

Dr.-Ing. V. Feldrappe

Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff



2. Jahrestagung und 55. Forschungskolloquium des DAfStb, 26./27.11.2014, Düsseldorf

1

Konzept des Forschungsvorhabens

Gemeinschaftsvorhaben von:

- FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.
Dr.-Ing. A. Ehrenberg, Dr.-Ing. V. Feldrappe
- Institut für Bauforschung der RWTH Aachen
Prof. W. Brameshuber, Prof. A. Vollpracht, Dipl.-Ing. C. Nobis



Gefördert durch:

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" (AiF)
als IGF-Vorhaben 16743 N



2

1 Regelungsstand

2 Ziele des Forschungsvorhabens AiF 16743N

3 Ausgangsstoffe

4 k-Wert Konzept

5 Zusammenfassung

• Derzeitige Situation

- Hüttensandmehl ist nicht in den Betonnormen DIN EN 206-1/DIN 1045-2 erfasst
- 3 Anwendungskonzepte sind grundsätzlich denkbar
- Anwendung in Deutschland ist über das DIBt geregelt

Deskriptives Konzept

Performance - Konzepte

k = 0,40

Nicht geregelt

Zulassung

• 2014 DIN EN 206

- Die 3 Anwendungskonzepte sind gleichwertig gültig
- Keine unmittelbare Verbesserung der Anwendungssituation (k-Wert ist national festzulegen; im Anhang L ist k-Wert = 0,60 empfohlen)

• 2014 + x Überarbeitung DIN 1045-2

- Forschungsvorhaben kann substantiellen Beitrag leisten, Anwendungsregeln auf Basis wissenschaftlicher Ergebnisse zu schaffen
- Unterschiedliche k-Werte werden mangels Hüttensandmehl-Kategorien in DIN EN 15167-1 vorerst nicht festgelegt
- Performance-Konzepte werden aufgrund mangelnder Erfahrung voraussichtlich an einen bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweis gebunden

Ziele und Aufgabensetzung des Forschungsvorhabens

- **Vergleich der 3 Anwendungskonzepte**
 - Abdeckung der europäischen HS-Qualitäten
 - Evaluierung der Konzepte auf Basis gleicher Materialien
 - Gesamtheitliche Bewertung der Leistungsfähigkeit der Konzepte unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit
- **Bildung von HSM-Kategorien und Definition von zugehörigen k-Werten**
- **Vorschlag für nationale Anwendungsregeln**
- **Empfehlungen zur Qualitätssicherung bei der Anwendung der verschiedenen Konzepte**
 - Überprüfung der Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Regelung im Praxistest

Ausgangsstoffe

6 Hüttensande: Spannweite mittel-/westeuropäischer HS-Qualitäten

Einheit		HS 1	HS 2	HS 3	HS 4	HS 5	HS 6	DIN EN 15167-1
C+M+S	[M.-%]	83,2	85,8	82,8	84,7	86,2	85,6	≥ 2/3
C/S	[-]	1,12	1,11	1,07	1,31	1,02	0,90	
(C+M)/S		1,31	1,29	1,35	1,47	1,30	1,14	> 1
F-Wert ^{*)}		1,57	1,48	1,59	1,76	1,44	1,25	
Glasgehalt	[Vol.-%]	100	100	99	100	100	97	≥ 2/3
TiO ₂	[M.-%]	0,77	1,03	0,88	1,34	0,57	0,47	

^{*)} F-Wert = $(CaO+0,5 \cdot S^2+0,5 \cdot MgO+Al_2O_3) / (SiO_2+MnO)$

- **Aufbereitung der Hüttensande auf 3500, 4200 und 5500 cm²/g (Blaine)**
↳ 18 Hüttensandmehle
- **Labormahlung & 1 Industriemehl**

