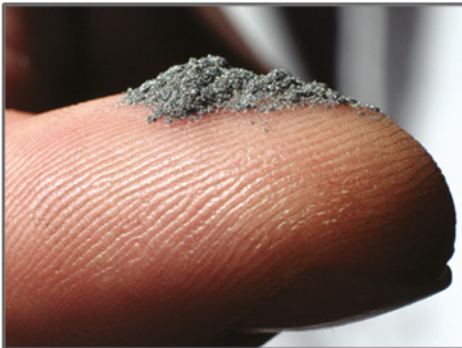




FuturZement C.1 | FuturBeton C.1

nanostrukturierter Baustoff

hochreaktiv und mehr als doppelt so fest wie herkömmlicher Beton bei überlegener Dauerhaftigkeit und gigantischer CO₂-Emissionseinsparung



BMBF-Projekt-Nr. 03X0068A



weltweit erste öffentliche Brücke aus Futur - Hochleistungszement/Beton

Brücke "Rosenthal" errichtet in Olpe am 14. November 2012



12 Tonnen Dachbalustrade, Villa ZCS errichtet in Siegen am 21. Juni 2013



www.zoz.de

FuturZement C.1 | FuturBeton C.1

nanostrukturierter Baustoff

hochreaktiv und dreimal fester als herkömmlicher Beton bei überlegener
Dauerhaftigkeit und gigantischer CO₂-Emissionseinsparung

Einleitung

Zoz beschäftigt sich seit ca. 15 Jahren zusammen mit Partnern aus Forschung, Lehre und Industrie mit der Verbesserung von Portland-Zement-Werkstoffen, vorwiegend durch Kornfeinung und nanoskalige Aktivierung mittels Hochkinetischer Prozesstechnik (HKP). Dabei wurden reproduzierbare Festigkeiten > 1 GPa (25 x fester als konventioneller Zement !) unter erheblicher Steigerung der Frühfestigkeit sowie das Potential einer quantitativen Zementphasenumwandlung nachgewiesen [1]-[5]. Zusätzlich wurde im Rahmen eines BMBF-Projektes ab 2009 die Möglichkeit substanzieller CO₂-Emissionseinsparung durch Einsatz von HKP-aktiviertem Hüttensand untersucht und dieses vollständig erfolgreich mit einem Brückenbauwerk aus FuturBeton C.1 (Bild 1) als Demonstrator per 2013 abgeschlossen [6]. Zoz war Koordinator dieses Projekts. Eine Prüfung des Projekts durch die Bezirksregierung Arnsberg im April 2016 bestätigt den Erfolg des Projekts.



Bild 1a-c: Betonfertigung bei der Fa. Runkel am 05.11.2012 und Montage der Brücke Rosenthal am 14.11.2012 in Olpe

Zement/Beton stellt mit einer jährlichen Produktion von heute weltweit ca. 8 Gt Beton eines der bedeutendsten Produkte der Menschheit dar und gilt als der Baustoff schlechthin. Der dazu heute im Wesentlichen verwendete Portlandzement ist bereits seit dem 19. Jahrhundert bekannt, wobei Zement selbst sogar bis in die Römerzeit (i. d. F. ca. 100 n. Chr.) zurückzuverfolgen ist (z. B. Kuppel des Pantheon in Rom). In Anbetracht solcher langen Geschichte und der ungeheuren Produktionsmengen stellt sich sowohl Zementfertigung wie auch Zement/Beton als Baustoff selbst als eher weniger innovativ dar. Als wesentliches technisches Charakteristikum gilt die Druckfestigkeit, die bei konventionellen Baustoffen mit 30-55 MPa nachgewiesen wird. Problematisch sind ein hoher Energieverbrauch mit hoher CO₂-Emission (insbesondere durch Aufbereitung und Kalzinierung). So verursacht die Herstellung von jeder einzelnen Tonne herkömmlichem Zement die gigantische Menge von durchschnittlich 575 kg CO₂-Emission.

Und das ist teuer und wird wahrscheinlich immer teurer werden !

Verfügbare Hüttensandzemente die vergleichsweise CO₂-arm hergestellt werden können sind reaktionsträge und auch von geringerer Endfestigkeit. Insbesondere hohe Frühfestigkeit bedeutet aber schneller und flexibler bauen zu können.

Technisches und somit weiteres wirtschaftliches Potential liegt für quasi jeden Baustoff und so auch hier in höheren Festigkeiten sowie in der Verbesserung mäßiger Dauerhaftigkeit - letztgenannte insbesondere aufgrund Wasseraufnahme im Falle von Beton.

Innovation & Leistung

HKP-Anlagen (Simoloyer®, i. d. F. semi-kontinuierlich) für die Umwandlung von OPC in HPC (Ordinary Portland Cement in High Performance Cement) werden bereits seit vielen Jahren insbesondere nach Mexico und Indien geliefert - allerdings ohne spürbaren Marktdurchbruch.

Als erstes Zement-Produkt in quasi Eigenregie (zusammen mit allen BMBF-Partnern) repräsentiert FuturBeton C.1 einen innovativen Baustoff der mittels FuturZement C.1 hergestellt wird. Dazu wird als Ausgangswerkstoff Hüttensand (GGBS) in einer kontinuierlichen Simoloyer®-Anlage (Bild 2) in extrem kurzer Prozesszeit aktiviert und fein gemahlen mit dem gezielten Ergebnis einer bimodalen Partikelgrößenverteilung (Bild 3) bei gleichzeitiger substanzieller Porenfeinung annähernd vollständig in den Gelporenbereich (Bild 4).



1) Turbine Zoz SKZ300a

3) Schneckenförderer Zoz SFV63-20-s1

5) Zyklon Zoz ZK100-L

2) Pulverbehälter mit Rührwerk Zoz CS030a

4) HKP-Anlage (Simoloyer® CM20)

6) Produktauffangbehälter

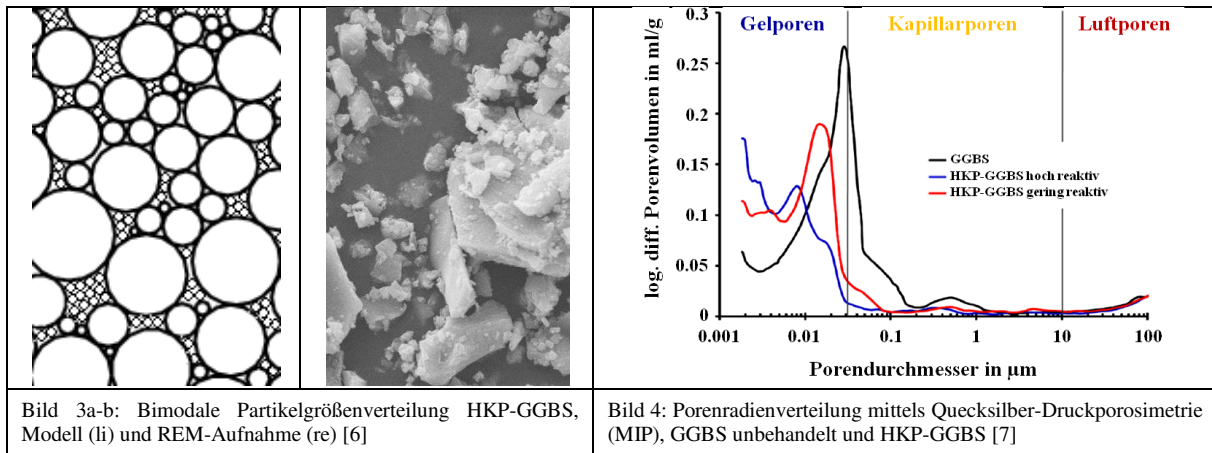
Materialfluss: (2)-(3)-(4)-(5)-(6), die Turbine (1) treibt den geschlossenen Trägergaskreislauf an.

Bild 2: Herstellung von nanostrukturiertem Hüttensand im Tonnenmaßstab mittels Hochkinetischer Prozessanlage Simoloyer® CM20-20lm-s1 (Zoz baut solche Anlagen bis zu 45x größer) mit kontinuierlichem Materialfördersystem für Zement. Genau diese "Labor"-Anlage wurde benutzt, um binnen 2er Wochen im 2-Schichtbetrieb den Werkstoff für die Brücke Rosenthal herzustellen und damit wurde auch für den Demonstrator "Frontalustrade Villa ZCS" produziert.

Die Aktivierung des Hüttensands erfolgt nanoskalig, wobei die Reaktivität mit der Oberfläche nicht linear, sondern nahezu exponentiell zunimmt (Bild 5). Damit ist eine physikalische Erhöhung der Reaktivität durch Oberflächenvergrößerung nicht der einzige Faktor. Der Hüttensand wird zusätzlich durch tribochemische Vorgänge aktiviert. Im Gegensatz zu unbehandeltem Hüttensand, der nur eine geringe bis gar keine Reaktivität mit Wasser aufweist, reagiert der aktivierte Hüttensand (HKP-GGBS) mit Wasser (Bild 6) in gleicher Geschwindigkeit, wie Zement.

