DOI: 10.1002/best.201200051

Wolfram Schmidt, Henricus Jozef Hubertus Brouwers, Hans-Carsten Kühne, Birgit Meng

Optimierung der Robustheit von selbstverdichtendem Beton gegenüber Temperatureinflüssen

Selbstverdichtender Beton verhält sich unter Temperatureinfluss anders als Normalbeton, da die Rheologie neben der fortschreitenden Hydratation zusätzlich durch die von der Zeit und dem Hydratationsfortschritt abhängige Adsorption von Fließmitteln beeinflusst wird. Anhand rheometrischer Betonversuche an SVB unterschiedlicher Entwurfskonzepte mit variierter anionischer Ladungsdichte im Fließmittel wird verdeutlicht, dass mehlkornreiche SVB bei niedrigen Temperaturen sehr robust sind, während bei hohen Temperaturen mehlkornärmere Entwürfe zu bevorzugen sind. Darüber hinaus wird gezeigt, wie sich unterschiedliche Fließmittelmodifikationen in bestimmten Temperaturbereichen verhalten. Anhand des Wasser-Feststoff-Verhältnisses und des Adsorptionsverhaltens von Fließmitteln werden die maßgeblichen Prozesse erläutert und Möglichkeiten für die Entwicklung robuster Mischungen für individuelle Temperaturbereiche aufgeführt.

Robustness optimisation of self-compacting concrete regarding temperature effects

Regarding the temperature dependent performance, self-compacting concrete (SCC) distinguishes from normal concrete, since its rheology does not only depend upon the hydration itself but supplementary upon the adsorption of superplasticizers, which is affected by the time and the hydration progress. Based on rheometric concrete investigations with different SCC mixture compositions and varied anionic charge densities of the superplasticizers, it is shown that SCC, which is rich in powder components, shows robust performance at low temperatures, while compositions with lower powder contents are favourable at high temperatures. Furthermore, the performance of different superplasticizer modifications at different temperature ranges is demonstrated. The relevant processes are explained by means of the water to powder ratio as well as the adsorption behaviour of superplasticizers, and options for the development of robust mixture compositions for individual temperature ranges are itemised.

1 Einleitung

Damit selbstverdichtender Beton (SVB) als Transportbeton oder als Baustellenbeton eingesetzt werden kann, muss dieser eine hohe Robustheit gegenüber Einflüssen aus den Umgebungsbedingungen aufweisen. Robustheit wird zumeist als Stabilität des Systems gegenüber Variationen in Qualität und Quantität der Betonkomponenten verstanden oder als die Fähigkeit, menschliche oder prozesstechnische Unsicherheiten abzufedern [1 bis 5]. Allerdings kommt auf der Baustelle der Aspekt tageszeitlich und saisonal schwankender Temperaturen erschwerend hinzu. Die Stabilität der Eigenschaften von SVB unter veränderlichen Temperaturen bei ansonsten gleichbleibenden Einflussgrößen wurde bisher kaum systematisch untersucht.

Die Fließeigenschaften von SVB werden durch eine Reihe von Faktoren bestimmt. Hierzu zählen Art, Menge und Zusammensetzung der Gesteinskörnung, das Wasser-Feststoff-Verhältnis des Bindemittelleims sowie die Wechselwirkungen zwischen Bindemittelkomponenten und polymeren Zusatzmitteln. Als polymere Zusatzmittel kommen für SVB üblicherweise Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) zum Einsatz. Die üblicherweise in hohen Mengen zugegebenen Fließmittel führen dazu, dass sich SVB und Normalbeton in ihrem temperaturabhängigen Verhalten deutlich voneinander unterscheiden und Erfahrungen aus dem Normalbeton nur eingeschränkt auf selbstverdichtenden Beton übertragbar sind.

2 Wirkungsweise von PCE und Einfluss der Ladungsdichte

Im Hinblick auf das Verhalten von SVB bei wechselnden Temperaturen spielt die Interaktion zwischen PCE und Zementhydratation eine wichtige Rolle. Die Verflüssigung des Bindemittels erfolgt aufgrund der Adsorption von Fließmittelmolekülen an den Oberflächen der Zementklinkerphasen und frühen Hydratationsprodukte [6, 7]. Diese Moleküle bestehen aus einer negativ geladenen Hauptkette und einer Vielzahl von Seitenketten zur sterischen Abstoßung der Partikel und Oberflächen. Die negativ geladenen Hauptketten adsorbieren an positiven Ladungsplätzen der Partikeloberflächen. Hierdurch lagern sie sich gerade in der Anfangsphase verstärkt an C_3A und Ettringit an [8]. Allerdings konkurrieren die Fließmittelpolymere dabei mit Sulfationen aus dem Erstarrungsregler und Alkalisulfaten aus dem Klinker [9, 10], sodass die Moleküle nicht immer unmittelbar adsorbieren können. Zusätzliche zeitliche Einflüsse bilden im Verlauf der frühen Hydratation entstehende Reaktionsprodukte, die neue Adsorptionsflächen zur Verfügung stellen. Von diesen wirkt sich Ettringit am stärksten auf die Adsorption aus, da es ein hohes positives Zetapotential aufweist und große Adsorptionsflächen anbietet [8].

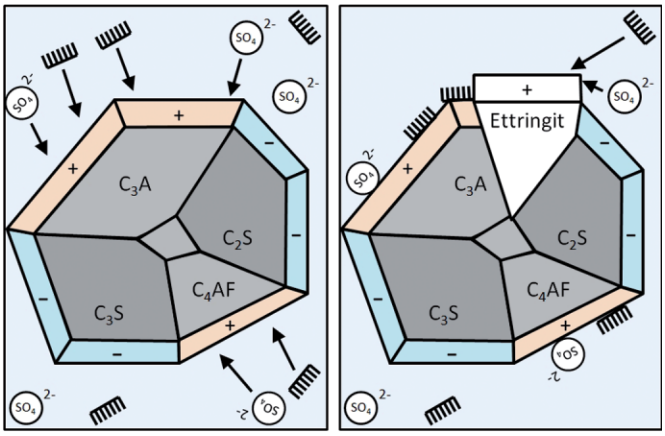

Bild 1 Konkurrenz zwischen PCE-Molekülen und Sulfationen bei der Adsorption und zeitversetzte Adsorption durch die Entstehung von Ettringit
Competitions for adsorption spaces between PCE molecules and sulphate ions and time-delayed adsorption due to ettringite formation

Der zeitliche Verlauf der Interaktion von Fließmitteln mit der Zementhydratation wird schematisch in Bild 1 dargestellt. Je höher die anionische Ladungsdichte des Polymers ist, umso stärker ist seine Neigung, zu adsorbieren. Je niedriger sie ist, umso langsamer findet Adsorption statt, dafür können aber bei Adsorptionsgleichgewicht mehr Polymere adsorbieren. Sobald ein temporäres Adsorptionsgleichgewicht erreicht ist, findet zunächst keine weitere Adsorption statt. Hierdurch bedingt, verbleibt ein signifikanter Anteil an Polymeren bei hohen Fließmitteldosierungen – wie im Falle von SVB – zunächst unwirksam in der Porenlösung. Weitere Adsorption findet dann aber über den zeitlichen Verlauf der Hydratation statt, sobald neue Adsorptionsflächen aufwachsen [8].

