

Ultrahochfester Beton – geopolymeres Bindemittel

Lange Zeit galten die Zemente, wie sie sich auch in den neuen Normen widerspiegeln, als zentrales, hydraulisches Bindemittel, das wohl verbesserungsfähig ist, insbesondere immer genauer normiert wurde (siehe Beton/Zement ÖNORM EN 197-1, Betonnorm ÖNORM B 4710-1). Nachdem die Einsicht Platz gegriffen hat, dass durch Additive maßgebliche Verbesserungen durchgeführt werden können, entwickelte sich in der letzten Zeit (beginnend in den 70er-Jahren vorigen Jahrhunderts) eine Betontechnologie, welche nicht mehr allein auf Basis der normierten Zemente arbeiten muss, sondern vielschichtige Rezepturen aufweist. Als Spitze dieser Entwicklung sind wohl die Rezepturen ultrahochfester Betone (UHPC oder UHFB) anzusehen.

Charakteristisch für diese Rezepturen ist:

- 1.) eine hochalkalische Komponente, welche etwa von Seiten eines Zementes geliefert werden kann (Portlandzement spaltet etwa 20 Kalziumhydroxid beim Abbindevorgang ab), aber durchaus auch aus Kalk (CaO , CaOH_2) allein oder ähnlichen basischen Komponenten bestehen kann;
- 2.) eine Kalzium (oder auch Kalium- oder Natrium) liefernde Komponente (für Kalzium zB diverse Schlacken);
- 3.) eine reaktive Si- oder/und Al-Komponente, welche verschiedenste Genese sein kann (durchaus auch verschiedene Zementkomponenten), zB Metakaolin (bei zirka 600 °C gebrannter billiger Kaolin);
- 4.) hochreaktives SiO_2 , wie etwa Silika (amorphes Siliziumdioxid – wie es etwa bei der Herstellung von Siliziummetall und Ferrosilizium entsteht) oder auch Zemente extremer Mahlfeinheit, welche Blainewerte um 5500 cm^2/g und darüber haben; auch etwa von Zementwerken entwickelte Spezial- SiO_2 -Komponenten (zB Dyckerhoff Mikrodur) Oder diverse Nano-Produkte (Partikel kleiner 10/–9);
- 5.) im System sind zusätzlich Inerte oder nicht-reaktive Komponenten, jedoch immer von höchster Feinheit vorhanden, im Nano-Bereich oder wenig darüber;
- 6.) neue Verflüssiger, die es ermöglichen, extrem verflüssigende Wirkung – je nach Wunsch – einzustellen. Diesen Produkten, die derzeit in einer rasanten Entwicklung sind, kommt eine zentrale Bedeutung zu. Es sind organische Substanzen, welche nicht in den Abbinde Mechanismus mittels Reaktionen eingreifen, sondern an den Partikeloberflächen wirksam werden (zB PCE Hochleistungsverflüssiger auf Basis Polycarboxylate Ether), aber auch spezielle Additive etwa zur Ansteifregulierung etc.
- 7.) Alle Rezepturen arbeiten mit geringer Zuschlagkorngröße (meistens zwischen 1 und 3 mm, aber auch bis 16 mm, selten darüber). Aber auch Rezepturen mit 0,2 mm Zuschlag sind in Verwendung (Plattenelemente). Den Zuschlagkörnern und deren Qualität und mineralogische Zusammensetzung kommt eine noch entscheidend größere Bedeutung als beim klassisch abbindenden Beton zu, da die Festigkeit der abgebundenen Matrix (Sammelbegriff für das Gesamte an Feinteilen bis etwa 0,5 – 1 mm) durchaus in der Nähe oder über dem Zuschlagkorn liegen kann, was bei klassischen Betonen nur bei ganz minderwertigem Korn der Fall ist.