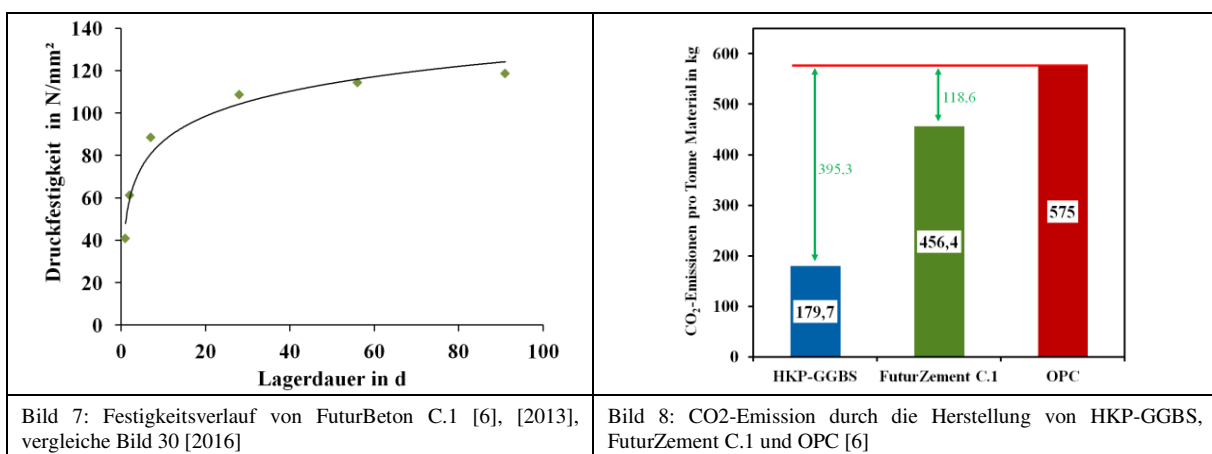
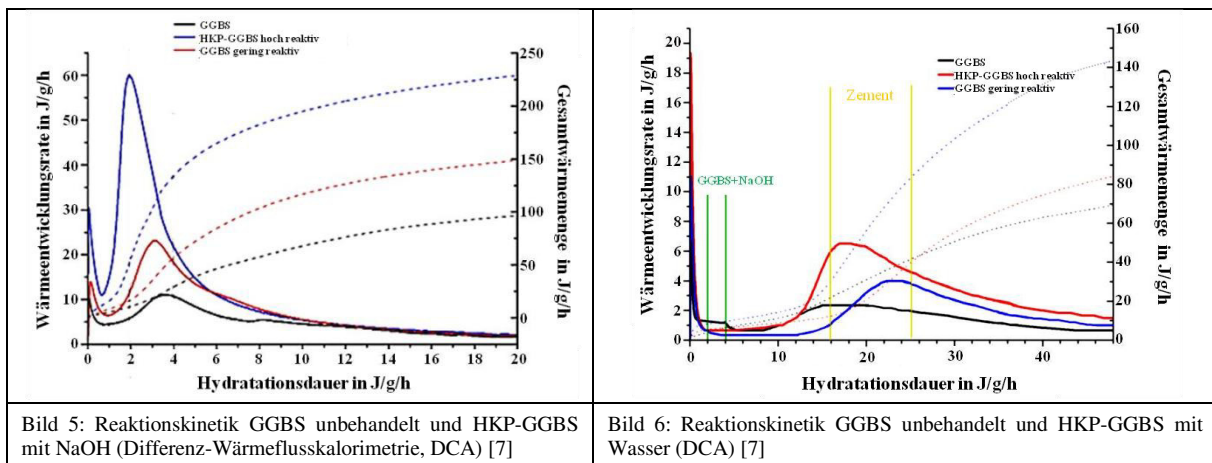
Im nächsten Prozessschritt werden dann nach Gewicht 30 % HKP-GGBS (aktiviert) mit 70 % OPC zu FuturZement C.1 einfach gemischt. Im Ergebnis beträgt der Gewichtsanteil des HKP-Materials im fertigen Beton FuturBeton C.1 nur ca. 5 %, liefert jedoch signifikante Verbesserung der Betoneigenschaften. Es wurde auch 50/50 als Mischungsverhältnis getestet, was ebenso Verbesserungen erzielte im Vergleich zu nicht aktiviertem Hüttensand, aber die Verwendung des aktivierten HKP-GGBS in einem Portlandhüttenzement anstelle eines Hochofenzements wurde im weiteren Verlauf bevorzugt.

Der neue Werkstoff zeichnet sich durch mehr als verdoppelte Festigkeit bei extrem hoher Frühfestigkeit (Bild 7) und überlegener Dauerhaftigkeit sowie zusätzlich durch eine enorme CO₂-Einsparung (Bild 8) im Produktionslauf aus.



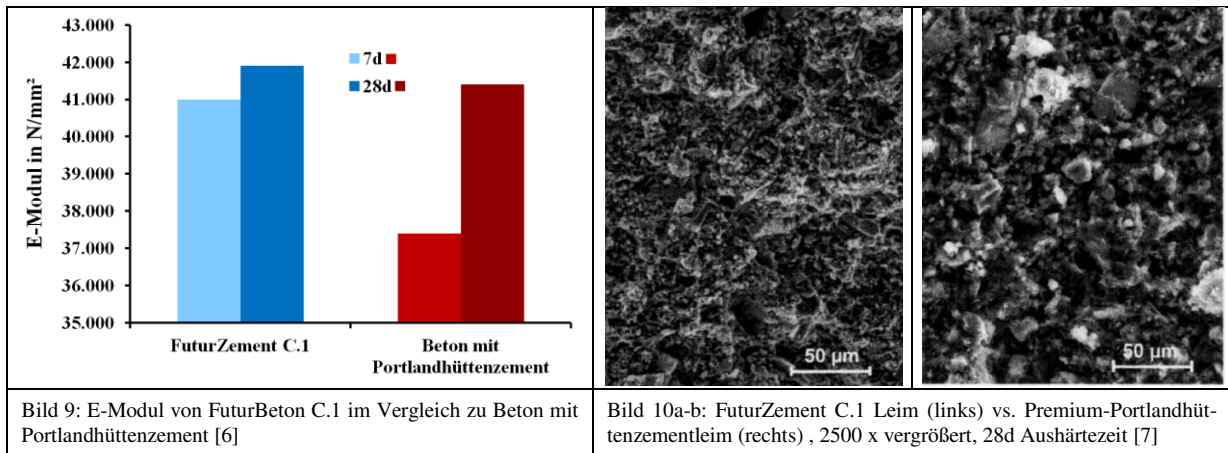
Gelporen	Kapillarporen	Luftporen
< 0,03 µm	10 - 0,03 µm	> 10 µm

Tab. 1: Poreneinteilung nach Smolczyk [8]

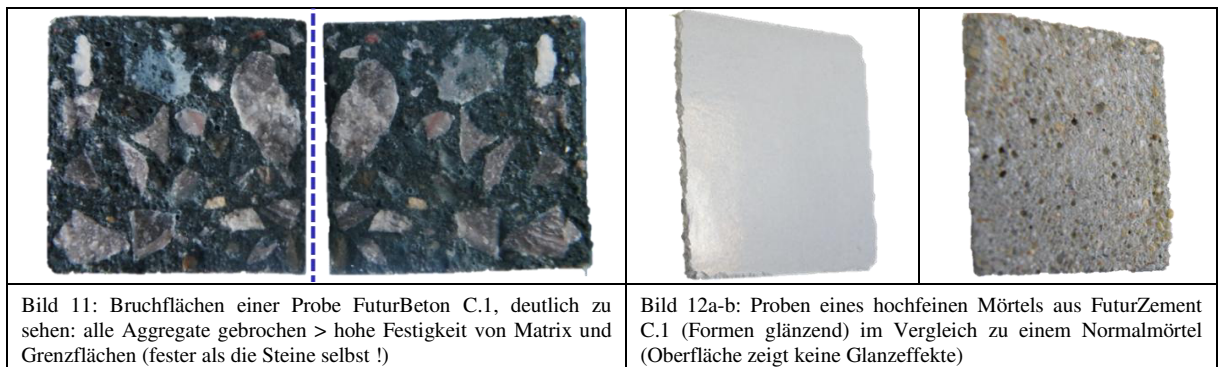


Der E-Modul von FuturBeton C.1 zeigt im Vergleich zu einem gleich zusammengesetzten Beton mit Premium-Portlandhüttenzement höhere Werte nach einer Woche Aushärtezeit (Bild 9). Hier zeigt sich, dass eine frühe und schnellere Phasenbildung im Rahmen der Hydratation möglich ist. Gegen Ende gleichen sich die Werte an, aber durch den früheren gesteigerten E-Modul ist eine frühere Belastung

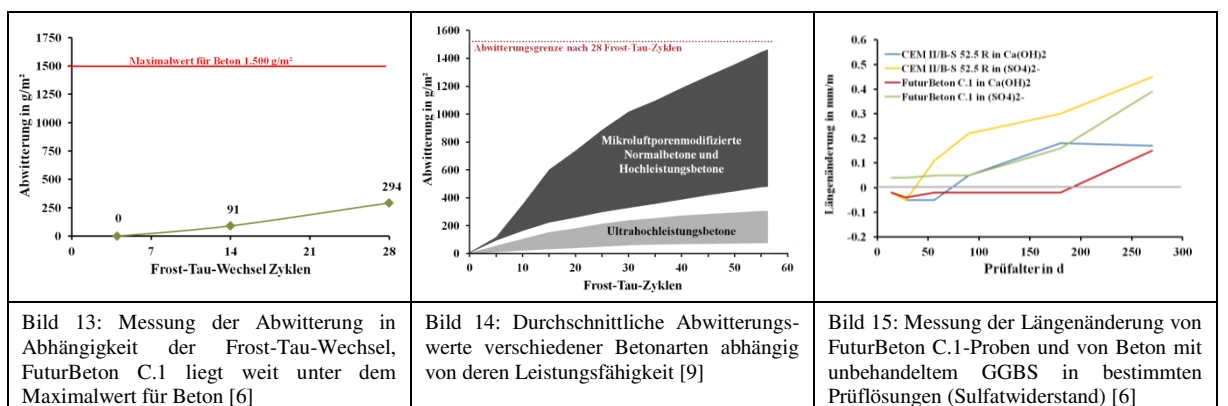
der mit FuturBeton C.1 hergestellten Bauteile möglich. Weiterhin wird deutlich, dass ausgehärteter FuturZement C.1 eine deutlich dichtere Struktur aufweist, als vergleichbare Premium-Portlandhüttenzemente (Bild 10).



