforderungen an Rissefreiheit und Genauigkeit umgesetzt werden.

■ Bernhard Sagmeister, durcrete GmbH, Deutschland
 Thomas Deuse, Dyckerhoff AG, Deutschland ■

Die Besonderheiten von Nanodur-Beton

Bei üblichem UHPC wird eine hohe Packungsdichte durch die Verwendung von industriellen Nebenprodukten wie z. B. Silikastaub erreicht. Durch den Einsatz dieser Zusatzstoffe in Verbindung mit PCE-Hochleistungsfließmitteln erreicht man durch Optimierung der Packungsdichten sehr hohe Druckfestigkeiten. Beim Nanodur Compound 5941 wird ein anderer Ansatz zur Erhöhung der Packungsdichte verfolgt. Nach der Vermahlung von Zementkomponenten wird ein Sichtung- oder Klassifizierungsprozess durchgeführt (Mikrodur Technologie). Feinstanteile aus diesem Prozess werden mit Basis-Normzementen sowie mineralischen Feinstoffen in einem genau festgelegten Kornband/Sieblinie wieder zusammengesetzt. Zur Hydratationssteuerung kommen nanostrukturierte synthetische Kieselsäuren zum Einsatz. Das für Industriekunden entwickelte Nanodur Compound 5941 ist ein Spezialbindemittel ausschließlich für UHPC-Anwendungen. Die daraus hergestellten Betone weisen Vorteile gegenüber klassischen Rezepturen

im Hinblick auf einfache Ausgangsstoffe und Mischtechnik sowie Verarbeitbarkeit und Wirtschaftlichkeit auf.

Nanodur-Beton ist deutlich weniger klebrig und zäh als klassischer UHPC mit Silikastaub. Deshalb werden keine Spezialmischer benötigt, sondern es können die in jedem Fertigteil- oder Transportbetonwerk vorhandenen Trogmischer oder Doppelwellenmischer verwendet werden. Nanodur-Beton kann zu Versuchszwecken sogar mit einem Küchenmixer angerührt werden. Bei älteren Anlagen sind manchmal geringfügige Modifikationen bei den Abstreifern und der Wasserzufuhr erforderlich. Die Mischdauer pro Charge beträgt ca. 10 Minuten, bei einer maximalen Ausnutzung der Mischerkapazität von 50 %.

Die verwendeten Sand- und Splittfraktionen beeinflussen die Betoneigenschaften nur wenig. So kann regional verfügbarer, naturfeuchter Grubensand 0/2 und Hartgesteinssplitt wie z.B. Basalt der Körnungen 1/3 oder 2/5 oder 4/8mm verwendet werden.

Das Fertigteilwerk oder Transportbetonwerk muss nur ein Silo für das als lose Ware angelieferte Spezialbindemittel bereitstellen.

Der Übersee Versand des Nanodur Compound 5941 ist mittels Container weltweit lizenzfrei möglich.

Für die optimierte Betonrezeptur werden lediglich etwa 18 kg/m³ PCE-Fließmittel benötigt. Verwendet werden können lokal verfügbare Produkte, gute Erfahrungen liegen mit den weltweit verfügbaren Fließmitteln BASF Glenium ACE 430 sowie mit Grace ADVA Flow 375 vor. Die robuste Betonmischung ist selbstverdichtend.

Unbewehrte, faserfreie, nicht thermisch nachbehandelte Nanodur-Betone weisen bei der Normprüfung an Mörtelprismen je nach Rezeptur eine Biegezugfestigkeit von 15-25 N/mm² auf. Damit verbleibt dieser Beton sehr lange im ungerissenen Zustand. Er kann somit wirtschaftlich in Anwendungen eingesetzt werden, bei denen eine Rissbildung nicht erlaubt ist und die Zugfestigkeit des Materials das maßgebende Kriterium darstellt. Bei diesen Anwendungen kann man auf Bewehrung und Fasern verzichten, was deutliche Kostenvorteile birgt. Beim Einsatz von Schwindreduzierern beträgt das Schwindmaß ca. 0,5 bis 0,6 mm/m und entspricht etwa demjenigen von Normalbeton.