Bei größeren Zuschlagkörnern sinkt die Festigkeit. Dies ist einsichtig, da bei Gesteinen mit zunehmender Stückgröße die Anzahl der Mikro und Makrorisse deutlich zunimmt. Zu bevorzugt sind immer Gesteine mit möglichst kleinen Kristallen, da bei Gesteinen mit großen Kristallen die Bindungsfehler und auch die innerkristallinen Fehlstellen und damit Schwächen zunehmen.

Bei UHPC-Geopolymeren ist die Matrixfestigkeit im Vergleich mit der Zuschlagkornfestigkeit zu prüfen und damit auch eine spezielle Gesteinsauswahl zu treffen, wobei gleiche Gesteinstypen jedoch von verschiedenen Vorkommen durchaus verschieden reagieren können. Dem Zuschlag ist somit entscheidend größeres Augenmerk zuzuwenden, als dies bei normal kristallisierenden Bindemittel der Fall ist.

8.) Allen diesen Systemen ist eigen, dass der Wasser-Bindemittel-Faktor kleiner als 0,35 ist und bis unter 0,2 reicht. Dabei ist festzuhalten, dass es sich nicht um den Wasser-Zement-Faktor handelt.

9.) Alle Rezepturen sind danach ausgerichtet, einen möglichst dichten Festkörper zu erstellen, der eine möglichst große Raumfüllung aufweist.

Diese vereinfachte Aufstellung zeigt die weiten Möglichkeiten einer Rezeptur für superhochfestes Bindemittel, welche nicht nur auf Zementkomponenten basieren muss, ja sogar ohne diese oder nur mit ganz geringem Klinkeranteil arbeitet. Man denke nur etwa an Rezeptierungen, welche mit CEM-IV-Komponenten arbeiten, bei denen der Klinkeranteil nur 5 % ist, der auch jederzeit durch gebrannten Kalk oder Kalziumhydroxid ersetzt werden kann.

Es soll hier auch gesagt werden, dass etwa die CEM-III-Typen, besonders die mit höherem Index, eigentlich keine Zemente sind, wenn man den Klinkeranteil als wesentlich betrachtet. Es handelt sich um eine eigene Bindemittelsorte, welche man als alkalisch angeregte Ca-Si-Al-Komponenten ansprechen muss. Bei einem Klinkeranteil von 5%

von Zement zu sprechen, ist nur dadurch zu erklären, dass man diese Gruppe willkürlich der Zementindustrie zuordnen will.

Mit den geeigneten Schlackenrohstoffen – und davon gibt sehr viele – oder auch natürlichen oder synthetischen Stoffen (zB Metakaolin) und Zugaben von kleinen Mengen Kalziumhydroxid oder Oxid kann jedes Werk, das eine geeignete Mühle hat (und es gibt in Europa zahlreiche Mahlwerke, die selbst keinen Klinker erzeugen, sondern diesen beziehen), ein solches Bindemittel erzeugen. Man ist keinesfalls auf den großen Aufwand eines Zementwerkes angewiesen.

Die Zukunftsentwicklung wird sicher unter anderem an Bindemittelrezepturen ausgerichtet sein, welche in Mahlwerken entstehen. Diese Werke haben nur einen Bruchteil der Anschaffungskosten eines Zementwerkes und benötigen eine Bruchteil des Platzbedarfes und können mit einer weiten Palette von natürlichen, synthetischen und Beyrohstoffen beliefert werden. Ferner sind solche Werke entscheidend umweltverträglicher.

Der Grundgedanke der neuen Bindemittel wurde bereits in den 70er-Jahren von Dr. *Joseph Davidovic* gelegt. Er nannte diese alkaliaktivierten Bindemittel Geopolymere, da er damals schon feststellte, was heute bewiesen ist, dass solche Bindemittel zum größten Teil nicht mehr durch Kristallisation erhärten, sondern einen den organischen Polymeren ähnlichen bis gleichen Erhärtungsablauf haben.

Davidovics Entwicklungen in einem eigenen Institut zielten jedoch nicht oder noch nicht auf ein Massenprodukt ab, sondern nahmen als Basiskomponenten alkalische Substanzen wie Wasserglas, Kaliumhydroxid, Natriumhydroxid, Bariumhydroxid etc und Si- und Si-Al-Komponenten diversester Art (Metakaolin, Schlacken, Flugaschen, aktivierte Tone etc). Obwohl er auch mit Trockenkomponenten arbeitete, gab er den Nassreaktionen (die alkalische Komponente ist flüssig) den Vorrang wodurch eine Baustellenmanipulation mit großen Flüssigkeitsmengen kaum mehr möglich ist. Trotzdem sollte man sich diese Entwicklungen, welche sehr weit getrieben wurden, ansehen. Etwa im Zusammenhang mit der CO₂-Bindung in verschiedenen trockenen und nassen hydrometallurgischen Prozessen. Bei Reaktion von CO₂ mit natürlichen Rohstoffen können gewaltige Mengen an reaktivem SiO₂ oder reaktive Si-Al-Komponenten in naher Zukunft greifbar sein.

Ich weise darauf hin, dass die Zementindustrie mit rund 5 % des weltweiten CO₂-Ausstoßes an der Spitze der „globalen Wärmesünder“ steht. Im Jahre 2000 betrug der CO₂-Ausstoß der Zementindustrie über 900 Millionen Tonnen. Dieser hohe CO₂-Ausstoß ist einsichtig, da nicht nur durch den Verbrennungsvorgang große CO₂-Mengen entstehen, sondern auch aus Kalzination und Verklinkerung des Hauptrohstoffes Kalk (CaCO₃), welcher rund 44 % CO₂ enthält. Auch aus diesem Grund ist die Entwicklung neuer Bindemittel auf nicht klassisch zementärer Basis wünschenswert.

Die Argumentation, dass für den Mahlvorgang eines nicht zementären Bindemittels viel zu hohe Energiemengen nötig sind, da Mahlvorgänge oder thermische Aktivierungen

benötigt werden, ist grundsätzlich falsch, wenn man die Energiemengen für die klassische Zementerzeugung in Betracht zieht.

Ein reines Mahlbindemittel, welches auf verschiedensten Rezepturen basieren kann ist sicher zukunftsträchtig. Dabei darf man nicht vergessen, dass solche Bindemittel auch auf sulfatischer Basis erstellt werden können. Allzu lange hat man auf „Sulfat“-Bindemittel vergessen, da man sie seinerzeit nicht beherrschte. Heute sind verschiedenste Firmen durch Forschung in der Lage, solche Bindemittel zu erstellen.

Von Bedeutung ist, dass Mahlbindemittelwerke auch sehr klein und damit dezentralisiert erstellt werden können, was von besonderer Bedeutung für wenig dicht besiedelte Erdgebiete und Entwicklungsländer ist, wo weite Transporte Probleme darstellen.

Es muss auch auf die Verwendung völlig neuer Rohstoffe verwiesen werden, wie etwa basische Gesteine (Gesteine mit einem SiO₂-Gehalt unter 45 %), die in bekannten Lösungsprozessen Verwendung finden, wodurch eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes bei der Bindemittelerzeugung um bis zu 80 % möglich ist. In den nächsten zwei Jahrzehnten wird eine deutlich Umwälzung im Bereich der Bindemittel eintreten.

Somit kommen auf den Sachverständigen auch in naher Zukunft völlig neue Aufgaben zu. Unter anderen werden zahlreiche Normen überflüssig, da viele Eigenschaften a priori von einem Geopolymer erfüllt werden (zB Säurebeständigkeit, Wasserdichtigkeit, Frost- und Tausalzbeständigkeit, Beständigkeit bis 800/1.000 °C, Auslaugbarkeit, Normierungen der Betonoberfläche, Beständigkeit gegenüber strahlenden Substanzen, Ausblühneigung und starke Fleckigkeit usw).

Nach diesem Exkurs zurück zu ultrahochfestem Beton, welcher größtenteils durchaus als Geopolymere anzusprechen ist. Welche Eigenschaft hat ein solches **Geopolymer-UHPC**? Es sollen kurz **die wichtigsten Eigenschaften** aufgezählt werden:

1.) Druckfestigkeiten bis 150 Megapascal (1 MPa = 10,19716 kg/cm²) sind an Bauten leicht erreichbar. Spezielle geopolymere Verbundwerkstoffe mit SiC-Fasern erreichen Festigkeiten bis 380 MPa. B65, B105 sind in der Hochhauspraxis bereits gängige Werte.

2.) Selbstverdichtend (SSC Self Compacting) und selbst entlüftend, auch bei dichter Bewehrung unproblematisch. Insgesamt eine Konsistenz, die einem Honig gleicht, obwohl die Wasser-Bindemittel-Werte bei bis zu 0,15 liegen.

3.) Feuerbeständig 800/1.200° C (abhängig vom Zuschlagstoff). Einen Tunnel ohne eine solche Innenschicht zu bauen, kann heutzutage fast als fahrlässig bezeichnet werden. Abplatzungen, die bei einem erhöhten Feuchtegehalt möglich sind, können durch Zugabe von Kunststofffasern, die schmelzen und damit den Dampf ableiten, behoben werden.

4.) Baumassereduzierung bis 60 % ist möglich. Allein durch die dadurch eingesparte Fläche und das Volumen, gar nicht zu sprechen von der Senkung der Bodenlast,

sollte auch bei kleineren und besonders mittleren Bauten der Einsatz immer überlegt werden.

Bei Brückenbauten verwendet man auch in Österreich glasfaserarmierte UHPC-Betone. (Wild-Brücke Völkermarkt, Zusammenarbeit mit Lafarge – Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Graz).

5.) Armierungseisenreduzierung –30 % ist möglich. Auch alleinige Verwendung von Fasern, bevorzugt Glasfasern, ist erprobt.

6.) Höchste physikalische Datenwerte bei Glasfaserarmierung ($0,5 - 2 \text{ kg/m}^3$) und Eisenfaser-Armierung ($2 - 80 \text{ kg/m}^3$), Kohlefaser-, Kunststofffaser- ($0,5 - 20 \text{ kg/m}^3$) oder SiC-Armierung.

7.) Oberfläche immer glatt, entspricht vorzüglichster Sichtbetonqualität – detailreiche Abbildung möglich, besondere ästhetische Gestaltung.

8.) Ausblühungsfrei, gleichmäßige Abwitterung.

9.) Beständig gegen saure und natürlich alkalische Medien. Diese Beständigkeit gegen selbst stark saure Umgebung hat entscheidende Bedeutung. Beständig gegen Chloride und Nitrate.

10.) Hohe Wasserdichtigkeit, hohe Gasdichtigkeit. Der Zuschlag wird lückenlos umschlossen, nicht nur von einem Kristallfilz (Polymerisat-Umhüllung).

11.) Das gesamte Bindemittel kommt zur Reaktion (in den größten Teilen der normierten Zementtypen kommt nur ein Teil des Bindemittels zur Reaktion; rund 40 % des Klinkers bleiben innert; dies haben viele Versuche ergeben, Feinteile aus Altbeton [Recyclingmaterial] zu mahlen und als Bindemittel zu verwenden).

12.) Von großer Bedeutung ist die erwiesene Möglichkeit, radioaktive Stoffe oder auch diverse andere schädliche Stoffe so einzubinden, dass eine Eluierung kaum mehr möglich ist.

Bei diesen Vorteilen, so sie Planer, Statiker und Baugewerbe tatsächlich ausnützen, spielt der Preis des Betons und des Bindemittels keine kalkulationsentscheidende Rolle, auch wenn die Preise pro m^3 zwischen € 450,- und € 800,- liegen könnten.

Die Beziehung zwischen Festigkeit und W/Z (Wasser-Zement-Faktor). Der abrupte Anstieg mit sinkendem Wasserbindemittelfaktor ist jedem Fachmann bekannt, konnte jedoch bis vor wenigen Jahren nicht ausgenützt werden, da die klassische Betontechnologie mit den Normzementen ein Wasser-Zement-Faktor von 0,5 nicht wesentlich unterschreiten konnte. Erst die Entwicklung der modernen Verflüssiger ermöglichte Wasser-Bindemittel-Werte kleiner 0,35 bis unter 0,2.

Betrachtet man den klassischen Abbindevorgang eines Normzementes, so stellt sich dieser als Kristallisationsvorgang des gemahlten Zementklinkers dar. In verschiedene Prozesse über Hydrolyse und Hydratation und In-loco-Kristallisationen kommt es im Wesentlichen zu einem feinfasrigen verfilzten Kristallisationsgebilde (CSH-Faserbüschel, CSH-Blattstrukturen, plattiges Kalziumhydroxid, in die Länge wachsende Ettringitkristalle etc), das letztendlich für die Festigkeitsentwicklung verantwortlich ist (siehe Abbildung 1). Die REM-Aufnahmen von geopolymere Bindemittel zeigen bei gleichen Vergrößerungen nur leichte Abschattungen und eventuell nanoorientierte und schattierte Partien. Erst im Bereich von nm werden gesprenkelte Mikrostrukturen sichtbar (siehe Abbildung 2). Man beachte die völlig dichte Umschließung der Glasfasern.

Da diese letztendlich bei Normzementen sich bildenden Kristallite hohe Kristallwassergehalte aufweisen, ist es einsichtig, dass bei niedrigen und sehr niedrigen Wasser-Bindemittel-Faktoren unter gewissen Umständen nicht genügend Wasser zur Kristallisation vorhanden sein kann. Noch dazu, da ein Teil des Wassers zur Plastifizierung im Zusammenhang mit dem Verflüssiger in Oberflächenreaktionen nötig ist.

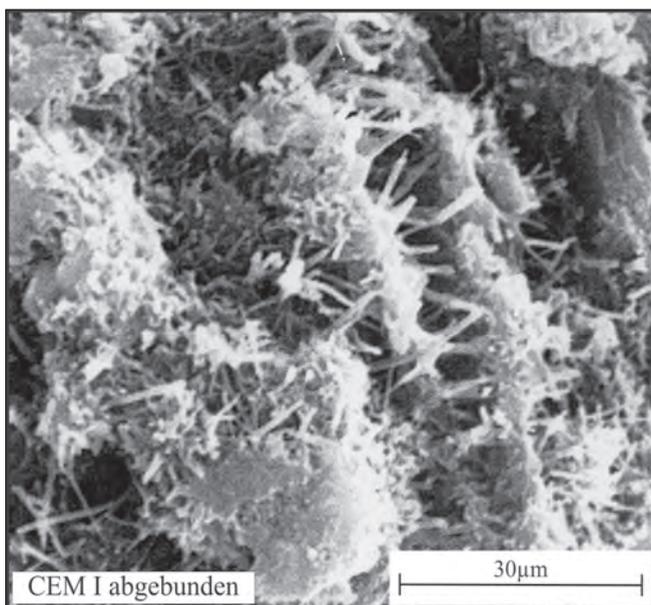


Abbildung 1

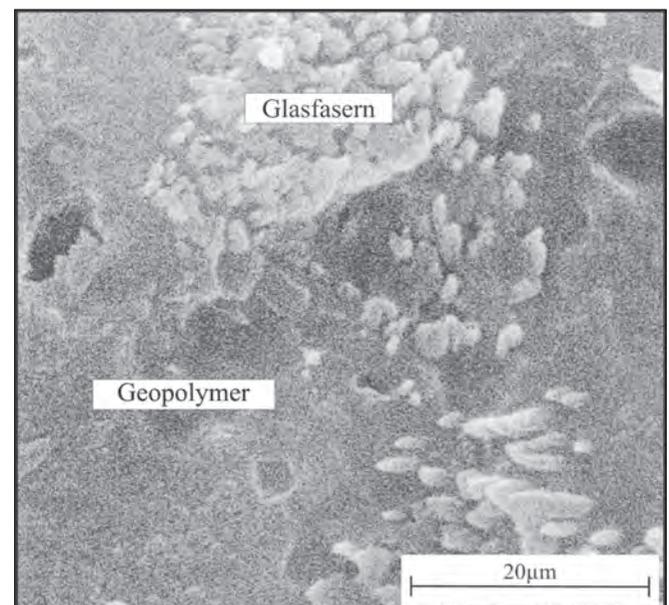


Abbildung 2

Die Verfestigung eines großen Teils ultrahochfesten Betone erfolgt durch einen Polymerisationsvorgang des Bindemittels. Es ist der gleiche Vorgang, welcher bereits von *Davidovic* beschrieben und erforscht wurde. Im Wesentlichen handelt es sich um eine Polymerisation von SiO_4 - und AlO_4 -Tetraeder in Ketten, Band und auch räumlichen Strukturen, in denen Kalziumionen etc eingelagert sind. Dabei sind diese Polymerisate von den Rezepturen nach *Davidovic* (Entdecker der Geopolymere 1940) besser bekannt als diejenigen von hochfesten Betonbindemitteln.

Von großer technologischer Bedeutung ist, dass Geopolymere den Zuschlagstoff allseitig fest umschließen. Dies ist bei der klassischen Zementerhärtung nicht der Fall. Hier wachsen die Kristallite nur um und auf dem Zuschlagkorn auf. Die Berührungsfläche Zuschlagkorn zu Kristalliten, die ja die Basis der Festigkeit ist, beträgt maximal 50 %, liegt manchmal aber unter 30 %.

Überblickt man die gesamte Literatur, von denen ein Großteil vom Autor gesichtet und gesammelt wurde, so ist es merkwürdig, dass der Polymerisationsvorgang von diesen Bindemitteln mit Wasser-Bindemittel-Faktor kleiner 0,35 bis unter 0,2 nahezu nicht erwähnt wird und man praktisch annimmt, dass die Erhärtung gleich wie sonst bei den üblichen Normzementen erfolgt.

Grundsätzlich geben Rasterelektronen mikroskopische Bilder von Geopolymeren bis etwa 20.000-fache Vergrößerung nur ein leicht fleckiges Gebilde, jedoch keine Kristallisationen wieder, wie man sie ansonsten bei Zementen gewohnt ist. Röntgenaufnahmen zeigen, dass größere Reflexe, welche auf größere Kristalle hinweisen, nicht oder nur untergeordnet vorhanden sind. Man könnte höchstens von Nano-Strukturen sprechen.

Es fragt sich, ob ein Baustoff, welcher nicht die klassischen Festigkeitsentwicklungen durch Kristallisation aufweist, mit den gleichen Maßstäben zu messen und zu untersuchen ist, wie dies für kristallisierende Bindemittel der Fall ist.

Die Langzeiteigenschaften eines Geopolymeres (darunter verstehen wir all diejenigen Bindemittel, die nicht im klassischen Sinn kristallisieren und erhärten) könnte durchaus anders zu bewerten sein.

Vor allen haben viele Untersuchungen ergeben, dass Geopolymere extrem spröde sind. Unter Sprödigkeit wollen wir vereinfacht das Verhalten eines Feststoffes verstehen, der bei kleinen Biegebelastungen bereits zu Rissbildungen neigt und bei Schlagbelastungen ebenfalls leicht Risse zeigt. Die Sprödigkeit ist ein eklatanter Mangel der Geopolymere. Bei normal kristallisierend abbindendem Zementbeton spielt die Sprödigkeit eine untergeordnete Rolle.

Diese Sprödigkeit bedingt auch den fast immer erfolgten Einsatz von Fasern, besonders Glasfasern. Nur so ist die Sprödigkeit gut beherrschbar.

Eine gute Einführung über ultrahochfeste Betone gibt die Arbeit von *Andreas Timo Rummelin* „Entwicklung, Bemessung, Konstruktion und Anwendung von ultrahochfesten Beton“ (Diplomarbeit an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Fachhochschule Stuttgart – University of Applied Sciences Stuttgart 2005, 237 Seiten, großes Stichwortver-

zeichnis, 10 Seiten Literatur [diese Literaturzusammenstellung ist so umfangreich, dass der Autor dieses Artikels keine zusätzlichen Zusammenstellungen angibt]; die Arbeit kann im Internet unter http://ruemmelin.info/Beruf/Diplomarbeit/Diplomarbeit_low.pdf kostenlos heruntergeladen werden). Die sonst sehr informative Arbeit zeigt jedoch, dass auf die Feinstruktur, also Polymerisation, nicht eingegangen wurde. Es ist nicht glaubbar, dass bei einem Wasserbindemittelfaktor von 0,16 eine normale Zement-Kristallisation möglich ist. Die in der Arbeit gezeigten Bilder sind Zitate aus einer fremden Arbeit und stammen nicht aus eigenen Untersuchungen.

Ferner sind die Kongressbände „UHPC“ der Universität Kassel aus den Jahren 2004 und 2008 zum Studium zu empfehlen oder Kontakte mit dem schon genannten Grazer Institut.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass nach dem derzeitigen Wissensstand und nach einer Unzahl von internationalen Untersuchungen von renommierten Instituten und Forschern bei Betonrezepturen um Werte kleiner 0,3 Wasser-Bindemittel-Faktor mit dem Elektronenmikroskop zu untersuchen ist, ob eine Polymerisation vorliegt oder ein klassischer Kristallisationsprozess oder – was auch möglich ist – eine Kombination von beiden.

Die vielfach vorgebrachte Argumentation, dass hier noch wenig Erfahrung vorliegt, kann nicht akzeptiert werden. Ich verweise auf: Trianon-Hochhaus Frankfurt/Main (Wasser-Bindemittel-Faktor 0,33), Commerzbank-Hochhaus, Main-Tower, Chicago-Executive-Hochhaus, Two Union Square Building Seattle (130 MPa Beton), Taipeh Twin Towers, Bionic Tower, Shanghai World Financial Center, Burj Dubai sowie diverse Brücken wie etwa Kanada Sherbrooke Footbridge (30 mm Oberplatte), Südkorea Seonya Foodbridge, Fulda Gärtnerplatzbrücke (erstmalig UHPC-Teile verklebt). Dies sind nur einige, der teilweise sogar weiter zurückliegenden Anwendungen. Aber auch in Österreich wurde eine Brücke (Wilden-Brücke Völkermarkt) bereits mit UHPC erstellt.

Berechnungen haben ergeben, dass bei einem UHPC-Geopolymeren eine theoretische Druckbruchlänge von 16.000 m im Hochbau möglich wäre. Diese ist jedoch praktisch auf 3.200 m zu reduzieren.

Am Markt befinden sich derzeit nur wenige UHPC-geeignete Fertigbindemittel oder Betone. Zu nennen sind: Die Entwicklungen von Dyckerhoff, ferner Ductal der Baufirma Bouygues zusammen mit Lafarge in Frankreich, „Beton special industriell“ der EFAGE, genannt BSI, aus dem die erste Verkehrsbrücke in Frankreich gebaut wurde, und das kommende Produkt „Duracrete advanced“ der Firma Schwenk, Deutschland.

Für Auskünfte steht der Autor jederzeit zur Verfügung.

Korrespondenz:

Dr. Gerhard A. Bertoldi

Bundesstraße 28

8041 Graz-Thondorf

E-Mail: technomineral.bertoldi@yahoo.de