



**QUEEN'S
UNIVERSITY
BELFAST**

Compability of Superplasticizers with Cementitious Materials

Garcia Taengua, E. J., Sonebi, M., Taylor, S., Ferrara, L., Deegan, P., & Pattarini, A. (2014). Compability of Superplasticizers with Cementitious Materials. *BFT (Concrete Plant + Precast Technology) International*, 80(10). http://www.bft-international.com/en/artikel/bft_Compability_of_superplasticizers_with_cementitious_materials_2165293.html

Published in:
BFT (Concrete Plant + Precast Technology) International

Document Version:
Peer reviewed version

Queen's University Belfast - Research Portal:
[Link to publication record in Queen's University Belfast Research Portal](#)

General rights

Copyright for the publications made accessible via the Queen's University Belfast Research Portal is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

Take down policy

The Research Portal is Queen's institutional repository that provides access to Queen's research output. Every effort has been made to ensure that content in the Research Portal does not infringe any person's rights, or applicable UK laws. If you discover content in the Research Portal that you believe breaches copyright or violates any law, please contact openaccess@qub.ac.uk.

Open Access

This research has been made openly available by Queen's academics and its Open Research team. We would love to hear how access to this research benefits you. – Share your feedback with us: <http://go.qub.ac.uk/oa-feedback>

To study the effect that mineral admixtures have on superplasticizers performance, the rheology of different grouts has been studied. This study represents the first step towards the optimisation of the self-compacting concrete (SCC) mixes.

Die vorliegende Studie über Auswirkungen mineralischer Zusätze auf die Leistungsparameter von Hochleistungsfließmitteln stellt den ersten Schritt in Richtung einer Optimierung des Mischungsentwurfs von selbstverdichtendem Beton (SVB) dar.

Compability of superplasticizers with cementitious materials

Kompatibilität von Hochleistungsfließmitteln mit zementgebundenen Stoffen

E. García-Taengua, M. Sonebi, S. Taylor, L. Ferrara, P. Deegan, A. Pattarini

1 Characterizing superplasticizers interaction with mineral additions

The proliferation of high performance concretes in the last two decades has drawn attention to fine materials used to partially replace cement [1]. The use of mineral admixtures such as limestone powder or filler (LSP), fly ash, silica fume or ground granulated blast furnace slag (GGBS) affects the interaction between superplasticiser (SP) and cement [2]. The interaction between mineral admixtures and cement is also modified by the type and SP dosage. As a result, the effect of admixture-cement interaction on the properties of fresh concrete are difficult to rationalize, especially in the case of systems including mineral admixtures [3].

The Marsh cone (Fig. 1) test measures grout or paste flowability, as the inverse of the flow time. Because of its simplicity and highly visual interpretability of the outcome, it has been extensively used for research and is the test selected for this research.

LSP usually has a positive effect on the flowability of grouts and workability of fresh concrete, and therefore allows the reduction of SP dosage to enhance good workability levels [4]. However, this cannot be assumed as a general truth for any mineral addition: mineral powders improve concrete performance but sometimes reduce workability, since their addition is likely to increase the water demand, given their fineness [5]. As a result of the complex interaction between different mineral additions and between them and SP, the concept of compatibility between mineral additions and SP arises [2,6,7].

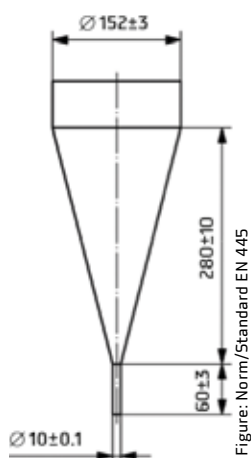
All the aforementioned aspects highlight the convenience of research and preliminary testing with mineral additions and SP in grouts as a first step in the proportioning and optimization of SCC mixes. The research reported here proposes a new approach to take advantage of Marsh cone test results and explores the compatibility between two particular mineral additions (LSP and GGBS) and two SPs (SP1 and SP2).

1 Charakterisierung der Interaktion von Hochleistungsfließmitteln mit mineralischen Zusatzstoffen

Die immer breitere Anwendung von Hochleistungsbetonen in den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die Aufmerksamkeit auf die zur anteiligen Zementsubstitution eingesetzten feinkörnigen Stoffe gelenkt [1]. Die Verwendung von mineralischen Zusätzen wie Kalksteinmehl oder -füller, Flugasche, Silikastaub oder Hochofenschlacke beeinflusst die Interaktion zwischen dem Hochleistungsfließmittel (SP) und dem Zement [2]. Zudem wird die Wechselwirkung zwischen mineralischen Zusatzstoffen und Zement von der Art des Verflüssigers und seiner Dosierung bestimmt. Daraus ergibt sich, dass die Einflüsse der Zusatzstoff-Zement-Interaktion auf die Eigenschaften des Frischbetons nur schwer abzuleiten sind. Dies gilt insbesondere für Stoffsysteme mit mineralischen Zusätzen [3].

Bei der Prüfung im Marsh-Konus (Abb. 1) wird die Fließfähigkeit des Mörtels oder Zementleims ermittelt und als Reziprokwert der Ausflusszeit dargestellt. Dieser Versuch wird vielfach in der Forschung angewandt. Er wurde aufgrund seiner Einfachheit und leichten visuellen Auswertbarkeit der Ergebnisse für die vorliegende Studie ausgewählt.

Die Zugabe von Kalksteinmehl wirkt sich im Allgemeinen positiv auf die Fließfähigkeit von Mörteln und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons aus. Sie ermöglicht daher eine Reduzierung der Fließmitteldosierung, um so gute Verarbeitbarkeiten zu gewährleisten [4]. Dieser Grundsatz lässt sich jedoch nicht auf alle mineralischen Zusatzstoffe übertragen: Gesteinsmehle erhöhen die Leistungsfähigkeit des Betons, verringern jedoch in manchen Fällen auch seine Verarbeitbarkeit, da ihre Zugabe aufgrund der feinkörnigen Struktur den Wasseranspruch eher erhöht [5]. Aufgrund der komplexen Interaktion zwischen unterschiedlichen mineralischen Zusätzen sowie zwischen den Zusätzen und dem Hochleistungsfließmittel stellt sich die Frage der Kompatibilität zwischen mineralischen Zusatzstoffen und Verflüssigern [2, 6, 7].



1
The Marsh cone,
dimensions in mm

Marsh-Konus,
Abmessungen in mm

2 Experimental Programme

2.1 Materials

The materials used to produce the grouts have been: cement, LSP, GGBS, in addition to water and SP. Cement is CEM I 42.5R produced by Irish cement (Ireland). LSP has an average particle size (d_{50}) of 9.1 microns, and GGBS has an average particle size of 13.8 microns.

Fluidity of cement pastes and grouts depends on the composition and effectiveness of the SP, which varies from one product to another [7]. Hence the convenience of considering more than one product. Accordingly, two polycarboxylate ether-based SPs have been used, SP1 and SP2. Their densities are 1.06 g/cm³ and 1.08 g/cm³ respectively. Both superplasticisers are similar in terms of water content (65 % and 60 % respectively), but not in terms of the structure of the polymers they contain.

2.2 Composition of grouts

The fundamental objective of this research was to study the effect that different percentages of LSP and GGBS have on Marsh cone flow times of the corresponding cement grouts. To do so, grouts with different weight percentages of their solid components have been produced and tested, according to the combinations shown in Table 1.

Since the effect of LSP and GGBS is likely to vary depending on SP, these combinations have been produced and tested twice, using SP1 in a first series and SP2 in a second series.

