

# Hochleistungsbeton mit natürlichen Feinsanden als alternative wertvolle Gesteinskörnung

■ Matthias Derstroff, Thomas Deuse, Frank Parker und Frank Rüßmann, Dyckerhoff GmbH, Deutschland

„Der weltweite Bauboom hat eine Sandknappheit ausgelöst. Die Folgen für die Umwelt sind laut einem neuen UNO-Bericht dramatisch. Die Nachfrage nach Sand und Kies hat sich einer neuen Studie zufolge in 20 Jahren verdreifacht. Mit 40 bis 50 Milliarden Tonnen pro Jahr sei Sand einer der wichtigsten Handelsrohstoffe weltweit, teilte das UNO-Umweltprogramm (UNEP) in Genf mit. Der unregulierte Abbau schade der Umwelt. „Flüsse, Deltas und Küsten werden ausgewaschen, Sand-Mafias blühen, und der Bedarf steigt“, so die UNEP. Der Grund für die hohe Nachfrage liegt vor allem in der Zunahme der weltweiten Bautätigkeit. Sand wird neben Wasser, Zement und Kies als wesentlicher Bestandteil für die Betonherstellung verwendet.“ [1]

## Gesteinskörnung für Normal- und Ultra-Hochleistungsbeton

An Gesteinskörnungen für Beton werden hohe Anforderungen gestellt, um das mit Zementleim zu verfestigende mineralische Korngerüst zu optimieren. Neben einer günstigen

gedrungenen Kornform und einer granulometrischen Abstufung entsprechend dem Einsatzzweck, sollen Gesteinskörnungen dicht, frostbeständig und alkaliresistent sein. Letzteres kann bei Hochleistungsbetonen durch eine sehr hohe Gefügedichtigkeit kompensiert werden, wie Versuche mit Granodiorit als Gesteinskörnung in Ultra High Performance Concrete UHPC 2012 bei 1-jähriger Klimawechsellagerung in Wasser und NaCl-Lösung an der Universität Weimar gezeigt haben [2].

Aber auch Granulometrie und Kornform der Gesteinskörnung sind bei Hochleistungsbetonen bei weitem nicht so wichtig wie bei Normalbeton, da die Betonstruktur eigentlich eine andere ist. Aufgrund hoher und sehr hoher Bindemittelgehalte muss hier nicht zwingend ein Korngerüst aus scharfkantigen gedrungenen und aufeinander abgestimmten Korngrößen vorliegen, sondern die Gesteinskörnung übernimmt vielmehr die Aufgabe eines Füllers wie er auch bei Kunstharzen für die mechanische Festigkeit notwendig ist. Bei UHPC entsteht nur aus Zement sowie feinteiligen Puzzolanen als Bindemittel und Gesteinskörnungen < 1 mm eine hohe



Abb. 1: Dyckerhoff Kieswerk Seltz, Frankreich



■ Dr. Matthias Derstroff, Dipl. Wirtsch.-Ing., studierte in Darmstadt Wirtschaftsingenieurwesen mit der technischen Vertiefung Maschinenbau. Berufliche Stationen waren Softwareberater bei Siemens, wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Braunschweig und 1994 erfolgte der Eintritt in die Dyckerhoff AG Wiesbaden mit verschiedenen kaufmännischen Funktionen, zuletzt Leiter Controlling Beton. Seit 2005 Mitglied der Geschäftsleitung Beton, seit 2013 Geschäftsführer der Dyckerhoff Beton GmbH & Co. KG und ab 2017 Leiter des Geschäftsbereichs Beton Deutschland/Niederlande.

matthias.derstroff@dyckerhoff.com



■ Thomas Deuse, Dipl.-Ing., studierte in Siegen Bauingenieurwesen. Berufliche Stationen waren Bauleiter bei Gartenmann, Anwendungstechniker im Bereich anorganische Chemieprodukte der Degussa AG, Projektleiter bei Peri sowie bautechnischer Berater bei der Ceca Klebstoff GmbH. 1996 Eintritt in die Dyckerhoff AG, Wiesbaden, zunächst mit Aufgaben im technischen Vertrieb

Spezialbaustoffe und später im Produktmarketing Bindemittel und Zement. Von 2011 bis zur Pensionierung 2022 Leiter Produktentwicklung und Spezialbaustoffe der Dyckerhoff GmbH.



