

## **KURZBERICHT**

**F 960**

### **Gemeinsame Verwendung von Flugasche und Hüttensand als Zusatzstoff im Beton**

**Aktenzeichen: Z6-10.08.18.7-07.40/ II 2 – F20-07-038**

Forschungsstelle: Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen  
Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber  
Sachbearbeiterin: Dipl.-Ing. Julia Steinhoff

Förderhinweis:

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

## **1 ZIEL DER FORSCHUNGSAUFGABE**

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten grundlegende Untersuchungen zu der gemeinsamen Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl im Beton durchgeführt werden. Es sollte nachgewiesen werden, dass Betone, die bei gemeinsamer Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff hergestellt werden, die Normanforderungen nach DIN EN 1045-2 und DIN EN 206-1 /DIN08, DIN05b/ sicher erfüllen bzw. vergleichbare Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen wie Betone, die unter Verwendung von Hochofenzement und Flugasche hergestellt werden. Des Weiteren sollten herstellbedingte Schwankungen der Eigenschaftskennwerte unterschiedlicher Produktionschargen der Betonausgangsstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt werden. Durch die zielgerichtete Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl ist eine höhere Baustoff- und somit Bauteilqualität zu erwarten. Hier sollte das Potential der Bindemitteloptimierung ausgelotet werden.

## **2 DURCHFÜHRUNG DER FORSCHUNGSAUFGABE**

Das Forschungsvorhaben gliederte sich in vier Projektphasen. In Projektphase 1 wurden diverse Ausgangsstoffe charakterisiert. In der zweiten Projektphase sollte der Nachweis erbracht werden, dass bei praxisnaher Zusammensetzung von Mörteln unter Verwendung von Zement, Flugasche und Hüttensandmehl vergleichbare Frisch- und Festmörteleigenschaften zu erzielen sind wie bei der Verwendung von Hochofenzement und Flugasche. Die Untersuchungen erfolgten an CEN-Normmörteln gemäß DIN EN 196-1:2005-05 /DIN05a/. Die Überprüfung der Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf den Betonmaßstab fand in der letzten Projektphase statt. Ein weiterer Schritt war die granulometrische Optimierung der Sieblinie im Feinbereich, um die tatsächlichen Potentiale von gezielter Kombination von Ausgangsstoffen mit unterschiedlichen Feinheiten vollständig auszuschöpfen.

Ein weiterer Schwerpunkt des Projektes war die Untersuchung von herstellbedingten Schwankungen der Eigenschaftskennwerte unterschiedlicher Produktionschargen der Betonausgangsstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Hierfür wurden innerhalb eines halben Jahres monatlich Proben der Ausgangsstoffe entnommen und damit Mörtel gleicher Zusammensetzung hergestellt und miteinander verglichen.

## **3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE**

In Projektphase 1 wurden zunächst verschiedene Ausgangsstoffe charakterisiert, von denen für die zweite Projektphase marktgängige Produkte ausgewählt wurden. Es wurden

ein CEM I 42,5 R, ein CEM II/B-S 32,5 R und ein CEM III/A 32,5 N sowie eine Flugasche mittlerer Feinheit und ein Hüttensandmehl der Mahlfeinheitsstufe 4000 cm<sup>2</sup>/g (Blaine) verwendet. Der ursprünglich vorgesehene Portlandzement CEM I 32,5 R mit demselben Ausgangsklinker wie die restlichen Zemente wurde mit Zustimmung des Beratergremiums aus dem Programm gestrichen, da er nicht mehr produziert wird. Für die Mörteluntersuchungen in Projektphase 2 wurden die Mischungen so zusammengesetzt, dass sie zur Vergleichbarkeit gleiche Klinker- und Hüttensandmehlanteile aufwiesen (s. Tabelle 1, Spalte 7). So besteht zum Beispiel Mischung M X.1.4 aus 50 % CEM I und 50 % HSM und die entsprechende CEM II-Mischung aus 76,9 % CEM II/B-S und 23,1 % HSM.