Da es sich um einen neuen Baustoff handelt, werden belastbare Alterungsmessungen "am Bau" in den Folgejahren durch den BMBF-Partner Universität Siegen anhand der Brücke "Rosenthal" erst noch ermittelt. Allerdings sind besonders die dichte Packung von FuturBeton C.1 aufgrund der bimodalen Verteilung, sowie substanzielle Porenfeinung, wie auch die Reduktion des Gesamtporenvolumens (Porosität) der HKP-GGBS-Phase im 2-stelligen Prozentbereich (Bild 4), eindeutige Indikatoren für signifikanten Fortschritt und Verbesserung.



Diese positive Erwartung wird auch durch Laborversuche und -messungen gestützt. Verschiedene Proben wurden dazu untersucht und bei Betrachtung fallen zwei Phänomene auf. FuturBeton C.1-Proben, die 1 Jahr in Wasser gelagert und dann gebrochen wurden, zeigen, dass aufgrund der hohen Festigkeiten des ausgehärteten Bindemittels zuerst das Grobkorn (Steine) und erst dann die Matrix bricht (Bild 11), was anschaulich belegt, dass der Binder besser ist, als das zu bindende Material. Angefertigte Mörtelproben aus FuturZement C.1 (Bild 12) weisen ein hohe Oberflächengüte und Abformbarkeit des Bindemittels bei entsprechender Bearbeitung auf.



Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit, bei denen der Grad der Abwitterung in Abhängigkeit der Frost-Tau-Wechsel (Bild 13) gemessen wurde, sowie Messungen des Sulfatwiderstands (Bild 15) zeigen, dass FuturBeton C.1 eine hohe Dauerhaftigkeit bietet, besser als herkömmlicher Beton und besser als Beton in gleicher Zusammensetzung mit unbehandeltem GGBS. Mit diesen Werten ist FuturBeton C.1 im Bereich der Dauerhaftigkeit von Ultrahochleistungsbetonen einzuordnen (Bild 14).

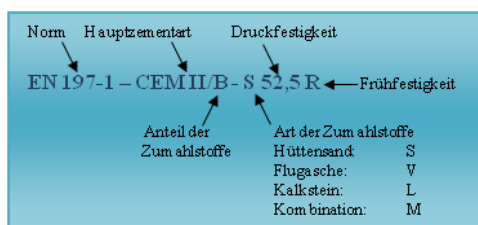
Aufgrund des relativ geringen Anteils von HKP-Material am Gesamtprodukt lassen sich technisch unproblematisch große Mengen darstellen und das gleichermaßen zu wirtschaftlich überzeugenden Konditionen. So bietet eine einzige Simoloyer® CM900-Anlage ausreichend Kapazität für eine Jahresproduktion von ca. 43.000 t FuturBeton C.1 bei dann gleichzeitiger Einsparung von ca. 850 t CO₂-Emissionen (Tab. 4) !

FuturBeton C.1 stellt dabei mit moderater Festigkeitssteigerung nur den Anfang einer Entwicklung dar, die bei allgemeiner Baustoffakzeptanz zu vielfach höheren Festigkeiten führen kann. So oder so kann man in Zukunft damit leichter und schneller und damit z. B. auch höher bauen, kann gigantische Mengen Baustoff wie auch CO₂-Emission einsparen was neben Kosten in der Tat auch Platz und Raum sparen hilft.

Klassifizierung von Zementen, Vergleichbarkeit

Um die Bedeutung und eine Kategorie für FuturZement C.1, bzw. FuturBeton C.1 heraus- bzw. festzustellen, müssen zunächst die Unterteilungen, Klassifizierungen und Eckdaten für Zemente und Betone in Deutschland definiert werden. Es werden fünf Hauptzementarten unterschieden, Portlandzement (CEM I), Portlandkompositzement (CEM II), Hochofenzement (CEM III), Puzzolanzement (CEM IV) und Kompositzement (CEM V) [10].

Zemente nach DIN EN 197-1 werden gekennzeichnet durch Angabe der Hauptzementart und der Normbezeichnung, des Kurzzeichens der Zementart, der Festigkeitsklasse 32,5 oder 42,5 oder 52,5 und der Anfangsfestigkeit: N (übliche Anfangsfestigkeit), R (hohe Anfangsfestigkeit) oder L (niedrige Anfangsfestigkeit, gilt nur für CEM III Zemente). Normalzemente mit niedriger Hydratationswärme erhalten zusätzlich die Kennzeichnung LH, Normalzemente mit hohem Sulfatwiderstand SR. Bei CEM I mit hohem Sulfatwiderstand ist zusätzlich der C₃A-Gehalt im Klinker anzugeben:



Die Festigkeitsklasse definiert sich durch Anfangsfestigkeit und die Normfestigkeit (Tab. 2).

Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit [MPa]			
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit	
	2 Tage	7 Tage	28 Tage	
32,5 L	-	≥12,0	≥32,5	≤52,5
32,5 N	-	≥16,0		
32,5 R	≥10,0	-		
45,5 L	-	≥16,0	≥42,5	≤62,5
45,5 N	≥10,0	-		
45,5 R	≥20,0	-		
52,5 L	≥10,0	-	≥52,5	-
52,5 N	≥20,0	-		
52,5 R	≥30,0	-		

Tab. 2: Festigkeitsklasse und Anfangsfestigkeit von Normzementen [10]

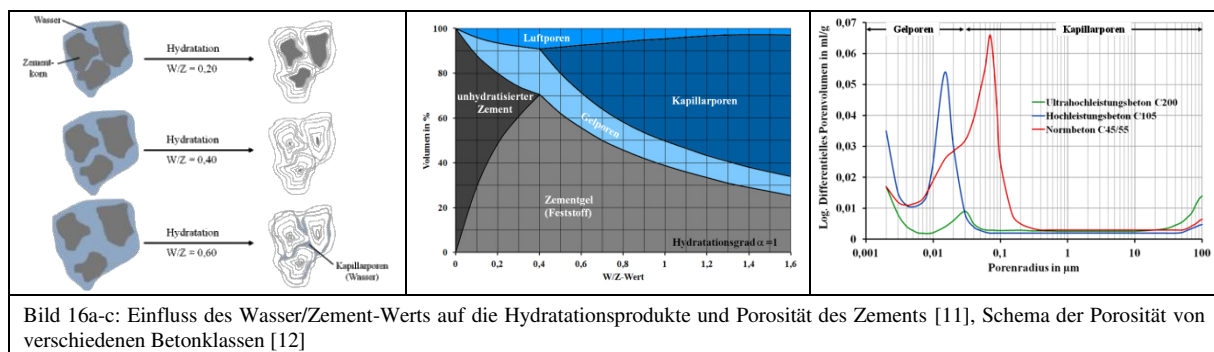
Zemente, die für Hochleistungsbetone und Ultrahochleistungsbetone verwendet werden sind bevorzugt schnellhärtende Zemente mit hoher Festigkeit, also 52,5 R-Zemente. FuturZement C.1 ist nach dieser Einteilung ein CEM II/B-S 52,5 R.

Betone werden klassifiziert auf Basis ihrer Druckfestigkeit (Tab. 3).

Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}^{1)}$ [MPa]	$f_{ck,cube}^{2)}$ [MPa]	Druckfestigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}^{1)}$ [MPa]	$f_{ck,cube}^{2)}$ [MPa]
C8/10	8	10	C45/55	45	55
C12/15	12	15	C50/60	50	60
C16/20	16	20	C55/67 ³⁾	55	67
C20/25	20	25	C60/75	60	75
C25/30	25	30	C70/85	70	85
C30/37	30	37	C80/95	80	95
C35/45	35	45	C90/105 ⁴⁾	90	105
C40/50	40	50	C100/115 ⁴⁾	100	115

Tab. 3: Druckfestigkeitsklasse für Normal- und Schwerbetone [10], ¹⁾charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern ($\varnothing$ 150 mm, L = 300 mm, 28 d, Wasserlagerung), ²⁾charakteristische Mindestdruckfestigkeit Würfel (L = 150 mm, 28 d, Wasserlagerung), ³⁾ab Druckfestigkeitsklasse C55/67: Hochfester Beton, ⁴⁾Druckfestigkeitsklassen C90/105 und C100/115: allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) oder Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erforderlich

FuturBeton C.1 kann klassifiziert werden als hochfester Hochleistungsbeton C100/115. Um Hochleistungsbetone herzustellen ist die Verwendung von Fließmitteln notwendig. Diese werden verwendet, um das Wasser-/Zement-Verhältnis (W/Z-Wert) zu verringern. Der W/Z-Wert bestimmt die Festigkeiten und Porosität von ausgehärteten Zementen bedingt durch den Hydrationsgrad und die Dispergierung. Für gewöhnlich haben Betone je nach Oberfläche, die benetzt werden muss, einen W/Z-Wert von 0,4-0,45. Damit wäre eine vollständige Hydratation gegeben. Würde man den Wert auf 0,6-0,7 erhöhen würden die Proben „bluten“, d. h. Wasser würde aufschwimmen, was die Festigkeit rapide herabsetzt und dafür sorgt, dass die Probe viele Poren ausbildet und Frostempfindlichkeit und Schwinden zunehmen (Bild 16).



Für Hochleistungsbetone wie FuturBeton C.1 wird der W/Z-Wert reduziert, da unreaktierter Klinker eine höhere Festigkeit aufweist, als dessen Reaktionsprodukte. Da bei geringerem Wert eine Verarbeitbarkeit und damit Gießfähigkeit nicht mehr gegeben sind, ist die Verwendung von Fließmitteln unabdingbar. Ohne solche wäre ein Hochleistungsbeton nicht zu verarbeiten, die Folge wäre eine zu erhöhende Wasserzugabe, was wie o. g. wiederum zu Herabsetzung der Festigkeit führt. Dabei spielen auch Reihenfolge des Mischens und Mischenergie eine deutliche Rolle, so wie das auch in den Workshops 2015 in Indien vs. 2016 in China nachgewiesen wurde (siehe nachfolgend).