The water/solids ratio was kept at 0.40 for all grouts.

2.3 Grouts production and testing

The flowability of all grouts has been evaluated through the Marsh cone 7-min flow time, according to the standard EN 445: the time it takes for 1.2 litres of grout to pass the 10 mm opening of the cone has been measured for all grouts after 7 minutes mixing.

Water has been used at a temperature between 15°C and 18°C in all cases. Since the sequence used to incorporate the different components into the mixer can significantly affect workability [7, 8], grouts production and testing has followed the same sequence of operations in all cases. The SP is diluted in water and both are poured before the solids into the mixer.

3 Analysis of results: Methodology

3.1 Definition of the flow curves for grouts

7-min flow time obtained for different dosages of SP1 or SP2, expressed in terms of SP weight referred to the total binder weight, are given in Tables 2 and 3 respectively.

In each case, exponential curves have been fitted to the experimental results according to the following expression:

$$t(x) = a \exp\left(\frac{1}{bx+c}\right)$$

where: x is the SP content expressed in percentage over binder weight, t(x) is the 7-min flow time, and a, b, and c are parameters to be obtained when fitting the equation. Each t(x) curve is referred to as the flow curve of the grout.

Grout ref. Mörtel Nr.	Cement Zement	Limestone Kalkstein	GGBS Hochofenschlacke
G-0	100%	0%	0%
G-30L	70%	30%	0%
G-25G	75%	0%	25%
G-50G	50%	0%	50%
G-30L35G	35%	30%	35%

Alle zuvor genannten Aspekte lassen Forschungen und erste Versuche mit mineralischen Zusatzstoffen und Hochleistungsfließmitteln in Zementmörteln als ersten Schritt des Entwurfs und der Optimierung von SVB-Gemengen als geboten erscheinen. Mit dem im vorliegenden Beitrag beschriebenen Forschungsvorhaben wird ein neuer Ansatz zur vorteilhaften Nutzung der Ergebnisse des Marsh-Konus-Versuchs vorgeschlagen, und es wird die Kompatibilität zwischen zwei mineralischen Zusätzen (Kalksteinmehl und Hochofenschlacke) und zwei Hochleistungsfließmitteln (SP 1 und SP 2) untersucht.

2 Versuchsprogramm

2.1 Materialien

Zur Herstellung der Mörtel wurden folgende Materialien eingesetzt: Zement, Kalksteinmehl und Hochofenschlacke zusätzlich zu Wasser und dem Hochleistungsfließmittel. Als Zement wurde ein von Irish Cement produzierter CEM I 42,5R verwendet. Das Kalksteinmehl weist eine durchschnittliche Korngröße (d_{50}) von 9,1 µm, die Hochofenschlacke eine durchschnittliche Korngröße von 13,8 µm auf.

Die Fließfähigkeit von Zementleimen und -mörteln hängt von der Zusammensetzung und Wirksamkeit des Hochleistungsfließmittels ab, die sich von Produkt zu Produkt unterscheidet [7]. Daher ist in diesem Fall mehr als nur ein Produkt zu betrachten. Dementsprechend wurden zwei Mittel auf Polycarboxylat-Basis untersucht (SP1 und SP2). Ihre Dichten lagen bei 1,06 g/cm³ beziehungsweise 1,08 g/cm³. Beide Hochleistungsfließmittel wiesen einen

Grout ref. Mörtel Nr.	SP content (% over binder weight) SP-Anteil (Gew.-% des Bindemittels)					
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
	7-min flow times (seconds) 7-Min.-Ausflusszeiten (s)					
G-0	70	60	56	50	51	56
G-30L	51	54	39	42	38	-
G-25G	77	75	65	64	61	63
G-50G	84	68	70	71	69	65
G-30L35G	34	32	32	31	-	-

Grout ref. Mörtel Nr.	SP content (% over binder weight) SP-Anteil (Gew.-% des Bindemittels)					
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6
	7-min flow times (seconds) 7-Min.-Ausflusszeiten (s)					
G-0	174	90	87	-	72	59
G-30L	77	37	38	33	37	-
G-25G	141	-	97	95	89	89
G-50G	161	132	114	110	-	111
G-30L35G	63	46	38	-	39	-

Tab. 1

Percentages of solids in the combinations tested.

Feststoffanteile in den untersuchten Kombinationen

Tab. 2

Marsh cone test results for SP1.

Untersuchungsergebnisse Marsh-Konus für SP1

Tab. 3

Marsh cone test results for SP2.

Untersuchungsergebnisse Marsh-Konus für SP2

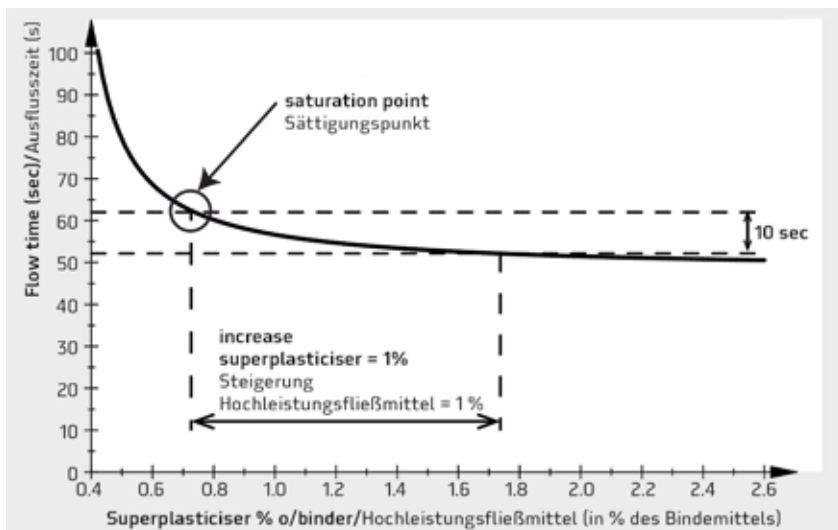


Figure: Norm/Standard EN 445

2 Proposed definition of Saturation Point

Vorgeschlagene Definition des Sättigungspunktes

This approach offers potential advantages when compared to other methodologies proposed to determine the saturation point: it allows further interpretation of the experimental results because the three parameters a, b, and c define the position and shape of the flow curve. Parameter a is the asymptotic flow time and therefore informs of the maximum effect that the SP might have on a grout with a certain composition. Parameters b and c define the shape of the curve.

3.2 Definition of the optimum dosage of superplasticizer

The saturation point, or optimum dosage, of a superplasticizer is the point beyond which additional superplasticizer is of no benefit [9]. This point is often determined visually, and there are a number of definitions based on the slope of the flow curve [7]. However, a more explicit definition for the saturation point is herein presented, a new definition based on the efficiency of increasing amounts of superplasticizer. Once the flow curve $t(x)$ has been fitted to experimental data, the saturation point or optimum SP dosage, x^* , is defined as the point beyond which no time reduction higher than 10 seconds is possible by adding 1% o/binder of superplasticizer. This criterion is exemplified in Figure 2. This value can be obtained from the following equation:

$$t(x^*+1) - t(x^*) = 10 \text{ sec}$$

Tab. 4 Saturation points and corresponding flow times.