**Tabelle 1:** Mischungszusammensetzungen der zu untersuchenden Mörtel (Projektphase 2)

Bezeichnung	Zementart	Bindemittelzusammensetzung			w/z <sub>eq</sub>	k/h <sub>ges</sub>		f/(z + h)
		z	h	f		Ziel	tats.	
-	-	M.-% vom Bindemittel			-	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	100	0	0	0,5	100/0	100/0	0
M X.1.1		75	0	25	0,59			0,33
M X.1.2		65	35	0	0,5	65/35	65/35	0
M X.1.3		48,75	26,25	25	0,59			0,33
M X.1.4		50	50	0	0,5	50/50	50/50	0
M X.1.5		37,5	37,5	25	0,59			0,33
M X.1.6		35	65	0	0,5	35/65	35/65	0
M X.1.7		26,25	48,75	25	0,59			0,33
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R h <sub>z</sub> = 30 M.-%	100	0	0	0,5	65/35	70/30	0
M X.2.1		75	0	25	0,59			0,33
M X.2.2		76,9	23,1	0	0,5	50/50	54/46	0
M X.2.3		57,7	17,3	25	0,59			0,33
M X.2.4		53,8	46,2	0	0,5	35/65	38/62	0
M X.2.5		40,35	34,65	25	0,59			0,33
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N h <sub>z</sub> = 50 M.-%	100	0	0	0,5	35/65	50/50	0
M X.3.1		75	0	25	0,59			0,33
M 1.2.6	CEM II/B-S 32,5 R h <sub>z</sub> = 30 M.-%	92,9	7,1	0	0,5	65/35	65/35	0
M 1.2.7		69,6	5,4	25	0,59			0,33
M 1.3.2	CEM III/A 32,5 N h <sub>z</sub> = 50 M.-%	70	30	0	0,5	35/65	35/65	0
M 1.3.3		52,5	22,5	25	0,59			0,33

z Zement

f Flugasche

k Klinker

h Hüttensandmehl

h<sub>z</sub> Hüttensandmehl im Zement

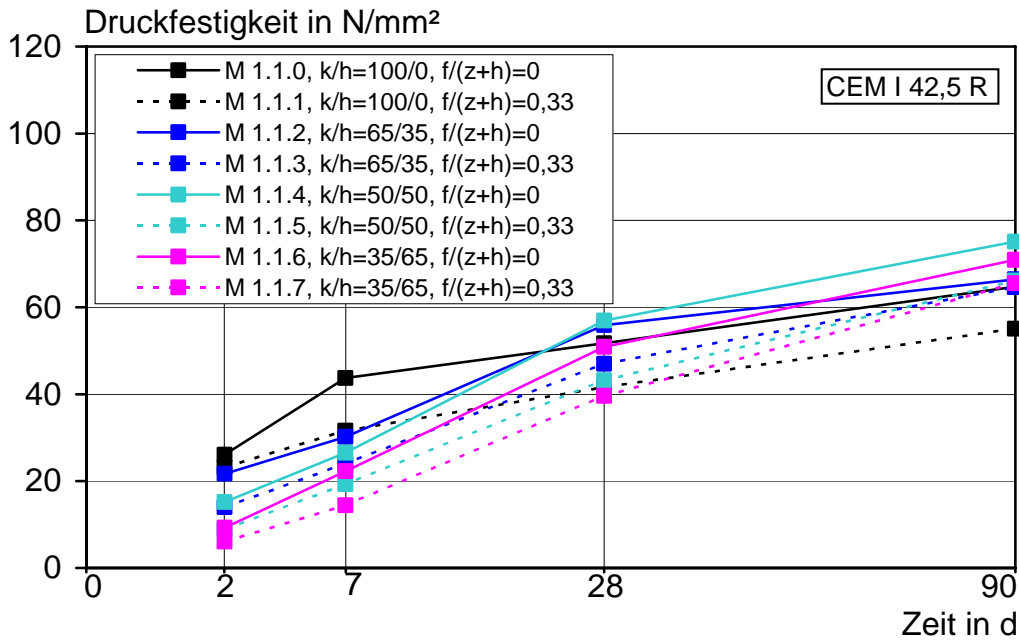
h<sub>ges</sub> = h + h<sub>z</sub>

w/z<sub>eq</sub> = w/(z+h+0,4·f)

Zur Erfassung der herstellbedingten Schwankungen wurden die Untersuchungen an jeweils 6 Chargen der Ausgangsstoffe durchgeführt. Insgesamt war eine hohe Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe festzustellen. Die Streuungen der Frisch- und Festmörteleigenschaften der einzelnen Chargen waren gering.