Kosten/Nutzen, harte Fakten

Die Kostenkalkulation (Tab. 4) auf Basis einer Simoloyer[®] CM900-Anlage inkludierend Investition, Wartung, Arbeitskosten, Energie und Wasser per Stand Oktober 2012 in Deutschland (i. d. F. Energiekosten 0,10 €/kWh) bei einer Betriebszeit von 6.000 Stunden p. a. (20h/Tag an 300 Tagen) und einer Abschreibungszeit von 20 Jahren ergibt Prozesskosten von ca. 140,00 €/t HKP-GGBS. Als Mehrkosten des FuturBeton C.1 schlagen sich pro Tonne davon nur 5 % nieder was gerade einmal 7,00 € pro Tonne bedeutet.

Vergleichsweise kostet OPC-Beton bei einer durchschnittlichen Rohdichte von 2,4 kg/dm³ ca. 42,00 €/t. FuturBeton C.1 läge damit bei 49,00 €/t und somit nur 14 % teurer, wenn man voraussetzt, dass der Rohstoff GGBS etwa im gleichen Kostenrahmen wie die Rohstoffe für OPC liegen.

Eine Tonne FuturZement C.1 würde 42,00 € teurer und sich der Preis somit weit weniger als verdoppeln. Vergleiche mit kommerziell verfügbaren und durch Klassierung produzierten Feinstzementen die ähnliche Festigkeiten aber keine CO₂-Emissionseinsparung und vergleichsweise kein Potential zur weiteren Festigkeitssteigerung bieten, liefern jetzt bereits (quasi im Labormaßstab) wirtschaftliche Überlegenheit. Wenn man dann anhand der Zahlen CM100-CM400-CM900 (Tab. 4) eine weitere ggfls. mögliche Hochskalierung im Anlagenbau in Betracht zieht, mag man mutmaßen, was passieren wird.

CO₂-Einsparung in Zahlen und in geldwertem Vorteil

Mit einer einzigen CM900-Anlage würde man über die Laufzeit von 20 Jahren ca. 43.000 Tonnen HKP-GGBS herstellen können und dabei in der weiteren Zement/Beton-Verwendung (860.000 Tonnen FuturBeton C.1) gegenüber herkömmlichem OPC (ohne Einrechnung der Folgerung, dass man aufgrund höherer Festigkeit weniger Baustoff benötigen würde und aufgrund höherer Dauerhaftigkeit weniger bauen müsste) ca. 17.000 Tonnen CO₂-Emission einsparen (Tab. 4).

Simoloyer [®] Anlagengröße		CM20	CM100	CM400	CM900
Produktionsleistung	[kg/h]	8	40	160	360
Tageskapazität (20h)	[t]	0,16	0,8	3,2	7,2
Jahreskapazität (300 T)	[t]	48	240	960	2.160
Totalkapazität (20 J)	[t]	960	4.800	19.200	43.200
Energie pro Tonne	[kWh/t]	n. V.	347	320	300
CO₂-Einsparung	[t]	380	1.900	7.590	17.080
Prozesskosten (GGBS)	[€/t]	n. E.	432	200	140
Prozessmehrkosten FuturZement (GB30:70)	[€/t]	n. E.	130	60	42
Prozessmehrkosten FuturBeton (FZ1:6)	[€/t]	n. E.	22	10	7

Tab. 4: HKP-GGBS, Prozesskosten und CO₂-Einsparung inkludierend Investition, Wartung, Arbeitskosten, Energie und Wasser per Stand Oktober 2012 in Deutschland (i. d. F. Energiekosten 0,10 €/kWh), resultierende Prozessmehrkosten FuturZement und FuturBeton

Den Prozessgesamtkosten von ca. 140,00 €/t HKP-GGBS steht eine CO₂-Emissionseinsparung von jeweils ca. 395 kg CO₂ pro ersetzter Tonne OPC-Anteil im FuturZement C.1 gegenüber. Sollte man im ungünstigsten und unsinnigen Fall diese Technologie ausschließlich einführen wollen um CO₂ zu sparen und sämtliche Werkstoffvorteile und i. d. F. auch noch die Herstellkosten des ersetzten OPC völlig falscherweise außer Acht lassen, so würde man quasi eine Tonne eingespartes CO₂ mit 354,00 € bezahlen (Tab. 5).

Primärziel CO ₂ -Einsparung, Mehrkosten [7]		Auto Treibstoff	CM900 GGBS	Gesamtprozesskosten HKP-GGBS, CO ₂ -Einsparung als Nebeneffekt	
CO ₂ -Emission Heute	[g/km]	136	140	[€/t]	Gesamtprozesskosten
CO ₂ -Emission Basis (Ziel 2015)	[g/km]	130			
CO ₂ -Flottenziel	[g/km]	95	395	[kg/t]	CO ₂ -Einsparung pro ersetzter Tonne OPC-Anteil im FuturZement
CO ₂ Einsparung (-CE-)	[g/km]	35			
CE bei 12.500 km p. a. / 12 Jahre	[t/Fzg]	5,3	0 !!	[€/t]	Produktwertanteil FuturZement
Mehrkosten / Fahrzeug	[€]	3.600			
Mehrkosten CO₂-Einsparung	[€/t]	678	354	[€/t]	Gesamtkosten CO₂-Einsparung

Gesamter Wertanteil FuturZement schlicht ignoriert (Nebeneffekt); Automobil aus millionenfacher Fertigung verglichen mit einem einzelnen Simoloyer[®] CM900 aus Einzelfertigung; zusätzliche indirekte CO₂-Einsparung aufgrund weniger Materialeinsatz (höhere Festigkeit und Dauerhaftigkeit von FuturBeton) ebenfalls ignoriert.

Tab. 5: Gegenüberstellung CO₂-Emissionseinsparungskosten Automobil vs. Gesamtprozesskosten HKP-GGBS

Demgegenüber beziffert die aktuellste Studie (RWTH Aachen) für den Automobilsektor die Mehrkosten vor dem Kunden zum Erreichen des CO₂-Flottenziels von 95 g/km mit bis zu 3.600,00 €/Fahrzeug, ausgehend von einer Basis von 130 g/km (Ziel 2015; Ist-Stand ca. 136g/km). Bei einer Durchschnitts-Laufleistung von 12.500 km pro Jahr und ca. 12 Jahren Lebensdauer spart das pro Fahrzeug ca. 5,3 t CO₂ in Summe über die 12 Jahre. Damit ergäben sich 3.600,00 €/5,3t CO₂ und

somit 678,00 €/t [16]. Hier wird also für das gleiche Ergebnis ca. 2 x mehr investiert werden müssen und dabei würde hier nicht noch dann quasi kostenloser Hochleistungszement danebenstehen.

Da jede Gesellschaft nur einen bestimmten Teil ihrer Leistungsfähigkeit i. d. F. für die CO₂-Emissionseinsparung investieren kann, müsste die logische Schlussfolgerung lauten, dass man im Automobilsektor auf weitere CO₂-Einsparung verzichten und zunächst den OPC dieser Welt durch FuturZement C.1 ersetzen müsste. Wirtschaftlicher Ausgleich könnte dabei z. B. über Emissionshandel erfolgen !

Nationale und globale Bedeutung

Ausgehend von einem Richtwert des derzeitigen globalen Betonverbrauchs von etwa 8 Gt mit einem nationalen Anteil in Deutschland von etwa 250 Mt bzw. 3% ergibt sich bei vereinfachend vorausgesetzter "autarker" Betonproduktion in Deutschland durch Technologiewechsel zum FuturBeton C.1 sowie weiterer vereinfachender Voraussetzung ausschließlicher OPC-Verwendung ein Einsparpotential von national ca. 5 Mt und global annähernd 160 Mt CO₂-Emission (Tab. 6).

Massen und Potentiale, Deutschland und global p. a.		DE	Welt	Anteil DE
CO2-Emission total [13]-DE, [14]-Welt	[Mt]	850	30.000	2,9 %
Betonverbrauch		250	8.000	3,1 %
		absolut	relativ	
FuturZement C.1, CO2-Einsparung / Tonne Zement	[kg]	118,6	20 %	
FuturBeton C.1, CO2-Einsparung / Tonne Beton		19,8		
		DE	Welt	
CO2-Einsparpotential (durch FuturZement/Beton C.1)	[Mt]	4,95	158,4	
CO2-Einsparpotential (dito relativ)	[-]	0,6 %	0,5 %	
Tab. 6: Gegenüberstellung Betonverbrauch und CO2-Einsparpotential in Deutschland und der Welt				

Weiter ausgehend von einem Richtwert der gesamten durch die Menschheit verursachten CO₂-Emission von national ca. 850 Mt [13] und global ca. 30 Gt [14] ergibt sich ein Einsparpotential national von 0,6 % und global von 0,5 % !

Zur Erinnerung:

Das CO₂-Emissionseinsparpotential würde durch enorme Material- und in Folge z. B. auch durch Energieeinsparung (derzeit bis zu 50 % !!) weiter potenziert - und die Mehrkosten FuturBeton C.1 betragen nur etwa 7,00 € pro Tonne !

Markt und Marktreife

Potentielle Kunden für den neuen Baustoff / für die Innovation sind a) Zementhersteller für den technologischen Wandel, b) Betonhersteller die bei a) FuturZement C.1 als modernes Bindemittel zukaufen und ist c) die Bauwirtschaft, die mit FuturBeton C.1 eminent schneller, schlanker, höher, kostengünstiger, dauerhafter und zudem signifikant umweltfreundlicher bauen kann.