Der Hydratationsfortschritt und die Ladungsdichte des PCE stellen also den entscheidenden Einflussfaktor dar, der bestimmt, zu welchem Zeitpunkt welche Menge an Fließmitteln effektiv wirkt. Hieraus ergibt sich der wesentliche Unterschied zwischen Normalbeton und SVB im Hinblick auf die Leistungseigenschaften bei verschiedenen Temperaturen.

3 Unterschied zwischen Normalbeton und SVB

Im Normalbeton beeinflusst die Umgebungstemperatur die Betontemperatur, welche in der Folge den Hydratationsfortschritt entweder beschleunigt oder verlangsamt. Eine Beschleunigung bei hohen Temperaturen wirkt ansteifend, eine Verzögerung bei niedrigen Temperaturen verlängert die Verarbeitbarkeit. Dieser Zusammenhang ist auch dann gültig, wenn Fließmittel in geringen Mengen im Beton enthalten sind. Sind allerdings, wie im Falle von SVB, erhebliche Mengen an Fließmitteln erforderlich, überlagern sich teilweise gegensätzliche Effekte des Hydratationsfortschritts mit Effekten aus der hieraus bedingten Adsorption von PCE. Während eine beschleunigte Hydratation das Bindemittel grundsätzlich ansteifen lässt, führt die schnellere Bildung von Ettringit auch zu vermehrter Adsorption von PCE, was wiederum eine starke Verflüssigung zur Folge hat. Eine Verzögerung bei niedrigen Temperaturen verhindert einerseits grundsätz-

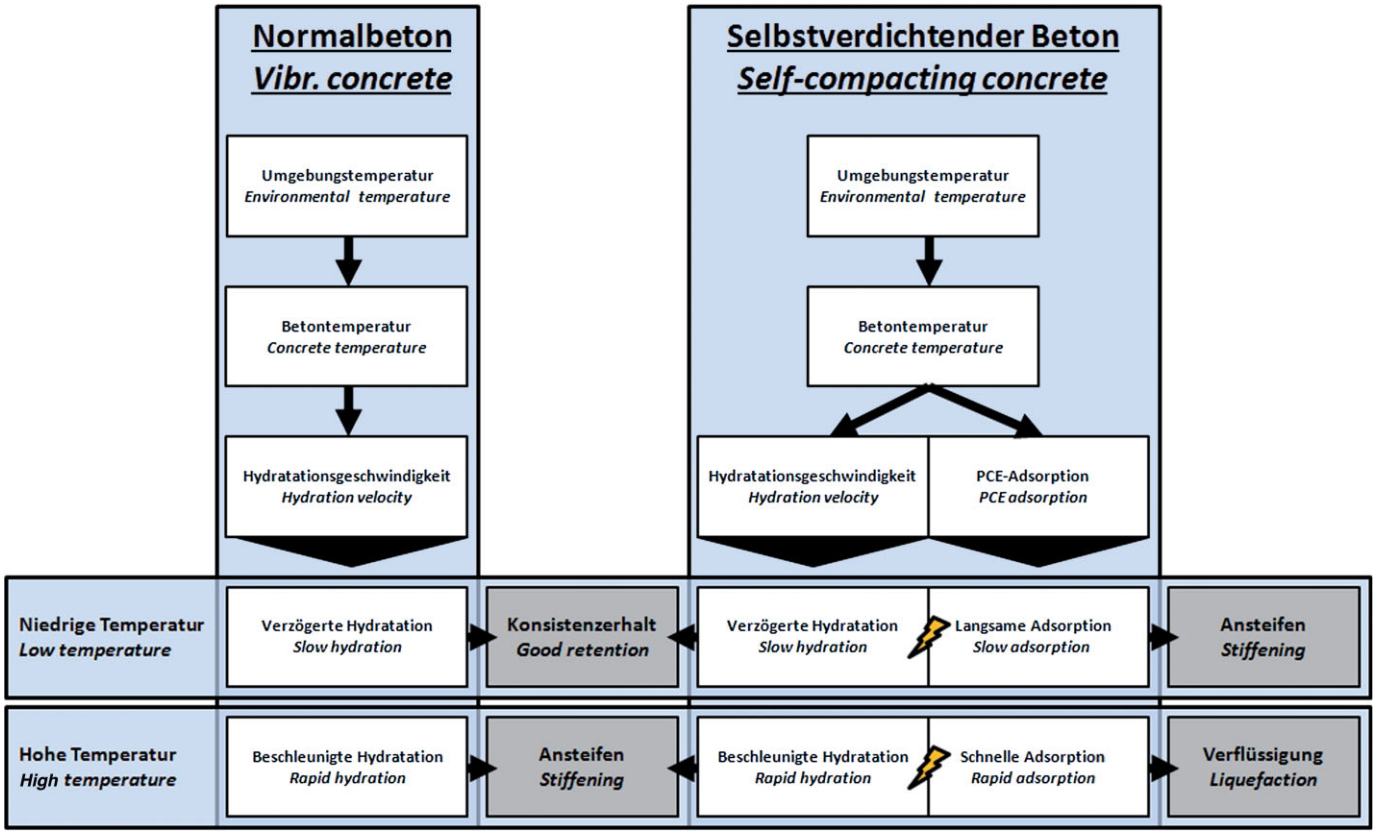

Bild 2 Schematische Darstellung des unterschiedlichen Einflusses der Temperatur auf Normalbeton und auf SVB
Flow chart of the different influences of temperature on normal concrete and SCC

lich frühe morphologische Veränderungen der Bindemittelpartikel, welche die Verarbeitbarkeit reduzieren. Andererseits entstehen gleichsam Reaktionsprodukte nur in geringen Mengen oder verzögert, sodass nicht ausreichend Adsorptionsflächen für die PCE verfügbar sind. Dies wiederum verringert die Verflüssigungswirkung des Fließmittels. Bild 2 stellt diesen Zusammenhang sowie den Unterschied zum Normalbeton schematisch dar.