■ Frank Parker studierte Mineralogie am Institut für Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz und absolvierte anschließend eine Ausbildung zum Chemielaboranten. 1989 bis 1994 Mitarbeiter im Zentrallabor bei Erbslöh, Geisenheim, sowie bei der IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Mannheim. Ab 1994 Mitarbeiter im Wilhelm Dyckerhoff Institut,

Wiesbaden, im Bereich Spezialtiefbau und Güteüberwachung - seit 2005 in der Anwendungstechnik und Produktentwicklung im Bereich Spezialbaustoffe der Dyckerhoff GmbH.

frank.parker@dyckerhoff.com



■ Frank Rübmann, Dipl.-Ing., studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen und trat im Mai 1998 in die Dyckerhoff Baustoffsysteme GmbH ein. Die Tätigkeit begann mit der Betreuung von Spezialzementen für Spritzbetonanwendungen, gefolgt von Bindermittelmischungen für Dicht- und Schlitzwände sowie Feinstzementen für Injektionen. Später erweiterte sich das

Aufgabengebiet auf den gesamten technischen Vertrieb der Dyckerhoff Spezialbindemittel. Heute betreut Herr Rübmann als Verkaufsleiter neben den Spezialbindemitteln auch Standardzemente im Verkaufsgebiet Süd-Ost der Dyckerhoff GmbH.

frank.ruessmann@dyckerhoff.com

Gefügedichtigkeit, wobei für sehr hohe Druckfestigkeiten auch eine Kornabstufung sinnvoll sein kann [3].

UHPC wird aber nur zum Teil durch Druckkräfte beansprucht, sondern ist eher Biege- und Zugbeanspruchungen ausgesetzt und so fordert das Merkblatt 2052 Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) des Schweizer Ingenieur- und Architektenvereins lediglich eine für die Praxis völlig ausreichende Druckfestigkeit von  $> 120 \text{ N/mm}^2$  für alle Leistungsklassen. Dies ist aber auch ohne Abstufung der Gesteinskörnung möglich und für die wichtigeren hohen Biegezugfestigkeiten genügt nur eine industriell aufbereitete Sandkörnung 0,063-0,25 mm [4].

Hochleistungsbetone sind aktuell noch Sonderbauweisen mit hohen Kosten pro  $\text{m}^3$ . Bei einer teilweise bis zu 50 % reduzierten Masse der Bauteile sieht das dann aber schon sehr viel günstiger aus und wenn Aspekte wie  $\text{CO}_2$ -Emissionen und Rohstoffverbrauch hinzukommen, kann das Bauen mit Hochleistungsbeton durchaus sehr attraktiv werden.



Abb. 2: Dyckerhoff Kieswerk Trebur, Deutschland



Abb. 3: Wüstensand

### Betontechnologisch ungeeignete Sande

„Aufgrund der weltweit fehlenden Mengen an geeigneten Sanden für die Herstellung von Betonen rücken bislang ungenutzte Ressourcen wie Wüstensand oder Feinsandüberschüsse immer mehr in den Fokus. Bisher werden die in den Sandfraktionen enthaltenen Feinsandbestandteile weitestgehend abgetrennt und in die Auskiesungsgebiete zurückgespült. Allein in Deutschland beträgt der dadurch bislang nicht genutzte und damit deponierte Feinsandanteil bis zu 40 Millionen Tonnen pro Jahr. Darüber hinaus verursachen die deponierten Feinsandanteile erhebliche Umweltschäden. Die Kornstruktur von Feinsandsanden und Wüstensanden ist durch eine gerundete Geometrie und eine glatte Oberfläche gekennzeichnet. Auf Grund dieser Beschaffenheit sind Feinsande und Wüstensande für die Herstellung von Betonen ungeeignet.“ [5]