Die Marktreife von FuturZement/Beton ist zu 100 % gegeben. Technologisch hätte man andernfalls den BMBF-Demonstrator als öffentliche Brücke gar nicht bauen dürfen. Ökonomisch lässt sich die Wirtschaftlichkeit bereits im Labormaßstab (eine CM900-Anlage stellt für Verhältnisse der Bauindustrie einen solchen dar) nachweisen und ökologisch haben wir es hier wohl mit der besten Möglichkeit zu tun, massenhaft und wirtschaftlich CO₂ einzusparen.

Es ist daher jetzt entscheidend, den Markt von dieser Marktreife zu überzeugen. Daher werden Demonstratoren in die Welt gesetzt werden müssen, damit der Markt greift. Einiges ist bereits erreicht, weitere markante und öffentlichkeitswirksame Demonstrationsbauwerke werden gesucht !

Realisierung, Strategie & Planung

Bereits realisiert wurde per 2012 eine Brücke als Demonstrator des eingangs erwähnten BMBF-Projektes [6] in Kooperation mit der Kreisstadt Olpe und Strassen.NRW (Bild 1). Hierbei ist klarzustellen, dass die Bauteildicke nicht die Möglichkeiten des Werkstoffs sondern die Verantwortung einer Behörde widerspiegelt und das bedeutet i. d. F., dass die Ausführung geometrisch genau-so zu erfolgen hatte, als wenn es sich um konventionellen Beton herkömmlicher Festigkeit handeln würde. Es handelt sich hier daher zunächst lediglich um Austausch des

Bindemittels ohne Optimierung der Bauwerkskonstruktion. Immerhin verbleiben die Vorteile "Dauerhaftigkeit und CO2-Einsparung" und der Anfang ist damit aber gemacht.



Bild 17a-c: Nanotech Europe 2013 Award hergestellt aus Zentallium®-Stäben eingelassen in FuturBeton C.1 - beides Zoz-Werkstoffe

In 2013, zwar ohne Demonstrationscharakter aber doch mit einer hervorragenden Publikumswirkung wurde der "Nanotech Europe 2013 Award" aus einer Reihe von 17 Stäben aus Zentallium® (Zoz Superleichtbauwerkstoff) hergestellt, die in FuturBeton C.1 eingebettet sind (Bild 17). Die Preis-Skulptur, entworfen, hergestellt und gestiftet von Zoz wurde am 19.06.2013 in Dublin verliehen.



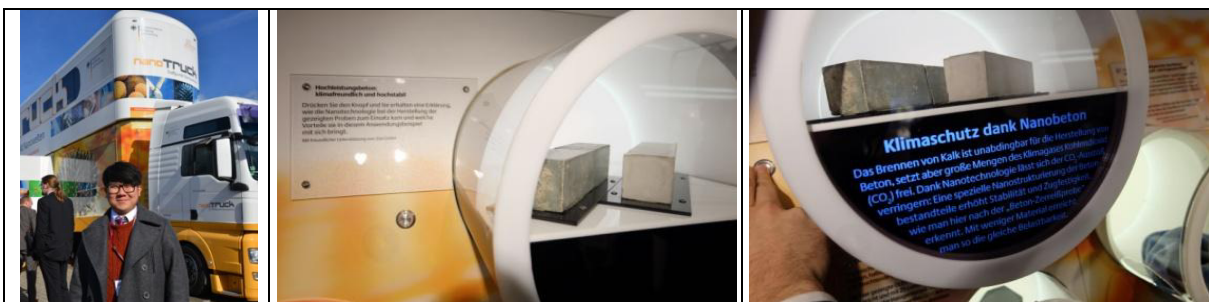
Bild 18a-d: Villa ZCS in Siegen um 1900, dann im Übernahmezustand 2010: Türmchen, Balkon und Frontbalustrade fehlen. Auch mit Hilfe von FuturBeton (Balustrade, Balkon) & Zentallium® (goldene Turmkrone) kommt das Gebäude in 2015 dem Glanz aus alten Tagen wieder nahe. Im Keller ist bereits eine Brennstoffzelle zur Strom- und Wärmezeugung in Betrieb.

Zwei Tage später, am 21.06.2013 wurde am Zoz-Standort in Siegen die Montage eines 6 x 6 Meter großen und ca. 12 Tonnen schweren Ziergiebels / einer Dachbalustrade aus FuturBeton C.1 an der Fassade der "Villa ZCS" (Bild 18) unmittelbar an der Hauptverkehrsstraße im Zentrum der Kreisstadt durchgeführt. Dazu wurden im April 2013 bei Zoz weitere 950 kg HKP-GGBS abermals quasi unter Laborbedingungen produziert, die im Mai bei Dyckerhoff zu ca. 3 t FuturZement C.1 weiterverarbeitet wurden. Der daraus hergestellte FuturBeton C.1 formte dann den Ziergiebel, der weithin sichtbar beste Publikumswirkung verspricht (Bild 18). Insofern handelt es sich hierbei um den zweiten Demonstrator der jetzt allerdings in Eigenregie (Zoz und Dyckerhoff) her- und aufgestellt wurde.

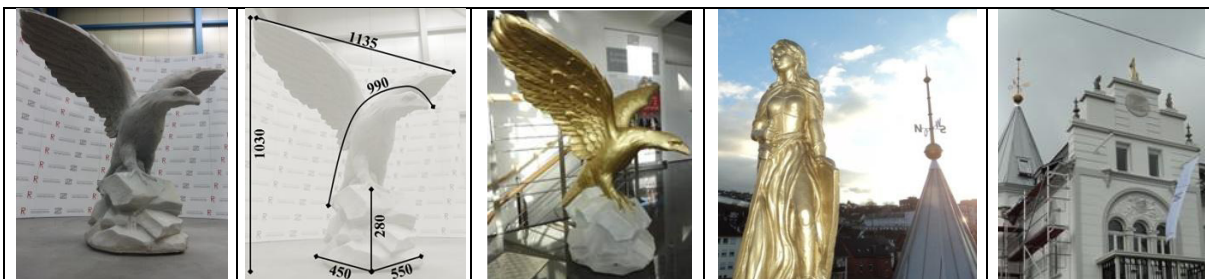
Ebenfalls im Stadtzentrum von Siegen standen und stehen in den Jahren 2013 und 2014 insgesamt 3 Brücken zur Erneuerung an. Das sind die Bahnhofstraßenbrücke, die Oberstadt- und die Apollobrücke (Bild 20: Vordergrund, Bildmitte res. Hintergrund). Anfangs bemühten sich Zoz und Dyckerhoff gemeinsam darum, dass FuturBeton C.1 hier Verwendung finden würde. Tatsächlich gelang es Zoz, die notwendige Zustimmung der Behörden in Siegen für die Errichtung der Apollobrücke aus FuturBeton zu erlangen und konnte zeitgleich auch die beauftragte Bauunternehmung überzeugen - und genau in diesem Moment ist Dyckerhoff quasi abgesprungen. Heute sind die meisten Mitglieder der seinerzeit beteiligten Dyckerhoff-Projektgruppe, wie auch der Direktor des Wiesbadener Forschungsinstitutes nicht mehr bei dem vormalig traditionsreichen Deutschen Unternehmen beschäftigt, welches Jahre zuvor von der Italienischen Buzzi Zement Gruppe übernommen wurde.



Im Februar 2014 wurden Normprismen (siehe auch Bild 11) aus FuturBeton C.1, Stäbe aus Zentallium® (Zoz super-Leichtbauwerkstoff) sowie ein H2Tank2Go® (Zoz H2-Feststoffspeichertank) in die "Nano-Demonstrationen" des BMBF-nanoTruck verbaut (Bild 21). Die Aufnahme in diese "rollende Ausstellung" des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) liefert zwar weder wirtschaftlichen Einfluss noch realen Demonstrationscharakter, zeigt aber die öffentliche Wertschätzung gegenüber diesen drei Innovationen von Zoz.



Im November 2014 wurde der erste Zoz-FuturBeton-Adler (Bild 22) hergestellt. Nachdem Dyckerhoff unerwartet die Bühne verlassen hatte, musste Zoz die gesamte früher eingebrachte Dyckerhoff-Expertise selber erlernen. Das inkludiert, wie man superaktivierten GGBS mit OPC geeignet und unter hoher Intensität zu FuturZement C.1 mischt und das beinhaltet auch, wie man mittels FuturZement C.1 geeignet und mit den richtigen Zuschlagstoffen FuturBeton herstellt. Neben diesen technischen Notwendigkeiten, die sich quasi auf die gesamte Zement/Betonchemie erstrecken, liegt und lag die größte Herausforderung und insofern die wohl schwierigste Hürde jedoch in der Erlangung einer generellen Material/Baustoffzulassung.



Der FuturBeton-Adler wird seither wöchentlich hergestellt um kontinuierlich das Betonbaustoff-bezogene interne Wissen weiterzuführen und generierte Erfahrung auszubauen. Diese Demonstrationsskulpturen wurden dazu ausgewählt, da Zoz für genau solche einen Eigenbedarf für die Wiederherstellung eigener Denkmäler hatte (Bild 23). Zudem erfordert die Vermarktung solcher "Gartenfiguren" keine besonderen Materialzulassungen, sehr wohl stellen diese aber hohe Anforderungen an eine hochwertige Oberfläche, die Wind und Wetter ausgesetzt ist und auch

problemlos zu reinigen sein soll. Und letztlich lassen sich im Bereich "nanostrukturierter Produkte" kaum andere Beispiele finden, per denen man einen nicht-subventionierten Verkaufspreis von netto EUR 4,30/kg (Typ Natur) res. EUR 6,60/kg (Typ vergoldet) finden kann.