4 Forschungsbedarf

Inwieweit veränderliche Temperaturen auf einen SVB verflüssigend oder ansteifend wirken, hängt also nicht nur wie beim Normalbeton vom fortschreitenden Hydratationsverlauf ab, sondern auch von dessen Einfluss auf die Adsorption von Polymeren. Hierdurch erklären sich auch Berichte über unterschiedliche Auswirkungen veränderlicher Temperaturen auf das Verhalten von SVB.

Yamada et al. berichten von einer Abnahme der Fließfähigkeit von Zementleimen bei niedrigen Temperaturen, während hohe Temperaturen zu einer zeitlich versetzten Abnahme der Fließfähigkeit führen [11]. Bei Golaszewski und Cygan kann abweichend davon von einer Zunahme der Fließfähigkeit von Zementleimen gegenüber dem Verhalten bei einer Vergleichstemperatur von 20 °C sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Temperaturen beobachtet werden [12]. Petit et al. zeigen anhand von Mikromörteln, dass unterhalb einer mischungsabhängigen Grenztemperatur ein Abfall der Fließgrenze beobachtet werden kann [13]. Berücksichtigt man die von Yamada et al. [11] dargestellte, temperaturbedingt unterschiedliche Löslichkeit von Sulfaten sowie den bei Plank et al. dargestellten Wettbewerb der PCE mit den Sulfationen um Adsorptionsflächen [9] sowie die von Schober und Flatt [7] berichtete wesentliche Abhängigkeit des Fließverhaltens von der Menge an adsorbierten Polymeren, wird ersichtlich, dass die Ladungsdichte des Polymers das Temperaturverhalten des Bindemittelleims wesentlich beeinflussen muss.

Nur wenige Studien zeigen Ergebnisse des Temperaturverhaltens von SVB anhand von Betonversuchen. Aus Versuchen von Golaszewski und Cygan [12] geht hervor, dass erhöhte Temperaturen zum Verlust der Verarbeitbarkeit führten, während niedrige Temperaturen eine Verbesserung herbeiführen konnten. Schmidt und Kühne berichten davon abweichend von einem Verlust der Verarbeitbarkeit bei niedrigen Temperaturen und einer starken anfänglichen Entmischungsneigung bei hohen Temperaturen [14]. Die untersuchten Mischungen unterscheiden sich insbesondere in ihrem Wasser-Feststoff-Verhältnis im Leim. Während die von Golaszewski und Cygan [12] untersuchten Betone hohe Bindemittelvolumina mit großem Mehlkorngehalt aufwiesen, war das Bindemittelvolumen bei Schmidt und Kühne [14] vergleichsweise gering. In Schmidt et al. [15] werden anhand von Mischungsentwürfen des Mehlkorntyps und des Stabilisierertyps große Unterschiede im Temperaturverhalten beider Entwurfstypen aufgeführt. Neben dem Einfluss der Hydratation und der Fließmittelmodifikation muss entsprechend der Einfluss des Betonentwurfstyps berücksichtigt werden. Anhand der dargestellten Versuche an unterschiedlichen Mischungsentwurfstypen und unter Verwendung von Fließmitteln mit unterschiedlicher Ladungsdichte werden die auftretenden Effekte in unterschiedlichen Temperaturbereichen erläutert, und es werden Entscheidungskriterien für eine robuste Betonage von SVB für spezifische Temperaturbereiche aufgeführt.

5 Versuchsaufbau und Spezifikationen

Für die Versuche wurden zwei charakteristisch unterschiedliche Basisrezepturen entwickelt (Tab. 1). Hierbei handelt es sich um einen SVB mit hohem Mehlkorngehalt, dessen Stabilität auf einem niedrigen Wasser-Mehlkorn-Verhältnis basiert (Mehlkorntyp) sowie um einen SVB mit gegenüber Normalbeton nur leicht erhöhtem Mehlkorngehalt, der ein höheres Wasser-Mehlkorn-Verhältnis aufweist (Stabilisierertyp). Beide Mischungen enthalten modifizierte Kartoffelstärke als Stabilisierer, wobei dessen Anteil im Mehlkorntyp vernachlässigbar gering ausfällt, während dem Stabilisierertyp vergleichsweise hohe Mengen zugegeben werden müssen.

Variationen der in Tab. 1 dargestellten Basisrezepturen ergaben sich durch Verwendung unterschiedlicher Fließmittel. Die verwendeten PCE weisen eine gleiche Hauptkette, aber unterschiedliche Seitenkettenanordnungen auf, sodass die Polymere durch unterschiedliche anionische Ladungsdichten charakterisiert werden können. Die Zugabemenge eines jeden PCE wurde jeweils so dosiert, dass sich bei 20 °C zum Zeitpunkt 30 Minuten nach Mischende ein Setzfließmaß zwischen 650 und 700 mm

Tab. 1 Grundrezepturen der Mischungsentwürfe
Basic compositions of the mix design types

Mischungsentwurf *Mixture composition*	**Mehlkorntyp** *Powder type*	**Stabilisierertyp** *Stabilising agent type*
Zement/*Cement*	310 kg/m³	350 kg/m³
Kalksteinmehl/*Limestone filler*	250 kg/m³	130 kg/m³
Wasser/*Water*	175 kg/m³	175 kg/m³
Sand/*Sand* (0,1–4,0 mm)	808 kg/m³	848 kg/m³
Gesteinskörnung/*Aggregates* (4,0–16,0 mm)	791 kg/m³	831 kg/m³

Tab. 2 Zusatzmittelcharakteristik und Dosierungen
Admixture characteristics and dosages

PCE		Mehlkorntyp *Powder type*		Stabilisierertyp *Stabilising agent type*	
Code	**Ladungsdichte** *Charge density*	**PCE Feststoff** *PCE solids*	**ST**	**PCE Feststoff** *PCE solids*	**ST**
		M.-%[1]	**M.-%[2]**	**M.-%[1]**	**M.-%[2]**
PCE1	Niedrig/*low*	0,62	0,035	0,68	0,24
PCE2	Hoch/*high*	0,38	0,035	0,44	0,24

[1] bezogen auf Zement/*related to cement*; [2] bezogen auf Wasser/*related to water*

ergab. Einen Überblick über die Charakteristika der Zusatzmittel und die individuellen Dosierungen liefert Tab. 2. Die PCE-spezifischen Dosierungen wurden bei allen Temperaturen konstant gehalten.