Ausgangsstoffe der Mischung



Mischen von Nanodur-Beton



■ Dipl.-Ing. Thomas Deuse studierte Bauingenieurwesen in Siegen. Nach Tätigkeiten als Anwendungsberater für bauchemische Produkte von Degussa und Ceca wechselte er 1996 zur Dyckerhoff AG. Er war maßgeblich an der Entwicklung von Nanodur beteiligt und verantwortet die Produktentwicklung und den Vertrieb der Spezialbaustoffe der Dyckerhoff AG in Wiesbaden. Thomas.Deuse@dyckerhoff.com



■ Dr.-Ing. Bernhard Sagmeister studierte Bauingenieurwesen in München und promovierte in Darmstadt. Nach Tätigkeiten als Tragwerksplaner, Bau- und Oberbauleiter bei der Philipp-Holzmann Gruppe wechselte er zur Baustoffindustrie und war dort viele Jahre Geschäftsführer von Betonfertigteilterwerken. 2010 gründete er das Start-Up-Unternehmen durcrete, welches sich mit der Beratung, Entwicklung, Berechnung und Vertrieb von Produkten aus Nanodur-Beton beschäftigt. sagmeister@durcrete.de

Tabelle 1: Rezeptmuster

Material		Einwaage
Split, z. B. Basalt 1/3 o. 2/5 o. 5/8 mm, naturfeucht	kg/m ³	880
Sand 0/2 mm, naturfeucht	kg/m ³	430
Nanodur Compound 5941	kg/m ³	1.050
Fließmittel und Schwindreduzierer	kg/m ³	26
w/z-Wert, circa		0,26
Dichte, circa	kg/m ³	2.500

Trotz dieser besonderen Eigenschaften ist Beton auf Basis von Nanodur Compound 5941 ein „normaler“ Beton mit allen seinen Möglichkeiten aber auch Grenzen und bleibt deshalb ein Baustoff für Profis. Dies ist besonders bei optischen Anforderungen zu berücksichtigen, denn auch hier braucht man die berufstübliche Erfahrung um Effekten wie Ausblühungen, Blauerfärbungen, Grautonschwankungen, Schüsseln (Krümmen) von dünnen Platten sowie Empfindlichkeit gegenüber Zwangsspannungen im jungen Alter durch überlegtes Handeln entgegenzuwirken. Wenn man dies bei normalen Betonen im Griff hat, braucht man mit Nanodur Compound 5941 den Umgang mit UHPC nicht zu scheuen.

Anwendungen im Bauwesen

UHPC wird in Deutschland seit mehreren Jahren mit Förderprogrammen der DFG erforscht und beschrieben. Dennoch hat er nur selten Eingang in die Anwendung gefunden. Er ist nicht nur sehr teuer, sondern mit den üblichen Rezepturen mit Silikastaub wird häufig eine Zustimmung im Einzelfall benötigt und darüber hinaus sind die empfindlichen Rezepturen schwer zu verarbeiten. Mit Nanodur Compound 5941 liegt nun ein Produkt vor, welches die Herstellung und Vermarktung von UHPC deutlich erleichtert und vereinfacht.

Die weiße Sichtbetontreppe auf dem Stand der Dyckerhoff AG anlässlich der Bau 2011 in München (Januar 2011) zeigt,

dass bei 29 mm Dicke beidseitig schalungsglatt über 1 m Höhe stehend betoniert werden kann. Die Oberflächenhaftzugfestigkeit des Betones ist so groß, dass hier ohne Verschraubung, nur mittels einer Verklebung, das Faltnetz an den gläsernen Wangen befestigt wurde. Im Herstellwerk, bei der Benno Drössler Bauunternehmung in Siegen, wurden Belastungsversuche durchgeführt, bei der knapp 2 t Gewicht pro Stufe aufgebracht wurden. Trotz dieser Belastung blieb die Treppe im ungerissenen Zustand, so dass die aus Duktilitätsgründen und Sicherheitsgründen enthaltenen Stahlfasern ihre Leistungsfähigkeit nicht erbringen mussten.

Die Garderobenstelen des Bibelmuseums Frankfurt sind aus weißem Sichtbeton unter Verwendung von Nanodur Compound 5941 gefertigt. Die 2,90 m hohen, 1 m breiten und 5 cm dicken Elemente sind beidseitig schalungsglatt ausgeführt. Die vom Innenarchitekten Peter Harroider aus Dreieich entworfenen Möbelstücke sind unbewehrt und faserfrei und tragen nur aufgrund der Zugtragfähigkeit des Betones.