Vorgenannte Zahlen ergeben sich aus dem Stückpreis von EUR 650 bzw. EUR 1.000 für die Skulpturen mit den Hauptabmessungen L/B/H 990 x 1.135 x 1.030 mm bei einem Gewicht von jeweils 152 kg. Bei einer Abbindezeit von < 15 h wird nach 16 h ausgeschalt mit einer dann bereits erreichten hohen Frühfestigkeit von > 25 MPa und einer CO₂-Emissionseinsparung von 3 kg im Vergleich zu OPCC (Portlandzement-basierender Beton). Der bisher weitgehend manuelle Verarbeitungsprozess dauert insgesamt ca. 1 h, wovon 30 min auf Mischen und Anrühren entfallen, 20 min zum Gießen und 10 min zum Rütteln benötigt werden.



FuturZement C.1 kann in vielen anderen Bereichen verwendet werden, ein weiterer sind Pflastersteine. Solche können in verschiedener Zusammensetzung gegossen und bereits am nächsten Tag ausgeschalt werden. Der Wahl von Zusatzmitteln und z. B. der Einfärbung durch Pigmente sind dabei keine Grenzen gesetzt. So wurden Anfang 2016 mit kommerziell erhältlichen Gussformen verschiedene Pflastersteine mit hoher Abformgenauigkeit gegossen (Bild 24). Aufgrund dieser Abformgenauigkeit sind auch filigrane Gussarbeiten (Logos etc.) möglich, was anhand der Oberflächenstruktur (Bild 25) der gewählten Gecko-Form besonders deutlich wird !



Bereits im April 2014 wurde Zoz ein Mitglied der Innovationsarena der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Hier war leider zu lernen, bzw. zur Kenntnis zu nehmen, dass der singuläre Innovationszyklus im Deutschen Straßenbau mit 10-15 Jahren ! zu veranschlagen ist. Wenn man bedenkt, dass das Umfeld, dass gleichbedeutend der umgebende Markt die Höhe der Innovationsbarrieren bestimmt, dann ist das nicht mal überraschend. Je moderner und je entwickelter eine Gesellschaft ist, desto höher stellen sich diese Barrieren in Form von Regularien und Standards und auch durch "Verfügbarkeiten nahe an der Sättigung" dar.

Zudem stellt sich die Frage, ob am Ende die Zementindustrie oder möglicherweise die Stahlindustrie der Treiber für hier behandelte Innovation sein wird. Die Zementindustrie würde über einen weit besseren Baustoff verfügen, der in einem volumenmäßig geringeren Materialverbrauch / Materialgeschäft resultieren würde. Im Gegensatz dazu würde die Stahlindustrie die Umwandlung eines heutigen Abfall- oder zumindest beinahe-Abfallstoffes (GGBS) in ein vergleichsweise hochpreisiges Produkt in neuem Geschäftsfeld erleben, was in Bezug auf Wertschöpfung erheblich attraktiver erscheint.

Ferner muss auch die Frage gestattet sein, ob die Bauindustrie ein natürliches Interesse hat, die Dauerhaftigkeit von Beton zu vervielfachen oder nicht.

Insofern könnten auch hier militärische Anwendungen (Flugfelder, Schutzbau) aufgrund der überlebenswichtigen Abhängigkeit von besten Eigenschaften (hier Festigkeit und Zeit - Frühfestigkeit) eine wichtige Rolle spielen. Gleiches gilt auch für die Politik, da die meisten Straßen, Brücken und Dämme sowie unzählige Bauten Unterfangen der öffentlichen Hand darstellen und sowohl Investition wie auch Unterhaltung eine erdrückende Position im Staatshaushalt darstellen.



Bei alledem ist es wichtig zu erkennen, dass es in Deutschland unter genau den gegebenen Rahmenbedingungen nachgewiesen wurde, dass es möglich ist, eine öffentliche Brücke zu errichten. Für ein solches Unterfangen oder derzeit jedes weitere Bauvorhaben musste, bzw. muss allerdings innerhalb der Genehmigungsbehörden eine Abweichung res. eine Ausnutzung der Bandbreite zur Auslegung von Vorschriften erfolgen, was in der Tat nicht nur nötig sondern offensichtlich auch zulässig und möglich ist (siehe Brücke Rosenthal). Dazu wiederum waren für dieses und sind derzeit für jedes weitere Projekt / Bauvorhaben / Demonstrator aufwändige Lobbyarbeit mit viel Klinkenputzen notwendig, bis ein Marktdurchbruch, möglicherweise auch in einem anderen Land, erreicht ist.

Suche nach Marktdurchbruch außerhalb Deutschlands und der EU: Indien und China

Auf der Suche nach Markteinstieg ist zu realisieren, dass sogenannte Innovationshemmnisse dann besonders hoch sind, wenn die Gesellschaft/der Markt der jeweiligen Hemisphäre besonders hoch entwickelt ist. Insbesondere Zulassungen für neue Werkstoffe in der Bundesrepublik Deutschland wie auch in Europa stellen sich auch nach jahrelangen Bemühungen als extrem schwierig, zeitaufwändig und/oder kostenintensiv dar.



Daher wurde im Dezember 2015 in Indien und im Mai 2016 in China jeweils ein Workshop veranstaltet, in denen quasi unter den Augen der Teilnehmer von indischer, res. chinesischer Zement- und Bauindustrie sowie Vertretern relevanter Behörden FuturZement | FuturBeton online/onsite vorgeführt wurde. Am Tag 1 wurde dazu FuturBeton hergestellt und in ASTM/DIN-Testwürfel gegossen, welche dann am Tag 2 per Druckfestigkeitsprüfung "zerstört" wurden (Bild 28, Bild 29).



Bild 27a-c: komplett falsch: manuelles Anmischen kann und wird nicht zu repräsentativen Ergebnissen oder verbesserten Eigenschaften von FuturBeton führen

Dabei waren die Ergebnisse in Indien desolat, da hier eine angemessene Durchmischung von FuturZement C.1 und Zuschlagstoffen zu FuturBeton C.1 nicht gewährleistet werden konnte. Tatsächlich und leider wurde in Indien versucht, FuturBeton manuell, d. h. ohne jedes mechanische Mischaggregat herzustellen (Bild 27). Das führt zu Inhomogenitäten innerhalb der Zementsteinmatrix und zu einem erhöhten Wasserbedarf, um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu erhalten. Ein erhöhter Wasserbedarf erhöht aber, wie oben bereits erwähnt, ebenfalls die Porosität und setzt die Festigkeit herab (Bild 28).



Bild 28a-c: Beton in Prüfformen gegossen, manuell gefertigte Testkörper und Druckfestigkeitsprüfvorrichtung, desolaten Festigkeiten aufgrund von Inhomogenitäten und der fehlenden Wirkung des Fließmittels nach Handvermischung des Betons

Nach dem Desaster in Indien im Dezember 2015 wurde Anfang 2016 in Deutschland der manuelle Mischprozess aus Indien genau nachgestellt und vergleichend der Einfluss des geforderten hohen Durchmischungsgrades untersucht. Das Ergebnis bestätigte selbstverständlich die sichere Erwartung, dass FuturZement nur dann hohe Leistung bringen kann, wenn dieser im Beton homogen verteilt ist.

Stand der Technik 2016-05 in China neu definiert

Mit den Lehren aus Indien in China angetreten, waren die Ergebnisse dort bei genauer Befolgung der Prozessanleitung überragend (Bild 29):

Frühfestigkeit 45-49 MPa nach 20h, Endfestigkeit 140-145 MPa

und haben den Stand der Technik neu definiert. Die Endfestigkeit wurde dabei anhand von Simultantests in China und Deutschland ermittelt. Zoz hatte dazu zwei Standard-Testwürfel nach China gebracht, die zuvor in Deutschland angefertigt und dann in China geprüft wurden. Genau zeitgleich (zum Workshop in Changzhou) wurden in Deutschland aus exakt der gleichen Herstellserie weitere Quader bei der Firma Runkel in Siegen getestet und die Ergebnisse quasi online übermittelt (09:00 Uhr in Siegen = 15:00 Uhr in Changzhou). Dabei ergaben sich gleichlautend Endfestigkeiten von 140-145 MPa !



Bild 29a-c: Standard-Testwürfel vor und nach dem Ausschalen (linkes Bild), Testapparatur in Changzhou (Mitte), Videodokumentation der Versuche (rechtes Bild). Auf dem Stapel Testquader ist noch die Jutetasche einer Siegener Firma zu erkennen, per der Zoz zwei Betonklötze im Handgepäck nach China gebracht hatte.

Damit liegt FuturBeton jetzt nicht nur in der Frühfestigkeit, sondern auch in der Endfestigkeit, per 2013 mit 110-120 MPa gestartet und jetzt bei ca. 140 MPa deutlich über allen kommerziell verfügbaren hochfesten Betonen - und das zu heute unschlagbarer Wirtschaftlichkeit, da sich an der Herstellmethode und insofern an den Prozesskosten nichts verändert hat (Bild 30).