Rheometrische Untersuchungen am Beton wurden mithilfe eines CONTEC-Rheometer-4SCC durchgeführt. Das mobile Betonrheometer erlaubt es, anhand der gemessenen Stromstärke über definiert veränderte Drehzahlen unter der Annahme BINGHAM'schen Fließverhaltens qualitative Informationen über die Fließgrenze (G-Yield) und die Viskosität (H-Viscosity) zu gewinnen [3]. Vorlagerung der Rohstoffe, Mischen und Versuchsablauf wurden in einer Klimakammer bei jeweiliger Beobachtungstemperatur durchgeführt. Für die Beobachtung der zeitlichen Entwicklung der Verarbeitbarkeit wurden die Messungen direkt nach dem Mischen sowie 30, 60 und 90 Minuten nach Mischende durchgeführt.

Die Probekörper für die Druckfestigkeitsuntersuchungen (15 × 15 × 15 cm³) wurden nach 30 Minuten hergestellt und bei individueller Untersuchungstemperatur abgedeckt gelagert. Im Anschluss an die rheologischen Messungen zum Zeitpunkt 90 Minuten nach Mischende wurden die Probekörper abgedeckt bei 20 °C gelagert. Nach 24 Stunden wurden sie ausgeschalt und bis zur Prüfung bei 21 °C unter Wasser gelagert. Die Prüfungen erfolgten entsprechend DIN EN 12390-2 (2001).

6 Versuchsergebnisse

Die in den Bildern 3 und 4 dargestellten G-Yield-Werte liefern qualitative Aussagen über den Verlauf der Fließgrenze über die Zeit. Steigende Werte bedeuten einen Anstieg der Fließgrenze, also eine Reduktion des Setzfließmaßes. Zur Verdeutlichung der Ergebnisse sei angemerkt, dass die Betone mit G-Yield-Werten größer als 2 000 mA keinerlei selbstverdichtende Eigenschaften mehr aufwiesen. SVB mit Werten bis etwa 1 500 mA waren gut verarbeitbar.

Für die mehlkornreichen SVB ergaben sich abhängig vom verwendeten Fließmittelpolymer deutliche Unter-

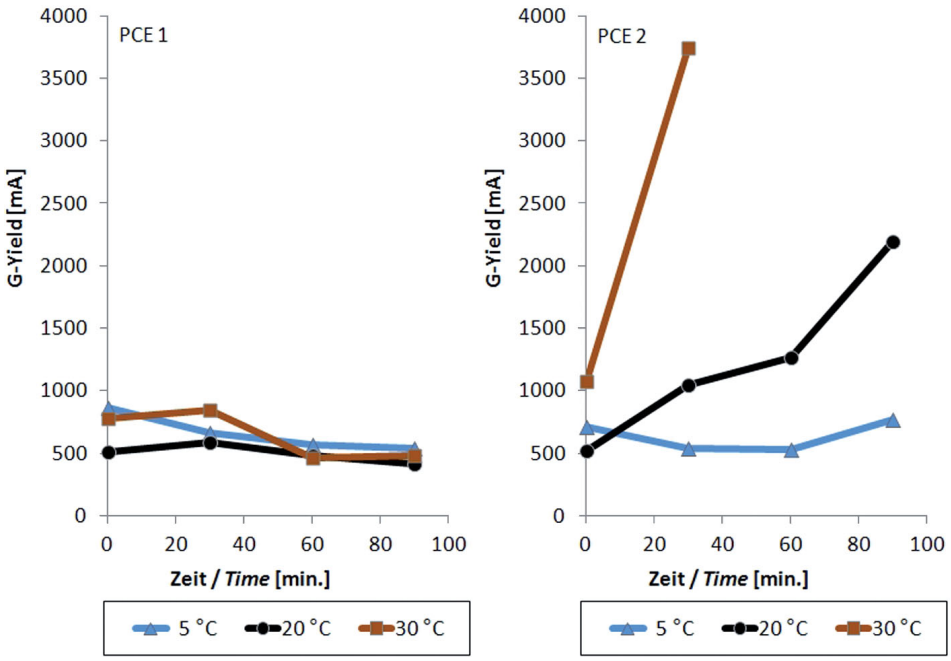

Bild 3 G-Yield-Werte der Mehlkorn-SVB bei unterschiedlichen Temperaturen für PCE mit unterschiedlicher Lagerungsdichte
G-Yield values at different temperatures for powder type SCCs with differently charged PCEs

schiede im Temperaturverhalten (Bild 3). Während unter Verwendung des niedrig geladenen Polymers weder ein deutlicher Einfluss der Zeit noch des verwendeten Polymers über den Beobachtungszeitraum zu erkennen ist, können für das hoch geladene Polymer spezifische Einflüsse erkannt werden. Während die anfänglich niedrige Fließgrenze bei 5 °C über den gesamten Beobachtungszeitraum aufrecht erhalten werden kann, findet bei 20 °C ein Ansteifen über die Zeit statt, sodass gute Verarbeitungseigenschaften lediglich über einen Zeitraum von 60 Minuten erhalten bleiben. Bei 30 °C liegt die Fließgrenze bereits nach dem Mischen höher als bei den geringeren Temperaturen. Darüber hinaus steigt sie mit der Zeit sehr schnell an, sodass bereits nach 30 Minuten keinerlei selbstverdichtende Eigenschaften mehr vorliegen und der Beton zu späteren Zeitpunkten bereits zu steif für weitere Messungen ist.

Ein anderes Bild ergibt sich für die Mischungen der SVB des Stabilisierertyps (Bild 4). Im Gegensatz zu den Mehlkornmischungen zeigen hier die SVB mit niedrig geladenem Polymer deutliche Temperaturabhängigkeiten. Bei 20 °C bleibt die anfängliche Fließgrenze weitgehend konstant, bei 30 °C liegt sie höher, nähert sich aber mit leicht fallender Tendenz mit der Zeit dem Verlauf der Kurve bei 20 °C an. Bei 5 °C allerdings liegt der G-Yield-Wert bereits anfänglich deutlich über den Werten bei 20 °C und 30 °C und steigt kontinuierlich an. Selbstverdichtende Verarbeitungseigenschaften sind für diese Temperatur-Fließmittel-Kombination zu keinem Zeitpunkt gegeben.