Ausgangsstoffe

3 CEM I 42,5 R: unterschiedliche Festigkeitsentwicklung

Hersteller	Bezeichnung	CEM I 42,5 R		
		1 Z1	2 Z2	3 Z3
	Feinheit nach Blaine [cm ² /g]	4240	3580	3400
	Reindichte [g/cm ³]	3,120	3,102	3,159
	Wasseranspruch [%]	29,0	28,0	28,0
	Erstarrungsbeginn [min]	180	215	210
Mörteldruckfestigkeit	2 d	32,6	29,9	23,7
	7 d	51,1	47,7	45,4
	28 d	60,8	59,3	58,2
	91 d	66,4	64,6	67,5

- Mischung der 3 CEM I -Zemente mit den 18 Hüttensandmehlen im Verhältnis 50:50 bzw. 25:75
- Zementtechnische Charakterisierung der Kombinationen
- Bestimmung des Aktivitätsindex

Ausgangsstoffe

Auswahl von 6 Hüttensandmehlen – 3 Feinheiten; vergleichbare KGV

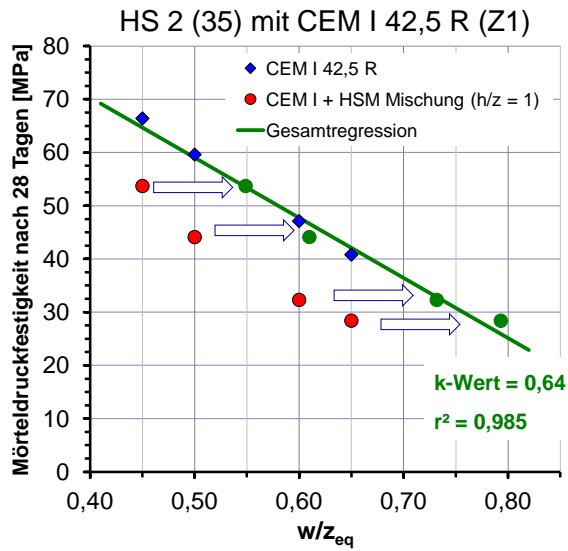
- Basierend auf den chemischen, physikalischen, mineralogischen und bindemitteltechnischen Eigenschaften

HS	3500			4200				5500			
	HS2			HS1	HS2		HS5	HS6			HS6
Blaine [cm ² /g]	3470			4400	4220		4060	4180			5580
d' [µm]	20			16	15		18	17			11
n [-]	1,02			0,99	0,98		1,19	0,88			0,97

- Aufbereitung der Hüttensandmehle für die Versuche zu den Anwendungskonzepten im Technikumsmaßstab (Ausnahme: HS5 (42) Industriemehl)

k-Wert Konzept

Ermittlung nach ibac-Methode



k-Wert Konzept

Ermittlung nach ibac-Methode

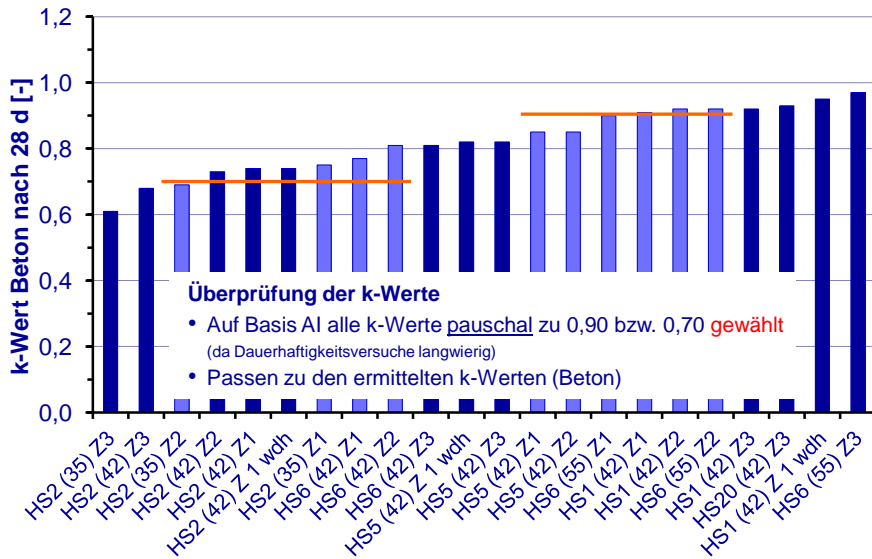


- **Betonversuche mit dem ermittelten k-Wert zur:**
 - Druckfestigkeitsentwicklung
 - Dauerhaftigkeit
- **Vergleich der Ergebnisse mit denen von Betonen mit CEM III/A-Zementen**