Sättigungspunkte und entsprechende Ausflusszeiten

	Grout ref. Mörtel Nr.	x^*	$t(x^*)$ (sec)
SP1	G-0	0.73	62
	G-30L	0.68	48
	G-25G	0.77	71
	G-50G	0.62	76
	G-30L35G	0.26	41
SP2	G-0	1.78	63
	G-30L	1.22	33
	G-25G	1.26	93
	G-50G	1.02	114
	G-30L35G	1.00	43

ähnlichen Wassergehalt auf (65% vs. 60%), unterschieden sich jedoch in der Struktur der enthaltenen Polymere.

2.2 Zusammensetzung der Mörtel

Hauptzielstellung des hier beschriebenen Forschungsvorhabens war die Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Anteile von Kalksteinmehl und Hochofenschlacke auf die Ausflusszeiten der entsprechenden Zementmörtel im Marsh-Konus-Versuch. Zu diesem Zweck wurden Mörtel mit unterschiedlichen Feststoffanteilen (in Gew.-%) produziert und geprüft. Die entsprechenden Stoffkombinationen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Da die Wirkung von Kalksteinmehl und Hochofenschlacke je nach eingesetztem Hochleistungsfließmittel voraussichtlich unterschiedlich ausfällt, wurden die genannten Kombinationen zweimal hergestellt und geprüft, wobei in einer ersten Versuchsreihe SP1 und in einer zweiten Reihe SP2 zum Einsatz kam.

Bei allen Mörteln betrug das Wasser/Feststoff-Verhältnis 0,40.

2.3 Mörtelherstellung und -prüfung

Die Fließfähigkeit aller Mörtel wurde durch Ermittlung der 7-Minuten-Ausflusszeit aus dem Marsh-Konus gemäß Norm EN 445 beurteilt. Dabei wurde für alle Mörtel die Zeit gemessen, die 1,2 Liter Mörtel für den Durchfluss durch die 10-mm-Öffnung des Konus nach 7 Minuten Mischdauer benötigen.

Die Temperatur des verwendeten Wassers lag in allen Fällen zwischen 15 °C und 18 °C. Da sich die Abfolge der Zugabe der einzelnen Bestandteile in den Mischer erheblich auf die Verarbeitbarkeit auswirken kann [7, 8], wurde bei der Herstellung und Untersuchung der Mörtel in allen Fällen auf eine identische Reihenfolge geachtet. Das Hochleistungsfließmittel wurde mit Wasser verdünnt und nachfolgend vor den Feststoffen in den Mischer gegeben.

3 Auswertung der Ergebnisse: Methodik

3.1 Definition der Fließkurven für Mörtel

In den Tabellen 2 und 3 sind die für unterschiedliche Dosierungen von SP1 und SP2 ermittelten 7-Minuten-Ausflusszeiten in Form des Fließmittelgewichts im Verhältnis zum Gesamt-Bindemittelgewicht dargestellt.

In jedem einzelnen Fall erfolgte dabei eine Anpassung der Exponentialkurven an die Versuchsergebnisse unter Anwendung der folgenden Gleichung:

$$t(x) = a \exp\left(\frac{1}{bx+c}\right)$$

mit x als dem Fließmittelgehalt in Prozent des Bindemittelgewichts, $t(x)$ als der 7-Minuten-Ausflusszeit und a , b und c als Parameter, die bei der Anpassung der Gleichung zu bestimmen waren. Die jeweilige $t(x)$ -Kurve wird als Fließkurve des Mörtels bezeichnet.

Dieses Verfahren bietet möglicherweise Vorteile gegenüber anderen methodischen Ansätzen, die für die Ermittlung des Sättigungspunktes vorgeschlagen wurden, denn es ermöglicht die weitere Interpretation der Versuchsergebnisse, da die drei Parameter a , b und c die Lage und Form der Fließkurve bestimmen. Parameter a ist die asymptotische Fließzeit und liefert daher Informationen über

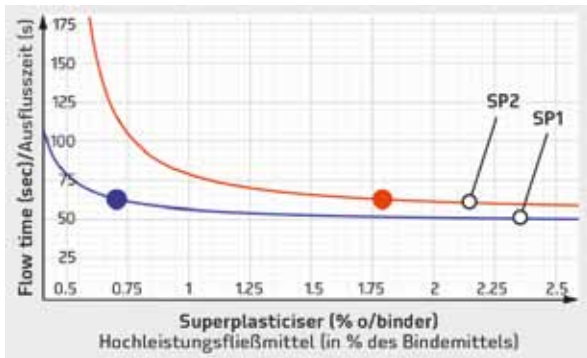


Figure: Norm./Standard EN 445

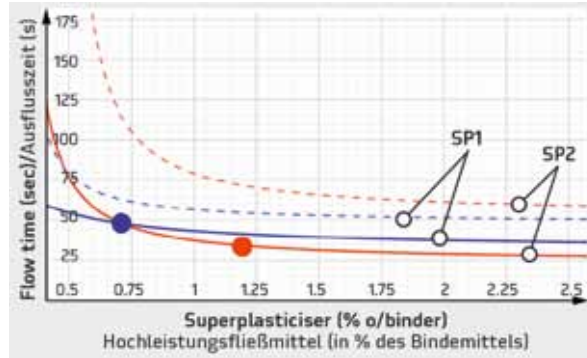


Figure: Norm./Standard EN 445

3 Flow curves for reference grouts (100% cement)

Fließkurven für Referenzmörtel (100% Zement)

Values for the optimum dosages, x^* , obtained for SP1 and SP2 together with the corresponding 7-min flow time, $t(x^*)$, are shown in [Table 4](#).

4 Results and discussion

4.1 Effect of SP1 and SP2 on 100% cement grouts

[Figure 3](#) shows the flow curves obtained for the reference grouts (solids content is 100% cement) using SP1 and SP2. It is observed that the asymptotic time is very similar for both admixtures (a is 48 seconds for SP1 and 53 seconds for SP2), and therefore their ideal, maximum performance on cement grouts would be very similar. However, the shape of these curves clearly shows that SP1 is more efficient than SP2, because flow times for a certain SP dosage are lower for SP1 than for SP2. Furthermore the saturation point of SP1 corresponds to a lower dosage than that of SP2, and therefore the optimum performance is achieved in a more cost-effective way for SP1 than for SP2.

4.2 Effect of limestone powder (LSP)

It has been previously found that the use of LSP at contents higher than 20% improves the dispersion of all solid particles and enhances compatibility between cement and SP [6]. The term ‚compatibility‘ refers to the interaction between a cementitious material and a superplasticiser: the more compatible they are, the more flowable is the resulting grout, or paste. When cement replacement materials or inert powders are used, the compatibility between cement and SP is likely to be modified.

The results herein reported are coherent with previous findings. [Figure 4](#) shows the flow curves obtained for grouts with 30% LSP and 70% cement (mass percentages), compared to those obtained for 100% cement grouts. It is observed that using LSP implies a general reduction of flow times.

This reduction is especially important when the superplasticizer used is SP2, which has been identified as the less performant. As a result, both superplasticisers are similarly performant for dosages above 0.75% over binder weight when 30% of the solids in the grout is replaced by LSP. Therefore, the addition of LSP is positive not only from the point of view of the grout fluidity but can also counterbalance a possible lack of efficiency of the superplasticiser.

4 Flow curves for grouts with 30% LSP

Fließkurven für Mörtel mit 30% Kalksteinmehl

die maximale Wirkung, die das Hochleistungsfließmittel auf einen Mörtel mit einer bestimmten Zusammensetzung haben kann. Die Parameter b und c definieren die Kurvenform.