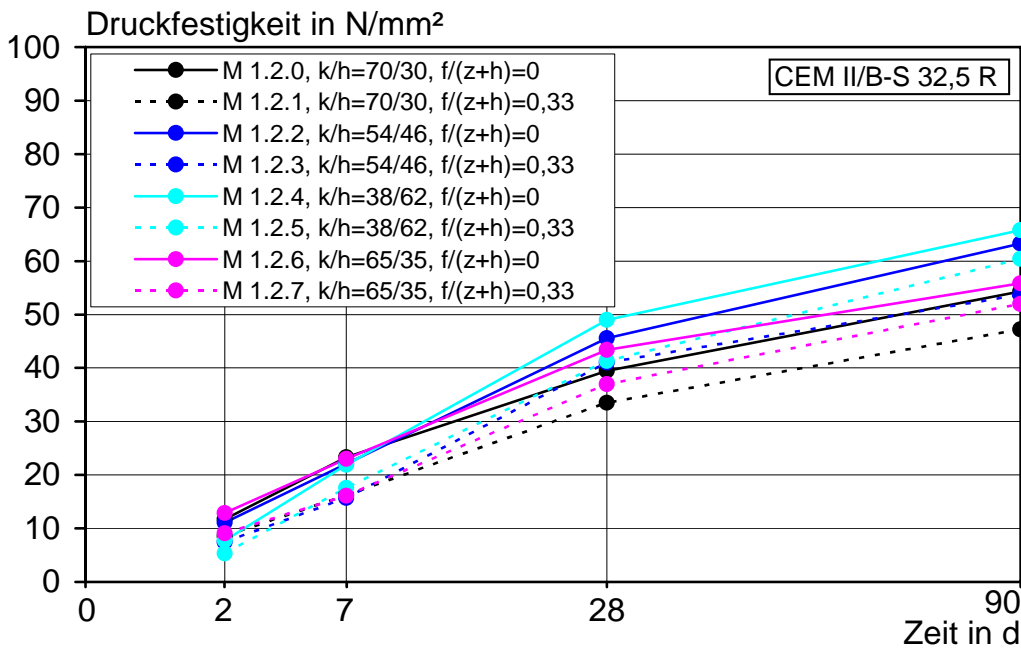
Da bei allen Chargen des CEM II/B-S statt 35 M.-% Hüttsandmehl nur rd. 30 M.-% enthalten war, wurde die Referenzmischung M X.2.0 für die erste Charge mit Zudosierung von Hüttsandmehl hergestellt, um einen Anteil von Klinker zu Hüttsandmehl von 65/35 zu erreichen (M 1.2.6). Im CEM III/A betrug der tatsächliche Anteil an Hüttsandmehl anstelle von 65 M.-% nur 50 M.-%. Auch hier wurde die Referenzmischung der ersten Charge unter Zugabe von Hüttsandmehl erneut hergestellt, um einen Anteil von Klinker zu Hüttsandmehl von 35/65 zu erreichen (M 1.3.2). Diese beiden Kombinationen von CEM II/B-S bzw. CEM III/A mit HSM wurden auch in Kombination mit Flugasche geprüft (M 1.2.7 und 1.3.3).

Der Nachweis, dass bei praxisnaher Zusammensetzung der Mörtel unter Verwendung von Zement, Flugasche und Hüttsandmehl vergleichbare Frisch- und Festmörteleigenschaften zu erzielen sind wie bei der Verwendung von Hochofenzement und Flugasche konnte teilweise erbracht werden. Die Frischmörteleigenschaften waren vergleichbar. Sie lagen im Bereich üblicher Normmörtel mit Ausbreitmaßen zwischen 200 und 240 mm, Luftgehalten zwischen 1,4 und 2,5 Vol.-% und Rohdichten zwischen 2,23 und 2,31 g/cm<sup>3</sup>. Bei den Festigkeiten traten unterschiedliche Effekte auf. Bei den Mischungen mit dem CEM I 42,5 R stellte sich heraus, dass nach 28 Tagen die Festigkeiten bei Verwendung des Hüttsandmehls höher als die der Referenzmischung waren (s. Bild 1). Die flugaschehaltigen Mischungen wiesen eine geringere Festigkeit auf als die Referenz, da die Flugasche voll angerechnet wurde.