Ein deutlich geringerer Temperatureinfluss kann unter Verwendung des hoch geladenen Polymers beobachtet werden. Bei allen Temperaturen findet ein stetiger Anstieg der Fließgrenze mit der Zeit statt. Zwischen 5 °C und 20 °C kann kein signifikanter Unterschied ausgemacht werden, die Verarbeitungseigenschaften bleiben über den gesamten Beobachtungszeitraum gut. Bei 30 °C ist der zeitabhängige Anstieg der Fließgrenze deutlich ausgeprägter, sodass nach 60 und 90 Minuten keine selbstverdichtenden Eigenschaften mehr vorliegen. Allerdings bleibt die Fließgrenze deutlich niedriger als beim vergleichbaren Mehlkorntyp.

7 Ergebnisdiskussion

7.1 Einfluss des Wasser-Mehlkorn-Verhältnisses

Beide Entwurfstypen verhalten sich bei 20 °C in Abhängigkeit vom verwendeten Fließmittel sehr ähnlich. Erwartungsgemäß hält das niedrig geladene Polymer die Konsistenz über einen langen Zeitraum an, während das hoch geladene Polymer zunächst besser verflüssigt, dann aber zu einem schnelleren Ansteifen führt.

Bei der Temperatur, auf die die Betone abgestimmt wurden, kann also kein signifikanter Unterschied zwischen Mehlkorntyp und Stabilisierertyp ausgemacht werden. Weicht die Umgebungstemperatur aber von der Temperatur ab, auf die die SVB abgestimmt wurden, wird deutlich, dass eine einfache Beschreibung des temperaturabhängigen Verhaltens von SVB nicht möglich ist. Eine Differenzierung zwischen mehlkornreichen und mehlkornarmen SVB ist notwendig, da diese unterschiedliche Wasser-Mehlkorn-Verhältnisse besitzen.

Mehlkorn-SVB haben üblicherweise ein Wasser-Feststoff-Verhältnis, welches nahe am minimalen Wasseranspruch des Bindemittelgemischs liegt. Hierdurch liegen sehr eng gepackte Partikel im Zementleim vor. Im Laufe der Hydratation stattfindende morphologische Veränderungen der Partikel wirken sich direkt auf deren wechselseitige

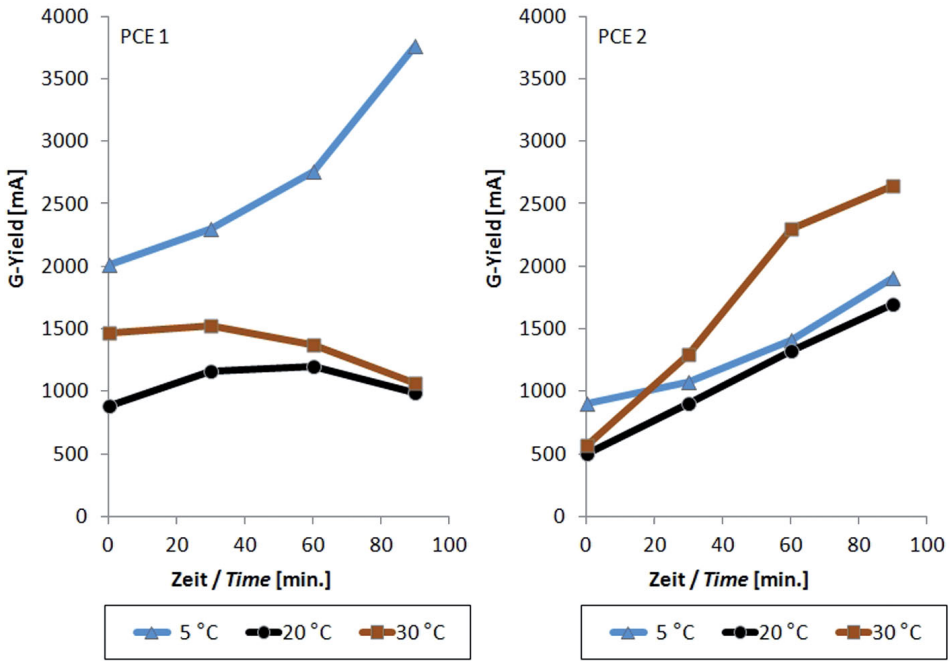

Bild 4 G-Yield-Werte der Stabilisierer-SVB bei unterschiedlichen Temperaturen für PCE mit unterschiedlicher Lagerungsdichte
G-Yield values at different temperatures for stabilising agent type SCCs with differently charged PCEs

Beweglichkeit aus. Vergrößert sich die Partikeloberfläche, behindern sich die Partikel gegenseitig. Die Rheologie eines SVB des Stabilisierertyps wird viel stärker von der flüssigen Phase zwischen den Partikeln bestimmt. Die Abstände der Partikel – entmischungsfreies Fließen vorausgesetzt – sind vergleichsweise groß, sodass morphologische Veränderungen eines Partikels sich weniger stark auf die Beweglichkeit eines benachbarten Partikels auswirken.

Bei 5 °C zeigt der Mehlkorntyp unabhängig vom Fließmittel sehr gute Fließeigenschaften über einen sehr langen Zeitraum. Der Stabilisierertyp besitzt hingegen nur unter Verwendung des hoch geladenen Polymers gute Fließeigenschaften. Mit dem niedrig geladenen Polymer kann keine Fließfähigkeit erreicht werden.

Bei 30 °C ergibt sich ein umgekehrtes Bild. Der Stabilisierertyp funktioniert unabhängig vom PCE deutlich stabiler als der Mehlkorntyp. Es ist zwar unter Verwendung des hoch geladenen Polymers ein Ansteifen zu erkennen, dies fällt aber deutlich geringer aus als beim Mehlkorntyp, der bereits nach sehr kurzer Zeit nicht mehr verarbeitbar ist.

7.2 Einfluss der PCE-Adsorption

Berücksichtigt man den signifikanten Unterschied im Wasser-Feststoff-Verhältnis sowie den zuvor geschilderten Einfluss der Ladungsdichte des PCE auf das zeitliche Adsorptionsverhalten, lassen sich die kombinierten Effekte modellhaft darstellen, wodurch sich nachvollziehen lässt, warum gerade bei hohen Temperaturen der Mehlkorntyp und hoch geladenes PCE sowie bei niedrigen Temperaturen Stabilisierertyp und niedrig geladenes PCE ungünstige Kombinationen darstellen.