3.2 Definition der optimalen Dosierung des Hochleistungsfließmittels

Der Sättigungspunkt beziehungsweise die optimale Dosierung eines Hochleistungsfließmittels ist der Punkt, nach dessen Überschreitung die Zugabe weiterer Fließmittelmengen keine Vorteile mehr mit sich bringt [9]. Dieser Punkt wird oft durch Sichtprüfung bestimmt, und je nach Anstieg der Fließkurve gibt es mehrere Definitionen [7]. Im vorliegenden Beitrag wird jedoch eine explizitere Definition des Sättigungspunktes dargestellt. Diese neue Definition beruht auf der Wirksamkeit der Steigerung der Fließmittel-Zugabemengen. Nach der Anpassung der Fließkurve $t(x)$ an die Versuchsergebnisse ist der Sättigungspunkt oder die optimale Fließmitteldosierung x^* definiert als der Punkt, nach dem bei Zugabe von 1 Gew.-% (Bindemittel) Hochleistungsfließmittel keine Zeitverkürzung um über 10 Sekunden mehr möglich ist. Dieses Kriterium ist in [Abbildung 2](#) dargestellt. Der entsprechende Wert lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$t(x^*+1) - t(x^*) = 10 \text{ sec}$$

[Tabelle 4](#) enthält Werte für die für SP1 und SP2 ermittelten optimalen Dosierungen x^* sowie die entsprechenden 7-Minuten-Ausflusszeiten $t(x^*)$.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Einfluss von SP1 und SP2 auf Mörtel mit 100% Zement

In [Abbildung 3](#) sind die für die Referenzmörtel (Feststoffanteil 100% Zement) bei Einsatz von SP1 und SP2 ermittelten Fließkurven dargestellt. Dabei ist festzustellen, dass die asymptotische Zeit für beide Zusätze sehr ähnlich ausfällt (a liegt für SP1 bei 48 und für SP2 bei 53 s). Aus diesem Grund lägen ihre idealen (maximalen) Leistungsparameter in Zementmörteln auf sehr ähnlichem Niveau. Dennoch zeigt die Form dieser Kurven eindeutig, dass SP1 eine höhere Wirksamkeit als SP2 aufweist, da die Ausflusszeiten bei einer bestimmten Fließmitteldosierung für SP1 kürzer als für SP2 sind. Darüber hinaus entspricht

This is due to the fact that limestone powders complement the deficiency in fine particles of the cement, enhancing stability of fresh grout and playing a lubricating role between the relatively coarser cement grains [4].

4.3 Effect of GGBS

Figure 5 shows the flow curves obtained for grouts with GGBS contents of 25% and 50%, (mass percentages) compared to those obtained for 100% cement grouts.

It is observed that replacing cement with GGBS has a negative impact on grout flowability, implying a general increase of flow times, especially when the superplasticizer used is SP2, which has been identified as the less performant.

In this case, it is clear that the replacement of cement with GGBS causes a severe loss of compatibility between cement and superplasticizer SP2.

There are several aspects that can explain the negative impact of GGBS on flow times reported here. First, the flaky shape of GGBS particles might be increasing the friction close to the cone orifice when the grout is flowing out of the Marsh cone. Second, it is possible that differences between SP1 and SP2 include the fact that some fraction of SP2 is adsorbed onto the GGBS particles while this does not happens with SP1. This could be a consequence of the different chemical composition of SP1 and SP2 and needs to be further explored, for instance by looking for possible changes in the zeta potential [10]. And finally, having only 50% of cement in the grout increases the average interparticle distance between cement particles and SP molecules. All these aspects may be at operation together.

4.4 Interaction between LSP and GGBS

Following the results presented in the previous sections it can be concluded that the use of LSP implies a gen-

der Sättigungspunkt von SP1 einer niedrigeren Dosierung als der von SP2. Daher erreicht SP1 seine optimale Leistungsfähigkeit auf kostengünstigere Weise als SP2.

4.2 Einfluss von Kalksteinmehl

Es wurde bereits nachgewiesen, dass die Zugabe von Kalksteinmehl in Anteilen von mehr als 20% zu einer besseren Verteilung der Feststoffpartikel führt und die Kompatibilität zwischen Zement und Hochleistungsfließmittel vorteilhaft beeinflusst [6]. Der Begriff der „Kompatibilität“ bezieht sich auf die Interaktion zwischen einem zementgebundenen Material und einem Hochleistungsfließmittel: Je größer ihre Kompatibilität, desto fließfähiger ist der daraus resultierende Mörtel oder Zementleim. Bei Einsatz von Zementsubstituten oder inerten Mehlkornkomponenten besteht die Wahrscheinlichkeit einer Modifikation der Kompatibilität zwischen Zement und Fließmittel.

Die in dem vorliegenden Beitrag veröffentlichten Ergebnisse stimmen mit früheren Forschungsergebnissen überein. Abbildung 4 zeigt die für Mörtel mit 30% Kalksteinmehl und 70% Zement (in Gew.-%) ermittelten Fließkurven im Vergleich zu den Fließkurven für Mörtel mit 100% Zement. Dabei ist festzustellen, dass die Zugabe von Kalksteinmehl zu einer allgemeinen Verkürzung der Ausflusszeiten führt.

Diese Reduktion ist von besonderer Bedeutung, wenn das Hochleistungsfließmittel SP2 eingesetzt wird, das als weniger leistungsfähig eingestuft wurde. Somit zeigen sich für beide Fließmittel bei Dosierungen über 0,75 Gew.-% des Bindemittels ähnliche Leistungsparameter, wenn 30% der im Mörtel enthaltenen Feststoffe durch Kalksteinmehl substituiert werden. Aus diesem Grund hat die Zugabe von Kalksteinmehl nicht nur im Hinblick auf die Fließfähigkeit des Mörtels einen positiven Einfluss, sondern kann auch eine möglicherweise geringere Wirksamkeit des Hochleistungsfließmittels ausgleichen.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass Kalksteinmehle den fehlenden Feinkornanteil im Zement ergänzen. Damit verbessern sie die Stabilität des Frischmörtels und fungieren als „Schmierstoff“ zwischen den vergleichsweise groben Zementpartikeln [4].

4.3 Einfluss von Hochofenschlacke

Abbildung 5 zeigt die für Mörtel mit 25% und 50% Hochofenschlacke (in Gew.-%) ermittelten Fließkurven im Vergleich zu den Fließkurven für Mörtel mit 100% Zement.

Dabei ist festzustellen, dass die Substitution von Zement durch Hochofenschlacke die Fließfähigkeit des Mörtels negativ beeinflusst und eine allgemeine Verlängerung der Ausflusszeiten bewirkt. Dies gilt insbesondere bei Zugabe des Hochleistungsfließmittels SP2, das als weniger leistungsfähig eingestuft wurde.

In diesem Fall ist eindeutig erkennbar, dass die Substitution von Zement durch Hochofenschlacke zu einer erheblichen Reduzierung der Kompatibilität zwischen dem Zement und dem Hochleistungsfließmittel SP2 führt.

