

# ZUSAMMENFASSUNG

**F 7038**

**Erarbeitung von Anwendungsregeln für  
Hüttensand als Betonzusatzstoff gemäß der  
harmonisierten Europäischen Stoffnorm**

**Projekt Nr. ZP 52-5-7.257-/05**

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Eigenschaften von Betonen mit Hütten- sandmehl als Betonzusatzstoff nach DIN EN 15167-1 /DIN06/ geprüft. Die DIN EN 15167-1 ist eine Stoffnorm, die chemische und physikalische Anforderungen an den gemahlene Hütten- sand festlegt. Vorgaben zur Anwendung des Hütten- sandmehls als Betonzusatzstoff werden nicht gemacht. Hierfür müssen nationale Anwendungsregeln formuliert werden. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, eine Datengrundlage für die Erarbeitung dieser Anwendungsregeln zu schaffen. Insbesondere sollte der versuchstechnische Nachweis einer zementäquivalenten Wirksamkeit (k-Wert) von Hütten- sandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06/ erbracht werden. Für das Projekt wurden fünf europäische Hütten- sande ausge- wählt, die als Granulate ans ibac geliefert und speziell für dieses Projekt aufgemahlen wurden. Die Untersuchungen mussten auch die ungünstigen Hütten- sandmehle der europä- ischen Produktnorm abdecken. Die Mahlfineinheit der Hütten- sandmehle spiegelt daher weder die Verhältnisse in hütten- sandhaltigen Zementen in Deutschland noch die in Europa ver- fügbaren Hütten- sandmehle wider, diese Hütten- sandmehle könnten jedoch theoretisch ge- mäß DIN EN 15167-1 angeboten werden. Neben der Ableitung des k-Werts wurde über- prüft, ob eine Verwendung nach dem Austauschkonzept möglich ist. Nach diesem Kon- zept wird Zement im Verhältnis 1 : 1 durch Hütten- sandmehl ersetzt, das vollständig auf den Wasserzementwert angerechnet wird. Die Kontrolle erfolgte durch Vergleich der Druck- festigkeiten der Kombination CEM I / Hütten- sandmehl mit Referenzbetonen aus Portland- hütten- bzw. Hochofenzement mit gleichem Hütten- sandgehalt.

In Tabelle 1 sind die Anforderungen der DIN EN 15167-1 den Kennwerten der Hütten- sand- mehle gegenübergestellt.

**Tabelle 1:** Überprüfung der Anforderungen an die chemische Zusammensetzung, den Glasgehalt, die Mahlfineinheit sowie den Aktivitätsindex der Hütten- sandmehle

Parameter	Ein- heit	Anforderung der DIN EN 15167-1	Hütten- sandmehl					
			A	C	D	E	F	
1	2	3	4	5	6	7	8	
CaO + MgO + SiO <sub>2</sub>	M.-%	≥ 66,7	85,5	86,7	82,1	88,0	86,5	
(CaO + MgO)/SiO <sub>2</sub>	-	> 1	1,44	1,54	1,19	1,39	1,26	
Magnesia (MgO)	M.-%	≤ 18	5,89	9,44	5,17	12,62	10,00	
Sulfid		≤ 2,0	0,93	0,99	1,20	0,73	0,71	
Sulfat		≤ 2,5	0,16	0,01	0,37	0,01	0,01	
Glühverlust <sup>1)</sup>		≤ 3,0	0,83	0,23	1,61	0,43	1,00	
Chlorid		≤ 0,1 <sup>2)</sup>	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	
Feuchtegehalt		≤ 1,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,2	
Glasgehalt (lichtmikroskopisch)		≥ 66,7	94,6	99,1	70,8	87,4	66,9	
Mahlfineinheit (Blainewert)		cm <sup>2</sup> /g	≥ 2750	3181	3505	2919	2675	3174
Aktivitäts- index	%	nach 7 d	≥ 45	73,5	58,0	49,7	44,6	54,1
		nach 28 d	≥ 70	102,8	84,7	74,4	63,8	85,5

1) nach Berücksichtigung der Oxidation von Sulfid

2) der Chloridgehalt darf höher sein, dann ist jedoch der Maximalwert anzugeben

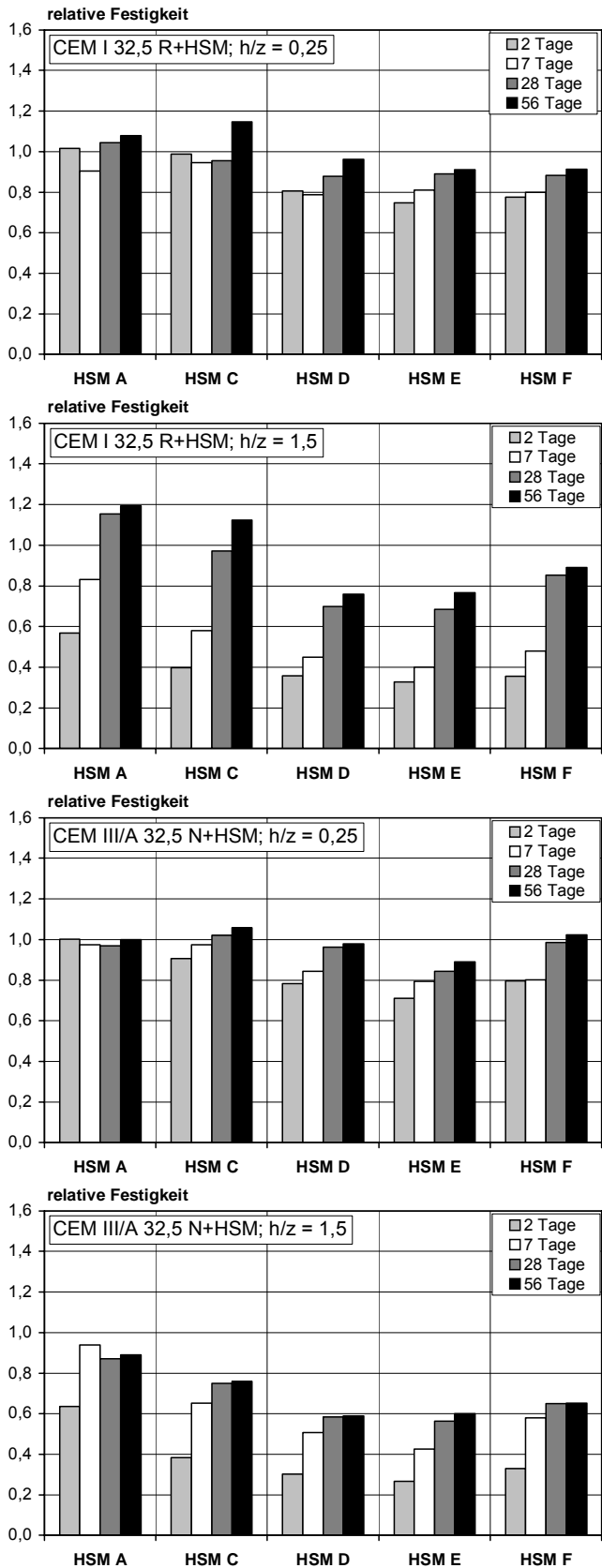
In Tabelle 2 sind zusätzlich der Glühverlust und die chemische Zusammensetzung der Hüttensandmehle gegeben.

**Tabelle 2:** Chemische Zusammensetzung der Hüttensandmehle (getrocknete Probe)

Parameter		Einheit	Hüttensandmehl				
			A	C	D	E	F
1		2	4	5	6	7	8
Glühverlust an Luft			-0,94	-1,40	-0,96	-0,74	-0,32
Glühverlust unter Argon			0,83	0,23	1,61	0,43	1,00
Unlöslicher Rückstand (HCl / Soda)			0,43	0,35	0,35	0,49	0,28
Unlöslicher Rückstand (EDTE)			79,5	92,6	58,9	70,7	52,3
Haupt- und Neben- bestand- teile	Kohlenstoff (als C)	M.-%	0,23	0,05	0,20	0,08	0,18
	Gesamtschwefel als SO <sub>3</sub>		2,43	2,51	3,45	1,76	1,68
	Chlorid (HNO <sub>3</sub> -Aufschluss)		0,03	0,01	0,02	0,01	0,03
	SiO <sub>2</sub>		34,1	37,5	36,9	38,3	37,5
	TiO <sub>2</sub>		0,60	0,42	0,30	0,46	0,23
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		10,1	12,23	7,25	9,26	8,73
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,52	0,13	0,35	0,17	0,20
	MnO		0,22	1,13	0,25	0,40	0,33
	MgO		5,89	9,44	5,17	12,6	10,0
	CaO		46,7	35,2	45,9	35,6	39,6
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,18	0,15	0,15	0,01	0,10
	Na <sub>2</sub> O		0,22	0,37	0,38	0,47	0,38
K <sub>2</sub> O	0,35	1,00	0,39	0,41	0,30		
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent			0,45	1,03	0,64	0,74	0,58

Zielsetzung bei der Mahlung war es, eine Mahlfeinheit möglichst knapp über der Mindestanforderung der DIN EN 15167-1 zu erreichen. Die bisher auf dem europäischen Markt erhältlichen Hüttensandmehle weisen in aller Regel deutlich höhere Mahlfeinheiten auf. Es war hier jedoch das Ziel, auch die ungünstigsten Hüttensandmehle nach DIN EN 15167-1 abzudecken. Daher orientierten sich sowohl die Auswahl der Hüttensande als auch die Aufmahlung an den Mindestanforderungen. In ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechen die Hüttensandmehle der Norm, die Anforderungen an den Aktivitätsindex und die Mahlfeinheit werden jedoch von Hüttensandmehl E nicht eingehalten. Es wurde dennoch in das Versuchsprogramm aufgenommen, um auch Versuchsergebnisse für ein Hüttensandmehl knapp unterhalb der Normanforderungen zu gewinnen.

Die Prüfungen an den Hüttensandmehlen erfolgten in Kombination mit je einem CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5 R (27,6 M.-% HS) und CEM III/A 32,5 N (51,2 M.-% HS). Zunächst wurden an allen Kombinationen von Hüttensandmehlen und Zementen die relativen Mörtel-  
druckfestigkeiten (bezogen auf die Festigkeit der Referenzzementmörtel) bestimmt, um festzustellen, wie reaktiv die Hüttensandmehle in Kombination mit den unterschiedlichen Zementen sind. Es wurden hierbei h/z-Verhältnisse von 0,25 bis 1,5 gewählt. In Bild 1 sind beispielhaft die relativen Festigkeiten für die Kombinationen mit CEM I 32,5 R und mit CEM III/A 32,5 N bei h/z = 0,25 und h/z = 1,5 dargestellt.



**Bild 1:** Relative Festigkeiten von Mörteln mit den fünf Hütten-sandmehlen in Kombination mit CEM I 32,5 R bzw. CEM III/A 32,5 N bei h/z-Verhältnissen von 0,25 und 1,5

Bei hohen h/z-Verhältnissen liegen die relativen Festigkeiten meist deutlich unter 1. Durch die Verwendung von Hochofenzementen fällt die relative Festigkeit weiter ab (s. Bild 1, unten). Dies betrifft insbesondere die frühen Prüftermine, da die latent-hydraulische Reaktion bei den hüttensandreichen Bindemittelsystemen deutlich verzögert ist. Mit dem reaktivsten Hüttensandmehl A wird jedoch auch bei Verwendung des CEM III/A 32,5 N und einem h/z-Verhältnis von 1,5 nach 28 Tagen noch eine relative Festigkeit von nahezu 0,9 erreicht. Dieses Bindemittelsystem hat einen Klinkeranteil von unter 20 M.-%. Die anderen Hüttensandmehle liefern im betrachteten Zeitraum einen deutlich geringeren Beitrag zur Festigkeit.

Im Betonmaßstab wurden Versuche mit vier Hüttensandmehlen durchgeführt. Zunächst wurden die zementäquivalenten Wirksamkeiten der Hüttensandmehle bei h/z-Verhältnissen von 0,33, 1,0 und z. T. 1,5 nach dem k-Wert-Konzept bestimmt (vgl. /Wes84/). Zu diesem Zweck wurden von jeder Bindemittelkombination drei Betone hergestellt, die den gleichen Wassergehalt aufwiesen, sich aber im Bindemittelgehalt und damit im w/b-Wert unterschieden. Anhand der Druckfestigkeiten dieser Mischungen wurden dann k-Werte für die Prüfalter 7, 28 und 56 Tage ermittelt. Allerdings konnte nicht immer ein zuverlässiger Wert bestimmt werden, da die Festigkeiten der hüttensandmehlhaltigen Betone z. T. deutlich unter den Referenzfestigkeiten lagen. Bei der Konzeption der Betone wurde der Zement 1:1 durch Hüttensandmehl ersetzt, d. h. es wurde ein k-Wert von 1 angenommen. Dieser k-Wert wird jedoch häufig bei weitem nicht erreicht, wie Tabelle 3 zeigt.

**Tabelle 3:** k-Werte der Hüttensandmehle in Abhängigkeit vom Zement, vom h/z-Verhältnis und vom Prüfalter

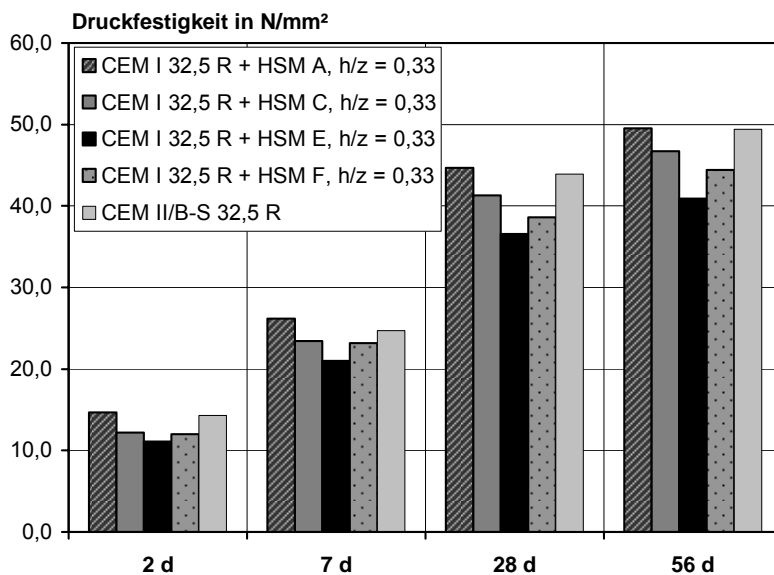
Hütten- sandmehl	h/z	CEM I 32,5 R			CEM II/B-S 32,5 R			CEM III/A 32,5 N		
		7 d	28 d	56 d	7 d	28 d	56 d	7 d	28 d	56 d
-	-	N/mm <sup>2</sup>			N/mm <sup>2</sup>			N/mm <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A	0,33	0,91	1,04	1,01	0,90	0,91	0,74	0,90	0,67	0,75
	1,00	0,71	0,90	0,90	0,79	0,93	0,90	0,79	0,76	0,81
	1,50	0,80	0,94	0,97	nicht geprüft			nicht geprüft		
C	0,33	0,65	0,96	0,93	0,57	0,89	0,79	0,45	0,56	0,59
	1,00	0,49 <sup>1)</sup>	0,81	0,79	–	0,83	0,82	0,57 <sup>1)</sup>	0,56 <sup>1)</sup>	0,59 <sup>1)</sup>
E	0,33	0,33	0,59	0,54	0,33 <sup>1)</sup>	0,47	0,47	0,26 <sup>1)</sup>	0,29	0,47
	1,00	–	0,54 <sup>1)</sup>	0,55 <sup>1)</sup>	–	0,48 <sup>1)</sup>	0,56 <sup>1)</sup>	–	–	0,46 <sup>1)</sup>
F	0,33	0,38	0,61	0,60	0,35	0,83	0,77	0,40	0,49	0,58
	1,00	–	0,53	0,62	0,48 <sup>1)</sup>	0,73	0,72	0,50 <sup>1)</sup>	0,56 <sup>1)</sup>	0,60 <sup>1)</sup>

1) k-Wert ungenau, da nur wenig Überlagerung mit den Druckfestigkeiten der Referenz

–: keine k-Wert-Bestimmung durchgeführt, da keine Überlagerung mit den Druckfestigkeiten der Referenz

Anhand der vorliegenden Daten kann abgeschätzt werden, dass der minimale k-Wert für normkonforme aber pessimal gewählte Hüttensandmehle im Alter von 28 Tagen je nach Zement zwischen 0,4 und 0,6 liegen wird. Zur genauen Quantifizierung müssten neue Mischungen mit einem höheren Bindemittelgehalt entworfen werden.

Für einen Einsatz des Hüttensandmehls nach dem Austauschkonzept ist nur das reaktivste Hüttensandmehl A geeignet, wie Bild 2 beispielhaft für die Kombinationen Portlandzement / Hüttensandmehl mit  $h/z = 0,33$  im Vergleich zum Portlandhüttenzement zeigt. Alle anderen untersuchten Portlandzement / Hüttensandmehl-Kombinationen erreichen die Festigkeit der Vergleichsbetone und -mörtel mit Portlandhütten- bzw. Hochofenzement nicht oder erst nach sehr langen Hydratationszeiten. Das heißt, ein beliebiges Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06/ kann nicht generell nach dem Austauschkonzept eingesetzt werden.



**Bild 2:** Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Betone CEM I / HSM mit  $h/z = 0,33$  (Hüttensandgehalt im Bindemittel: 24,8 M.-%) mit den Druckfestigkeiten des Referenzbetons mit CEM II/B-S (Hüttensandgehalt im Zement: 27,6 M.-%)

Neben den Druckfestigkeitsuntersuchungen wurde die Dauerhaftigkeit im Hinblick auf das Karbonatisierungsverhalten, den Elektrolytwiderstand und den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand untersucht. Bei der Prüfung der Karbonatisierung wurden Betonprismen ( $70 \cdot 70 \cdot 250 \text{ mm}^3$ ) verwendet. Zum Vergleich wurden sechs ausgewählte Mischungen mit  $h/z = 0,33$  nach dem Konzept des Deutschen Instituts für Bautechnik geprüft. Bei dieser Prüfung werden Feinbetonprismen (Normprismen  $40 \cdot 40 \cdot 160 \text{ mm}^3$ ) verwendet. Der Feinbeton unterscheidet sich neben der Sieblinie (Sieblinie A8/B8) auch im Wasser- und Bindemittelgehalt von dem Beton. Anhand der Betonuntersuchungen konnte gezeigt werden, dass die Karbonatisierungsgeschwindigkeit unter den gegebenen Laborklimabedingungen ( $20 \text{ °C} / 65 \text{ \% r. F.}$ ) mit steigendem Hüttensandgehalt und sinkendem Portlandzementgehalt zunimmt. Dabei ist es unerheblich, ob der Hüttensand aus dem Zement stammt oder als Zusatzstoff zugesetzt wird. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der verwendeten Hüttensandmehle ergaben sich nicht. Bei der Untersuchung im Feinbetonmaßstab werden Betone mit hohem Hüttensandanteil zu ungünstig bewertet, da die stärkere Austrocknung der kleinformatigen Prismen eine höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeit hervorruft als im Betonmaßstab tatsächlich auftritt. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Vergleich mit klinkerreichen Betonen gezogen wird, weil diese Betone im Feinbetonmaßstab weniger stark karbonatisieren als im Betonmaßstab.

Bei der Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands wurden nur die drei weniger reaktiven Hüttensandmehle C, E und F in Kombination mit dem Portland- und dem Portlandhüttenzement untersucht. Bei den Hüttensandmehlen E und F wurde nur das h/z-Verhältnis 0,33 geprüft, das Hüttensandmehl C wurde zusätzlich mit h/z = 1,0 untersucht. Die Zusammensetzung der Referenzmischungen wurde so gewählt, dass sie den Anforderungen an die Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 genügt. Bei den Mischungen mit Hüttensandmehl wurde derselbe Gesamtbindemittelgehalt wie bei der Referenz gewählt. Der Wassergehalt wurde entsprechend den ermittelten k-Werten und dem vorgeschriebenen Mindestwasserzementwert nach DIN 1045-2 /DIN01/ festgelegt. Die Eignung für die Expositionsklasse XF3 konnte für alle 10 untersuchten Betone im Würfelverfahren sicher nachgewiesen werden. Die Abwitterungen lagen bei maximal 2,5 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln. Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands im CDF-Verfahren trat bei h/z = 1,0 eine Abwitterung von  $> 1500 \text{ g/m}^2$  auf. D. h., die untersuchten Betone mit h/z = 0,33 sind für den Einsatz in der Expositionsklasse XF4 geeignet. Bei h/z = 1,0 und gleichzeitiger Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen kann in Abhängigkeit vom Hüttensandmehl im CDF-Verfahren eine Abwitterung von über  $1500 \text{ cm}^2/\text{g}$  auftreten.

Marktübliche Hüttensandmehle in Europa weisen höhere Mahlfeinheiten als die hier untersuchten auf. Daher werden in der Praxis in Abhängigkeit vom h/z-Verhältnis wahrscheinlich deutlich höhere Wirksamkeiten erzielt (siehe hierzu auch /Ras08/). Realistisch erscheint demzufolge z. B. ein k-Wert von 1 bei h/z = 0,33 und einem Blainewert des Hüttensands von  $\geq 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Um diese k-Werte ausnutzen zu können, müssten jedoch entweder in der DIN EN 15167-1 oder in den nationalen Anwendungsregeln verschiedene Qualitätsstufen für Hüttensandmehl eingeführt werden.

- /DIN01/ DIN 1045-2:2001-07 Tragwerke aus Beton Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- /DIN06/ DIN EN 15167-1:2006-12 Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Teil 1: Definition, Anforderung und Konformitätskriterien
- /Ras08/ Rasch, S. ; Brameshuber, W.: Leistungsfähigkeit von Beton bei der Verwendung von Hüttensand und Flugasche. Aachen: RWTH Aachen University, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Bauforschung, Institut für Massivbau, 2008. - In: DAFStb-Forschungskolloquium: Beiträge zum 49. Forschungskolloquium am 5./6. Juni 2008 an der RWTH Aachen
- /Wes84/ Wesche, K.H.: Zur Anrechenbarkeit von Flugasche auf den Bindemittelgehalt des Betons. Essen : VGB Kraftwerkstechnik, 1984. – In: 25 Jahre Beton mit Flugasche VGB-TG 203, S. 69-79