Fließmittel mit hoher Ladungsdichte adsorbieren nach Zugabe sehr schnell und sorgen für eine schnelle Verflüssigung. Die bei hohen Temperaturen sehr schnell fortschreitende Hydratation lässt auf der Oberfläche der Partikel sehr schnell AFm, AFt und Hydratphasen aufwachsen, welche einerseits die sterische Wirkung der bereits adsorbierten PCE minimieren, andererseits die Beweglichkeit der Partikel aufgrund der dichten Packung reduzieren (Bild 5). Wird unter gleichen Umgebungsbedingungen ein niedrig geladenes Polymer verwendet, bleibt zunächst ein größerer Teil der PCE ohne Effekt auf die Verflüssigung in Lösung. Mit fortschreitender Hydratation können diese zunächst nicht adsorbierten Polymere zeitversetzt adsorbieren und somit der morphologisch bedingten Immobilisierung der Partikel entgegenwirken (Bild 5).

Bei niedrigen Temperaturen gelten zunächst die gleichen Regelmäßigkeiten. Hoch geladene Polymere adsorbieren sehr schnell in hoher Menge und führen folglich zu einer guten Anfangsverflüssigung (Bild 6). Niedrig geladene Polymere verbleiben zunächst teilweise wirkungslos in der Porenlösung. Bei niedrigen Temperaturen findet die Hydratation allerdings deutlich verlangsamt statt, sodass keine oder nur wenige zusätzliche Adsorptionsflächen über die Zeit aufwachsen und die nicht adsorbierten Polymere auch über die Zeit keine Wirkung entfalten können. Hierdurch können die Partikel beim Fließen nicht effektiv stabilisiert werden, sodass sie sich gegenseitig behindern.

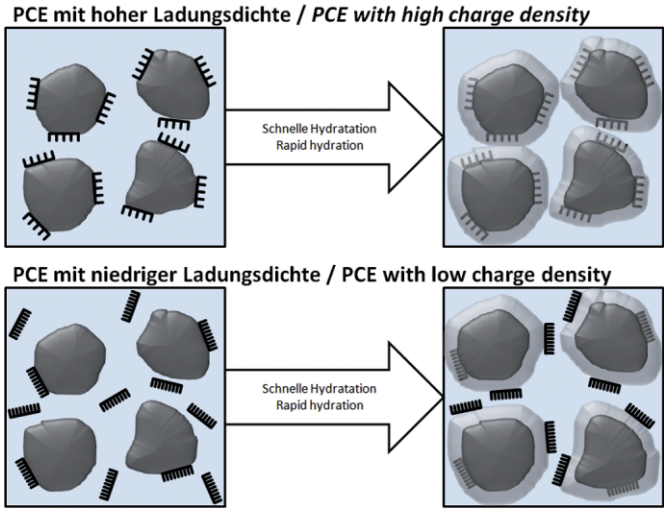

Bild 5 Zeitliche Veränderung der Partikelinteraktionen bei hohen Temperaturen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte eines PCE
Time dependent evolution of the particle interactions at high temperatures depending upon the charge density of the PCE

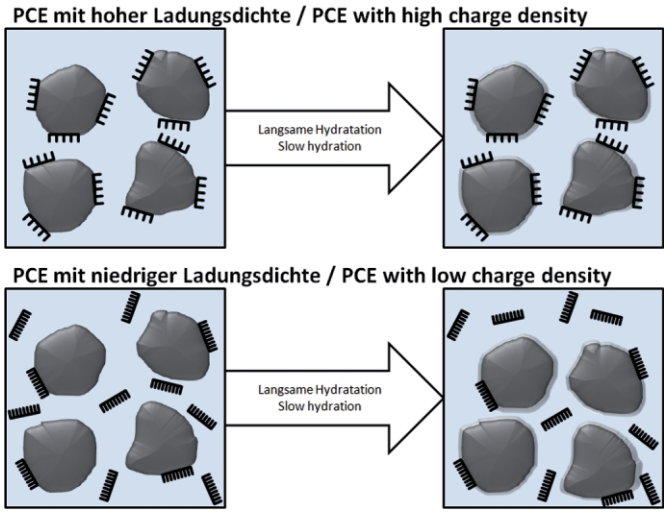

Bild 6 Zeitliche Veränderung der Partikelinteraktionen bei niedrigen Temperaturen in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte eines PCE
Time dependent evolution of the particle interactions at low temperatures depending upon the charge density of the PCE

7.3 Auswirkungen rheologisch ungünstiger Mischungsparameter auf die Festbetoneigenschaften

Die Folgen einer ungünstigen Kombination aus Fließmittelmodifikation und Mischungsentwurfstyp werden anhand der in den Bildern 7 und 8 dargestellten Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessungen nach 28 Tagen sichtbar.

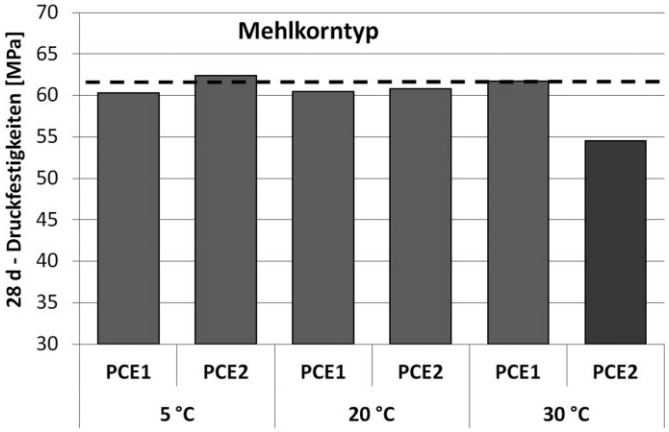

Bild 7 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen und PCE auf die 28d-Druckfestigkeit von SVB des Mehlkorntyps
Influence of different temperatures and PCEs on the 28d compressive strength of powder type SCC