Die hier dargestellte nachteilige Wirkung der Zugabe von Hochofenschlacke auf die Ausflusszeiten lässt sich durch mehrere Faktoren erklären. Zunächst könnte es beim Herausfließen des Mörtels aus dem Marsh-Konus aufgrund der schuppigen Form der Schlackepartikel zu

5

Flow curves for grouts with 25% and 50% GGBS

Fließkurven für Mörtel mit 25% und 50% Hochofenschlacke

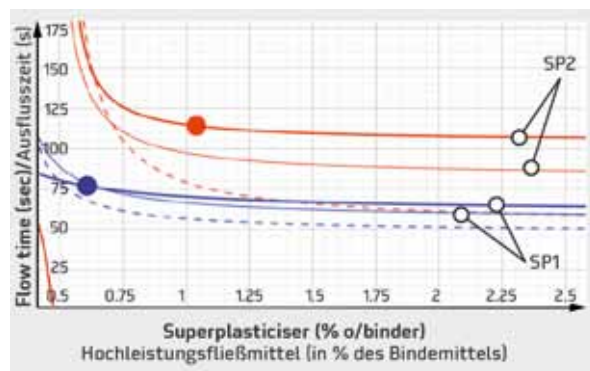


Figure: Norm/Standard EN 445

6

Flow curves for grouts with 30% LSP and 35% GGBS

Fließkurven für Mörtel mit 30% Kalksteinmehl und 35% Hochofenschlacke

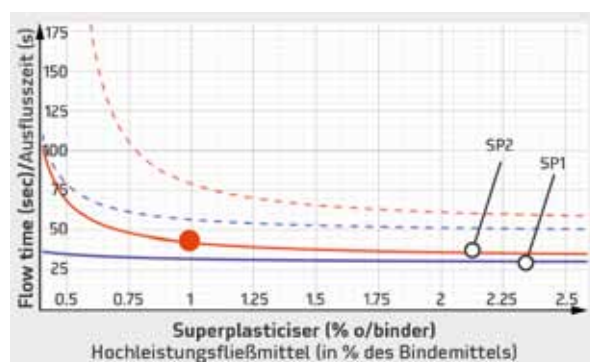


Figure: Norm/Standard EN 445

eral reduction of flow times, while the use of GGBS has proved to have a contrary effect. Therefore, it would be reasonable to expect that these effects are somehow counterbalanced when both mineral admixtures are used simultaneously.

However, this is not the case. Flow curves obtained for grouts when both filler limestone and GGBS are used together with cement (35% cement, 35% GGBS and 30% LSP, mass percentages) are shown in Figure 6. It can be observed that a general reduction in flow times is achieved when both mineral additions are used, regardless of the SP used.

This behaviour is the consequence of many causes operating simultaneously, mainly: a) the particle size distribution of the blend of these two powders is more continuous than their individual ones; b) when both of them are used, only 35% of grout solids is cement; c) the circumstances concerning solubility of different ions in the cement solution and the adsorptivity of SP are modified.

Therefore, it can be concluded that the effect of these mineral additions on flow times is not simple: they not only interact with the cement and superplasticiser but also between themselves. This interaction has turned out to be advantageous for the flowability of the grout. However, the problem is not trivial and cannot be generalised, since there are many different cases that can be found in previous papers and reports [5]. It is therefore of paramount importance to carry out preliminary tests to study the compatibility between mineral admixtures and superplasticiser rather than relying in general assumptions.

5 Superplasticizer performance related to mineral additions contents

5.1 Optimum superplasticizer dosage

The relationship between the optimum superplasticizer dosage (saturation point), the type of SP, and the percentages of LSP and GGBS over solids content has been modelled by means of multiple linear regression. A highly accurate model (R-squared 91.6%) has been found for the SP saturation point. This is used to estimate the optimum dosage of either SP1 or SP2 in different scenarios as long as they fall within the ranges tested (LSP percentages between 0% and 30%, and GGBS percentages between 0% and 50%).

Figure 7 shows the response surfaces obtained with this model. It can be observed that, in average, the saturation point for SP2 is twice as much as for SP1, in other words: SP1 is twice as efficient as SP2, in average. In average, using 30% of limestone filler causes an average reduction of 30% in the saturation point, and the use of GGBS causes an average reduction of 40%.

This is remarkable from the point of view of the superplasticisers cost-effectiveness. If both SP1 and SP2 have a similar cost per unit volume, choosing SP1 implies a reduction in superplasticizer consumption costs up to 50% at optimum dosage, and the use of LSP makes it possible to further reduce costs without compromising performance as long as the cost generated by consuming LSP is not greater than the cost reduction in

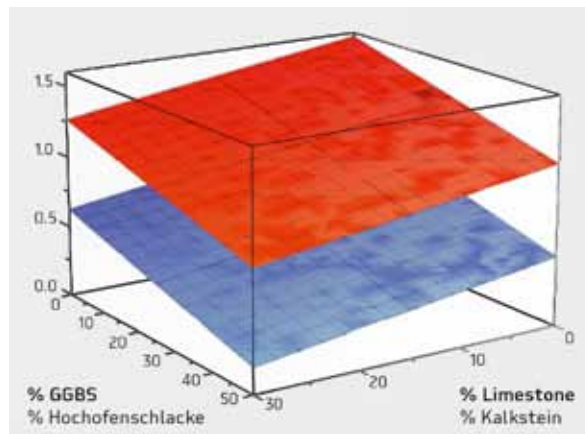


Figure: Norm/Standard EN 445

7 Saturation point for SP1 (blue) and SP2 (red) related to LSP and GGBS contents

Sättigungspunkt für SP1 (blau) und SP2 (rot) in Abhängigkeit von den Kalksteinmehl- und Hochofenschlackeanteilen

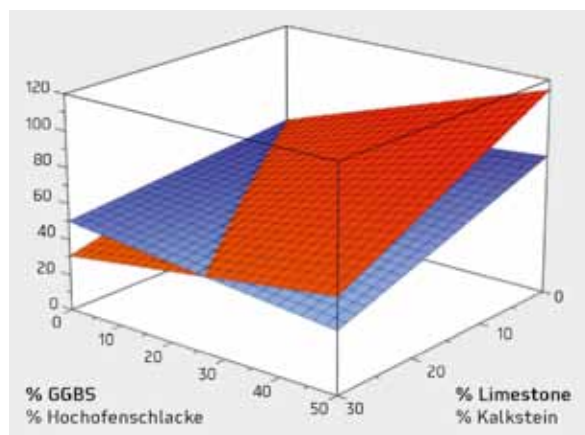


Figure: Norm/Standard EN 445

8 Flow times at optimum dosage of SP1 and SP2 related to LSP and GGBS contents

Ausflusszeiten bei optimaler Dosierung von SP1 und SP2 in Abhängigkeit von den Kalksteinmehl- und Hochofenschlackeanteilen

einer erhöhten Reibung nahe der Konusöffnung kommen. Zudem könnten sich Unterschiede zwischen SP1 und SP2 auch darin zeigen, dass sich eine gewisse Fraktion des SP2 an die Schlackepartikel anlagert, während dies bei Zugabe von SP1 nicht der Fall ist. Dieses Phänomen könnte sich aus den unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen von SP1 und SP2 ergeben. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich, beispielsweise die Ermittlung möglicher Änderungen des Zeta-Potenzials [10]. Schließlich führt ein Zementanteil von nur 50% im Mörtel zu einer Vergrößerung des durchschnittlichen Partikelabstands zwischen den Zementteilchen und den Fließmittelmolekülen. Alle genannten Faktoren könnten hier auch zusammenwirken.

4.4 Interaktion zwischen Kalksteinmehl und Hochofenschlacke

Aus den den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Ergebnissen kann gefolgert werden, dass der Einsatz von Kalksteinmehl zu einer allgemeinen Verkürzung der Ausflusszeiten führt, während die Zugabe von Hochofenschlacke einen nachweislich gegenteiligen Einfluss hat. Daher wäre die Annahme plausibel, dass diese Wirkungen in gewissem Umfang kompensiert werden, wenn beide mineralischen Zusätze gleichzeitig zugegeben werden.