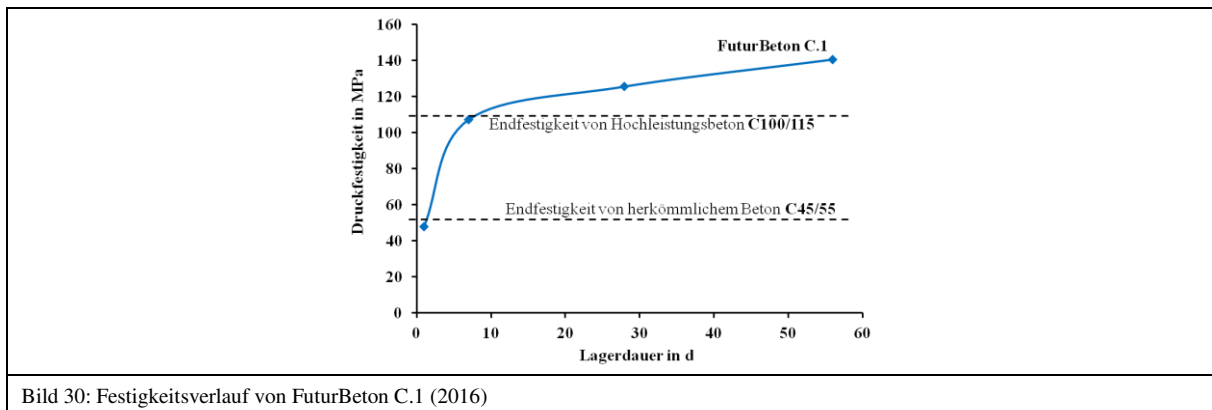


Bild 30: Festigkeitsverlauf von FuturBeton C.1 (2016)

Bild 30 zeigt dazu den Festigkeitsverlauf von FuturBeton per 2016-05 im Vergleich zu den Endfestigkeiten kommerzieller Betone.

Luftreinigung durch Beschichtung

Mit Unterstützung der tschechischen Firma Advanced Materials-JTJ, s.r.o. und dem Institut für Physikalische Chemie der tschechischen Republik (IPC) wurden Tests nach CEN-Vorgaben an FuturZement C.1 Leimproben durchgeführt, die mit Protectam FN2® Beschichtungen für Luftreinigungszwecke beschichtet wurden. Dazu wurde der Prozess des NO_x-Abbaus aus der Raumluft untersucht. (Bild 31 und Bild 32).



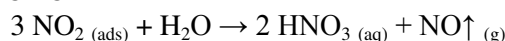
Bild 31a-b: Beschichtete FuturZement C.1 Leimproben, beschichtet mittels verschiedener Techniken, D: beschichtet mit weißer silikatischer Farbe, 2 Tage trocknen 3 Schichten durch Aufsprühen; E: Beschichtung mit 3 Schichten durch Spitzpistole

Bild 32: NO, NO₂, NO_x Konzentrationen (der Beginn der Kurven ist der Moment der Belichtung mit UV Strahlung)

NO_x ist eine allgemeine Bezeichnung für Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid (NO und NO₂). Sie entstehen z.B. während des Verbrennungsprozesses, speziell bei hohen Temperaturen. NO und NO₂

Oxidation findet unter Normalbedingungen nicht augenblicklich statt, allerdings oxidieren alle NO-Moleküle in der Luft zu NO₂ in wenigen Stunden. In Gebieten mit hohem Anteil von Kraftfahrzeugverkehr, wie in Großstädten (München, Stuttgart), kann der Anteil der NO_x-Luftverschmutzung in der Atmosphäre signifikant hoch sein. NO₂-Gas verursacht Smog und sauren Regen und ist außerdem ein zentraler Faktor für die Bildung von troposphärischem Ozon. Es wird klassifiziert als extrem gefährliche Substanz, welche für Asthmakranke gesundheitsschädigend sein kann und eine hohe Konzentration erhöht das Risiko für Herzkrankungen.

Die Verminderung der NO₂-Konzentration kann durch Photokatalyse auf einem photokatalytisch aktiven Untergrund erreicht werden. Während des photokatalytischen Prozess wird Stickstoffdioxid auf der Oberfläche adsorbiert und sukzessiv zu Salpetersäure oxidiert, die in Gegenwart von Alkalimetallionen oder in alkalischen Böden zu verschiedenen Nitraten neutralisiert wird durch mehrere Wasch- oder Lösevorgänge.



Die Untersuchungen zeigen, dass eine photokatalytische Oxidation durch Protectam FN2[®] Beschichtungen auf FuturZement C.1 eine effektive Methode zum Abbau von NO_x auf verschmutzter Luft ist. Die Experimente zeigen, dass in einem Gleichgewichtszustand und unter simulierten Realbedingungen die Protectam FN2[®] Beschichtungen in der Lage sind, die Konzentration der Stickstoffdioxide in der Luft um 20-50% zu verringern im Vergleich zum Ausgangszustand. Die höchste Effizienz zeigte hierbei Probe E, die zunächst gewaschen und anschließend mit einer HLVP Spritzpistole beschichtet wurde (3 Schichten Protectam FN2[®] mit ~25-30µm Dicke) (Tab. 7).

Start-Konzentration NO ₂ /Luft 0,1 ppm vergleichbar mit 190 µg/m ³				
Norm		Vorschlag der CEN		
Probe		A	D	E
NO ₂ - Abbau bei Beginn	[%]	18	25	40
NO ₂ - Abbau im Gleichgewicht	[%]	12	20	30

Tab. 7: NO-Abbau bei verschiedenen Proben

Dieses führt zu der Schlussfolgerung, dass die Kombination von FuturZement C.1-basierten Bauteilen mit der entsprechenden photokatalytischen Beschichtung Protectam FN2[®] bei richtiger Anwendung hervorragend verwendet werden kann, um die Menge an Stickstoffoxiden, sowie andere leicht flüchtige Komponenten (volatile organic compounds, VOC) in der Luft zu reduzieren.

Einbindung FuturZement in ein Zementwerk

Im Zusammenhang mit Gesprächen und Verhandlungen mit der Zementindustrie kommt immer wieder die Frage auf, ob der FuturZement-Prozess in den konventionellen Zementherstellungsablauf eingebunden werden kann. Tatsächlich ist solche Einbindung denkbar einfach, da der superaktivierte GGBS quasi per adaptierter Simoloyer[®]-Einheit in den kommerziellen Fertigungsprozess eines Zementwerkes injiziert werden kann um dann mittels der vorhandenen Technologie am Ende des Zement-Herstellungsprozesses Futur-Hochleistungszement zu liefern.

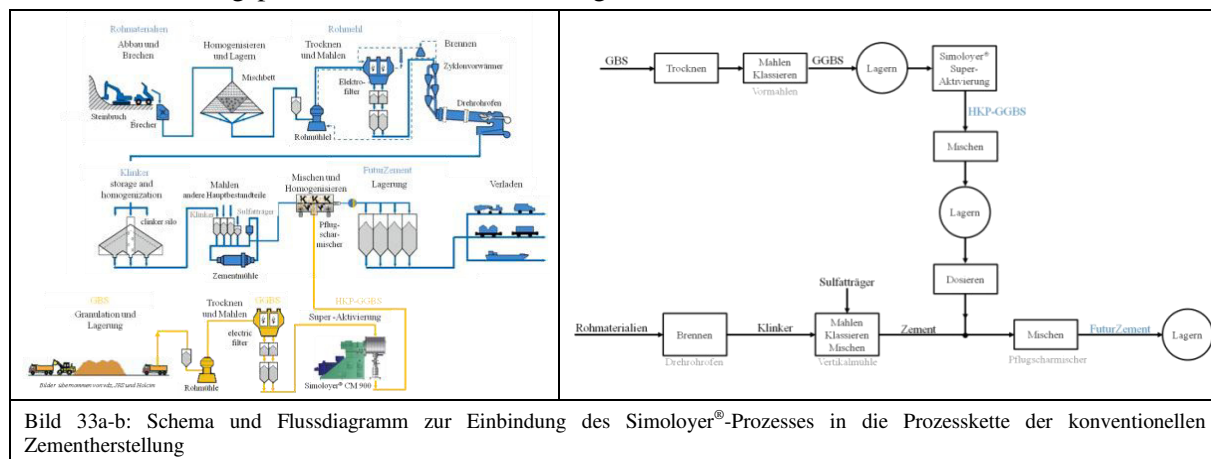
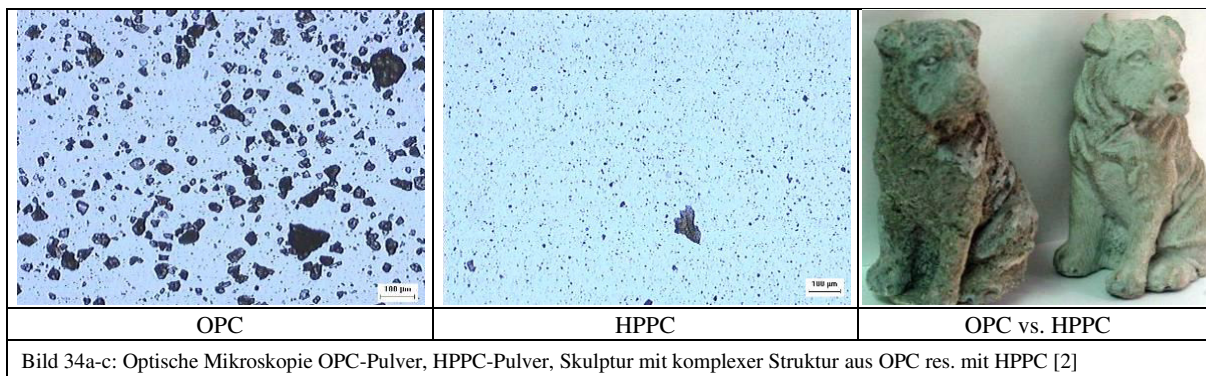


Bild 33 veranschaulicht die Erweiterung eines Zementwerkes, um FuturZement herzustellen.

Was wir anbieten

Zoz ist weder Zement- noch Betonhersteller und soll, kann und will dazu auch nicht werden. Alle vorgenannten Aktivitäten zielen explizit darauf ab, die entsprechende Technologie liefern zu können. Auf dem Weg dorthin ist es sicher vorstellbar und auch bereits praktiziert, Kleinmengen FuturZement C.1 z. B. bis 10 t anzubieten. Nach dem Verlust des kooperierenden Zementpartners ist Zoz seit 2015 in der Lage, FuturZement C.1 komplett selbst herzustellen wobei Bauvorhaben mit z. B. 50 t FuturBeton binnen 14 Tagen bedient werden können. Das gilt vorgenannt für FuturZement auf Basis von HKP-aktiviertem Hüttensand wie auch für superfeinen aktivierten OPC (Definition dann HPPC) als Mischungskomponenten.