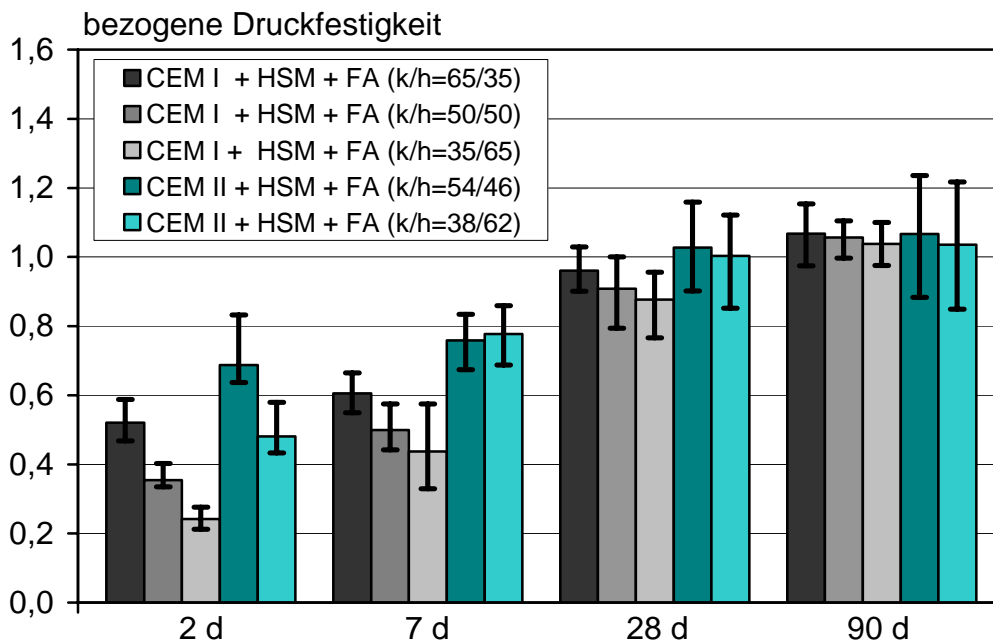
**Bild 1:** Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit CEM I der ersten Charge

Im Falle des CEM II/B-S 32,5 R wurde dagegen trotz voller Anrechnung der Flugasche nach 28 Tagen die Festigkeit der Referenz bei Kombination von Hüttensand und Flugasche erreicht (s. Bild 2). Diese Bindemittelkombination war demnach sehr günstig.



**Bild 2:** Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit dem CEM II der ersten Charge

Für die Mischungen mit dem CEM II ergaben sich geringfügig höhere Festigkeiten gegenüber den Mischungen mit dem CEM III. Ein Vergleich zwischen den CEM I-Mischungen und den anderen Mischungen konnte aufgrund der unterschiedlichen Zementfestigkeitsklassen nicht durchgeführt werden. Die Ermittlung der Aktivitätsindizes bzw. bezogenen Druckfestigkeiten ergab eine deutliche altersabhängige Reaktivität der Zusatzstoffe. Bis zum Alter von 28 Tagen ist die Kombination des CEM II mit Flugasche und Hüttensandmehl wesentlich günstiger als mit dem CEM I (s. Bild 3). Nach 90 Tagen jedoch sind die bezogenen Druckfestigkeiten vergleichbar.



**Bild 3:** Bezogene Druckfestigkeiten (inkl. Streubreiten der verschiedenen Chargen) der hüttensand- und flugaschehaltigen Mischungen zu den untersuchten Prüfterminen

Die zusatzstoffhaltigen Mischungen karbonatisierten erwartungsgemäß schneller als die Referenzmischungen. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten ( $v_k$ ) der CEM II- und CEM III-Mischungen waren höher als die der CEM I-Mischungen bei ähnlichen Hüttensandmehlgehalten (s. Tabelle 2).

**Tabelle 2:** mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtelmischungen im Zeitraum von 14 bis 365 Tagen

Bezeichnung	Zementart	$k/h_{\text{ges}}$	$f/(z + h)$	$v_k$
-	-	-	-	mm/ $\sqrt{d}$
1	2	3	4	5
M X.1.0	CEM I 42,5 R	100/0	0	0,116
M X.1.1			0,33	0,226
M X.1.2		65/35	0	0,188
M X.1.3			0,33	0,317
M X.1.4		50/50	0	0,207
M X.1.5			0,33	0,400
M X.1.6		35/65	0	0,274
M X.1.7			0,33	0,486
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R $h_z = 30 \text{ M.-%}$	70/30	0	0,291
M X.2.1			0,33	0,498
M X.2.2		54/46	0	0,296
M X.2.3			0,33	0,493
M X.2.4		38/62	0	0,334
M X.2.5			0,33	0,516
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N $h_z = 50 \text{ M.-%}$	50/50	0	0,365
M X.3.1			0,33	0,581
M 1.2.6	CEM II/B-S 32,5 R $h_z = 30 \text{ M.-%}$	65/35	0	0,316
M 1.2.7			0,33	0,533
M 1.3.2	CEM III/A 32,5 N $h_z = 50 \text{ M.-%}$	35/65	0	0,376
M 1.3.3			0,33	0,535