Dies ist jedoch nicht der Fall. Die für die Mörtel ermittelten Fließkurven bei gleichzeitiger Zugabe von Kalksteinmehl und Hochofenschlacke in Verbindung mit Zement (35% Zement, 35% Schlacke und 30% Kalksteinmehl; in Gew.-%) sind in Abbildung 6 dargestellt. Danach ergibt sich bei gleichzeitiger Zugabe

Flow times for different SP1 and GGBS contents with or without LSP

Ausflusszeiten für unterschiedliche Gehalte an SP1 und Hochofenschlacke mit und ohne Kalksteinmehl

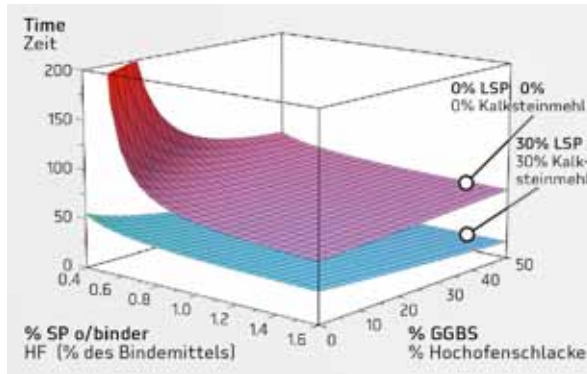


Figure: Norm/Standard EN 445

Flow times for different SP2 and GGBS contents with or without LSP

Ausflusszeiten für unterschiedliche Gehalte an SP2 und Hochofenschlacke mit und ohne Kalksteinmehl

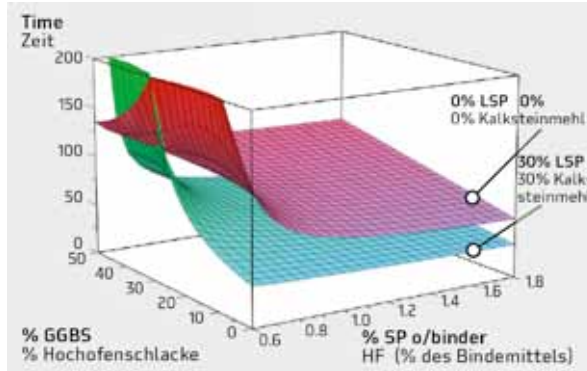


Figure: Norm/Standard EN 445

SP consumption. On these grounds, economic optimisation for grouts and, by extension, for self compacting concrete is possible.



Emilio García-Taengua

Research Fellow an der Queen's University of Belfast (GB). Als ausgebildeter Bauingenieur verfügt er über einen MSc(MEng)-Abschluss im Bauingenieurwesen, den er an der Universität Politècnica de València (UPV) in Spanien erworben hat. Dort schloss er auch seine Doktorarbeit ab. Darüber hinaus konzentriert er sich auf die Datenanalyse und verfügt über einen MSc-Abschluss in Angewandter Statistik.

Er war über sieben Jahre an der UPV tätig, unter anderem als

Dozent für Baustoffe. Seine Forschungsschwerpunkte sind selbstverdichtende und faserbewehrte Betone sowie Betone mit Recyclingkörnung für konstruktive Anwendungen. (e.garcia-taengua@qub.ac.uk)



Mohammed Sonebi

Dozent an der Queen's University of Belfast (GB). Er erwarb seinen MSc-Abschluss und Doktorgrad im Bauingenieurwesen an der University of Sherbrooke in Kanada. Dr. Sonebi ist stellvertretender Vorsitzender des ACI-Ausschusses 552 und Mitglied mehrerer Technischer Ausschüsse innerhalb der ACI, RILEM, ASTM, FIB und Concrete Society (GB).

Seine Branchenerfahrung umfasst unter anderem eine Position als F+E-Manager und Assistent des Technischen Direktors

bei RMC in den Vereinigten Arabischen Emiraten (2004-2005). Er war Mitglied von Organisationsgremien und wissenschaftlichen Beiräten mehrerer internationaler Konferenzen. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören selbstverdichtender Beton, das Fließverhalten zementgebundener Werkstoffe und die Dauerhaftigkeit von Beton. (m.sonebi@qub.ac.uk)

beider mineralischer Zusätze unabhängig vom eingesetzten Hochleistungsfließmittel eine allgemeine Verkürzung der Ausflusszeiten.

Dieses Verhalten ist auf zahlreiche, parallel wirkende Ursachen zurückzuführen, vor allem auf folgende Faktoren: a) das Gemisch aus beiden Mehlkornkomponenten weist im Vergleich zu den Sieblinien der Einzelstoffe eine gleichmäßigere Korngrößenverteilung auf; b) bei Zugabe beider mineralischer Zusätze beträgt der Zementanteil an den Feststoffen im Mörtel lediglich 35%; c) es kommt zu einer Veränderung der Bedingungen für die Löslichkeit verschiedener Ionen in der Zementlösung und für das Adsorptionsvermögen des Fließmittels.

Daraus kann gefolgert werden, dass der Einfluss der genannten mineralischen Zusätze auf die Ausflusszeiten komplex ist: Die Zusatzstoffe interagieren nicht nur mit dem Zement und dem Hochleistungsfließmittel, sondern auch untereinander. Diese Interaktion hat sich als vorteilhaft für die Fließfähigkeit des Mörtels erwiesen. Das hier dargestellte Problem ist jedoch nicht trivial und lässt keine Verallgemeinerungen zu, da in früheren Veröffentlichungen und Berichten viele unterschiedliche Fälle beschrieben wurden [5]. Aus diesem Grund ist die Durchführung erster Untersuchungen zur Kompatibilität zwischen mineralischen Zusatzstoffen und Hochleistungsfließmitteln von entscheidender Bedeutung, da die Zugrundelegung allgemeiner Annahmen nicht zielführend ist.

5 Leistungsprofil der Hochleistungsfließmittel in Abhängigkeit des Anteils mineralischer Zusatzstoffe

5.1 Optimale Dosierung des Hochleistungsfließmittels

Der Zusammenhang zwischen der optimalen Fließmitteldosierung (Sättigungspunkt), der Art des Hochleistungsfließmittels und den Anteilen des Kalksteinmehls und der Hochofenschlacke am Gesamt-Feststoffgehalt wurde mittels multipler linearer Regression modelliert. Für den Sättigungspunkt des Fließmittels wurde ein hochgenaues Modell ermittelt (R-Quadrat 91,6%). Dieses Modell dient zur Abschätzung der optimalen Dosierung von SP1 oder SP2 für verschiedene Szenarien innerhalb der untersuchten Bandbreiten (Kalksteinmehlanteile zwischen 0 und 30%, Schlackeanteile zwischen 0 und 50%).

Abbildung 7 zeigt die mit diesem Modell ermittelten Wirkungsflächen. Im Durchschnitt liegt der Sättigungspunkt für SP2 doppelt so hoch wie für SP1. Anders ausgedrückt ist SP1 durchschnittlich doppelt so wirksam wie SP2. Die Zugabe von 30% Kalksteinmehl führt durchschnittlich zu einer Reduktion des Sättigungspunktes um 30%, während der Einsatz von Hochofenschlacke zu einer Verringerung um 40% führt.