Vorteile für die Bauwirtschaft, FuturZement vs. HPPC

Der neue Baustoff FuturZement/Beton bietet vielfach höhere Festigkeit und das bedeutet in den allermeisten Fällen weniger Materialeinsatz für gleiches Ergebnis und somit weniger Materialkosten (Kostenvorteil KV1). Weniger Material bedeutet weniger Gewicht und somit kann man auch leichter und z. B. auch höher bzw. schlanker bauen. Wolkenkratzer, die heute durchgehend ein Grundgerüst aus Stahl besitzen könnten in Zukunft in wesentlich kostengünstigerem Beton ausgeführt werden. In manchen Fällen kann Stahl ersetzt werden, in manchen weniger Stahl benötigt werden (Kostenvorteil KV2).

Kostenvorteil		CO2 Emission einsparungsrelevant	Produktrelevanz FuturBeton C.1	Produktrelevanz HPPC
KV1	höhere Festigkeit > weniger Material	✓	✓	✓
KV2	höhere Festigkeit > Stahl ersetzen	✓	✓	✓
KV3	höhere Frühfestigkeit > schneller bauen	-indirekt-	✓	✓
KV4	höhere Dauerhaftigkeit > weniger Material	✓	✓	✓
KV5	höhere Dauerhaftigkeit > weniger oft bauen	✓	✓	✓
KV6	Bessere Oberfläche	-gering-	✓	✓
KV7	CO2-Einsparung im Produktionslauf	✓	enorm	✗

Tab. 8: Vorteile FuturBeton C.1 und HPPC, CO2-Emissionseinsparungsrelevanz

Der neue Baustoff FuturZement/Beton bietet eine extrem hohe Frühfestigkeit die am ersten Tag bereits der Endfestigkeit von herkömmlichem Beton (nach 28 Tagen) gleicht. Damit kann man in Zukunft wesentlich schneller bauen. Eingesparte Bauzeit bedeutet eingesparte Baukosten (Kapitalbindung vor Nutzung) und somit kann man nochmals kostengünstiger bauen (KV3).

Der neue Baustoff FuturZement/Beton bietet eine erheblich dichtere Packung was bedeutet, dass Wasser/Feuchtigkeit quasi nicht mehr bzw. mindestens weit weniger eindringen kann was eine erhebliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit zur Folge hat. Dadurch lässt sich in statisch zu berechnenden Betonbauwerken abermals Material einsparen und somit kann man nicht nur nachhaltiger sondern auch nochmals leichter, höher und jetzt zum vierten Mal kostengünstiger bauen (KV4). Nachhaltiger bedeutet i. d. F., dass man über die Zeit bei gleichem Nutzen weniger bauen muss was insofern zum vierten Mal kostengünstiger bauen bedeutet (KV5). FuturBeton erreicht deutlich bessere Oberflächen was je nach Anwendungsfall Kostenvorteile von marginal bis gewaltig zur Folge haben kann (KV6).

Der neue Baustoff FuturZement/Beton bietet in der Herstellung gegenüber herkömmlichem Beton eine in Summe gigantische CO₂-Einsparung und neben der Sorge und aufgrund der Sorge um unsere Umwelt lässt sich solche Einsparung bereits heute in Cent und Euro gegenrechnen. Damit kann man daher verantwortungsvoller und zum fünften Mal wirtschaftlicher bauen (KV7).

Und das alles zu Mehrkosten von derzeit etwa 7,00 € pro Tonne FuturBeton.

Insbesondere für HPPC, der üblicherweise ebenfalls als Fraktion mit OPC gemischt wird gilt, dass komplexere, und feinere hochfeste Strukturen dargestellt werden können (Bild 34, auch Bild 23 und Bild 24). Damit kann man z. B. qualitativ besseren Sichtbeton und leichtere Fassadenbauteile sowie noch leichtere Leichtbetonbausteine mit noch besseren Wärmedämmwerten herstellen.

Land	CO ₂ Emission ist teuer	bedeutende Stahlindustrie, GGBS als Abfallprodukt verfügbar	Die richtige Antwort !
A	✓	✓	FuturBeton C.1
B	✓	✗	HPPC
C	✗	✓	HPPC/FuturBeton C.1
D	✗	✗	HPPC

Tab. 9: FuturBeton C.1 und/oder HPPC, wo was zu tun ist

In Ländern, in denen CO₂-Emission viel Geld kostet und in denen Stahlindustrie und somit GGBS als Abfallprodukt in Megamassen anfällt, ist FuturBeton die richtige Antwort. In Ländern, in denen mindestens eine der beiden Voraussetzungen nicht gegeben ist, wird HPPC den Vorrang erhalten. Eine enorme CO₂-Einsparung wird dabei aber trotzdem generiert, da die o. g. Kostenvorteile KV1-KV5 gleichermaßen für HPPC zutreffen und davon KV1-2 und KV4-5 direkt CO₂-relevant sind.

CO₂-Emissionseinsparung wird immer gewinnen !

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Unterstützung und wir danken allen Projektpartnern FuturZement und ebenso allen Kooperationspartnern aus vorherigen und laufenden Gemeinschaftsarbeiten ohne deren Beitrag auch diese Arbeit nicht hätte zustande kommen können. Insbesondere und in Namen sind das:

Dr. Carsten Geisenhanslüke, Hr. Wilhelm Nolte, Fr. Miriam Ringwald und Dr. Josef Strunge (Dyckerhoff AG), Fr. Katrin Schumacher, Prof. Dr. Reinhard Trettin und Fr. Birgit Weitzel (Universität Siegen), Hr. Frank Siedenstien (Runkel Fertigteilebau GmbH), Dr. Albert Herrmann, Hr. Thomas Höppner und Fr. Birgit Mohrhardt (Fuchs Lubritech GmbH), Dr. Sebastian Diaz de la Torre und Dr. David Jaramillo Vigueras (CIITEC-IPN), Hr. Bernd Knaebel, Hr. Josef Zeppenfeld und Hr. Hans Venc (Tiefbauamt der Stadt Olpe), Hr. Ralf Rombach und Hr. Manfred Funk (Straßen.NRW), Dr. Michael Peters, Hr. Georg Don-Preisendanz und Hr. Ludger Stahl (ThyssenKrupp AG), Dr. Ravula Vijay, Dr. Tata Narasinga Rao, Dr. Gade Padmanabham, Dr. Govindan Sundararajan (ARCI), Dr. Pasala Sarah, Dr. Hari Shankar Jain (Vardhaman), Hr. Thorsten Lind, Hr. Homer Chu, Dr. Xiang-Qian Zhou (GIC), Hr. Xiaofan Xie (CMEA).

Quellenverzeichnis

- [1] H. Zoz, H. U. Benz, G. Schäfer, M. Dannehl, J. Krüll, F. Kaup, H. Ren, and D. Jaramillo V.: High Kinetic Processing of Enamel, p. I-a/b, INTERCERAM International Ceramic Review, Vol. 50 (2001) [5] pp 388-395 & [6] pp 470-477
- [2] H. Zoz, D. Jaramillo V., Z. Tian, B. Trindade, H. Ren, O. Chimal-V. and S. Diaz de la Torre: High Performance Cements and Advanced Ordinary Portland Cement Manufacturing by HEM-Refinement and Activation, ZKG International vol. 57 (2004) no.1, pp. 60-70
- [3] W. Nolte, Dyckerhoff AG: High Performance Cement and application, OZ-10, 3rd German-Japanese Symposium on Nanostructures (2010), Wenden, Germany, proceedings vol. 3 p-no. V05
- [4] J. C. Arteaga-Arcos, O. A. Chimal-Valencia, D. J. Delgado Hernández H. T. Yee-Madeira and S. Diaz de la Torre: High Energy Ball Mill Parameters used to obtain Ultra-Fine Portland Cement at laboratory level, ACI Materials Journal, 108-M39, pp. 371-377 [July/August 2011]

- [5] Ma. T. Fuentes-Romero, Doctor Thesis, 2013. CIITEC-IPN, Mexico
- [6] BMBF Forschungsprojekt "FuturZement", Projekt-Nr. 03X0068A (2009-2012)
- [7] BMBF Forschungsprojekt FuturZement, Proj.-Nr. 03X0068A, Abschlussbericht [2013, UV Universität Siegen]
- [8] Smolczyk, H.G.: Slag structure and Identification of slag; Proceedings of the 7th ICCS, Paris, Vol. 1 (1980) pp 1-17
- [9] www.uni-kassel.de/fb14/baustoffkunde/gaertnerplatzbruecke/images/UHPC/frost_tau_zyk_diagr.gif
- [10] Betontechnische Daten, Heidelbergcement, 2014
- [11] Zement-Taschenbuch, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Düsseldorf, Verlag Bau+Technik, 2002, ISBN 3-7640-427
- [12] Ultra-Hochfester Beton - Planung und Bau der ersten Brücke mit UHPC in Europa; Michael, Schmidt (Hrsg.); Fehling, Ekkehard (Hrsg.), Kassel University Press, 2003, ISBN: 3-89958-518-6
- [13] Veröffentlichung Umweltbundesamt vom 26.02.2013
- [14] The Cement Sustainability Initiative Progress Report [2005]
- [15] www.cemex.de; Preisliste 2016 (Mittelwert aus verschiedenen Betonklassen für allgemeinen Hoch- und Tiefbau)
- [16] Kommunikation mit Dr. Ulrich Eichhorn, Geschäftsführer, Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA), Berlin [05-2013]