In Projektphase 3 wurden granulometrische Optimierungen durchgeführt, um verbesserte Frisch- und Festmörteleigenschaften zu erreichen. Teilweise konnten geringere Wasseransprüche erzielt werden, die sich jedoch nicht in einer Festigkeitssteigerung der optimierten Mischungen bemerkbar machten. Generell ist festzuhalten, dass die in diesem Projekt durchgeführten granulometrischen Optimierungen nicht zielführend waren und es noch weiterer grundlegender Forschungsarbeiten in diesem Bereich bedarf.

In Projektphase 4 wurde schließlich die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Projektphase 2 auf den Betonmaßstab überprüft. Bei der Mischungskonzeption wurde von  $k_{\text{HSM}} = 1,0$  und  $k_{\text{FA}} = 0,4$  ausgegangen. Die Druckfestigkeiten der Mischungen mit dem CEM I waren bei der Referenzmischung am höchsten, da die unterstellten Wirksamkeiten der Zusatzstoffe

im Hinblick auf ihren Beitrag zur Festigkeit überschätzt wurden. Für die Mischung, die nur HSM enthielt, ergab sich ein k-Wert des HSM von 0,77 nach 28 Tagen und 0,89 nach 90 Tagen. Da keine Mischung vorhanden war, die nur Flugasche enthielt, konnte kein einzelner k-Wert für die Flugasche ermittelt werden. Der kombinierte k-Wert ( $k_{\text{HSM+FA}}$ ) ergab sich für die Mischung mit dem CEM I zu beiden Zeitpunkten zu ca. 0,55. Hätte die Flugasche einen k-Wert von 0,4, hätte sich mit dem vorhandenen  $k_{\text{HSM}}$  ein kombinierter k-Wert von 0,62 nach 28 Tagen bzw. 0,69 nach 90 Tagen ergeben. Bei Verwendung des CEM II wiesen die zusatzstoffhaltigen Betonmischungen ab einem Alter von 28 Tagen gleiche oder höhere Festigkeiten gegenüber der Referenzmischung auf. Der k-Wert für das HSM ergab sich nach 28 Tagen zu  $k_{\text{HSM}} = 1,0$  bzw. nach 90 Tagen zu 1,15. Der gemeinsame k-Wert betrug nach 28 Tagen 0,83 bzw. nach 90 Tagen 0,88. Bei einem k-Wert der Flugasche von 0,4 wäre ein kombinierter k-Wert von 0,76 nach 28 Tagen bzw. 0,85 nach 90 Tagen herausgekommen. Das heißt, auch im Betonmaßstab war die Kombination mit dem CEM II sehr günstig. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten waren für die zusatzstoffhaltigen Mischungen am höchsten. Wie im Mörtelmaßstab fielen die Karbonatisierungstiefen bei den Mischungen mit dem CEM II höher aus als bei den Mischungen mit dem CEM I. Größtenteils waren die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtel höher als die der Betone, die im Bereich üblicher Normalbetone lagen. Die Dichte der zusatzstoffhaltigen Mischungen war erwartungsgemäß höher als die der Referenzmischungen.

Die vorliegenden Ergebnisse zur Festigkeitsentwicklung der untersuchten Bindemittelkombinationen deuten darauf hin, dass Zusatzstoffe aufgrund ihrer chemischen oder physikalischen Beschaffenheit besser mit bestimmten Zementen zusammenwirken als mit anderen. Die genauen Zusammenhänge müssten näher untersucht werden. Unklar ist zudem, ob sich Packungsdichte und chemische Effekte überlagern und evtl. gegenseitig aufheben. Weiterhin ist ungeklärt, ob und wie sich Hüttensandmehl und Flugasche zeitlich in ihrer Reaktivität beeinflussen, weshalb hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

#### 4 LITERATUR

- /DIN05a/ DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement ; Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- /DIN05b/ DIN EN 206-1:2005-09 Beton ; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /DIN08/ DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton ; Teil 2: Beton ; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 + A1:2005