Dieses Ergebnis ist mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit der Hochleistungsfließmittel bedeutsam. Bei für SP1 und SP2 ermittelten ähnlichen Kosten pro Volumeneinheit führt die Wahl von SP1 zu einer Senkung der Fließmittelverbrauchs-kosten um bis zu 50% bei optimaler Dosierung, und die Zugabe von Kalksteinmehl ermöglicht eine weitere Kostensenkung ohne nachteilige Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit, solange die Kosten des Verbrauchs an Kalksteinmehl nicht höher liegen als die Reduzierung der Kosten des Fließmitteleinsatzes. Auf dieser Grundlage

5.2 Flow curves and optimum flow times

The flow time corresponding to the SP saturation point stands for the maximum level of performance aimed at, because it is not reasonable to use higher SP dosages. It has been related to the type of superplasticiser and the percentages of LSP and GGBS over solids content (R-squared 99.3%). The relationship found is shown in **Figure 8**. Some particular aspects have to be highlighted.

The first important aspect is that the type of superplasticiser modifies the effect of mineral admixtures on flow time. The favourable effect of LSP on flow time is always significant, but specially when SP2 is used. Since this has been identified as the least performant SP in this research, it can be concluded that LSP introduces compatibility in the cement-SP system.

The use of GGBS up to 50% introduces no significant differences with respect to the 100% cement grout when SP1 is used, which has turned out to be highly compatible with cement. On the contrary, if SP2 is used, a replacement of 50% cement with GGBS implies that the flow time at the optimum SP dosage is twofold increased.

The methodology described in this report has a lot of potential as a tool to describe the interaction between superplasticizer and mineral additions, as can be observed in **Figures 9** and **10**. In these figures response surfaces are plotted as a generalization of the flow curves. Each response surface makes it possible to estimate the flow time to be obtained in the Marsh cone test (and hence grout flowability) for any SP dosage and mineral additions contents. **Fig. 9** shows these response surfaces for SP1, and **Fig. 10** corresponds to SP2. Similar surfaces can be obtained for any superplasticizer or mineral additions, and are a highly visual tool for inspection of the compatibility between them, compressing a lot of useful information that can be used to estimate flowability of cement grouts in different scenarios.

The interaction between LSP and GGBS contents has a significant effect on flow time. It can be seen that, when the grout solids are 30% LSP, the GGBS content has no significant effect on flow times. On the contrary, when the grout is produced without limestone filler, increasing GGBS content clearly increases flow times at optimum superplasticizer dosage. This reinforces the idea that the use of limestone filler at 30% introduces compatibility in the cement-admixture system.

6 Conclusions

The compatibility between rapid cement, two mineral additions (LSP and GGBS) and two SPs (SP1 and SP2) has been studied in grouts using the Marsh cone.

An exponential expression to analytically define the flow curves obtained from the Marsh cone has been proposed.

A new definition based on SP efficiency has been proposed for the saturation point or optimum SP dosage. The ideal, maximum performance of SP1 and SP2 is

lassen sich Mörtel und damit auch selbstverdichtende Betone unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit optimieren.

5.2 Fließkurven und optimale Ausflusszeiten

Die dem Sättigungspunkt des Hochleistungsfließmittels entsprechende Fließkurve stellt das angestrebte Leistungsmaximum dar, da die Fließmittelzugabe in höherer Dosierung nicht angemessen ist. Diese Zeit wurde zur Art des Fließmittels und zu den Anteilen von Kalksteinmehl und Hochofenschlacke am Gesamt-Feststoffgehalt in Beziehung gesetzt (R-Quadrat 99,3%). **Abbildung 8** zeigt den sich daraus ergebenden Zusammenhang. Einige Aspekte verdienen dabei besondere Betrachtung:

Zunächst ist die Feststellung bedeutsam, dass die Art des verwendeten Hochleistungsfließmittels die Wirkung der mineralischen Zusatzstoffe auf die Fließzeit modifiziert. Der günstige Einfluss von Kalksteinmehl auf die Ausflusszeit ist in allen Fällen signifikant, dies gilt jedoch insbesondere für die Zugabe von SP2. Da im Rahmen der Studie für dieses Fließmittel die geringste Leistungsfähigkeit festgestellt wurde, kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass durch Zugabe von Kalksteinmehl eine höhere Kompatibilität des Systems aus Zement und Hochleistungsfließmittel hergestellt werden kann.

Der Einsatz von Hochofenschlacke bis zu einem Anteil



Su Taylor

Professorin für Tragwerksplanung an der Queen's University of Belfast. Sie studierte Bauingenieurwesen (Tragwerksplanung) an der University of Bath und ist Chartered Engineer. Bei der Einwerbung von Forschungsmitteln vom Engineering and Physical Sciences Research Council, dem Technology Strategy Board, dem Verkehrsministerium sowie der britischen Partnerschaft für Wissenstransfer kann sie eine hervorragende Bilanz vorweisen.

Zu ihren Forschungsfeldern gehören Technologien zur intelligenten Messung, leistungsfähige Betone und Verbundwerkstoffe, die Entwicklung von Niedrigenergie-Materialien, die Überwachung von Beton- und Holzbauwerken hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowie die Baustatik. (S.E.Taylor@qub.ac.uk)



Liberato Ferrara

Dr., Assistenzprofessor für Statik und Tragwerksplanung am Politecnico di Milano in Italien. Zuvor war er Fulbright-Gaststipendiat an der ACBM, Northwestern University; seit 2008 ist er zudem Gastdozent an der Jiaotong-Universität in Beijing. Er ist Vorsitzender des Technischen Ausschusses 544-C der ACI (Prüfung von faserbewehrtem Beton) und Mitglied in weiteren Ausschüssen innerhalb der ACI, RILEM und FIB. In Kooperation mit anderen Forschungseinrichtungen und Bauunternehmen

leitete er mehrere Forschungsvorhaben. Er war Mitglied der Organisationsgremien und wissenschaftlichen Beiräte mehrerer internationaler Konferenzen zu faserbewehrtem und selbstverdichtendem Beton. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen faserbewehrte zementgebundene Verbundwerkstoffe, selbstverdichtenden Beton, die computergestützte Modellierung des Verhaltens von Beton, die zerstörungsfreie Überwachung der Faserverteilung, die Bruch- und Schadensmechanik quasi-spröder Werkstoffe sowie Konstruktionen und Bauwerke aus Betonfertigteilen. (liberato.ferrara@polimi.it)



Peter Deegan

MEng-Abschluss im Bauingenieurwesen an der NUI Galway. Er ist Technischer Direktor der Banagher Precast Concrete Ltd und verfügt über mehr als 20 Jahre Erfahrung in der Betontechnologie, insbesondere in den Bereichen Hochleistungsbeton, Spannbetonsysteme und qualitativ hochwertige Oberflächenbehandlung von Fertigteilen. Er ist derzeit Vorsitzender der Irish Concrete Society und Mitglied des britischen Institute of Concrete Technology.

(peterd@bancrete.com)



Andrea Pattarini

Wirtschaftsingenieur mit Abschluss an der Universität Parma sowie MBA-Absolvent an der SDA Bocconi, Mailand, und Chicago Booth, University of Chicago. Er arbeitete vorwiegend im Finanz- und Beratungsbereich in Mailand, London und seiner Heimatstadt Mantua. Derzeit ist er für Azichem tätig, ein in Mantua ansässiges Unternehmen, das sich auf die Entwicklung, Fertigung und Distribution von Sondererzeugnissen und -technologien für die Bauindustrie spezialisiert hat und dabei

den Wohnungs-, Wirtschafts- und Verkehrswegebau sowie die historische Bausubstanz abdeckt. Bei Azichem ist er zuständig für den Geschäftsbereich Fasern und die Entwicklung internationaler Märkte. (a.pattarini@azichem.it)

similar. However, SP1 is more efficient and more compatible than SP2 with the mineral additions considered.

Adding LSP is beneficial: it not only improves flowability but also counterbalances a possible lack of SP efficiency.

Replacing cement with GGBS has a negative impact on flowability, implying a general increase of flow times, especially when SP2 is used.

The addition of 30% LSP together with 35% GGBS has been proved to be a far better option than adding only GGBS, regardless of the SP used.

The effect of mineral additions like LSP and GGBS on grout flowability is not simple: they not only interact with the cement and SP but also between themselves.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been made possible by the funding received from the European Union, as part of the FP7-PEOPLE-2012-IAPP project „EuroCrete: Development of sustainable, lower carbon, pre-cast concrete infrastructure“. The authors wish to thank their industrial partners as well: Banagher Precast Concrete (Ireland) and Azichem (Italy).

von 50% führt bei Zugabe von SP1 (das sich als hochkompatibel zu Zement erwiesen hat) im Vergleich zum Mörtel mit 100% Zement zu keinen wesentlichen Unterschieden. Dagegen führt die Substitution von 50% Zement durch Hochofenschlacke bei Zugabe von SP2 und optimaler Fließmitteldosierung zu einer Verdoppelung der Ausflusszeit.

Die im vorliegenden Beitrag beschriebene Methodik bietet ein hohes Potenzial als Instrument zur Beschreibung der Interaktion zwischen Hochleistungsfließmitteln und mineralischen Zusätzen (wie in den **Abbildungen 9** und **10** dargestellt). In diesen Diagrammen sind die Wirkungsflächen als Verallgemeinerungen der Fließkurven gekennzeichnet. Mit der jeweiligen Wirkungsfläche lässt sich die im Marsh-Konus-Versuch zu ermittelnde Ausflusszeit (und damit die Fließfähigkeit des Mörtels) für beliebige Fließmitteldosierungen und Anteile an mineralischen Zusätzen abschätzen. **Abbildung 9** zeigt diese Wirkungsflächen für SP1, **Abbildung 10** gilt für SP2. Ähnliche Flächen lassen sich für beliebige Hochleistungsfließmittel und mineralische Zusatzstoffe ermitteln. Diese dienen als Visualisierungswerkzeug zur Untersuchung der Kompatibilität zwischen diesen Stoffen und enthalten eine große Menge an nützlichen Informationen, die zur Abschätzung der Fließfähigkeit von Zementmörteln in unterschiedlichen Szenarien herangezogen werden können.

Die Interaktion zwischen den Kalksteinmehl- und Hochofenschlackegehalten hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausflusszeit. Anzumerken ist, dass der Schlackeanteil bei einem Anteil von 30% Kalksteinmehl am Feststoffgehalt des Mörtels keine signifikanten Auswirkungen auf die Ausflusszeiten hat. Im Gegensatz dazu führt eine Erhöhung des Schlackeanteils bei Herstellung des Mörtels ohne Kalksteinmehl und optimaler Dosierung des Hochleistungsfließmittels zu einer deutlichen Verlängerung der Ausflusszeiten. Dieses Ergebnis stützt die These, dass die Zugabe von Kalksteinmehl in einem Anteil von 30% zu einer Verbesserung der Kompatibilität innerhalb des Zement-Zusatzstoff-Systems führt.

6 Fazit

Die Kompatibilität zwischen Blitzzement, zwei mineralischen Zusätzen (Kalksteinmehl und Hochofenschlacke) und zwei Hochleistungsfließmitteln (SP1 und SP2) wurde für verschiedene Mörtel unter Anwendung des Marsh-Konus-Versuchs untersucht.

Es wurde eine Exponentialgleichung zur analytischen Definition der aus dem Marsh-Konus-Versuch abgeleiteten Fließkurven vorgeschlagen.

Zudem wurde für den Sättigungspunkt beziehungsweise die optimale Fließmitteldosierung eine neue Definition auf Grundlage der Wirksamkeit des Fließmittels vorgeschlagen.

Die ideale (maximale) Leistungsfähigkeit von SP1 und SP2 liegt auf einem ähnlichen Niveau. Dennoch zeigt SP1 im Vergleich zu SP2 eine höhere Wirksamkeit und Kompatibilität mit den zugegebenen mineralischen Zusätzen.

Die Zugabe von Kalksteinmehl wirkt sich positiv aus, da hierdurch nicht nur die Fließfähigkeit verbessert, sondern auch eine möglicherweise fehlende Wirksamkeit des Fließmittels kompensiert wird.

REFERENCES/LITERATUR

- [1] Ferraris, C. F., Obta, K. H., and Hill, R. (2000). "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete." *Cement and Concrete Research*, 31, 245-255.
- [2] Burgos-Montes, O., Palacios, M., Rivilla, P., and Puertas, F. (2012). "Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions." *Construction and Building Materials*, 31, 300-309
- [3] Nehdi, M., and Mindess, S. (1996). "Optimization of high strength limestone filler cement mortars." *Cement and Concrete Research*, 26(6), 883-893.
- [4] Nehdi, M. (2000). "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials." *Cement and Concrete Research*, 30, 1663-1669
- [5] Sonebi, M. (2001). "Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater composite cement grouts." *Cement and Concrete Research*, 31, 1553-1560.
- [6] Jolicoeur, C., and Simard, M. A. (1998). "Chemical Admixture-Cement Interactions: Phenomenology and Physico-chemical Concepts." *Cement and Concrete Composites*, 20, 87-101
- [7] Agulló, L., Toralles-Carbonari, B., Gettu, R., and Aguado, A. (1999). "Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer - A study based on the Marsh cone test." *Materials and Structures*, 32, 479-485
- [8] Bapat, J.D. (2012), *Mineral Admixtures in Cement and Concrete*, ed. by CRC Press, 310 pp.
- [9] Neville, A.M. (2011), *Properties of Concrete* (5th edition), ed. by Pearson, 846 pp.
- [10] Plank, J., and Hirsch, C. (2007). "Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption." *Cement and Concrete Research*, 37(4), 537-542

Die Substitution von Zement durch Hochofenschlacke beeinflusst die Fließfähigkeit negativ und führt zu einer allgemeinen Verlängerung der Ausflusszeiten, insbesondere bei Zugabe von SP2.

Unabhängig vom eingesetzten Hochleistungsfließmittel hat sich die Zugabe von 30% Kalksteinmehl in Verbindung mit 35% Hochofenschlacke als weit bessere Option als die alleinige Hinzufügung von Hochofenschlacke erwiesen.

Der Einfluss von mineralischen Zusätzen wie Kalksteinmehl und Hochofenschlacke auf die Fließfähigkeit des Mörtels ist komplex: Die Zusatzstoffe interagieren nicht nur mit dem Zement und dem Fließmittel, sondern

DANKSAGUNG

Das im vorliegenden Beitrag dargestellte Forschungsvorhaben wurde ermöglicht durch die Finanzierung seitens der Europäischen Union im Rahmen des Projekts FP7-PEOPLE-2012-IAPP „EuroCrete: Development of sustainable, lower carbon, pre-cast concrete infrastructure“. Die Verfasser sprechen darüber hinaus folgenden Partnerunternehmen aus der Industrie ihren Dank aus: Banagher Precast Concrete (Irland) und Azichem (Italien).

auch untereinander.