„Wüstensande bzw. äolische Sande unterscheiden sich aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte maßgeblich von Fluss-

und Meersanden. Insbesondere zeichnen sie sich durch eine sehr runde Kornform mit glatten Oberflächen und eine enge Kornabstufung aus. Gemessene Kornrohdichten von Wüstensanden liegen i.d.R. zwischen 2,44 kg/dm<sup>3</sup> und 2,87 kg/dm<sup>3</sup> und Partikelgrößen zwischen  $d = 0,04$  mm und  $d = 0,80$  mm, wobei bis zu 8,0 % dieser Sande einen Korndurchmesser kleiner als 0,07 mm haben können. Es wurde beobachtet, dass diese Werte sich zwischen geografisch voneinander entfernten Regionen nur wenig unterscheiden. Für einen Ersatz von Flusssanden eignen sich Wüstensande daher schon allein aufgrund ihrer Korngrößenverteilung nicht. Die enge Kornabstufung führt außerdem zu einer mangelnden Packungsdichte. Ein weiterer Hinderungsgrund ist die nicht ausreichende Korn-zu-Korn-Abstützung aufgrund der glatten Oberflächen und der runden Kornform.“[6]

Kontraproduktiv für das Korngerüst in normalem Beton sind also im Wesentlichen Kornform und -abstufung sowie die Feinheit der Sande mit  $< 1$  mm Partikelgröße.

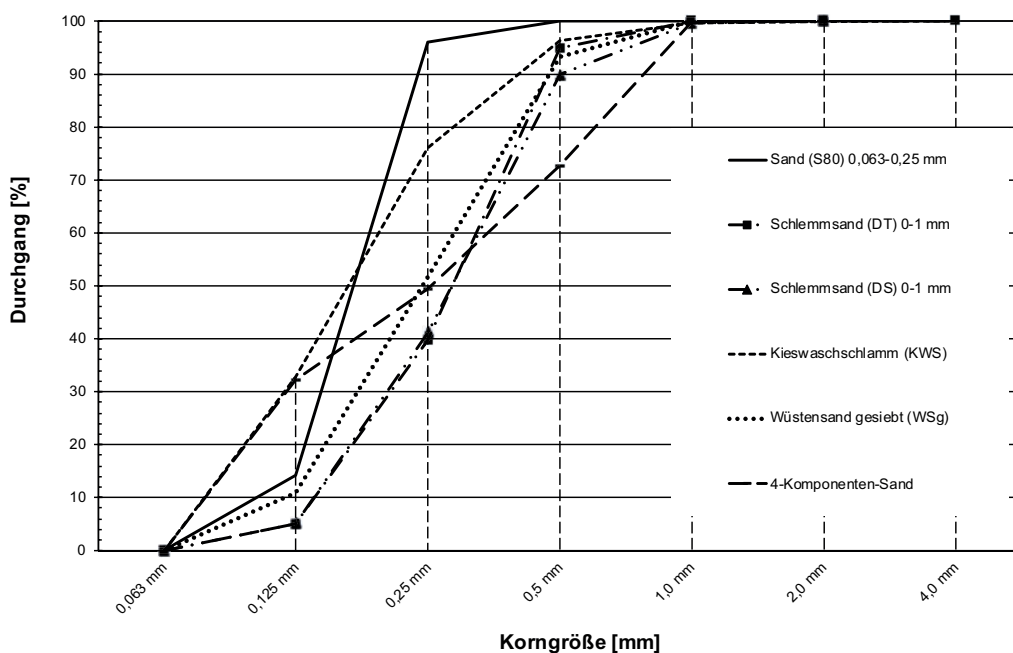


Abb. 4: Sieblinien der Feinsande für die Hochleistungsbetone

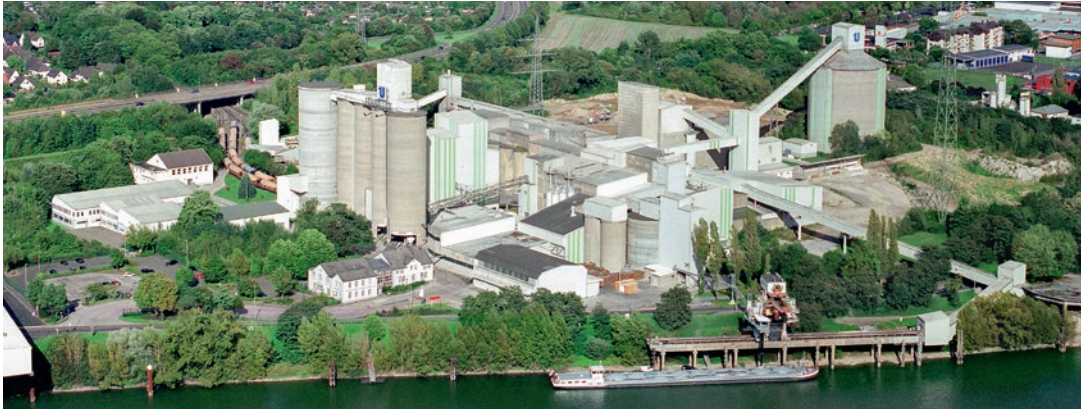


Abb. 5:  
Dyckerhoff  
Zementwerk  
Neuwied,  
Deutschland

Für die Transportbetonherstellung kommt üblicherweise nur Sand 0/2 mm zum Einsatz und so sind Schlemmsande 0/1 mm sowie Kieswaschschlamm aus Sand- und Kiesgruben in Europa reichlich verfügbar wie auch der Wüstensand z. B. im arabischen Raum. Die mineralische Grundlage der Feinsande ist meist Quarz und damit sind sie als Füller für UHPC Mischungen gut geeignet. Die Sieblinien liegen alle größtenteils im Bereich zwischen 0,063 und 0,5 mm (Abb. 4).

Neben den gängigen Kombinationen aus Portlandzement und feinteiligen Puzzolanen [3] werden seit über 20 Jahren anwendungsfertige praxisbewährte Spezialbaustoffe im Dyckerhoff Werk Neuwied mit Feinstzementtechnologie produziert [4].

Nanodur Compound 5941 enthält 41 % Quarzfeinsand und 59 % Zement auf Basis von Norm- und Feinstzementen sowie synthetischen Oxiden. Die Bindemittelvormischung wird seit mehr als 10 Jahren erfolgreich weltweit zur Herstellung von Maschinenbetten und Werkzeuggestellen eingesetzt. Im Ausland gibt es größere Projekte im Bauwesen, die in Deutschland nur mit einer Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung AbZ möglich wären. Auch wartet die gesamte Bauweise der Hochleistungsbetone in Deutschland immer noch auf eine grundsätzliche bauaufsichtliche Regelung, die dann aber auch nur Normprodukte umfassen wird.

Variodur 40 CEM III/A 52,5 R ist ein solcher Normzement auf Basis der Mikrodurtechnologie, der dann keine besonderen

Tab. 1: UHPC Rezepturen

UHPC-Rezepturen		NC 5941			Variodur 40						
VARIODUR 40 CEM III/A 52,5 R	kg/m³	-	-	900	900						
Nanodur Compound 5941	kg/m³	1700			-	-	-	-	-	-	-
Sand (S80) 0,063-0,25 mm	kg/m³	-	-	1.230	-	-	-	-	-	615	-
Wüstensand gesiebt (WSg)	kg/m³	-	-	-	-	-	-	-	1.230	-	-
Kieswaschschlamm (KWS)	kg/m³	-	400	-	-	-	-	1.230	-	615	-
4-Komponenten-Sand (4-K-S)	kg/m³	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.230
Schlemmsand (A) 0-1 mm	kg/m³	400	-	-	1.230	-	-	-	-	-	-
Schlemmsand (D) 0-1 mm	kg/m³	-	-	-	-	1.230	-	-	-	-	-
Schlemmsand (DS) 0-1 mm	kg/m³	-	-	-	-	-	1.230	-	-	-	-
Mikrostahlfasern 12,5 / 0,175	kg/m³				200						
PCE Fließmittel	kg/m³	20,0	22,6	25,0	22,0	18,5	18,9	24,0	16,5	21,6	21,6
Wasser (inkl. Wasser aus PCE)	kg/m³	235	235	196	180	180	180	207	180	194	194
w/z-Wert	-	0,235	0,235	0,22	0,20	0,20	0,20	0,23	0,20	0,215	0,215
Ausbreitmaß mit Schlag	mm	490	490	450	505	650	565	535	620	565	630
<b>Festbetoneigenschaften 28 Tage</b>											
Druckfestigkeit Prisma	N/mm²	169	182	191	195	204	188	174	208	187	210
Würfeldruckfestigkeit	N/mm²	150	142	157	157	163	149	150	160	154	176
Druckfestigkeit Zylinder	N/mm²	-	-	145	-	-	139	-	152	146	164
E-Modul	N/mm²	-	-	43.900	-	-	43.133	-	47.262	45.361	47.808
4-P-Biegezugfestigkeit Balken 4x10x50 cm³	N/mm²	-	-	22,0	-	-	22,2	-	-	-	-
4-P-Biegezugfestigkeit Prisma 4x4x16 cm³	N/mm²	17,8	20,4	18,4	18,7	19,3	20,0	17,4	17,0	17,0	16,4
Gesamtporosität	Vol.-%	-	-	8,3	8,6	-	-	-	-	-	-

Nachweise mehr erfordern wird. Ohne feinteilige Puzzolane kann mit gängiger Betonmischtechnik im Fertigteil- und im Transportbetonwerk Ultra-hochfester Beton UHFB für besonders CO<sub>2</sub>-effiziente schlanke Bauteile hergestellt werden [7].

**Natürliche wertvolle Feinsande als alternative Gesteinskörnung**

Der erste Tastversuch zur Feststellung der grundsätzlichen Eignung alternativer Gesteinskörnungen erfolgte mit nur 400 kg/m³ Schlemmsand und 1.700 kg/m³ Nanodur Compound 5941, d.h. die UHPC Mischung enthielt insgesamt 1.000 kg/m³ Bindemittel und 700 + 400 = 1.100 kg/m³ Quarz(fein)sand. Aufgrund der guten Resultate wurde dieser erste Tastversuch anschließend mit 400 kg/m³ Kieswaschschlamm KWS aus der Rückspülgrube eines Kieswerks wiederholt.

Grundsätzlich ist die Streuung der Messwerte bei Hochleistungsbetonen recht groß, wobei sich Zustand der Prüfkörperformen, Einfüllverhalten, Verdichtung etc. auf die Ergebnisse auswirken können.

Die Druckfestigkeiten am Würfel (10 x 10 x 10 cm³) der beiden Nanodur Varianten liegen im Bereich von 150 N/mm²

und bei den Ergebnissen an Prismen (4 x 4 x 16 cm³) war der Kieswaschschlamm KWS sogar etwas besser als der Schlemmsand 0/1 mm.

Referenz für alle weiteren Versuche waren dann die Eigenschaften der UHFB Rezeptur aus der Dyckerhoff Produktinformation mit 1.230 kg/m³ industriellem Feinsand S80 und 900 kg/m³ Normzement Variodur 40 CEM III/A 52,5 R [8].

Im Ergebnis zeigten alle drei Schlemmsande 0/1mm im Mittel eine sehr hohe Biegezugfestigkeit von 19 N/mm², Prismendruckfestigkeit von 195 N/mm² und Würfeldruckfestigkeit von 155 N/mm². Ergebnisse in derselben Größenordnung waren durchaus zu erwarten, da alle Sieblinien eng beieinander liegen (Abb. 4). Auch weitere Kennwerte wie E-Modul und Zylinderdruckfestigkeit eines exemplarisch geprüften Schlemmsands 0/1 lagen auf sehr hohem Niveau und entsprachen der Referenz mit dem industriellem Feinsand S80. Die Ergebnisse mit Kieswaschschlamm KWS zeigten bei vergleichbaren Druckfestigkeiten etwas geringere Biegezugfestigkeiten.

Ähnliche Kornformen wie Kieswaschschlamm KWS und Schlemmsand 0/1 mm weist in Abb. 6 ein für Terrarien ab-



Abb. 6: a) KWS - Wüstensand, b) Schlemmsand 0/1 - Wüstensand (Mikroskopaufnahmen mit 18-facher Vergrößerung)

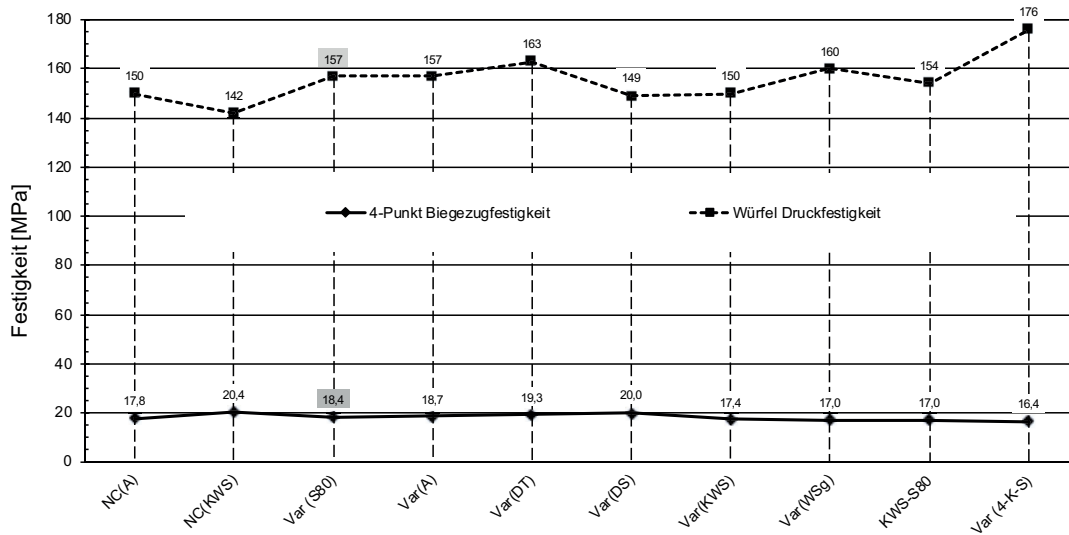


Abb. 7: Festigkeiten der geprüften Betone

gesiebter und gereinigter natürlicher Wüstensand [9] auf, dessen Partikelgrößen in dem zuvor beschriebenen Kornbereich zwischen 0,04 - 0,8 mm liegen [6]. Die Würfel- und Zylinderdruckfestigkeiten wie auch der E-Modul waren hier vergleichsweise hoch, die Biegezugfestigkeit aber etwas geringer.

Abschließend wurde noch eine Mischung aus 50 % industriellem Sand S80 und 50 % KWS sowie eine abgestufte Sandrezeptur aus 4 Komponenten analog [3] geprüft. Während das 50:50 Gemisch bei den Druckfestigkeiten auf dem Niveau der Einzelkomponenten lag, zeigte hier die 4-Komponenten Sandmischung deutlich höhere Werte. Die Biegezugfestigkeiten lagen jedoch bei den letzten beiden Rezepturen auf niedrigerem Niveau.

Besondere Kornabstufungen haben sich auch hier nicht auf die für UHPC wichtigere Biegezugfestigkeit ausgewirkt, sondern führen nur zu einer Steigerung der ohnehin hohen Druckfestigkeit. Das bestätigt erneut die langjährigen Erfahrungen mit UHPC im Bereich der Maschinenbetten und Werkzeuggestelle.

## Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften aller Varianten mit den alternativen Feinsanden auf einem sehr hohen Niveau mit  $> 140 \text{ N/mm}^2$  Druck- und  $\geq 17 \text{ N/mm}^2$  Biegezugfestigkeit liegen. Das unterstützt die These, dass Hochleistungsbeton mit sehr hochwertigem Bindemittel keine besondere Qualität und Abstufung der Gesteinskörnung erfordert und diese hauptsächlich als Füllstoff zu betrachten ist.

Auch die im Kieswaschschlamm enthaltene Organik mit 0,17 TOC gegenüber im Mittel 0,04 TOC bei den Schlemmsanden zeigte infolge der hohen Gefügedichtigkeit keine gravierenden Auswirkungen. Eine Prüfung auf tonige Bestandteile ergab 0,15 g/100g in einer Methylenblaulösung für die Schlemmsande und Kieswaschschlamm und war damit unkritisch.

Es ist also grundsätzlich möglich, nur mit den nicht bzw. schwer verwertbaren Feinstoffen aus der Sand- und Kiesaufbereitung als Gesteinskörnung in Verbindung mit Nanodur Compound 5941 wie auch mit Normzement Variodur 40 Hochleistungsbeton herzustellen. Der Einsatz als ausschließliche Gesteinskörnung ist dabei als ungünstigste Variante zu betrachten und Kombinationen mit hochwertigeren Gesteinskörnungen können die Ergebnisse nur verbessern. Hochleistungsbeton könnte also einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten und kann durch geringere Bauteilabmessungen sogar wesentlich  $\text{CO}_2$ -effizienter als Normalbeton sein. ■

## Literatur

- [1] Vereinte Nationen: Die Welt verbraucht zu viel Sand - DER SPIEGEL, 07.05.2019
- [2] BMBF Projekt OLAF: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb13/746933185.pdf>
- [3] Orgass, Marko et.al.: Überführungsbauwerk der L3378 bei Fulda-Lehnerz, Erster Einsatz von UHPC in Deutschland im Straßenbrückenbau, Beton- und Stahlbeton 113 (2018), Heft 11
- [4] Deuse, Thomas: UHPC mit Normzementen ohne Betonzusatzstoffe, IAB-Tage BETON 2021, Weimar (aus: Deuse, Thomas et.al.: HPC, UHPC, UHFB, UHLB, UHPFRC... A Babylonian confusion of languages and simple solutions in practice, Concrete Plant International CPI, 2-2020)
- [5] DE 10 2017 006 720 B3: Baustoffgranulat, Verfahren zum Herstellen eines Baustoffgranulats auf Basis von Mineralkörnern und seine Verwendung, DPMA, 21.06.20218
- [6] Höffgen, Jan et.al.: Gesteinskörnungen: Zukünftige Rohstoffversorgung, beton Heft 4 2021, S.113-119, Verlag Bau + Technik, Düsseldorf
- [7] Betz, Thorsten; Deuse, Thomas: Weniger  $\text{CO}_2$  durch Einsatz von Hochleistungsbeton, Betonwerk International BWI, 5-2021
- [8] Produktinformation: Dyckerhoff Baustoffe für Hochleistungsbetone, Stand 4/2020
- [9] Wüstensand: [http://www.exo-terra.com/de/products/desert\\_sand.php](http://www.exo-terra.com/de/products/desert_sand.php)

## WEITERE INFORMATIONEN



[www.dyckerhoff.com](http://www.dyckerhoff.com)