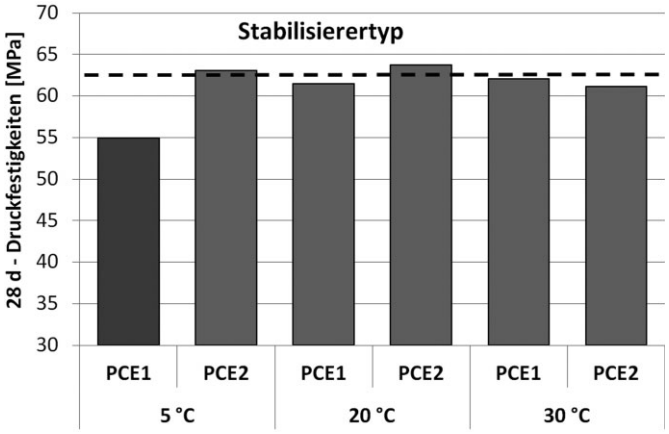

Bild 8 Einfluss unterschiedlicher Temperaturen und PCE auf die 28d-Druckfestigkeit von SVB des Stabilisierertyps
Influence of different temperatures and PCEs on the 28d compressive strength of stabilising agent type SCC

Unabhängig von der Verarbeitungstemperatur und der PCE-Modifikation weisen die Druckfestigkeiten aller Mischungen nur sehr geringe Schwankungen auf. Ausnahmen bilden lediglich die zuvor als rheologisch ungünstig identifizierten Mischungen. Dies ist bei niedriger Temperatur der Stabilisierertyp in Kombination mit einem niedrig geladenen PCE und bei hoher Temperatur der Mehlkorntyp zusammen mit einem hoch geladenen PCE. Die schlechte Verarbeitbarkeit dieser Mischungen führte zu mangelnder Verdichtung und somit letztendlich zu deutlich reduzierten Druckfestigkeiten.

7.4 Auswahlparameter für robuste SVB bei veränderlichen Temperaturen

Tab. 3 liefert einen qualitativen Überblick über die betrachteten SVB-Modifikationen. Es ist erkennbar, dass prinzipiell beide Entwurfstypen für jede untersuchte Temperatur in Frage kommen. Allerdings muss bei Verwendung eines Stabilisierertyp-SVB in niedrigen Temperaturen ein hoch geladenes PCE eingesetzt werden, während bei Verwendung eines Mehlkorn-SVB in hohen Temperaturen ein niedrig geladenes PCE eingesetzt werden sollte. Eine individuelle Anpassung an die klimatischen Rahmenbedingungen durch flexible Wahl der PCE-Modifikation ist allerdings in der Praxis häufig nicht möglich, oder dem Anwender ist nicht bekannt, welche Adsorptionseigenschaften das vorgesehene PCE überhaupt aufweist. Unter diesem Gesichtspunkt ist es möglicherweise von Interesse, einen Beton zu verwenden, der möglichst robust gegen Einflüsse der PCE-Modifikation ist. Bei niedrigen Temperaturen weist in diesem Falle der Mehlkorntyp eine hohe Robustheit auf, während der Stabilisierertyp bei hohen Temperaturen deutlich weniger sensibel auf unterschiedliche PCE-Modifikationen reagiert.

Tab. 3 Beobachtungen zum Einfluss des Mischungsentwurfs und der Fließmittelmodifikation
Observations regarding the influence of the mixture composition and the superplasticizer modification

		Ladungsdichte des PCEs ***Charge density of PCE***		**Problemfeld** ***Problem field***
		Niedrig ***Low***	**Hoch** ***High***	
Stabilisierertyp *Stabilising agent type*	**5 °C**	**Keine Fließfähigkeit, niedrige Festigkeiten** ***Poor flow, low strength***	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	**PCE-Abhängigkeit** ***PCE dependency***
	20 °C	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	–
	30 °C	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	Mittlere Verarbeitungszeit *Medium flow retention*	–
Mehlkorntyp *Powder type*	5 °C	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	–
	20 °C	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	Mittlere Verarbeitungszeit *Medium flow retention*	–
	30 °C	Lange Verarbeitungszeit *Good flow retention*	**Konsistenzverlust, niedrige Festigkeiten** ***Poor flow retention, low strength***	**PCE-Abhängigkeit** ***PCE dependency***

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe rheometrischer Methoden wurden Untersuchungen zum Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Verarbeitungseigenschaften von SVB durchgeführt. Hierbei wurden zwei charakteristisch unterschiedliche Mischungsentwürfe für selbstverdichtende Betone sowie zwei in der Höhe ihrer anionischen Ladungsdichte unterschiedliche Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether kombiniert und systematisch variiert.

Die Untersuchungen bestätigen, dass eine einfache Übertragung der Kenntnisse des Temperaturverhaltens von Normalbeton auf SVB nicht möglich ist, da die Wechselwirkung zwischen Zementhydratation und Fließmitteladsorption das temperaturabhängige Verhalten deutlich beeinflusst. Aus den dargestellten Versuchen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Bei der Charakterisierung des temperaturbedingten Verhaltens von SVB ist eine Unterscheidung zwischen Mischungen mit hohem und niedrigem Wasser-Mehlkorn-Verhältnis im Bindemittel notwendig.
- Die Verarbeitungseigenschaften von SVB des Mehlkorntyps wurden bei 30 °C sehr stark von der Ladungsdichte des PCE geprägt. Während die Verarbeitungseigenschaften mit einem niedrig geladenen PCE sehr gut waren, verlor der SVB mit hoch geladenem PCE sehr schnell an Konsistenz. Hoch geladene PCE adsorbieren sehr früh. Die beschleunigte Hydratation reduziert deren Wirkung rapide, sodass morphologische Veränderungen auf den Partikeloberflächen, die die Beweglichkeit der Partikel reduzieren, nicht mehr ausgeglichen werden können. Niedrig geladene PCE adsorbieren verzögert und können somit die Partikel länger auf Abstand halten.
- Bei niedrigen Temperaturen hingen die Frischbetoneigenschaften der SVB des Stabilisierertyps sehr stark von der Ladungsdichte des PCE ab. Während PCE mit hoher Ladungsdichte gute Verarbeitungseigenschaften hervorbringen kann, führt PCE mit niedriger Ladungsdichte zum Verlust der Fließeigenschaften. Infolge der verlangsamten Hydratation werden nur wenige Adsorptionsflächen ausgebildet. Fließmittel mit niedriger Ladungsdichte werden verdrängt und können sich auch mit der Zeit nicht anlagern, um die Partikel zu stabilisieren.
- Infolge der Beobachtungen und der Erklärungsmodelle konnten günstige und ungünstige Kombinationen aus Mischungsentwurf, PCE-Modifikation und Umgebungstemperatur plausibel aufgeführt und Entscheidungskriterien für die Generierung einer hohen Robustheit in unterschiedlichen Temperaturbereichen generiert werden.
- Sind unterschiedliche Fließmittelmodifikationen vorhanden und deren Eigenschaften bekannt, kann auf Schwankungen in der Umgebungstemperatur flexibel reagiert werden, indem bei niedrigen Temperaturen ein PCE mit hoher Ladungsdichte gewählt wird und bei hohen Temperaturen entsprechend ein PCE mit niedriger Ladungsdichte.
- Sind die PCE-Eigenschaften nicht bekannt oder kann das PCE nicht variiert werden, kann der Mischungsentwurf den Umgebungstemperaturen angepasst werden. Bei hohen Temperaturen verhält sich ein Stabilisierertyp robuster als ein Mehlkorntyp, bei niedrigen Temperaturen sollte ein Mehlkorntyp gewählt werden.