Beim Bürogebäude der Engineering Firma Ferchau (Bauherr FFI Frank Ferchau Immobilien) wurde eine vorgehängte hinterlüftete graue Sichtbetonfassade mit UHPC auf Basis von Nanodur Compound 5941 montiert. Die unbewehrten und faserfreien Fassadenelemente sind bis zu 2,92 m lang und bis zu 0,55 m breit. Die Paneele spannen mit 4 cm Dicke über ca. 2,90 m und werden gemäß DIN 18516 ohne Schienensysteme mit Ankerdornen direkt an der Stahlbetonunterkonstruktion befestigt. Aus statischer Sicht hätte 3 cm Dicke genügt, aber die Entwurfsplaner Gerber Architekten und die Ersteller des Fassadenkonzeptes, die Generalplaner Ahlbrecht, Felix, Scheidt, Kasprusch aus Essen, wollten die Massivität des Betones optisch erhalten. Die 1.120 individuell geschalteten Paneele (ca. 900 m²) wurden auf Stahlschaltischen maßgenau gefertigt. Statik, Produktion und Montage erfolgte in Verantwortung des Generalunternehmers der Fassade, der Fa. Benno Drössler GmbH & Co Bauunternehmen KG in Siegen. Mit einem Prüfzeugnis der durcrete GmbH war keine Zustimmung im Einzelfall erforderlich, da aufgrund der speziellen Betonrezeptur ohne Silikastaub der Fremdüberwacher den Beton als Betonwerkstein nach DIN V 18500 klassifizieren konnte.

Kohlebeißer der Hochschule Lausitz (FH)

Bei dem alle zwei Jahre stattfindenden Studentenwettbewerb der „Betonkanu-Regatta“ nahmen 2011 in Magdeburg mehrere Teams mit Konstruktionen auf Basis des



Treppe München, Frontalansicht



Treppe München, Seitenansicht



Bibelmuseum Frankfurt



Bibelmuseum Frankfurt

Nanodur Compounds 5941 teil. Sieger in der offenen Klasse wurde zum 3. Mal in Folge das Team der Hochschule Lausitz mit einem 5 t schweren, schwimmfähigen Betonnachbau eines Braunkohlebagger. Bei Entwurf und Bau wurden eine Vielzahl von neuen Konstruktions-, Schal- und Bewehrungsmethoden für dünnwandige UHPC-Bauteile entwickelt. Dabei wurden nicht nur bauwerksnahe Bauteile wie Fachwerkstäbe und -knoten, Schwimmkästen für die Pontons sowie die Schalen für die Schaufelräder in Beton gefertigt, sondern auch maschinenbautypische Bauteile. Dies gilt insbesondere für eine Betonantriebswelle mit Betonzahnrad, die auf einem Betonkugellager mit Betonkugeln gelagert wurde. Die plattenförmigen Elemente des Schaufelrades wurden mittels Betonschrauben und -muttern an dem Trägerring und der Antriebswelle befestigt.

Anwendungen im Maschinenbau

Der Hightech-Werkstoff auf der Basis von moderner Bindemitteltechnologie erschließt

dank seiner herausragenden Eigenschaften auch im Maschinenbau neue Anwendungsfelder. Dazu zählen insbesondere massive Maschinenbetten und Werkzeuggestelle. Aufgrund ihrer hohen Dämpfung haben sich hierfür bisher Polymerbeton und Naturstein im Maschinenbau durchgesetzt. Jetzt wird die Materialauswahl um den innovativen Werkstoff UHPC erweitert.

Elemente und Bauteile aus UHPC sind in ihrem Eigenschaftsbild bezüglich Festigkeit, E-Modul und Wärmeverhalten mit Natursteinen wie Granit zu vergleichen. Sie weisen insbesondere eine hohe innere Dämpfung auf. Der Spezialbeton dämpft dabei Schwingungen bis zu 80 % schneller als herkömmliche Stahlgusskonstruktionen. Mit dem Betonbett erreicht die Maschine somit eine neue Dynamik, die sich in höheren Vorschubgeschwindigkeiten und Achsbeschleunigungen ausdrückt. Die Standzeiten der Werkzeuge verlängern sich. Ein weiterer Vorteil: Das nichtbrennbare Material reagiert aufgrund seiner thermischen Trägheit nur langsam auf Temperatur-

änderungen und ermöglicht so hohe Genauigkeiten. Es kann auch bei Temperaturen von über 100° C eingesetzt werden. Dazu kommt eine Biegezugfestigkeit von 15-25 N/mm². Dieser Wert lässt sich durch das Vorspannen des Betonbauteils noch weiter verbessern. In dem Bauteil können unterschiedlichste Einbauteile, von Gewindehülsen bis zu Stahlschienen integriert, d. h. einbetoniert oder eingeklebt werden. Auch Rinnen, Gefälleausbildungen und Leitungsdurchlässe lassen sich mit Hilfe eines intelligenten Schalungsbau verwirklichen.

Die Materialkosten betragen nur 50 % der Materialkosten von Polymerbeton. Da die Verdichtung ohne Rütteln erfolgt, können leichte, langlebige und preiswerte Schalungen, auch aus Kunststoff, verwendet werden.

Entwurf und Konstruktion im Maschinenbau

Die Maschinenbauindustrie benötigt Maschinenbetten mit einer definierten



Bürogebäude Ferchau, Gesamtansicht



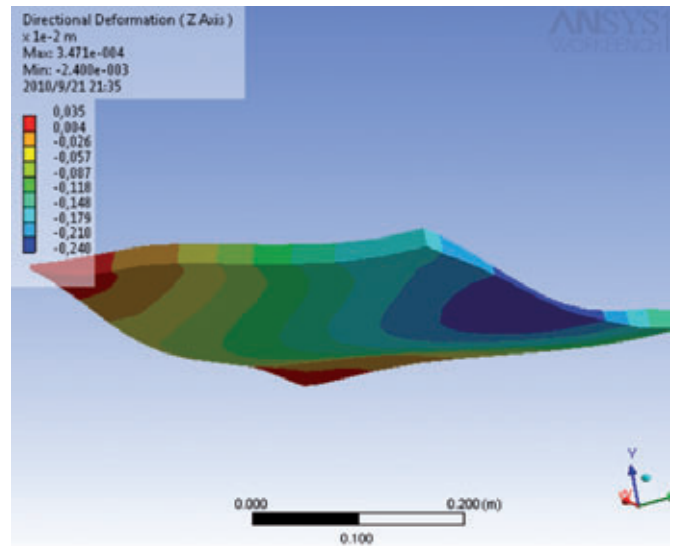
Bürogebäude Ferchau, Fugenausbildung



Betonschraube als Bestandteil eines Betonkanus



Betonkörper eines Maschinenbettes



Beispiel einer FE-Berechnung

Steifigkeit, Verformung und Dämpfung. Es ist unabdingbar, ungerissene Bauteile zu konstruieren und zu produzieren. Prüfungen stellen sicher, dass jedes Maschinenbett rissefrei und mit einer definierten Steifigkeit ausgeliefert wird. Bei einem Haarriss muss das Maschinenbett aussortiert und entsorgt werden, was für die Produktion eine große Herausforderung darstellt, die statische Berechnung aber ungemein erleichtert. Das Bett kann mittels linear elastischer FEM-Berechnung analysiert werden, wobei Volumenelemente zum Einsatz kommen. Bewehrungsstähle oder Fasern werden auf der sicheren Seite liegend bei der Bemessung nicht berücksichtigt, da diese erst nach einem Riss zum Tragen kommen. Sie werden auch tatsächlich nicht benötigt, denn im Falle eines Risses ist das Maschinenbauteil bereits zerstört. Bewehrung wird regelmäßig nur für die Befestigung und Erdung von Einbauteilen verwendet, Fasern nur für den Fall einer Kantenabsplitterung beim Gabelstaplertransport. Der limitierende Faktor der Bemessung ist also die Biegezugfestigkeit.

Genauigkeit im Maschinenbau

Mit speziellen Maßnahmen erreicht das deutsche Fertigteilwerk Sudholt-Wasemann allein durch Schalungsbau und geschickte Lagerung eine Ebenheitsgenauigkeit von ca. 0,1 mm über eine Länge von 2 m, was schon das Aufschauben von Linearführungsschienen ohne vorherige mechanische Bearbeitung ermöglicht. Bei den einbetonierten Gewindehülsen kann durch Berücksichtigung der

Schwindverkürzung eine Lagegenauigkeit von unter 0,5 mm erreicht werden.

Die Maschinenbauindustrie benötigt jedoch Genauigkeiten der Ebenheit, Planparallelität sowie Rechtwinkligkeit der rechteckigen oder linienförmigen Montageflächen bis zu 5 µm/m und eine Lagegenauigkeit von Gewindehülsen von 0,1 mm. Dies kann erreicht werden durch:

- Einbetonierten und verankerten Stahlplatten, die in einem Metallbearbeitungszentrum gefräst, geschliffen und gebohrt werden.
- Fräsen, Schleifen und Läppen der Betonoberfläche in einem spezialisierten Natursteinbetrieb, nachträgliches Bohren und Einkleben von Gewindeankern.
- Abformen der Teile mit einer Epoxidharzauffütterung gegen eine hochpräzise Lehre.

Die Verformungen sind so klein, dass sie nur mit sehr speziellen Präzisionsinstrumenten in einer Klimakammer gemessen werden können.

Aber alle diese aufgeführten Maßnahmen sind sinnlos, wenn ein Betonbauteil mit mehreren Metern Länge nach der Präzisionsbearbeitung um mehrere Millimeter schwindet. Nach einer im Herstellwerk durchgeführten Erhitzung auf 90 °C über ca. 48 h oder einer Nachbehandlung im Autoklaven können Verformungen infolge der Abbindeprozesse im Beton ausgeschlossen werden. In Versuchsreihen wurde weiterhin nachgewiesen, dass dieser Prozess des „Temperns“ dem UHPC nicht schadet.

Tabelle 2: Materialvergleich

Material	Dichte [t/m ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]
Nanodur-Beton	2,4-2,5	> 125	10-25	35-50.000
Granit	2,5-3,0	160-240	10-30	40-60.000
Polymerbeton	2,0-2,5	90-150	15-35	20-45.000
Stahl / Edelstahl /Guss	7,8-8,0	-	200-900	170-210.000



Maschinentisch



Hochpräzise Oberfläche im Betonwerk der Sudholt-Wasemann GmbH

Bei der Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit mit Ringnut konnten Werte von ca. $4,2 \text{ N/mm}^2$ nachgewiesen werden, wobei der Abriss immer im Beton und nie in der Kontaktfläche zwischen Kleber und Beton stattfand.

Mehrere unabhängige Messungen von spezialisierten Betrieben zeigen inzwischen, dass die Verformungsbeständigkeit des Nanodur-Betons nach der Feinbearbeitung hervorragend ist, so dass inzwischen auch Hersteller von Hochpräzisionsmessmitteln diesen neuen Werkstoff in Ihr Programm aufgenommen haben. Dabei kommen auch firmenspezifische Rezepturen zum Einsatz, wie das Produkt InnoCrete der Fa. Johann Fischer Präzisionswerke (JFA) in Aschaffenburg.

Ausblick

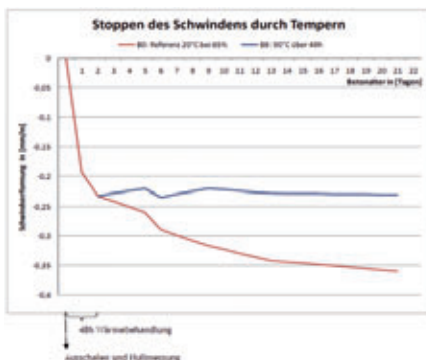
Mehrere Betonfertigteilewerke in Deutschland produzieren inzwischen mit unterschiedlichen Verfahren und Rezepturen Bauteile aus UHPC. Der Markt beschränkt sich nicht auf Baukonstruktionen, sondern erweitert sich stetig in Maschinenbau und

andere Bereiche, wo UHPC Metall oder Polymerbeton ersetzt. Die aktiven Marktteilnehmer sehen großes Potenzial des neuen

Werkstoffes, der mittels unterschiedlicher Rezepturvarianten an viele Herausforderungen angepasst werden kann. Die Dyckerhoff AG, hat das Spezialbindemittel Nanodur Compound 5941 für UHPC entwickelt und unterstützt Forschung, Entwicklung und Vertrieb zu Bauteilen, Maschinenbetten und anderen Anwendungen aus Nanodur-Beton.



Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit



Stoppen des Schwindens durch Tempern



Messgeräteunterbau aus InnoCrete, Foto JFA

■ Weiterführende Literatur

- [1] Deuse T.; Strunge J.; Parker F.: Nanostrukturierte Steuerungskomponenten in Normzement für ultrahochfeste Betone. Nanotechnologie aktuell, 2008
- [2] Ultrahochfestes Maschinenbett in der Reihe Perspektive Management. maschine+werkzeug Heft 7, 2011

■ WEITERE INFORMATIONEN



durcrete GmbH
 Frankfurter Straße 9
 65549 Limburg/Lahn, Deutschland
 T +49 6431 584 0376 · F +49 6431 584 0377
 info@durcrete.de · www.durcrete.de



Dyckerhoff AG
 Produktmarketing
 Biebricher Straße 69
 65203 Wiesbaden, Deutschland
 T +49 611 676 1181 · F +49 611 609 092
 marketing@dyckerhoff.com www.dyckerhoff.com