k- Wert(e) für HSM

k-Werte der Hüttensandmehle

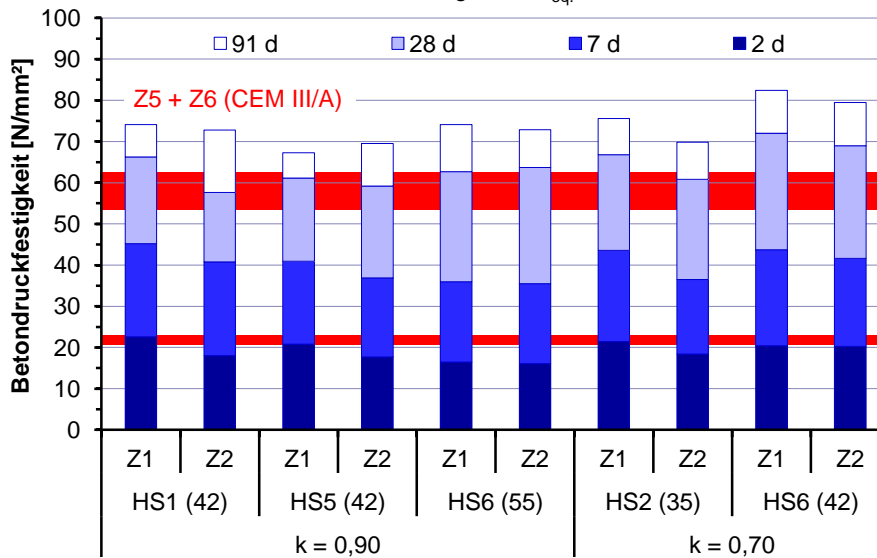
Spannweite nach 28 d zwischen 0,60 und 0,93



k-Wert Konzept – Validierung am Beton

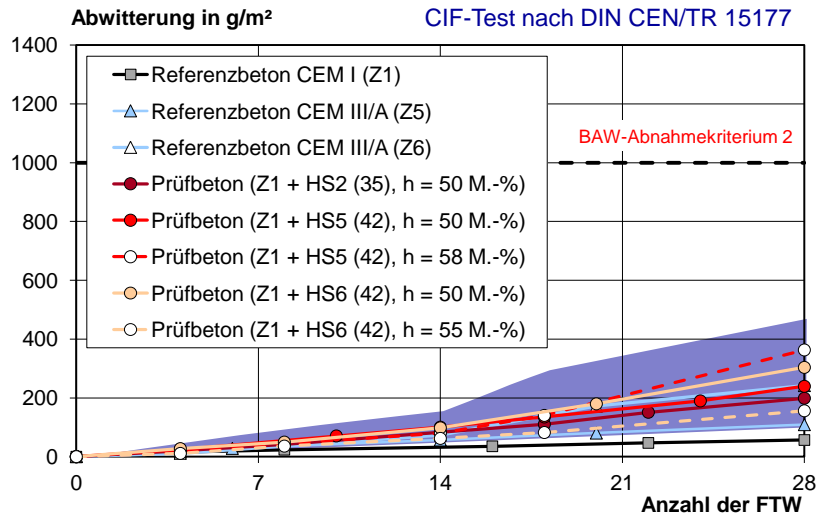
Betondruckfestigkeit (XF3 Frostwiderstand: \geq C35/45)

Binder = 320 kg/m³; w/z_{eq} = 0,50



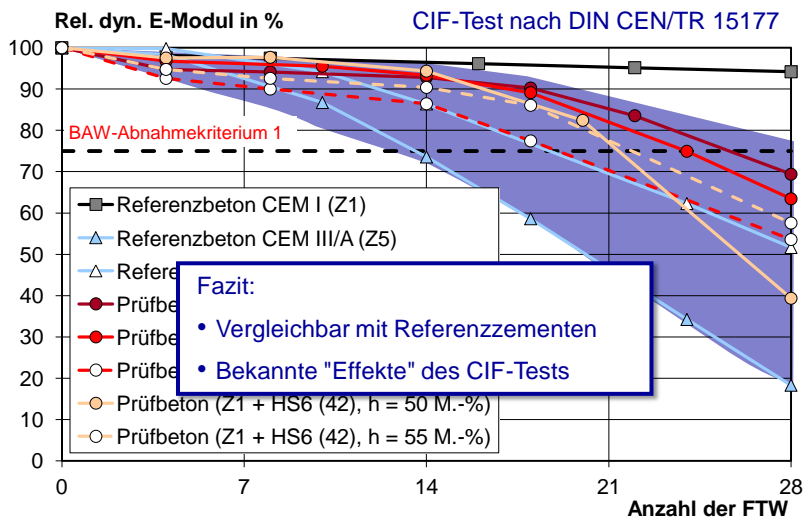
k-Wert Konzept – Validierung am Beton

XF3 Frostwiderstand (Binder = 320 kg/m³; w/b = 0,50)



k-Wert Konzept – Validierung am Beton

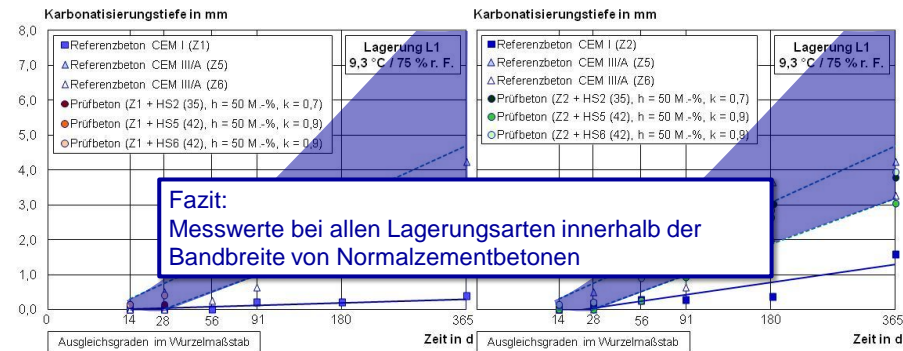
XF3 Frostwiderstand (Binder = 320 kg/m³; w/b = 0,50)



k-Wert Konzept – Validierung am Beton

XC4 Karbonatisierung (Binder = 280 kg/m³; w/z_{eq} = 0,60)

Lagerungsarten	Temperatur	Luftfeuchtigkeit
	°C	% r. F.
L1 (Ø Klima in D)	9,3 ± 2	75 ± 5
L2 (Laborbedingungen)	20,0 ± 2	65 ± 5
L3 (Außenlagerung unter Dach)	variabel	variabel



1 2 3 4 k-Wert Konzept 5

15

k-Wert Konzept – Bewertung der Ergebnisse

- k-Werte gemäß allgemein anerkannter Methode berechenbar
- Ergebnisse vergleichbar zu denen der Betone mit CEM I und CEM III/A -Zementen in Bezug auf die Leistungsfähigkeit (Frischbetoneigenschaften, Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit)
- Sulfatwiderstand im SVA-Test nicht gegeben
 - ↳ Verringerung der Sulfatisierung des gesamten Bindemittels (Z + HSM)
 - ↳ dadurch verstärkte AFm Bildung → bei Sulfatangriff Ettringitbildung auch CEM III/A mit 50 % HS i.d.R. nicht "SR"

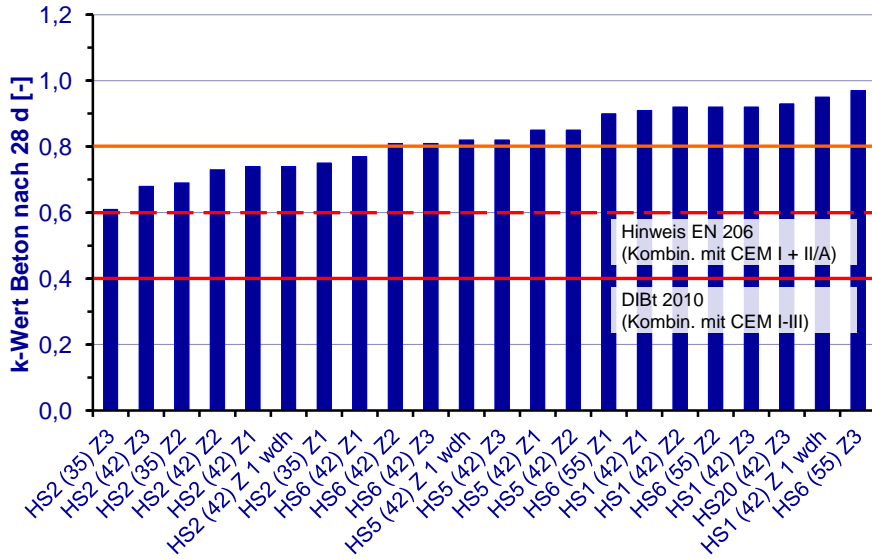
↳ k-Werte wurden bestätigt!

1 2 3 4 k-Wert Konzept 5

16

k-Wert Konzept – k-Wert Klassen

2 Klassen (0,6 und 0,8) gerechtfertigt!

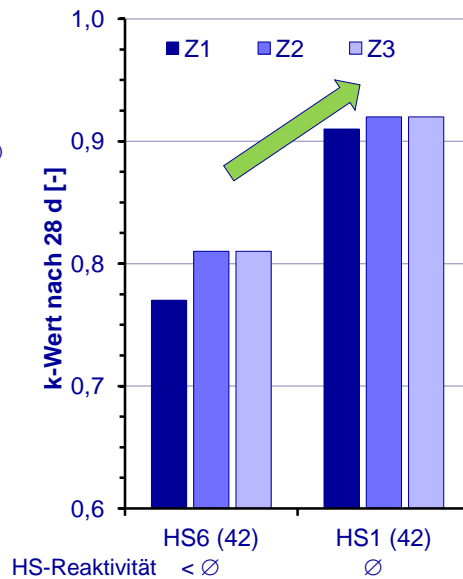


k-Wert Konzept – Einflüsse des HSM auf k-Wert

Bildung von HSM-Kategorien

- Reaktivität des Hüttensands (erweiterte Basizität / F-Wert*)

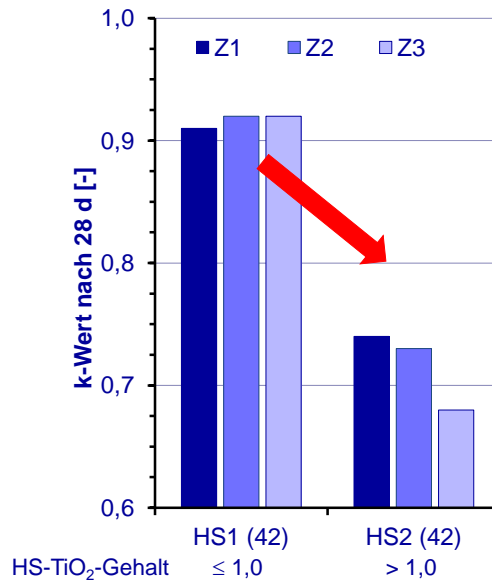
$$*) F\text{-Wert} = \frac{(CaO + 0,5 \cdot S^2 + 0,5 \cdot MgO + Al_2O_3)}{(SiO_2 + MnO)}$$



k-Wert Konzept – Einflüsse des HSM auf k-Wert

Bildung von HSM-Kategorien

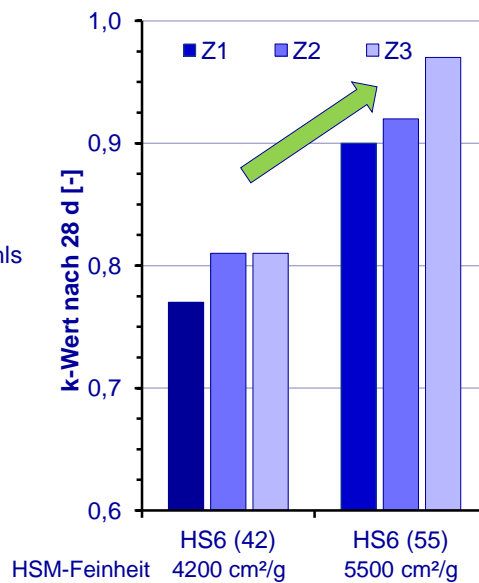
- Reaktivität des Hüttensands (erweiterte Basizität / F-Wert)
- TiO_2 -Gehalt des Hüttensands



k-Wert Konzept – Einflüsse des HSM auf k-Wert

Bildung von HSM-Kategorien

- Reaktivität des Hüttensands (erweiterte Basizität / F-Wert)
- TiO_2 -Gehalt des Hüttensands
- Mahlfeinheit des Hüttensandmehls



k-Wert Konzept – Einflüsse des HSM auf k-Wert

Bildung von HSM-Kategorien

- Reaktivität des Hüttensands
(erweiterte Basizität / F-Wert)
- TiO_2 -Gehalt des Hüttensands
- Mahlfineinheit des Hüttensandmehls
- Wechselwirkungen der Einflüsse
 - $\text{TiO}_2 \leftrightarrow$ Reaktivität
 - ↳ negativer Einfluss des TiO_2 kann chemisch kompensiert werden
 - $\text{TiO}_2 \leftrightarrow$ Feinheit
 - ↳ negativer Einfluss des TiO_2 kann ggf. nicht ausreichend kompensiert werden

k-Wert Konzept – Einflüsse des HSM auf k-Wert

Bildung von HSM-Kategorien

- Reaktivität des Hüttensands
(erweiterte Basizität / F-Wert)
- TiO_2 -Gehalt des Hüttensands
- Mahlfineinheit des Hüttensandmehls
- Wechselwirkungen der Einflüsse
- Zusätzlich: Glasgehalt des Hüttensands
(spielt in Mittel- / Westeuropa keine Rolle)
- Aktivitätsindex wird nicht berücksichtigt, da er auch abhängig vom Prüfzement ist

k-Wert Klassen und HSM-Kategorien – Vorschlag

Parameter		Einheit	k ₁ = 0,6	k ₂ = 0,8		
Glasgehalt		Vol.-%	≥ 67	≥ 90		
Reaktivität	(C+M)/S	-	≥ 1,0	≥ 1,0	≥ 1,20	≥ 1,30
	F-Wert ¹⁾		-	-	≥ 1,30	≥ 1,50
TiO ₂ -Gehalt		M.-%	-	≤ 1,00		1,01 – 1,50
Mahlfineinheit (Blaine)		cm ² /g	≥ 3.200	≥ 5.200	≥ 4.200	

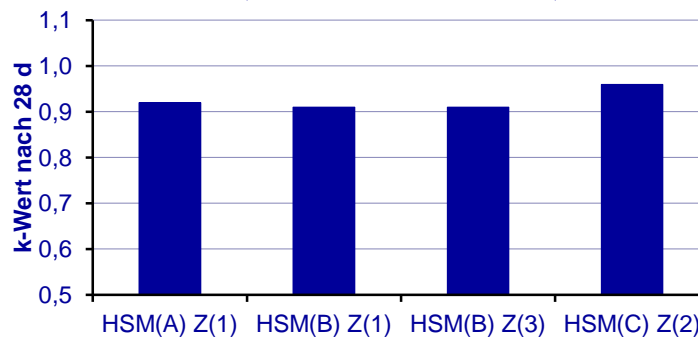
¹⁾ F-Wert = $(CaO + 0,5 \cdot S^2 + 0,5 \cdot MgO + Al_2O_3) / (SiO_2 + MnO)$

- Die Werte sind Mindestwerte jedes Einzelwerts
- Verwendung nur mit CEM I
- Anrechenbar bis zu einem HS-Gehalt von $h/z = 1,0$
- Mindestzementgehalt = Mindestbindemittelgehalt

Überprüfung des Vorschlags

HSM, die nicht Bestandteil des FV waren

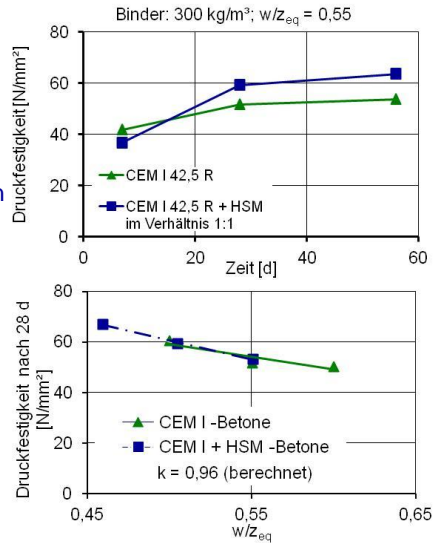
		HSM(A)	HSM(B)	HSM(C)
Glas	%	99,8	99,4	100
(C+M)/S	-	1,31	1,37	1,33
F-Wert		1,49	1,55	1,57
TiO ₂	M.-%	0,43	0,54	0,77
Feinheit	cm ² /g	4270	4290	4350
k-Wert Klasse		k ₂ = 0,8	k ₂ = 0,8	k ₂ = 0,8



Werkversuch – Überprüfen des Anwendungskonzepts

ca. 400 t HSM in 2.500 m³ Beton; Anwendung mittels Zustimmung im Einzelfall

- Charakterisierung der Ausgangsstoffe (Hüttensandmehl, Portlandzement)
- Ermittlung des k-Werts der Kombination
- Entwicklung und Erstprüfung der geplanten Betonsorten
- Begleitung und Dokumentation der Baumaßnahme
- Intensive Beprobung



Werkversuch – Überprüfen des Anwendungskonzepts

Entwicklung und Erstprüfung der geplanten Betonsorten



Beton mit HSM als Betonzusatzstoff mit k = 0,80¹⁾ auf den w/z-Wert angerechnet

	Ausbreitmaß nach		Betondruckfestigkeit nach			
	5 min	45 min	2 d	7 d	28 d	
Einheit	mm		N/mm ²			
Betonsorte	C12/15	530	470	5,4	15,5	28,5
	C16/20	500	445	7,4	21,1	32,5
	C20/25	520	460	9,9	24,6	37,2
	C25/30	500	450	13,3	29,6	47,0
	C30/37	510	450	15,4	33,6	46,3

Feedback: "sehr gut verarbeitbarer Beton"

¹⁾ k-Wert Ermittlung ergab k-Wert von 0,96

Zusammenfassung

- Erstmals wurden auf gleicher Ausgangsstoffbasis alle drei in der EN 206 verankerten Anwendungskonzepte für HSM als Betonzusatzstoff vergleichend überprüft.
- Leistungsfähige Betone mit Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff sind mit allen 3 Konzepten zielsicher herstellbar.
 - Leistungsfähige Prüfverfahren und belastbare Abnahmekriterien notwendig
- 2 k-Wert-Klassen ($k_1=0,6$ und $k_2=0,8$) sind mit zugehörigen HSM-Kategorien gerechtfertigt.

Danksagung



Das IGF-Vorhaben (Nr. 16743N) der VDEh-Gesellschaft zur Eisenforschung mbH und der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Hierfür bedanken sich die beiden antragstellenden Forschungsvereinigungen.

Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. V. Feldrappe
(v.feldrappe@fehs.de)

Second Severn Crossing,
UK, 1989-1996
(400.000 m³ GGBS-Concrete)

Dr. & Marie, Slag Cement Ltd.