Mischungsentwurf und Zusatzmittelwahl stellen die wesentliche Einflussgröße für veränderliche Verarbeitungseigenschaften von SVB bei unterschiedlichen Temperaturen dar. Allerdings spielen neben der Zusatzmittel-Zement-Interaktion weitere Faktoren, wie z. B. Zusatzstoffe und stabilisierende Zusatzmittel eine Rolle, indem sie die hier dargestellten Effekte möglicherweise vermindern oder verstärken. An dieser Stelle wird auf diese Effekte nicht weiter eingegangen, es sei aber auf weitere Publikationen der Autoren zu diesem Themenbereich hingewiesen [15 bis 17].

In der Praxis liegen dem Anwender die maßgeblichen Materialeigenschaften häufig nicht vor. Die in dieser Arbeit entwickelte modellhafte Darstellung der Interaktionen trägt zum Verständnis einiger temperaturbedingter Effekte bei. Für die Entwicklung robuster Betone für veränderliche Temperaturen oder spezielle Temperaturbereiche ist daher – aufbauend auf den Darstellungen dieser Arbeit – ein stufenweises Entwurfskonzept in Kombination mit schnell anwendbaren Prüfverfahren zur Bestimmung der Zement-Zusatzmittel-Interaktionen erforderlich, das Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten an der BAM sein wird.

Literatur

[1] bibm, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC and ERMCO: *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete – Specification, Production and Use*. http://www.efnarc.org.

[2] J. Terpstra: *Stabilizing self-levelling concrete with polysaccharide additive*. SCC'2005-China: 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, 2005, pp. 207–213.

[3] O. H. Wallevik; S. Kubens; F. Mueller: *Influence of cement-admixture interaction on the stability of production properties of SCC*. 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Ghent, Belgium, 2007, pp. 211–216.

[4] S. Nunes; H. Figueiras; P. Milheiro Oliveira; J. S. Coutinho; J. Figueiras: *A methodology to assess robustness of SCC mixtures*. Cement and Concrete Research, vol. 36, 2006, pp. 2115–2122.

[5] D. Hamada; T. Hamai; M. Shimoda; M. Shonaka; H. Takahashi: *Development of New Superplasticizer Provid-*

ing Ultimate Workability. 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006, pp. 31–50.

[6] I. Schober; R. J. Flatt: *Studying Admixtures with the 5C Rheometer*. 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006, pp. 93–104.

[7] I. Schober; R. J. Flatt: *Optimizing Polycaboxylate Polymers*. 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other chemical Admixtures in Concrete, Sorrento, Italy, 2006, pp. 169–184.

[8] J. Plank; C. Hirsch: *Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption*. Cement and Concrete Research, vol. 37, 2007, pp. 537–542.

[9] J. Plank; G. Bassioni; Z. Dai; H. Keller; B. Sachsenhauser; N. Zouaoui: *Neues zur Wechselwirkung zwischen Zementen und Polycarboxylat-Fließmitteln*. 16th International Conference on Building Materials – ibausil, Weimar, Germany, 2006, S. 579–598.

[10] K. Yamada; S. Ogawa; S. Hanehara: *Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase*. Cement and Concrete Research, vol. 31, 2001, pp. 375–383.

[11] K. Yamada; T. Yanagisawa; S. Hanehara: *Influence of temperature on the dispersibility of polycarboxylate type superplasticizer for highly fluid concrete.* 1st International RILEM symposium on Self-Compacting Concrete, Stockholm, Sweden, 1999, pp. 437–448.

[12] J. Golaszewski; G. Cygan: *Einfluss der Temperatur auf die Verarbeitbarkeit selbstverdichtender Betonmischungen*. BWI – Betonwerk International, 2009, S. 40–46.

[13] J.-Y. Petit; E. Wirquin; B. Duthoit: *Influence of temperature on yield value of highly flowable micromortars made with sulfonate-based superplasticizers.* Cement and Concrete Research, vol. 35, 2005, pp. 256–266.

[14] W. Schmidt; H.-C. Kuehne: *Interactions between admixtures and mineral components in Self-Compacting Concrete cast at different temperatures.* Concrete Plant International, 2009, pp. 32–39.

[15] W. Schmidt; H. J. H. Brouwers; H.-C. Kühne; B. Meng: *Effects of Superplasticizer and Viscosity-Modifying Agent on Fresh Concrete Performance of SCC at Varied Ambient Temperatures.* Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete – Proceedings of SCC2010, Montreal, Canada, September 26–29, 2010, K. H. Khayat and D. Feys, Eds.: Springer, 2010, pp. 65–77.

[16] W. Schmidt; H. J. H. Brouwers; H.-C. Kuehne; B. Meng: *Influence of Environmental Temperatures on the Performance of Polymeric Stabilising Agent in Fresh Cementitious Materials*. Key Engineering Materials, vol. 466, 2011, pp. 97–104.

[17] W. Schmidt; H.-C. Kuehne; B. Meng: *Temperature related effects on self-consolidating concrete due to interactions between superplasticizers, supplemental admixtures and additions*. 9th ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures – Supplementary Papers, Seville, Spain, 2009, pp. 135–147.

Autoren

Dipl.-Ing.
Wolfram Schmidt
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
wolfram.schmidt@bam.de

prof.dr.ir. Henricus Jozef
Hubertus Brouwers
Eindhoven University of Technology
Department of the Built Environment
P.O. Box 513 – Vertigo 6.10
5600 MB Eindhoven, The Netherlands
jos.brouwers@tue.nl

Dr.-Ing. Hans-Carsten Kühne
hans-carsten.kuehne@bam.de

Dir. und Prof. Dr. rer. nat. Birgit Meng
birgit.meng@bam.de

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin