

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

T 3223

T 3223

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-8147-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

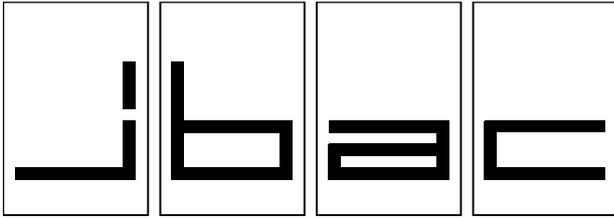
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

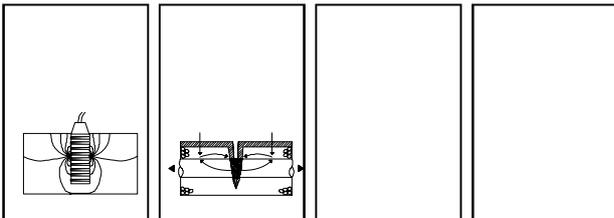
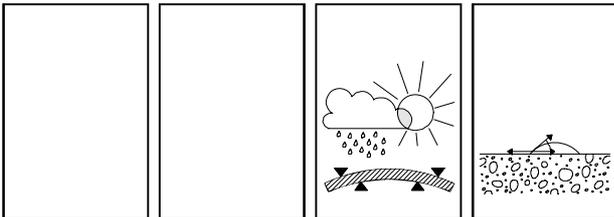
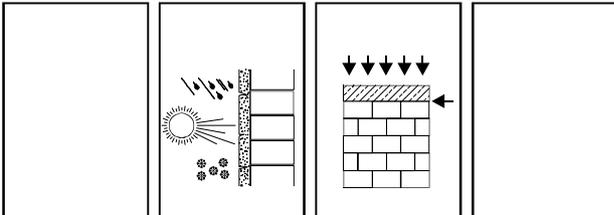
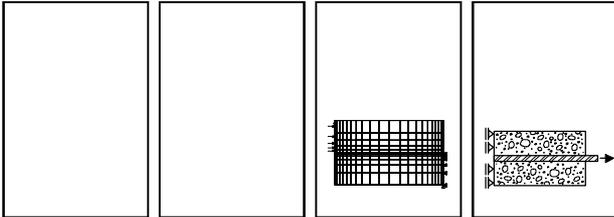
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG
 ÜBERWACHUNG
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-
 WESTFÄLISCHE
 TECHNISCHE
 HOCHSCHULE
 AACHEN

RWTH
 AACHEN
 UNIVERSITY

Forschungsbericht F 7038

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

Vp/Sc/Fk

4. Ausfertigung

THEMA

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

Forschungsbericht Nr.

F 7038
vom 09.03.2009

Projektbearbeitung

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber

Dipl.-Ing. Anya Vollpracht

Dipl.-Ing. Stefan Rasch

Auftraggeber/ Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30 L
10829 Berlin

Auftragsdatum Aktenzeichen

27.05.2005
ZP 52-5-7.257-1190/05

Dieser Bericht umfasst 72 Seiten, davon 32 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1	EINLEITUNG	1
2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM.....	2
2.1	Übersicht.....	2
2.2	Charakterisierung der Ausgangsstoffe.....	4
2.2.1	Hüttensande.....	4
2.2.2	Zemente.....	7
2.2.3	Gesteinskörnung.....	7
2.2.4	Betonzusatzmittel.....	8
2.3	Erstarrungsverhalten.....	8
2.4	Versuche im Mörtelmaßstab	8
2.4.1	Ermittlung der relativen Festigkeiten.....	8
2.4.2	Überprüfung der Einsetzbarkeit nach dem Austauschkonzept	12
2.5	Versuche im Betonmaßstab.....	13
2.5.1	Allgemeines	13
2.5.2	Herstellung und Lagerung.....	13
2.5.3	Bestimmung der Druckfestigkeiten und der zementäquivalenten Wirk- samkeiten (k-Werte).....	14
2.5.4	Überprüfung der Einsetzbarkeit nach dem Austauschkonzept	21
2.5.5	Bestimmung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit.....	23
2.5.5.1	Versuchsdurchführung.....	23
2.5.5.2	Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche an Beton	24
2.5.5.3	Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche an Feinbeton.....	27
2.5.6	Bestimmung des Elektrolytwiderstands	29
2.5.7	Untersuchung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands.....	30
2.5.7.1	Mischungszusammensetzung.....	30
2.5.7.2	Bestimmung des Frostwiderstands	30
2.5.7.3	Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands	31
3	ZUSAMMENFASSUNG	33
4	LITERATUR	36
	TABELLEN	A1-A17
	BILDER	B1-B24

1 EINLEITUNG

Für die Verwendung von gemahlenem Hüttensand als Betonzusatzstoff des Typs II nach DIN EN 206-1 /DIN00/ wurde die europäische Stoffnorm DIN EN 15167-1 /DIN06a/ erarbeitet. Diese Norm beschränkt sich jedoch auf die Beschreibung der Anforderungen an den gemahlene Hüttensand sowie die überwachungstechnischen Fragen zur Sicherstellung der Qualität. Vorgaben zu Einsatzmengen im Beton, zu einsetzbaren Zementarten, zur gemeinsamen Verwendung mit anderen Betonzusatzstoffen oder zur Anrechnung auf den w/z-Wert werden nicht gemacht. Für diese Fragestellungen müssen nationale Anwendungsregeln formuliert werden. Da Hüttensand in Deutschland bisher nahezu ausschließlich als Hauptbestandteil bei der Zementherstellung eingesetzt wurde, liegen keine veröffentlichten, technischen Grundlagen für die Festlegung dieser Anwendungsregeln vor, es werden jedoch gegensätzliche Standpunkte diskutiert. Im Sachstandsbericht des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton /DAf07/ sind die international gesammelten Erfahrungen zusammengefasst. Je nach Tradition im jeweiligen Land ist die Anwendung von gemahlenem Hüttensand sehr unterschiedlich und nicht direkt auf die deutschen Verhältnisse übertragbar. Kurzfristig umsetzbar erscheint ein Anwendungskonzept analog zur Flugasche. Hier wird das sog. k-Wert-Konzept verwendet, um die zementäquivalente Wirksamkeit (k-Wert) im Hinblick auf die Festigkeit zu beschreiben. Weiterhin muss eine ausreichende Dauerhaftigkeit der hüttensandmehlhaltigen Betone nachgewiesen werden. Alternativ zum k-Wert-Konzept könnte auch das so genannte Austauschkonzept zur Anwendung kommen, bei dem Zement im Verhältnis 1 : 1 durch Hüttensandmehl ersetzt wird, das dann auch vollständig auf den Wasserzementwert angerechnet werden kann. Der Nachweis erfolgt hier über einen Vergleich der Kombination Zement A / Zusatzstoff mit Zement B, der in der Zusammensetzung der Kombination von Zement A und dem Zusatzstoff entspricht. Für die jeweiligen Expositionsklassen sind Nachweise zu führen. Diese Vorgehensweise ist im Anhang E der DIN EN 206-1 /DIN00/ dargelegt und wird in den Niederlanden angewandt. In Großbritannien wird auf Nachweise zu den Expositionsklassen verzichtet und es werden lediglich die Früh- und Normfestigkeit der Kombination Zement / Zusatzstoff nachgewiesen.

Ziel dieses vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geförderten Forschungsprojekts war der versuchstechnische Nachweis einer zementäquivalenten Wirksamkeit (k-Wert) des Hüttensandmehls. Die Ergebnisse dienen als Grundlage allgemeiner, nationaler Anwendungsregeln für Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff des Typs II in Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 im Rahmen des k-Wert-Konzepts. Die zu untersuchenden Hüttensandmehle mussten daher im Bereich der Mindestanforderungen liegen, die innerhalb der europäischen Produktnorm gegeben sind, sie durften sich nicht nur an Hüttensandmehlen aus Deutschland orientieren. Die Hüttensande wurden als Granulate ans ibac geliefert und speziell für dieses Projekt aufgemahlen. Die Mahlfineinheit sollte dabei möglichst nah an der Mindestanforderung der DIN EN 15167-1 liegen. Die Mahlfineinheit der Hüttensandmehle spiegelt daher weder die Verhältnisse in hüttensandhaltigen Zementen in Deutschland noch die in Europa verfügbaren Hüttensandmehle wider, diese Hüttensandmehle könnten jedoch theoretisch gemäß DIN EN 15167-1 angeboten werden. Sowohl die Aufmahlung als auch die Auswahl der Hüttensande orientierten sich an den Minimalanforderungen der Norm. Der Prüfplan wurde im Verlauf des Projekts überarbeitet, um eine Anpassung an den zwischenzeitlich erarbeiteten DIBt-Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Hüttensandmehl zur Verwendung als Betonzusatzstoff im Beton nach DIN EN 206-1 /DIN00/ bzw. DIN 1045-2 /DIN01/, Fassung Februar 2007, zu erreichen. Neben der Ermittlung des festigkeitsbezogenen k-Werts wurden relevante Dauerhaftigkeitseigenschaften untersucht.

2 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

2.1 Übersicht

In diesem Projekt wurden fünf chemisch und mineralogisch unterschiedliche Hüttensandmehle in Kombination mit drei marktüblichen Zementen untersucht. Die Zemente und Hüttensandmehle wurden zunächst auf ihre chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften geprüft und nach DIN EN 196-1 /DIN05a/ und -3 /DIN05c/ charakterisiert (s. Abschnitt 2.2). Anschließend wurden Kombinationen von Zementen und Hüttensandmehlen im Mörtel- und Betonmaßstab geprüft. Diese Versuche sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die einzelnen Untersuchungen werden in den Abschnitten 2.4 und 2.5 detailliert beschrieben.

Tabelle 1: Übersicht der Mörtel- und Betonversuche

Versuchsart	Prüfung	Zement	Hüttensand- mehle	h/z	Anzahl der Mischungen
1	2	3	4	5	6
Mörtel- versuche	Druckfestigkeit nach 2, 7, 28 und 56 d Wasseran- spruch, Erstar- rungszeiten, Raumbestän- digkeit	CEM I 32,5 R	A, C, D, E, F	0,25	15
				1,0	
				1,5	
		CEM II/B-S 32,5 R	A, C, D, E, F	0,25	15
				1,0	
				1,5	
		CEM III/A 32,5 N	A, C, D, E, F	0,25	15
				1,0	
				1,5	
Beton- versuche	Druckfestigkeit nach 2, 7, 28 und 56 d zur Ermitt- lung des festig- keitsbezogenen k-Werts ¹⁾	CEM I 32,5 R	A, C, E, F	0	3 x 9 Mischungen
				0,33	
				1,0	
		CEM II/B-S 32,5 R	A, C, E, F	1,5	eine Bindemittelkombination (3 Mischungen)
				0	3 x 9 Mischungen
				0,33	
		1,0			
		CEM III/A 32,5 N	A, C, E, F	0	3 x 9 Mischungen
				0,33	
	1,0				
	Karbonatisierung nach 28, 56, 90 und 180 d sowie 1, 2 und 5 a ²⁾ ,	CEM I 32,5 R	A, C, E, F	0	9 Betonmischungen und 2 Feinbetonmischungen
				0,33	
				1,0	
		CEM II/B-S 32,5 R	A, C, E, F	1,5	eine Bindemittelkombination
				0	9 Betonmischungen und 2 Feinbetonmischungen
				0,33	
		1,0			
		CEM III/A 32,5 N	A, C, E, F	0	9 Betonmischungen und 2 Feinbetonmischungen
				0,33	
	1,0				
	Frostwiderstand (VDZ bzw. CIF) ²⁾	8 – 10 ausgewählte Mischungen			

1) Es werden jeweils 3 Mischungen (a, b und c) mit unterschiedlichen w/b-Werten geprüft

2) Untersuchung erfolgt jeweils nur an der B-Mischung

2.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

2.2.1 Hüttensande

Die verwendeten Hüttensande stammten aus fünf verschiedenen Provenienzen in Europa und werden mit A, C, D, E und F gekennzeichnet. Die Hüttensande wurden als Granulate angeliefert und dann aufgemahlen. Bei der Mahlung war es das Ziel, einen Blaine-Wert an der unteren Grenze der DIN EN 15167-1 /DIN06a/ zu erreichen. In Tabelle A1 sind die chemische Zusammensetzung der Hüttensandmehle und der Glasgehalt angegeben. Die Analyse erfolgte nach DIN EN 196-2 /DIN05b/. In DIN EN 15167-1 /DIN06a/ sind einige Anforderungen an die chemische Zusammensetzung gegeben, die in Tabelle 2 den Ergebnissen der chemischen Charakterisierung gegenübergestellt sind. Die Hüttensandmehle halten alle Anforderungen aus Tabelle 2 ein.

Tabelle 2: Überprüfung der Anforderungen an die chemische Zusammensetzung und den Glasgehalt der Hüttensandmehle

Parameter	Einheit	Anforderung der DIN EN 15167-1	Provenienz				
			A	C	D	E	F
1	2	3	4	5	6	7	8
CaO + MgO + SiO ₂	M.-%	≥ 66,7	85,5	86,7	82,1	88,0	86,5
(CaO + MgO)/SiO ₂	-	> 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 ¹⁾		≤ 3,0	0,83	0,23	1,61	0,43	1,00
Chlorid		≤ 0,1 ²⁾	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

1) nach Berücksichtigung der Oxidation von Sulfid

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

Bei der physikalischen Charakterisierung wurde neben der Rohdichte und der Mahlfeinheit die Kornverteilung einerseits mit Luftstrahlsiebung und andererseits mittels Lasergranulometrie bestimmt (s. Tabelle A2). Bei der Lasergranulometrie wird davon ausgegangen, dass die Partikel kugelförmig sind. Dies ist nur eine Näherung. Die Ergebnisse sind daher nicht identisch mit der Luftstrahlsiebung, sie liefern aber einen Anhaltswert für die Kornverteilung im Feinbereich. In Bild B1 sind die mit dem Lasergranulometer CILAS 1064 ermittelten Sieblinien der Hüttensandmehle dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Hüttensandmehle eine ähnliche, jedoch nicht exakt die gleiche Granulometrie aufweisen. Durch eine Aufbereitung/Sichtung hätten die Sieblinien angepasst werden können. Da jedoch in DIN EN 15167-1 /DIN06a/ keine weitere Behandlung der Hüttensandmehle vorgesehen ist, wurde in dem Projekt kein Einfluss auf die Kornverteilung genommen. Die spezifischen Oberflächen nach DIN EN 196-6 /DIN90/ liegen bei rund 3000 cm²/g und damit im unteren Bereich der DIN EN 15167-1 /DIN06a/. Da man die Mahlung nur in gewissen Bandbreiten einstellen kann, und das Ergebnis von Hüttensand zu Hüttensand unterschiedlich ist, wurde beim Hüttensandmehl E die Mindestmahlfeinheit von 2750 cm²/g etwas unterschritten.

In DIN EN 15167-1 /DIN06a/ werden neben den oben genannten chemischen und physikalischen Anforderungen Vorgaben zum Erstarren und zum Aktivitätsindex gemacht. Für diese Untersuchungen wird ein CEM I-Prüfzement benötigt, der der Festigkeitsklasse 42,5 (oder höher) entspricht. Der ausgewählte Zement ist in Abschnitt 2.2.2 beschrieben. Um ungünstige Verhältnisse abzubilden, wurden für die Untersuchungen an Mörtel und Beton Zemente mit geringem Alkaligehalt ausgewählt. Da der Prüfzement für die Bestimmung des Aktivitätsindex denselben Klinker aufweisen sollte, wurde der in DIN EN 15167-1 /DIN06a/ angegebene Mindestalkaligehalt des Prüfzements unterschritten. Zur Ermittlung der Beeinflussung des Erstarrens wird ein Gemisch aus 50 M.-% Hüttensandmehl und 50 M.-% Prüfzement hergestellt und der Erstarrungsbeginn nach DIN EN 196-3 /DIN05c/ ermittelt. Die Zeit bis zum Erstarrungsbeginn darf höchstens doppelt so lang sein wie beim Ausgangszement. Neben dem Erstarrungsbeginn wurden auch das Erstarrungsende und der Wasseranspruch nach DIN EN 196-3 /DIN05c/ ermittelt. In Tabelle A3 sind die Ergebnisse angegeben. Die Vorgaben zum Erstarrungsbeginn wurden von allen Hüttensandmehl-Zement-Mischungen eingehalten. Zur Berechnung des Aktivitätsindex wird die Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen an Normmörteln mit dem Prüfzement und dem Zement-Hüttensandmehlgemisch bestimmt. Tabelle 3 gibt die Zusammensetzung der Mörtel wieder.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Mörtel zur Bestimmung des Aktivitätsindex

Ausgangsstoff/Parameter	Einheit	Referenzmörtel	HSM-Mörtel
1	2	3	4
Prüfzement	g	450	225
HSM		–	225
Wasser		225	225
Normsand		1350	1350
w/b-Wert	–	0,50	0,50

HSM: Hüttensandmehl

Tabelle A3 gibt die Druckfestigkeiten der Mörtel wieder. Der Aktivitätsindex gibt das Verhältnis der Druckfestigkeiten der HSM-Mörtel und des Prüfmörtels an. Tabelle 4 zeigt die ermittelten Werte im Vergleich zu den Anforderungen der DIN EN 15167-1 /DIN06a/.

Tabelle 4: Aktivitätsindizes der Hüttensandmehle im Vergleich zur Normanforderung

Prüfalter	Vorgabe der DIN EN 15167-1	Provenienz				
		A	C	D	E	F
d	%	%				
1	2	3	4	5	6	7
7	≥ 45	73,5	58,0	49,7	44,6	54,1
28	≥ 70	102,8	84,7	74,4	63,8	85,5

Das Hüttensandmehl E hält die Anforderungen an den Aktivitätsindex nicht ein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Hüttensandmehl bei einem Prüfzement mit höherem Alkaligehalt möglicherweise einen höheren Aktivitätsindex erreicht hätte. Die Hüttensandmehle C, D und F weisen im Vergleich zum HSM A geringe Aktivitätsindizes auf, die jedoch noch im Bereich von DIN EN 15167-1 /DIN06a/ liegen. Eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Aktivitätsindex und der chemischen Zusammensetzung oder dem Glasgehalt ist nicht erkennbar. Durch eine Überlagerung dieses Einflusses mit der Feinheit, die sich nicht genau einstellen ließ, wird ein solcher Nachweis erschwert. Bekanntermaßen spielen mehrere Parameter eine wichtige Rolle für die Reaktivität des Hüttensandmehls /DAf07/.

2.2.2 Zemente

Als Prüfzemente wurden drei Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 ausgewählt, die mit demselben Klinker hergestellt wurden. Es handelt sich um einen Portlandzement CEM I 32,5 R, einen Portlandhüttenzement CEM II/B-S 32,5 R und einen Hochofenzement CEM III/A 32,5 N. Für die Charakterisierung der Hüttensandmehle (Aktivitätsindex) wurde zusätzlich ein CEM I 42,5 R verwendet (vgl. Abschnitt 2.2.1), der ebenfalls auf demselben Klinker basiert. Die chemische und mineralogische Zusammensetzung der vier Zemente ist in Tabelle A4 gegeben. Die Ermittlung der Mineralphasen erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie und Rietveld-Analyse. Die Unterschiede in der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Zemente CEM I 32,5 R und CEM I 42,5 R sind gering, was aufgrund des gleichen Klinkers zu erwarten war. Alle Zemente zeichnen sich durch ein niedriges Na_2O -Äquivalent aus. Ein niedriger Alkaligehalt wurde gewählt, um die Untergrenze der Reaktivität der Hüttensandmehle zu erfassen. Dies hatte jedoch zur Folge, dass der CEM I 42,5 R die Anforderung der DIN EN 15167-1 zum Alkaligehalt (Na_2O -Äquivalent zwischen 0,5 und 1,2 M.-%) nicht erfüllt.

Tabelle A5 gibt die Ergebnisse der physikalischen Charakterisierung wieder. Die mit dem Lasergranulometer ermittelte Korngrößenverteilung ist in Bild B2 graphisch dargestellt. Zur Charakterisierung der Zemente gemäß DIN EN 196-1 /DIN05a/ und -3 /DIN05c/ wurden außerdem die Mörteldruckfestigkeiten nach 2, 7, 28, 56 und 90 Tagen, die Raumbeständigkeit und die Erstarrungszeiten bestimmt. Die Ergebnisse enthält Tabelle A6. Zusätzlich ist die Druckfestigkeitsentwicklung in Bild B3 graphisch dargestellt. Der 56-Tage-Wert der Druckfestigkeit für den Referenzmörtel mit CEM I 32,5 R wurde versehentlich nicht bestimmt. Daher wurde zwischen dem 28-Tage- und dem 90-Tage-Wert interpoliert, was aufgrund des generellen Kurvenverlaufs sinnvoll erscheint. Der sich ergebende Wert ist in Tabelle A6 und in Bild B3 dargestellt und wurde für die weiteren Betrachtungen herangezogen.

2.2.3 Gesteinskörnung

Für die Untersuchungen wurde ein quarzitischer Rheinkies und -sand gemäß DIN EN 12630 /DIN03/ und DIN V 20000-103 /DIN04/ eingesetzt. Die Kornzusammensetzung entsprach bei den Betonuntersuchungen dem Sieblinienbereich A16/B16 nach DIN EN 1045-2 /DIN01/. Zusätzlich wurden auf Wunsch des Auftraggebers einige Mischungen mit einer Sieblinie A8/B8 zur Überprüfung des Karbonatisierungsverhaltens hergestellt. Bei den Mörtelversuchen wurde CEN-Normsand nach DIN EN 196-1 /DIN05a/ verwendet.

2.2.4 Betonzusatzmittel

Zur Einstellung der Konsistenz wurde bei den Betonversuchen ein handelsübliches Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis gemäß DIN EN 934-2 /DIN02/ verwendet.

2.3 Erstarrungsverhalten

Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende wurden an Kombinationen aller Zemente und Hüttensandmehle im h/z-Verhältnis 50/50 bestimmt. Zusätzlich wurden die Raumbeständigkeit und der Wasseranspruch dieser Bindemittelkombinationen ermittelt (s. Tabelle A7). Das Erstarrungsverhalten der Bindemittelkombinationen ist normgemäß, es treten keine stark verlängerten Erstarrungszeiten auf.

2.4 Versuche im Mörtelmaßstab

2.4.1 Ermittlung der relativen Festigkeiten

Um festzustellen, wie reaktiv die Hüttensandmehle in Kombination mit den unterschiedlichen Zementen sind, wurden die fünf Hüttensandmehle mit den drei Zementen der Festigkeitsklasse 32,5 kombiniert und die Mörteldruckfestigkeiten bestimmt. Es wurden hierbei h/z-Verhältnisse von $h/z = 20/80$, $50/50$ und $60/40$ gewählt. Die relativen Festigkeiten konnten dann mit Hilfe der Druckfestigkeiten der Zementmörtel (s. Tabelle A6) berechnet werden. Die Mörtel wurden analog zu DIN EN 196-1 /DIN05a/ mit einem w/b-Wert von 0,5 und einem Gesamtbindemittelgehalt von 450 g hergestellt. Die Proben wurden bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle A8 gegeben und in den Bildern B4 bis B6 im Vergleich zu den Zementmörteln (ohne HSM) dargestellt. Die relativen Festigkeiten sind in Tabelle A9 zusammengestellt und in den Bildern 1 bis 3 dargestellt.

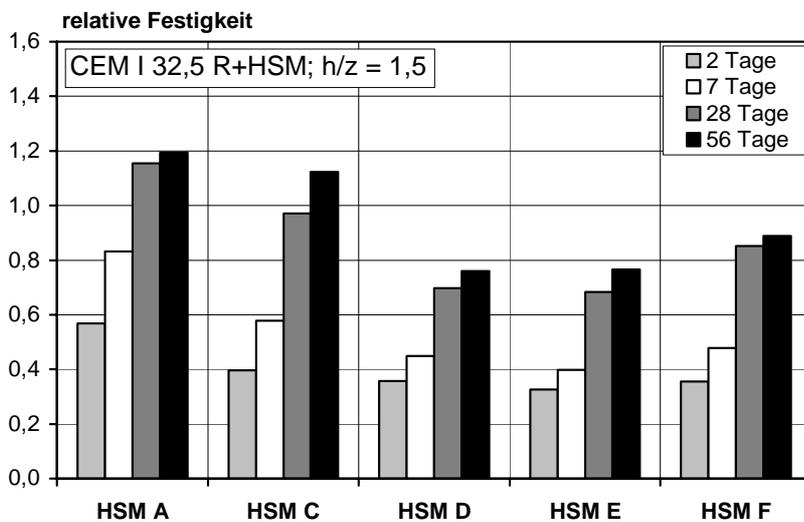
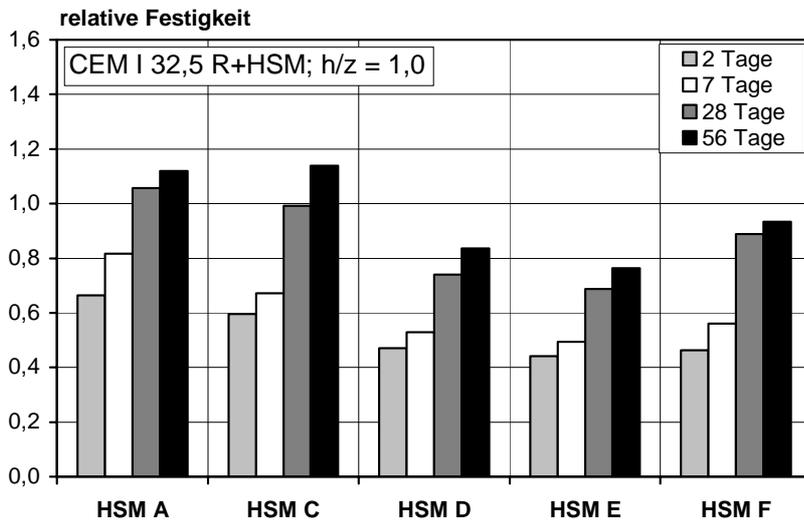
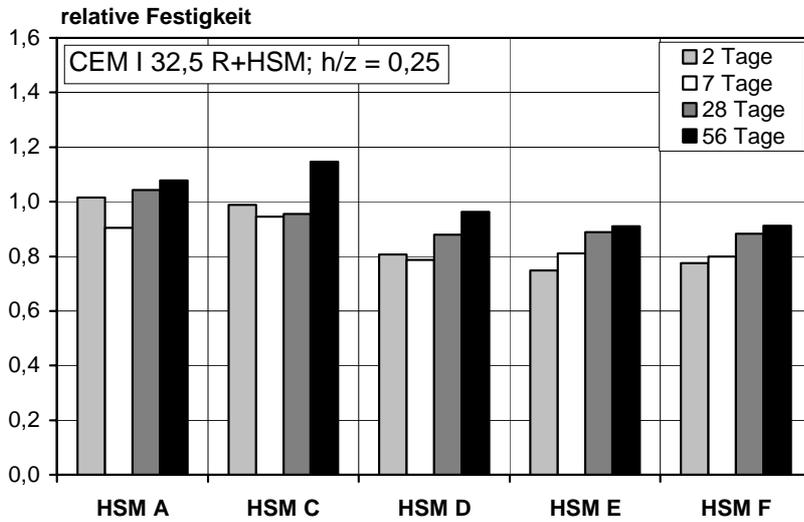


Bild 1: Relative Druckfestigkeiten von Mörteln mit den fünf Hüttensandmehlen in Kombination mit CEM I 32,5 R bei unterschiedlichen h/z-Verhältnissen

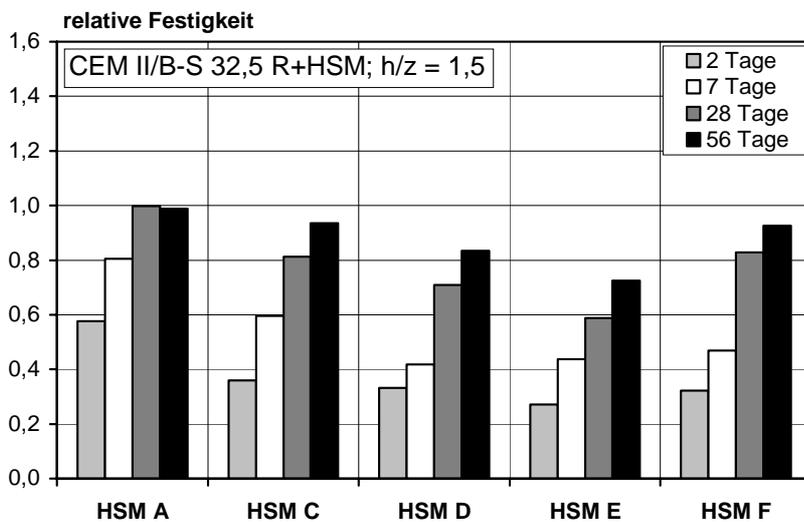
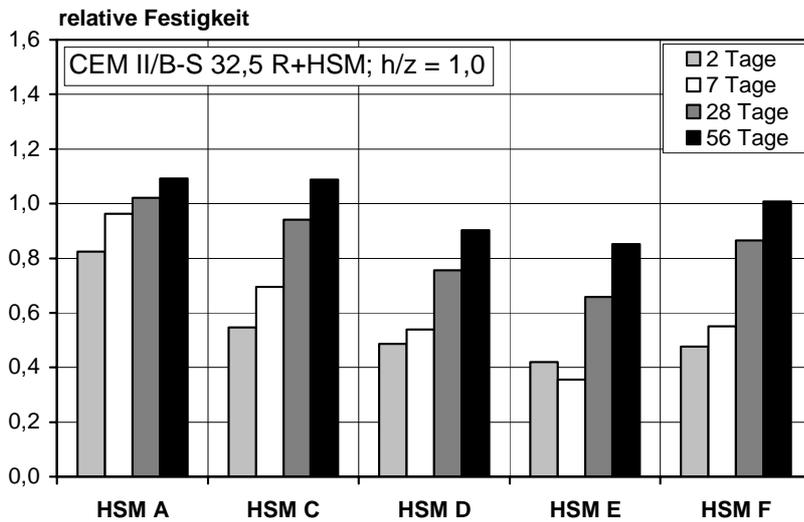
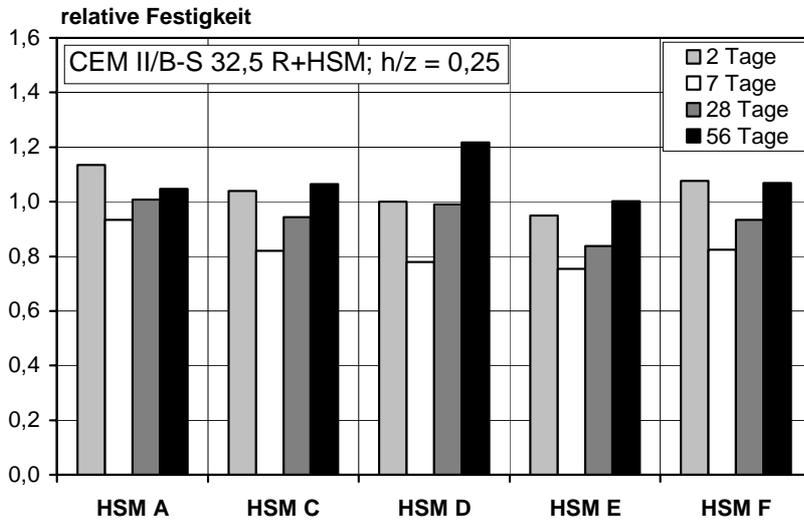


Bild 2: Relative Druckfestigkeiten von Mörteln mit den fünf Hüttensandmehlen in Kombination mit CEM II/B-S 32,5 R bei unterschiedlichen h/z-Verhältnissen

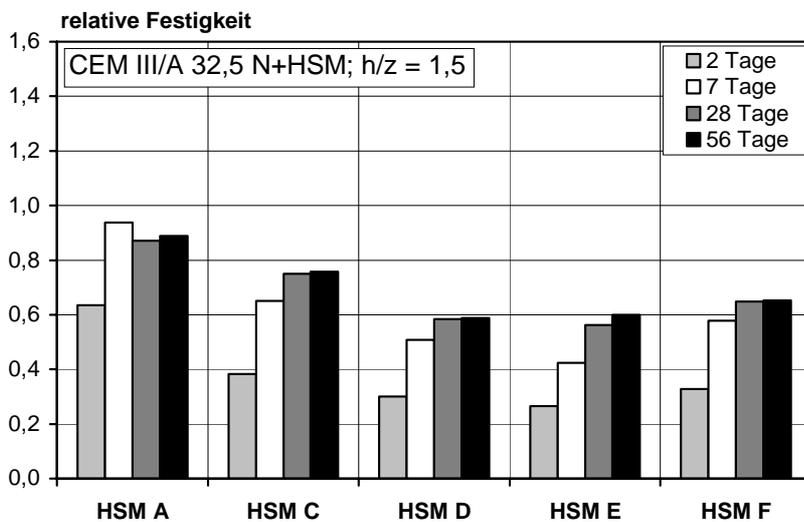
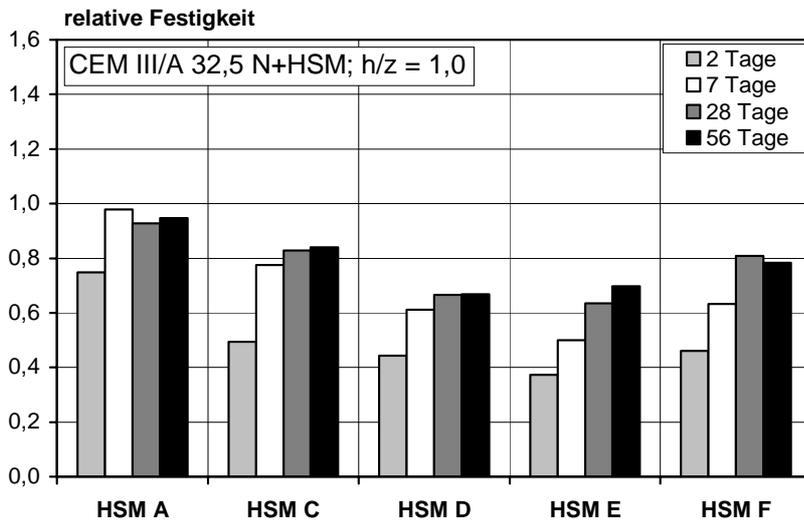
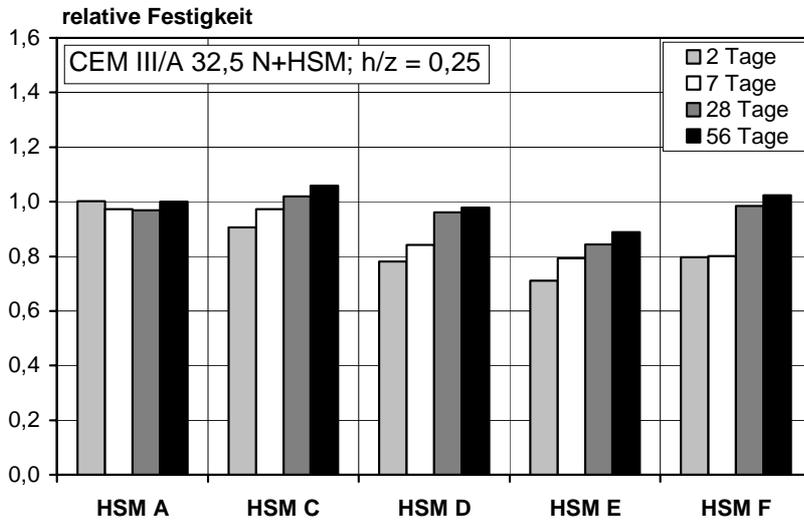


Bild 3: Relative Druckfestigkeiten von Mörteln mit den fünf Hüttensandmehlen in Kombination mit CEM III/A 32,5 R bei unterschiedlichen h/z-Verhältnissen

Bei hohen h/z-Verhältnissen liegen die relativen Festigkeiten meist deutlich unter 1. Durch die Verwendung von Hochofenzementen fällt die relative Festigkeit weiter ab. Dies betrifft insbesondere die frühen Prüftermine, da die latent-hydraulische Reaktion bei den hütten-sandreichen Bindemittelsystemen deutlich verzögert ist. Mit dem reaktivsten Hütten-sandmehl 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 Bin-demittelsystem hat einen Klinkeranteil von unter 20 M.-%. Das Hütten-sandmehl aus E weist die geringste Reaktivität auf; dies war nach den Ergebnissen der Charakterisierungs-prüfungen zu erwarten. Die Hütten-sandmehle D und F, die der DIN EN 15167-1 /DIN06a/ genügen, weisen jedoch meist nur wenig höhere relative Festigkeiten auf.

2.4.2 Überprüfung der Einsetzbarkeit nach dem Austauschkonzept

Wendet man das Prinzip gleicher Betonleistungsfähigkeit nach Anhang E der DIN EN 206-1 /DIN00/ an, um eine Einsetzbarkeit nach dem Austauschkonzept zu überprüfen, so können Betone mit der Bindemittelkombination Zement / Hütten-sandmehl mit einem Portlandhütten-zement oder einem Hochofenzement verglichen werden. Die Kombinationen CEM I / Hütten-sandmehl mit h/z = 1 weisen fast denselben Hütten-sandgehalt auf wie der CEM III/A. In Bild 4 sind die Druckfestigkeiten dieser Betone einander gegenübergestellt, um einen Ver-gleich zu ermöglichen.

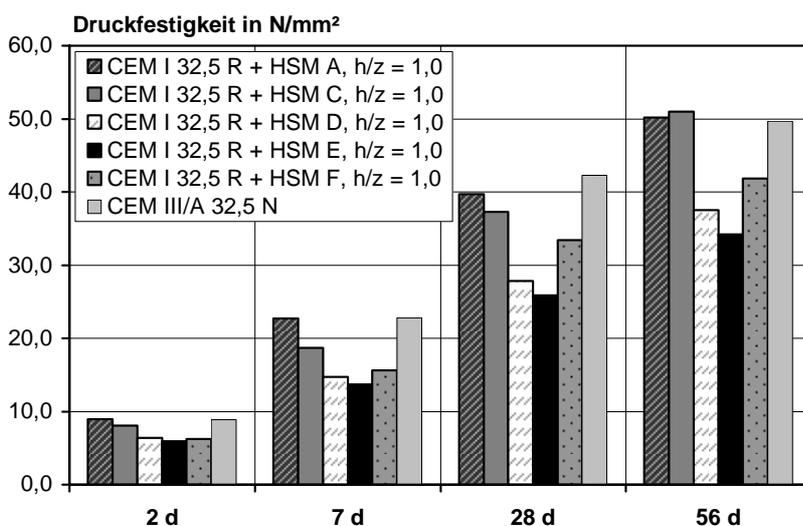


Bild 4: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Betone mit rund 50 M.-% Hütten-sand im Bindemittel

Der Beton mit dem Hüttensandmehl A erreicht oder überschreitet zu fast allen Prüfzeitpunkten die Festigkeit des Hochofenzements. Die Festigkeit nach 28 Tagen liegt etwas unterhalb der Referenz, was jedoch im Rahmen der Prüfstreuungen vernachlässigbar ist. Für dieses Hüttensandmehl scheint demnach eine Anwendung nach Austauschkonzept möglich zu sein. Alle anderen Portlandzement / Hüttensandmehl-Betone erreichen die Festigkeit des Hochofenzementbetons nicht oder erst nach sehr langen Hydratationszeiten. Das heißt, ein beliebiges Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ kann nicht generell nach dem Austauschkonzept eingesetzt werden.

2.5 Versuche im Betonmaßstab

2.5.1 Allgemeines

Die Versuche im Betonmaßstab wurden an den Hüttensandmehlen A, C, E und F durchgeführt. Das Hüttensandmehl D konnte im Betonmaßstab nicht untersucht werden, da die Probenmenge zu gering war. Die Untersuchungen im Mörtelmaßstab lassen jedoch den Schluss zu, dass sich dieses Hüttensandmehl ähnlich wie die HSM E und F verhalten wird.

2.5.2 Herstellung und Lagerung

Bei der Herstellung betrug die Temperatur der Ausgangsstoffe, des Prüfraumes, der Geräte und des Lagerraumes 18 bis 22 °C. Das Mischen der Ausgangsstoffe Wasser, Zement, Hüttensandmehl und Gesteinskörnung erfolgte in einem Zwangsmischer. Zunächst wurden Zement, Hüttensandmehl und Gesteinskörnung trocken angemischt. Nach der Wasserzugabe wurde bei Bedarf Fließmittel für eine Zielkonsistenz F2 zugegeben und insgesamt 2,5 Minuten gemischt. Die Prüfkörper wurden nach 1 bis 2 Tagen ausgeschalt und anschließend bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser gelagert. Anschließend lagerten die Prüfkörper im Normklima 20/65. Nur die Probekörper zur Elektrolytwiderstandsmessung wurden durchgehend unter Wasser gelagert.

2.5.3 Bestimmung der Druckfestigkeiten und der zementäquivalenten Wirksamkeiten (k-Werte)

Als erster wesentlicher Punkt beim Einsatz und bei der Anrechnung von Betonzusatzstoffen wird der Beitrag zur Festigkeitsentwicklung betrachtet. Die Bewertung soll hier nach dem k-Wert-Konzept erfolgen, das für Flugasche verwendet wird. Zu diesem Zweck wurden von jeder Bindemittelkombination drei Betone hergestellt, die den gleichen Wassergehalt aufweisen, sich aber im Bindemittelgehalt und damit im w/b-Wert unterscheiden. Die Ermittlung des k-Werts erfolgt durch Vergleich mit Referenzbetonen ohne Zusatzstoff. Diese Betone werden ebenfalls mit drei unterschiedlichen w/z-Werten hergestellt. Die Druckfestigkeiten der Mischungen werden dann in einem Diagramm über dem äquivalenten Wasserzementwert ($w/z_{\text{eq}} = w/(z+k \cdot h)$) aufgetragen. Der k-Wert wird dabei so gewählt, dass die Festigkeiten der Referenzmischungen und der Prüfmischungen auf einer Geraden liegen. Das genaue Vorgehen wird im Folgenden erläutert. Tabelle 5 gibt zunächst die Zusammensetzung der Betone wieder. Es wurde eine quarzitische Gesteinskörnung der Sieblinie A16/B16 verwendet. Die Herstellung erfolgte nach Abschnitt 2.5.2.

Tabelle 5: Bindemittel- und Wassergehalte der Betone zur k-Wert Bestimmung

Parameter	Einheit	Referenzbetone			Betone mit h/z = 0,33			Betone mit h/z = 1,0			Betone mit h/z = 1,5		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zementgehalt	kg/m ³	370	315	275	280	240	210	185	160	140	147	127	110
Gehalt an Hüttensandmehl		–	–	–	93	80	70	185	160	140	220	190	165
Wassergehalt		168			168			168			168		
w/b-Wert	–	0,45	0,53	0,61	0,45	0,53	0,60	0,45	0,53	0,60	0,46	0,53	0,61

Die an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge ermittelten Druckfestigkeiten im Alter von 2, 7, 28 und 56 Tagen sind in Tabelle A10 zusammengestellt. Für die b-Mischungen ist die Druckfestigkeitsentwicklung zusätzlich in den Bildern B7 bis B9 graphisch dargestellt.

Zur Ermittlung des k-Werts werden nun die Druckfestigkeiten der Referenzproben a, b und c über dem jeweiligen w/z-Wert aufgetragen (s. Bild 5, links). Im Bereich der oben angegebenen w/z-Werte liegen die Festigkeiten i. d. R. mit guter Näherung auf einer Geraden. Anschließend werden die Festigkeiten der hüttensandhaltigen Mischungen a, b und c über dem äquivalenten Wasserzementwert $w/z_{eq} = w / (z + k \cdot h)$ aufgetragen. Der k-Wert wird dabei so gewählt, dass die beiden Geraden möglichst übereinander liegen. Dies ist im Bild 5, rechts, beispielhaft für das Hüttensandmehl aus E bei einem h/z-Verhältnis von 0,33 dargestellt.

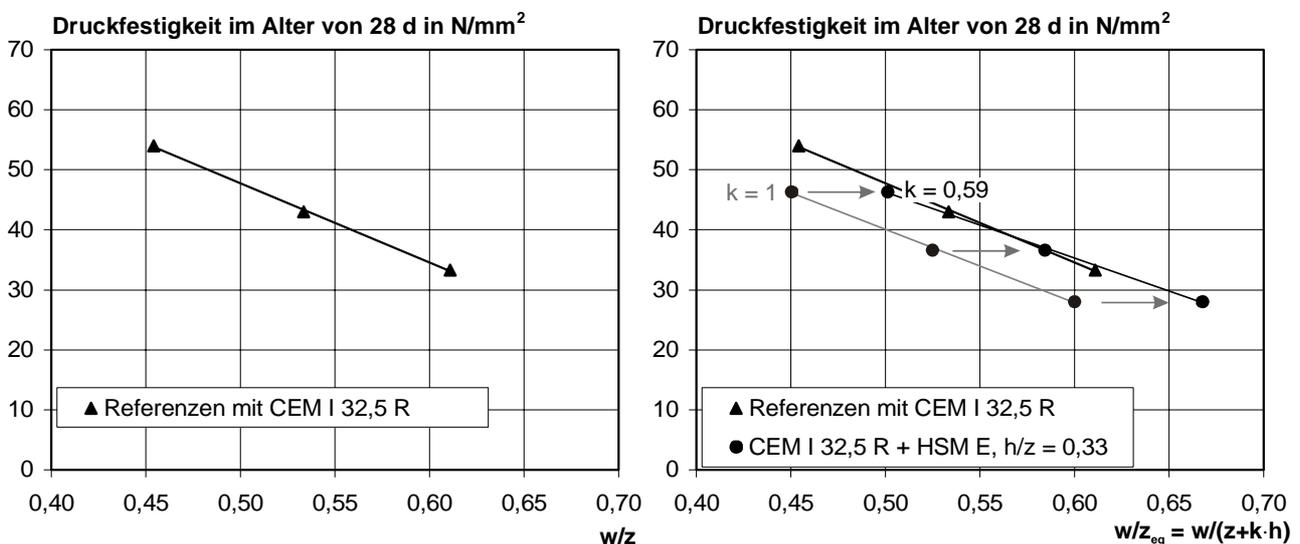


Bild 5: Bestimmung des k-Werts; rechts: Referenzfestigkeiten, links: Überlagerung der Festigkeiten der Prüfmischung mit der Referenzgeraden

Nach diesem Vorgehen sollten für die 25 betrachteten Bindemittelkombinationen (vier Hüttensandmehle kombiniert mit 3 Zementen bei h/z-Verhältnissen von 0,33 bis 1,5) k-Werte für die Prüfalter 2, 7, 28 und 56 Tage abgeleitet werden. Es ergaben sich dabei jedoch einige Schwierigkeiten. Bei den Referenzmischungen mit CEM III/A 32,5 R wurde festgestellt, dass die Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen nicht auf einer Geraden lagen (s. Bild 6). Das Bestimmtheitsmaß der Ausgleichsgrade lag unter 0,9.

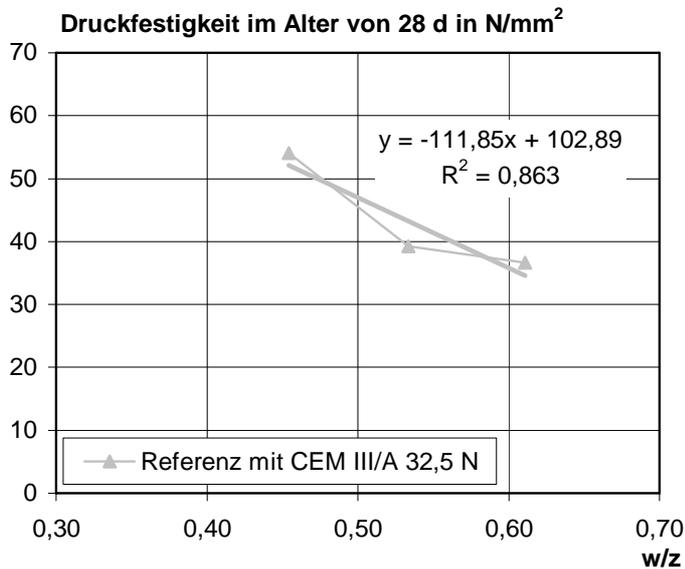


Bild 6: Druckfestigkeit der Referenz mit CEM III/A 32,5 N in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

Diese Abweichung wird wahrscheinlich durch Versuchsstreuungen hervorgerufen. Um einen Anhaltswert für die Gradengleichung zu erhalten, wurden die Ergebnisse mit dem Walz-Diagramm verglichen. Da das Walz-Diagramm für Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm aufgestellt wurde, müssen die hier ermittelten Festigkeiten (s. Tabelle A10, Zeile 23, Spalten 6, 10 und 14) mit dem Faktor 0,95 multipliziert werden. Die sich ergebenden Werte sind in Bild 7 in das Walz-Diagramm eingetragen.

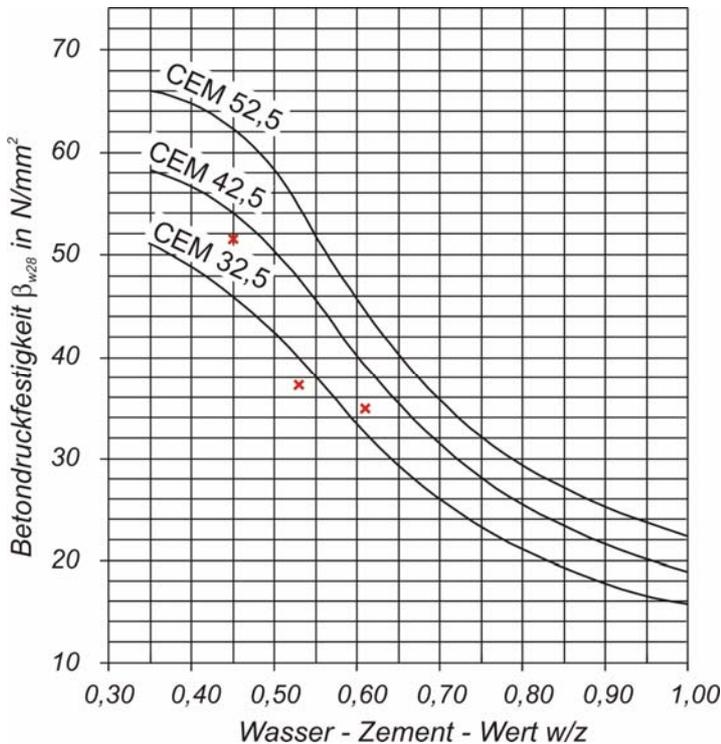


Bild 7: Walz-Diagramm mit den Festigkeiten der Referenzen mit CEM III/A 32,5 N

Es ist ersichtlich, dass die Festigkeiten bei $w/z = 0,45$ und $w/z = 0,61$ über der Kurve für den CEM 32,5 liegen, während die Festigkeit bei $w/z = 0,53$ offenbar zu gering ist. Verschiebt man die Walzkurve nach oben, so dass sich eine gute Anpassung an den höchsten und den niedrigsten w/z -Wert ergibt, so erhält man für $w/z = 0,53$ eine Festigkeit von ca. $43,9 \text{ N/mm}^2$. Der hier ermittelte Wert liegt bei $37,2 \text{ N/mm}^2$. Verwendet man diesen niedrigen Wert, so führt das dazu, dass die Ausgleichsgerade der Referenzmischung sich zu niedrigeren Festigkeiten verschiebt. Bei der Überlagerung der Ausgleichsgeraden der hüttensandhaltigen Mischungen würden dadurch höhere k -Werte ermittelt. Um die k -Werte nicht zu überschätzen, wurde für die Auswertung eine Festigkeit von $43,9 \text{ N/mm}^2 / 0,95 = 46,2 \text{ N/mm}^2$ herangezogen.

Im Alter von 2 Tagen war eine Überlagerung der Geraden meist nicht möglich, da die Festigkeiten der hüttensandhaltigen Mischungen deutlich unter der Festigkeit der Referenzen lagen. In diesem jungen Alter wurde daher auf eine Bestimmung des k -Werts verzichtet. Für die übrigen Prüfalalter wurde eine k -Wert-Bestimmung durchgeführt, allerdings konnte nicht immer ein zuverlässiger Wert ermittelt werden. In Bild 8 sind zwei solche Fälle dargestellt.

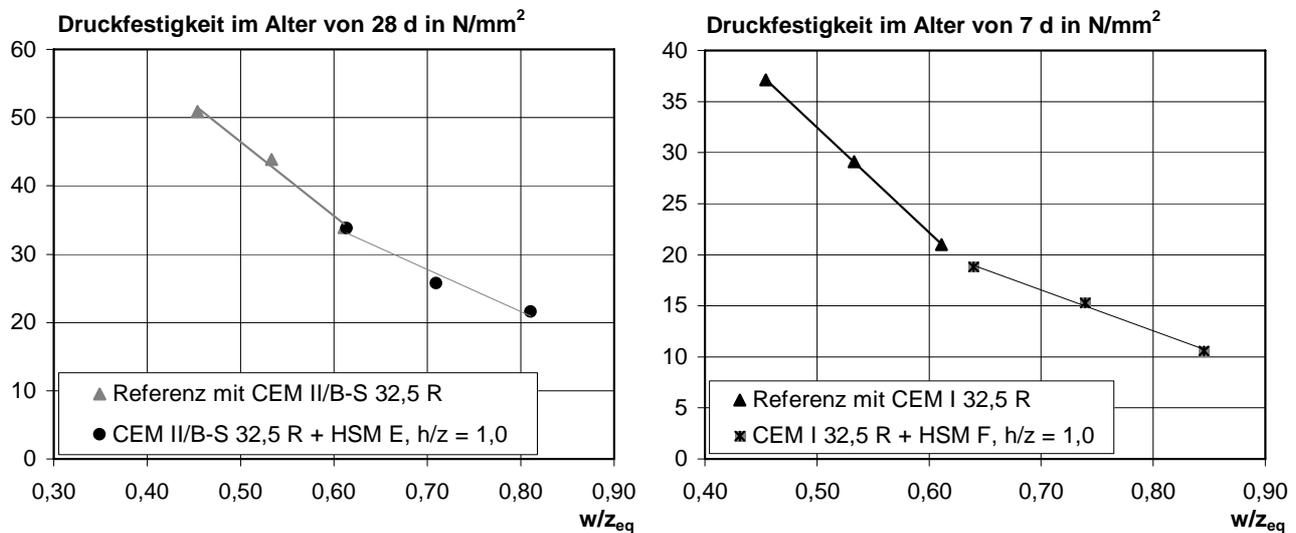


Bild 8: Beispiele für ungünstige Ausgangsdaten zur Bestimmung des k-Werts

Links im Bild 8 erreicht die Festigkeit der hüttensandhaltigen Mischung bei niedrigstem w/z-Wert gerade die Festigkeit der Referenz bei höchstem w/z-Wert, rechts liegen alle Festigkeiten der hüttensandhaltigen Mischung unterhalb der Referenz. Da die Steigungen der Ausgleichsgeraden von Referenz und hüttensandhaltiger Mischung jeweils verschieden sind, kann kein zuverlässiger k-Wert angegeben werden. Bei der Zusammenstellung der k-Werte (s. Tabelle 6) sind daher Mischungen, bei denen nur eine geringe Überschneidung der Festigkeitswerte aufgetreten ist (wie in Bild 8, links), gekennzeichnet. Für Mischungen, bei denen keine Überlagerung der Festigkeiten aufgetreten ist (wie in Bild 8, rechts) werden keine k-Werte angegeben. Die geringe Überlagerung resultiert daraus, dass der Festigkeitsbeitrag des Hüttensandmehls bei der Konzeption der Mischungen überschätzt wurde – es wurde ein k-Wert von 1,0 unterstellt. Zur Quantifizierung dieser k-Werte müssten deshalb neue Mischungen mit einem höheren Bindemittelgehalt entworfen werden.

Tabelle 6: k-Werte der Hüttensandmehle in Abhängigkeit vom Zement, vom h/z-Verhältnis und vom Prüfalalter

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 ²			N/mm ²			N/mm ²		
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 ¹⁾	0,81	0,79	–	0,83	0,82	0,57 ¹⁾	0,56 ¹⁾	0,59 ¹⁾
E	0,33	0,33	0,59	0,54	0,33 ¹⁾	0,47	0,47	0,26 ¹⁾	0,29	0,47
	1,00	–	0,54 ¹⁾	0,55 ¹⁾	–	0,48 ¹⁾	0,56 ¹⁾	–	–	0,46 ¹⁾
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 ¹⁾	0,73	0,72	0,50 ¹⁾	0,56 ¹⁾	0,60 ¹⁾

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

Die ermittelten k-Werte sind in den Bildern 8 bis 10 vergleichend dargestellt. Wie zu erwarten war, weisen die Mischungen mit dem Portlandzement (s. Bild 9) nach 7 Tagen geringere k-Werte auf als nach 28 Tagen, da die Reaktion des Hüttensandmehls langsamer abläuft als die des Klinkers. Zwischen 28 und 56 Tagen treten keine signifikanten Steigerungen in den k-Werten auf. In Kombination mit dem CEM II/B-S 32,5 R verhalten sich die Hüttensandmehle ähnlich wie beim Portlandzement (s. Bild 10), allerdings werden meist niedrigere k-Werte erreicht. Beim Hochofenzement (s. Bild 11) sind die Unterschiede zwischen den 7- und 28-Tage-Werten geringer, da dieser Zement bereits ohne Zugabe von Hüttensandmehl als Zusatzstoff eine langsame Festigkeitsentwicklung aufweist und daher die Festigkeiten der Referenz in jungem Alter niedriger sind. Die k-Werte liegen hier nochmals niedriger als beim CEM II/B-S.

Ein k-Wert von 1 wird bei der hier vorliegenden Mahlfeinheit nur vom reaktivsten Hüttensandmehl (A) in Kombination mit dem Portlandzement bei relativ kleinem h/z-Verhältnis erreicht. Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ kann daher nicht generell mit $k = 1$ eingesetzt werden.

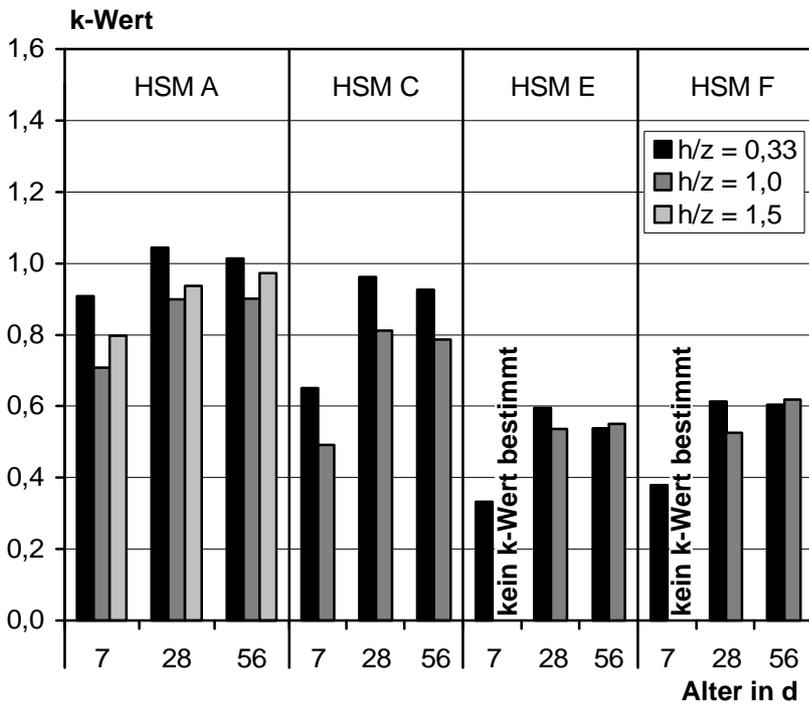


Bild 9: k-Werte der Hüttensandmehle in Kombination mit CEM I 32,5 R im Alter von 7, 28 und 56 Tagen

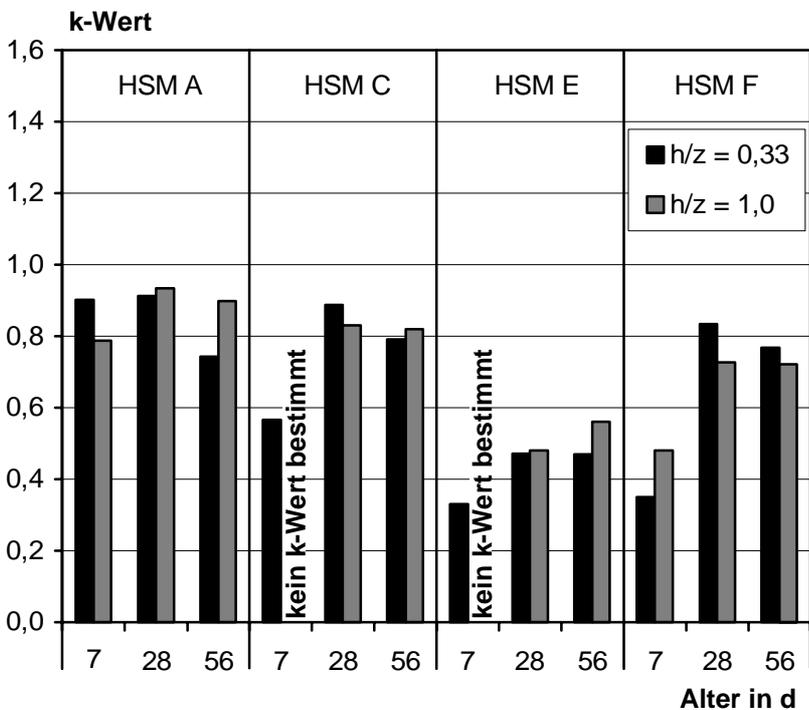


Bild 10: k-Werte der Hüttensandmehle in Kombination mit CEM II/B-S 32,5 R im Alter von 7, 28 und 56 Tagen

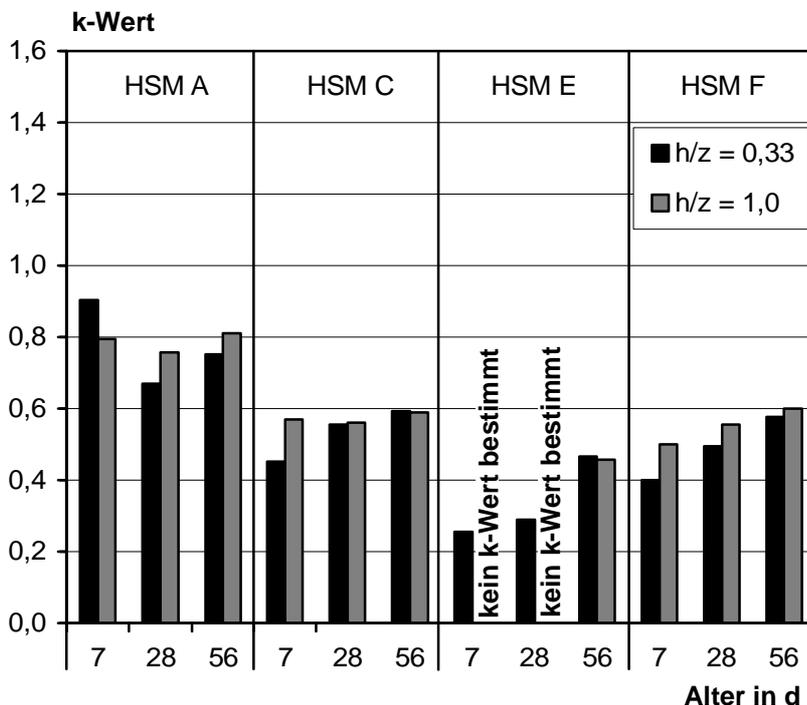


Bild 11: k-Werte der Hüttensandmehle in Kombination mit CEM III/A 32,5 N im Alter von 7, 28 und 56 Tagen

Die Festlegung eines minimalen k-Werts, der nach 28 Tagen von allen Hüttensandmehlen nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ erreicht wird, wird durch die teilweise sehr unsichere k-Wert-Bestimmung (s. o.) erschwert. Wahrscheinlich wird dieser k-Wert im Bereich von 0,5 liegen. Das nicht normkonforme Hüttensandmehl aus E erreicht diesen Wert bei mehreren Kombinationen nicht.

2.5.4 Überprüfung der Einsetzbarkeit nach dem Austauschkonzept

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 2.4.2 werden hier Bindemittelkombinationen, die einen ähnlichen Hüttensandgehalt aufweisen, wie der Portlandhüttenzement oder der Hochofenzement, diesen Referenzbetonen gegenübergestellt. Es wird hier nur auf die b-Mischung eingegangen. Bild 12 zeigt die Bindemittelkombinationen CEM I / Hüttensandmehl mit $h/z = 0,33$ im Vergleich zum Portlandhüttenzement und Bild 13 die Kombinationen mit $h/z = 1$ im Vergleich zum Hochofenzement.

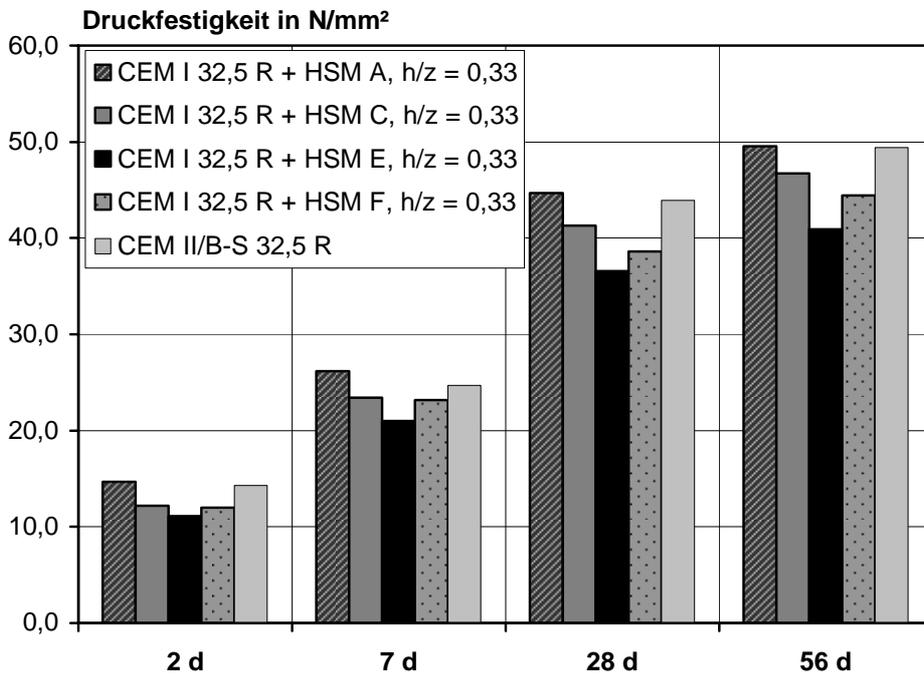


Bild 12: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Betone CEM I / HSM mit $h/z = 0,33$ (Hüttensandgehalt im Bindemittel: 24,8 M.-%) mit den Druckfestigkeiten des Referenzbetons mit CEM II/B-S (Hüttensandgehalt im Zement: 27,6 M.-%)

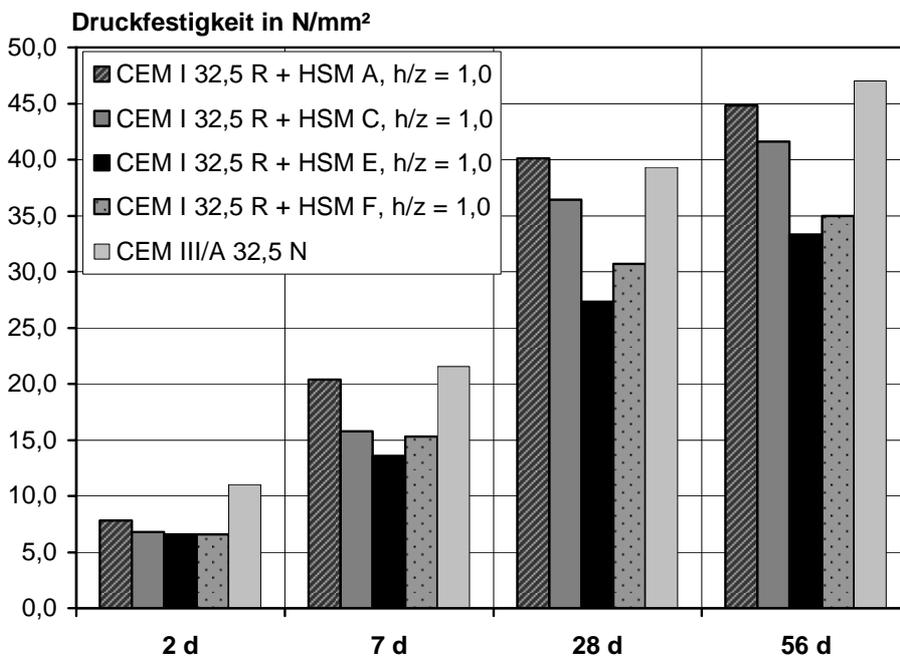


Bild 13: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Betone CEM I / HSM mit $h/z = 1$ (Hüttensandgehalt im Bindemittel: 50 M.-%) mit den Druckfestigkeiten des Referenzbetons mit CEM III/A (Hüttensandgehalt im Zement: 51,2 M.-%)

Es ist ersichtlich, dass eine gleiche Leistungsfähigkeit nur beim HSM A gegeben ist. Die Ergebnisse der Mörtelprüfungen (Abschnitt 2.4.2) werden bestätigt.

2.5.5 Bestimmung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit

2.5.5.1 Versuchsdurchführung

Das Karbonatisierungsverhalten wurde zunächst an Betonprismen ($70 \cdot 70 \cdot 250 \text{ mm}^3$) der b-Mischungen aus Abschnitt 2.5.3, Tabelle 5, untersucht. Auf Wunsch des Auftraggebers wurden dann zusätzlich an sechs ausgewählten Mischungen mit $h/z = 0,33$ Prüfungen an Feinbetonprismen (Sieblinie A8/B8) durchgeführt, um eine Anbindung an die Datenbank des DIBt zu erhalten. Der Feinbeton unterscheidet sich neben der Sieblinie auch im Bindemittelgehalt und im Wassergehalt von dem Beton, da die Feinbetone analog zu DIN EN 196-1 /DIN05a/ mit einem Gesamtbindemittelgehalt von mindestens 450 g und einem w/b -Wert von $0,5$ hergestellt werden. Die auf den m^3 bezogenen Bindemittel- und Wassergehalte der Betone sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Bindemittel- und Wassergehalte der Betone zur Untersuchung des Karbonatisierungsverhaltens

Parameter	Einheit	Betonmischungen				Feinbetonmischungen
		Referenz	$h/z = 0,33$	$h/z = 1,0$	$h/z = 1,5$	$h/z = 0,33$
1	2	3	4	5	6	7
Zementgehalt	kg/m^3	315	240	160	127	370
Gehalt an Hüttensandmehl		–	80	160	190	123
Wassergehalt		168	168	168	168	247
w/b -Wert	–	0,53	0,53	0,53	0,53	0,50

Die Betone wurden, wie in Abschnitt 2.5.2 angegeben, 7 Tage unter Wasser vorgelagert und anschließend im Normklima 20/65 gelagert. Die Prüfung der Karbonatisierungstiefe erfolgte nach dem in Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton („Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048“) angegebenen Prüfverfahren. Dazu wurden zu jedem Prüftermin von drei Prüfkörpern ca. 30 mm dicke Stücke abgespalten und die frische Bruchfläche mit 1%iger Phenolphthaleinlösung besprüht. Die Karbonatisierungstiefe wurde 24 Stunden später gemessen. Ermittelt wurde die mittlere Karbonatisierungstiefe jeder Seite der Bruchfläche und die sich daraus ergebende mittlere Karbonatisierungstiefe d_k des Prismas zum Prüfzeitpunkt. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt. Folgende Prüftermine wurden gewählt: 28, 56, 90, 180 und 365 Tage sowie 2 und 5 Jahre Hauptlagerung.

Die Feinbetonprismen wurden bei zwei Vorlagerungen untersucht: 7 und 28 Tage. Wie bei der Karbonatisierungsprüfung im Rahmen von Zulassungen üblich, wurde zusätzlich die Druckfestigkeit nach Vorlagerung, im Alter von 35 Tagen und nach 140 Tagen Hauptlagerung bestimmt. Für die Messung der Karbonatisierungstiefe wurden folgende Prüftermine gewählt: 14, 28, 56, 98, 140 und 365 Tage sowie 2 und 5 Jahre Hauptlagerung.

2.5.5.2 Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche an Beton

Die gemessenen Karbonatisierungstiefen der Betone sind in Tabelle A11 angegeben. Zur Ermittlung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit wurden die Karbonatisierungstiefen über der Zeit im Wurzelmaßstab aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden gibt dann die mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeit an. Dies ist in den Bildern B10 bis B21 dargestellt. Da die Mischungen nicht zeitgleich hergestellt wurden, liegen unterschiedlich viele Ergebnisse vor. Da immer eine gewisse Streuung auftritt und zudem die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in hohem Alter tendenziell abnimmt, beeinflusst die Zahl der Messpunkte die Steigung der Ausgleichsgeraden erheblich. Für einen Vergleich der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Mischungen sollten deshalb möglichst die gleichen Prüfzeitpunkte vorliegen. Um trotz der bisher unvollständigen Datengrundlage eine Aussage zur Beeinflussung des Karbonatisierungsverhaltens durch die Hüttensandmehle treffen zu können, wurden die mittleren Karbonatisierungsgeschwindigkeiten für einen Zeitraum von 28 bis 365 Tagen berechnet. Bei Mischungen, für die schon Werte für 2 Jahre vorliegen, wurde dieser Zeitpunkt weggelassen.

Tabelle 8: Mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Prüfbetone im Zeitraum von 28 bis 365 Tagen

Hüttensand- mehl	h/z	Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mischungen mit		
		CEM I 32,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
-	-	mm/ \sqrt{d}		
1	2	3	4	5
- ¹⁾	0	0,171	0,151	0,265
A	0,33	0,206	0,257	0,216
	1,00	0,248	0,221	0,300
	1,50	0,268	nicht untersucht	nicht untersucht
C	0,33	0,206	0,220	0,393
	1,00	0,267	0,342	0,434
E	0,33	0,205	0,249	0,353
	1,00	0,300	0,504	0,530
F	0,33	0,168	0,179	0,378
	1,00	0,331	0,295	0,330

1) Referenzmischung

Die Zusammenstellung zeigt, dass durch die Zugabe von Hüttensandmehl als Zusatzstoff die Karbonatisierung beschleunigt wird, lediglich bei dem Hochofenzement scheint die Zugabe des Hüttensandmehls A bei einem h/z-Verhältnis von 0,33 keinen beschleunigenden Einfluss zu haben. Mit steigender Dosierung nimmt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit z. T. erheblich zu, in einigen Fällen jedoch auch geringfügig ab. Der Hüttensandgehalt des Zements wirkt sich ähnlich stark aus. In Bild 14 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Portlandzementgehalt aufgetragen. Der Portlandzementgehalt ist der Zementgehalt abzüglich des Hüttensandanteils im Zement.

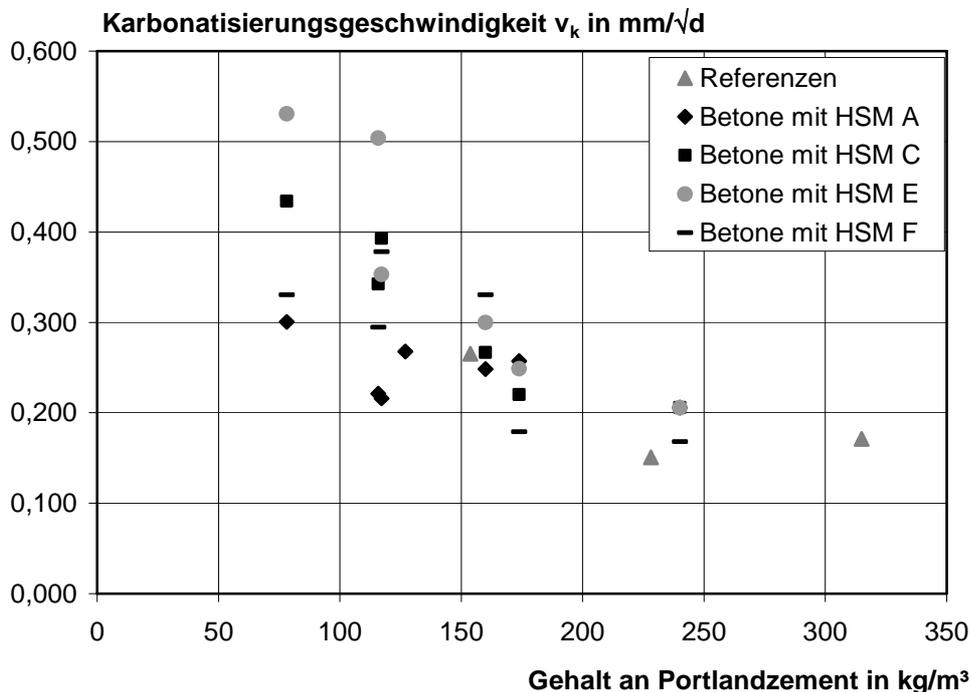


Bild 14: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der untersuchten Betone in Abhängigkeit vom Gehalt an Portlandzement

Wie bereits aus den Bildern B10 bis B21 deutlich wurde, streut die Karbonatisierungsgeschwindigkeit z. T. stark. Trotz dieser Streuung ist insbesondere im Bereich hoher Hüttensandgehalte bzw. geringer Portlandzementgehalte eine gewisse Tendenz hinsichtlich der Qualität der verschiedenen Hüttensandmehle festzustellen (s. Bild 14). So ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit des Hüttensandmehls E, das bereits bei der Bestimmung der Druckfestigkeit die geringste zementäquivalente Wirksamkeit aufwies (s. Tabelle 7), hier am höchsten. Das Hüttensandmehl A, der die höchste zementäquivalente Wirksamkeit aufweist, besitzt die geringste Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Entsprechendes gilt auch für die Hüttensandmehle C und F. Somit wird, zumindest bei hohen Hüttensandgehalten, ein Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungsgeschwindigkeit und der Druckfestigkeit deutlich, was in erster Linie auf das Gefüge des Betons zurückzuführen ist. Der Beton mit dem Hüttensandmehl E in Kombination mit dem Portlandhüttenzement und einem h/z -Verhältnis von 1,0 fällt aus der Bandbreite der übrigen Messpunkte stark heraus (s. auch Bild 15, höchster Wert). Dieses Hüttensandmehl liegt jedoch bzgl. des Blaine-werts und des Aktivitätsindex unterhalb der Normanforderungen. Die übrigen Karbonatisierungstiefen liegen im Bereich von äquivalenten Bindemitteln mit Hüttensand (s. Bild 15).

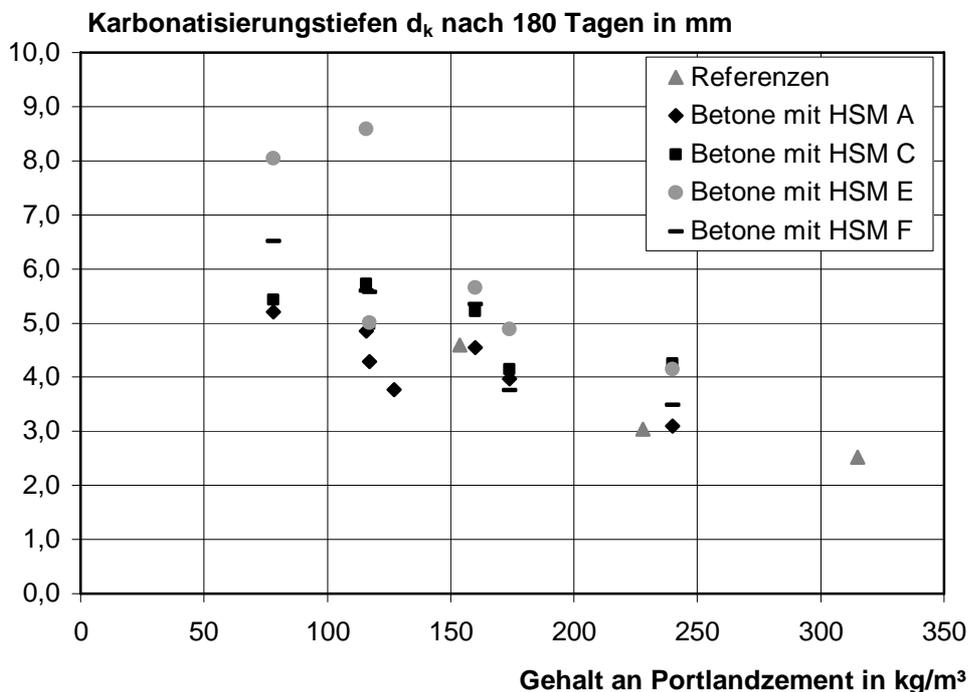


Bild 15: Karbonatisierungstiefen der untersuchten Betone nach 180 Tagen in Abhängigkeit vom Gehalt an Portlandzement

Da die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei einem Portlandzementgehalt unter 150 kg/m³ offensichtlich erheblich zunehmen kann, erscheint es empfehlenswert bei der Festlegung der Anwendungsregeln für die Expositionen XC einen Mindestklinkergehalt aufzunehmen, der sowohl bei Verwendung von Portlandzement als auch bei Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen gilt.

2.5.5.3 Ergebnisse der Karbonatisierungsprüfung an Feinbeton

Die Karbonatisierungstiefen der Feinbetone sind in Tabelle A12 angegeben. Hier liegen Werte für einen Zeitraum von 14 bis 140 Tagen vor. Die Druckfestigkeiten sind in Tabelle A13 aufgeführt und in Bild B22 dargestellt. Wie im Abschnitt 2.5.5.2 beschrieben, wurden auch hier die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten anhand der Ausgleichsgeraden bestimmt (s. Bild B23 bis B25) und in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Feinbetone im Zeitraum von 14 bis 140 Tagen

Hüttensand- mehl	Vorlage- rung	Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mischungen mit		
		CEM I 32,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
-	d	mm/ \sqrt{d}		
1	2	3	4	5
A	7	0,140	0,261	0,293
	28	0,118	0,098	0,118
E	7	0,188	0,292	0,343
	28	0,153	0,128	0,188

Bei einer Vorlagerung von 7 Tagen steigt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit zunehmendem Hüttensandgehalt des Zements an. Durch die Verlängerung der Vorlagerung auf 28 Tage kann man diese Tendenz jedoch ausgleichen und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei allen Betonen deutlich verringern. Die Reaktivität des Hüttensandmehls spielt für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit eine wichtige Rolle, so sind die Werte von HSM A grundsätzlich günstiger als von HSM E. Vergleicht man die Ergebnisse der Tabelle 9 für die Vorlagerung VL 7 mit den Karbonatisierungsprüfungen im Betonmaßstab (Abschnitt 2.5.5.2, Tabelle 8, Zeile 5 und 10), so ist folgendes festzustellen:

- Bei den Bindemittelkombinationen mit dem CEM I 32,5 R ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit vom Feinbeton geringer als im Betonversuch,
- bei den Bindemittelkombinationen mit CEM II/B-S 32,5 R liegen die Werte für Beton und Feinbeton in einem ähnlichen Bereich und
- die Bindemittelkombinationen mit CEM III/A 32,5 N karbonatisieren im Feinbetonmaßstab schneller als im Betonversuch.

Dies zeigt, dass Betone mit hohem Hüttensandanteil bei der Untersuchung im Feinbetonmaßstab zu ungünstig bewertet werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn ein Vergleich mit klinkerreichen Betonen gezogen wird, die im Feinbetonmaßstab weniger stark karbonatisieren als im Betonmaßstab. Die höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeit der hüttensandreichen Betone im Feinbetonmaßstab ist auf die stärkere Austrocknung der kleinformatigen Prismen zurückzuführen. Die Hüttensandmehle erreichen dadurch nicht den Reaktionsgrad, der sich im Beton einstellt. Hinzu kommt, dass auch die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betonproben höher sind, als in der Praxis, da die Lagerungsbedingungen sehr ungünstig gewählt wurden. Die im Labor ermittelten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten sind daher nicht direkt auf die Praxis zu übertragen.

2.5.6 Bestimmung des Elektrolytwiderstands

Zur Bestimmung der Dichtheit der Betone wurde der Elektrolytwiderstand nach dem Wenner-Verfahren (Vier-Elektroden-Methode) gemessen. Dabei wurden alle fünf Schalseiten je eines Würfels der b-Mischungen nach Tabelle 5, Abschnitt 2.5.3 diagonal und parallel zu den Rändern (in der Mitte des Würfels) geprüft, so dass jeweils 20 Messwerte vorlagen, die gemittelt wurden. Die Herstellung und Lagerung des Prüfwürfels mit 200 mm Kantenlänge erfolgte nach Abschnitt 2.5.2. Die Prüfung wurde im Alter von 7, 14, 28 und 56 Tagen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A14 zusammengestellt und in den Bildern B26 bis B28 graphisch dargestellt. Die Bilder zeigen, dass die Zugabe von Hüttensandmehl wie erwartet zu einer erheblichen Steigerung des Elektrolytwiderstands vor allem in höherem Alter führt. Die weniger reaktiven Hüttensandmehle E und F wirken dabei gleich stark wie das Hüttensandmehl A. Das Hüttensandmehl C zeigt dagegen in Kombination mit dem Portlandzement und dem Portlandhüttenzement nur eine vergleichsweise geringe Verbesserung des Elektrolytwiderstands, bei den frühen Prüfterminen liegen die Werte sogar unter der Referenz. Wenn man davon ausgeht, dass der Elektrolytwiderstand ein zuverlässiger Indikator für die Dichtheit des Betons ist, so müsste aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass die Mischungen mit dem Hüttensandmehl C eine deutlich größere Porenstruktur aufweisen als die Mischungen mit den Hüttensandmehlen aus E und F. Dies ist jedoch nicht sehr wahrscheinlich. Das Hüttensandmehl C weist den höchsten Alkaligehalt der hier untersuchten Hüttensandmehle auf. Wenn diese Alkalien an der Oberfläche der Hüttensandpartikel vorliegen, könnte dies dazu führen, dass die Porenlösung bei Mischungen mit dem Hüttensandmehl C zunächst eine höhere Alkalikonzentration und damit eine höhere Leitfähigkeit aufweist. Dies könnte den geringeren Elektrolytwiderstand erklären. Zur eindeutigen Klärung dieser Frage müssten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

2.5.7 Untersuchung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands

2.5.7.1 Mischungszusammensetzung

Zur Untersuchung des Frostwiderstands wurden 10 Mischungen ausgewählt, die mit dem Portlandzement bzw. dem Portlandhüttenzement hergestellt wurden. Es wurden nur die drei weniger reaktiven Hüttsandmehle (C, E und F) untersucht. Die Zusammensetzung der Referenz wurde so gewählt, dass sie den Anforderungen an die Expositionsklasse XF3 und XF4 genügt. Bei den Mischungen mit Hüttsandmehl wurde derselbe Gesamtbindemittelgehalt wie bei der Referenz gewählt. Der Wassergehalt wurde entsprechend den in Abschnitt 2.5.3 ermittelten k-Werten festgelegt, wobei die 28-Tage-Werte aus Tabelle 6 auf ganze 0,05 gerundet wurden. Tabelle 10 gibt die Bindemittel- und Wassergehalte der Mischungen wieder.

Tabelle 10: Zusammensetzung der Betone zur Untersuchung des Frostwiderstands

Parameter	Einheit	Betone mit CEM I 32,5 R					Betone mit CEM II/B-S 32,5 R				
		Referenz	h/z=0,33			h/z=1,0	Referenz	h/z=0,33			h/z=1,0
			C	E	F	C		C	E	F	C
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zementgehalt	kg/m ³	320	240	240	240	160	320	240	240	240	160
Gehalt an Hüttsandmehl		–	80	80	80	160	–	80	80	80	160
k-Wert	–	–	0,95	0,6	0,6	0,8	–	0,9	0,5	0,8	0,8
w/(z+k·h)	–	0,50					0,50				
Wassergehalt	kg/m ³	160	158	144	144	144	160	156	140	152	144
w/b	–	0,50	0,49	0,45	0,45	0,45	0,50	0,49	0,44	0,48	0,45

Die Herstellung erfolgte analog zu Abschnitt 2.5.2.

2.5.7.2 Bestimmung des Frostwiderstands

Zur Bestimmung des Frostwiderstands wurde das Würfelprüfverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 /DIN06b/ herangezogen, wobei die Prüfung über die nach dieser Vorschrift vorgesehenen 56 Frosttauwechsel (FTW) hinaus bis 100 FTW fortgeführt wurde. Die Prüfkörper wurden im Alter von 27 Tagen in Wasser eingelagert, und die Prüfung begann im Alter von 28 Tagen. Zu diesem Zeitpunkt wurde auch die Druckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge bestimmt. Die Prüftermine für die Frostprüfung waren: 14, 28, 42, 56, 74 und 100 FTW. Die ermittelten Abwitterungen der Probekörper sind in Tabelle A15 angegeben. Die Druckfestigkeiten enthält Tabelle A16. Die Druckfestigkeiten der Referenzen soll-

ten in etwa den Festigkeiten der Mischungen mit den Hüttensandmehlen entsprechen. Dies ist nicht immer der Fall. Die Abweichungen deuten darauf hin, dass der k-Wert des Hüttensandmehls C bei $h/z = 0,33$ insbesondere in Kombination mit dem Portlandzement etwas zu hoch angesetzt worden ist, während der k-Wert des Hüttensandmehls E in Kombination mit dem Portlandhüttenzement zu niedrig gewählt wurde. Der k-Wert des Hüttensandmehls F wurde bei der Kombination mit dem Portlandzement zu niedrig gewählt.

Die Abwitterungen der untersuchten Mischungen (s. Bild B29) sind sehr gering. Die Betone sind damit für die Exposition XF3 geeignet.

2.5.7.3 Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde im CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 /DIN06b/ geprüft, wobei die Versuchslaufzeit von 28 FTW auf 56 FTW verlängert wurde. Für die CDF-Prüfung wurden die Betone nach Tabelle 9 gemäß DIN EN 1045-2 /DIN01/ mit Luftporenbildner hergestellt. Der erzielte Luftgehalt lag bei 5,2 bis 5,6 Vol.-%. Es wurden Probekörper mit den Abmessungen 150 mm · 110 mm · 72 mm verwendet. Als Prüftermine für die Bestimmung der Abwitterung und des dynamischen E-Moduls waren 6, 14, 20, 28, 34, 44 und 56 Tage vorgesehen. Zum Teil ergaben sich Verschiebungen von 1 bis 2 Tagen, die in den Tabellen A17 und A18 angegeben sind. Wie bei der Prüfung des Frostwiderstands wurde auch hier die Druckfestigkeit nach 28 Tagen bestimmt. Sie ist in Tabelle A19 angegeben. Aufgrund der Luftporen fallen die Festigkeiten hier durchgehend deutlich geringer aus als bei den Betonen für das Würfelverfahren (Abschnitt 2.5.7.2). Ein Vergleich der hüttensandhaltigen Mischungen mit den Referenzen bestätigt, dass der k-Wert des Hüttensandmehls C bei $h/z = 0,33$ in Kombination mit dem Portlandzement etwas zu hoch angesetzt worden ist und der k-Wert des Hüttensandmehls E in Kombination mit dem Portlandhüttenzement zu niedrig. Die k-Werte des Hüttensandmehls F wurden ebenfalls etwas zu niedrig gewählt. Die zeitlichen Verläufe der Abwitterung und des E-Moduls sind in den Bildern B30 bis B33 dargestellt. Ergänzend zeigen die Bilder B34 und B35 die Wasseraufnahme der Betone während des Versuchs. Die Mischungen mit Hüttensandmehl weisen eine geringere Wasseraufnahme auf als die Referenzen. In den Bildern 13 und 14 sind die 28-Tage-Werte der Abwitterung und des dyn. E-Moduls den Anforderungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und den RILEM Recommendations gegenübergestellt.

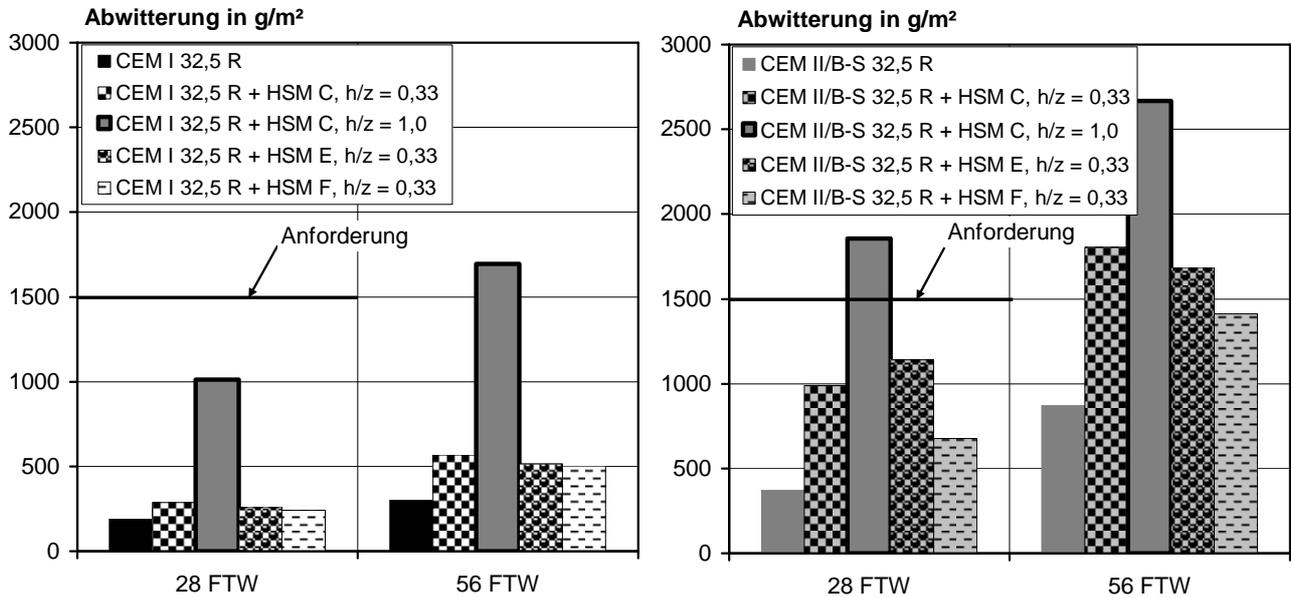


Bild 16: Abwitterung der Betone im CDF-Verfahren im Vergleich zu der Anforderung

Die Anforderung an die Abwitterung wird nach 28 Tagen von der Mischung mit CEM II/B-S und $h/z = 1,0$ überschritten. Bei einem h/z -Verhältnis von 0,33 halten alle Betone die Anforderung ein. Eine Gefügeschädigung konnte bei keinem der Betone nachgewiesen werden, alle Mischungen halten die Anforderungen an den relativen dynamischen E-Modul ein (s. Bild 17).

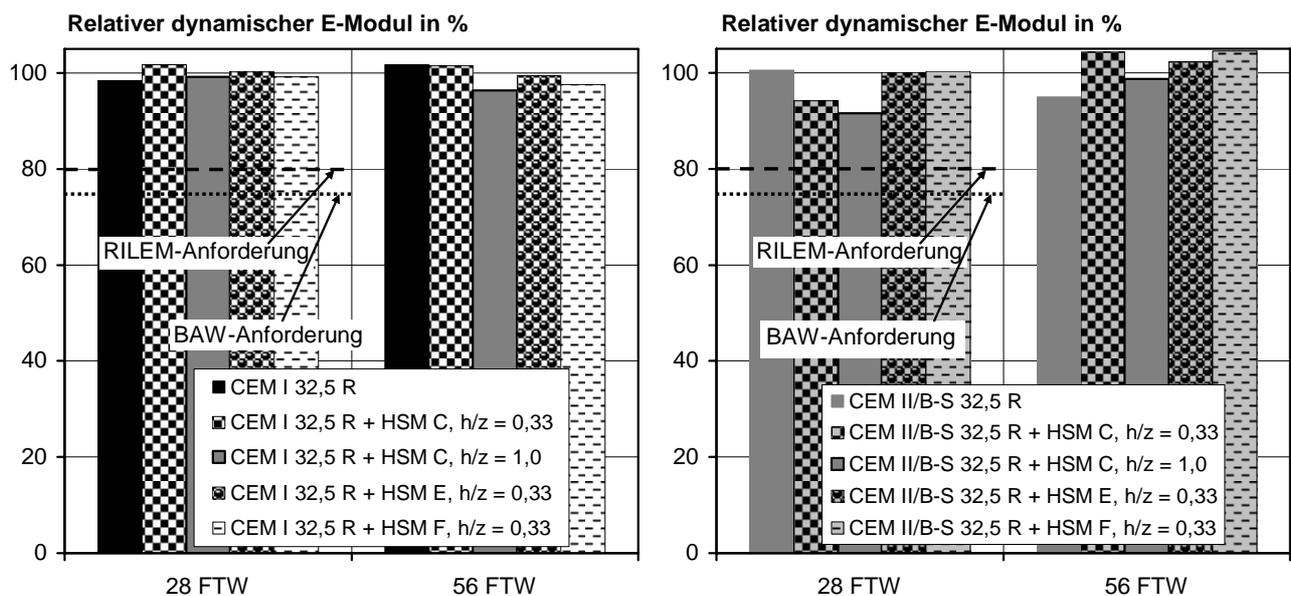


Bild 17: Relativer dynamischer E-Modul der Betone im CDF-Verfahren im Vergleich zu den Anforderungen

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 hüttensandhaltigem Zement wurde die Anforderung an die Abwitterung im CDF-Verfahren überschritten. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse der CDF-Prüfung aufgrund der Prüfbedingungen (z. B. Vorlagerung und Wassersättigung) nur bedingt auf die Praxis zu übertragen sind.

3 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Eigenschaften von Betonen mit Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ geprüft. Die DIN EN 15167-1 ist eine Stoffnorm, die chemische und physikalische Anforderungen an den gemahlene Hüttensand festlegt. Vorgaben zur Anwendung des Hüttensandmehls 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 zement-äquivalenten Wirksamkeit (k-Wert) von Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ erbracht werden. Die gewählten Hüttensandmehle mussten daher im Bereich der Mindestanforderungen liegen, die innerhalb der europäischen Produktnorm gegeben sind. Neben der Ableitung des k-Werts wurde überprüft, ob eine Verwendung nach dem Austauschkonzept möglich ist. Nach diesem Konzept wird Zement im Verhältnis 1 : 1 durch Hüttensandmehl ersetzt, das dann auch vollständig auf den Wasserzementwert angerechnet wird. Die Kontrolle erfolgte durch Vergleich der Druckfestigkeiten der Kombination CEM I / Hüttensandmehl mit Referenzbeton aus Portlandhütten- bzw. Hochofenzement mit gleichem Hüttensandgehalt.

Für das Projekt wurden fünf europäische Hüttensande ausgewählt, die als Granulate ans ibac geliefert und speziell für dieses Projekt aufgemahlen wurden. Die Mahlfeinheit sollte dabei möglichst nah an der Mindestanforderung der DIN EN 15167-1 liegen. Die am Markt erhältlichen Hüttensandmehle weisen in aller Regel 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 Minimalanforderungen der Norm. In ihrer chemischen Zusammensetzung entsprechen die Hüttensandmehle DIN EN 15167-1 /DIN06a/. Die Anforderungen an den Aktivitätsindex und die Mahlfeinheit werden von einem Hüttensandmehl 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 und CEM III/A 32,5 N. Zunächst wurden an allen Kombinationen von Hüttensandmehlen und Zementen die relativen Festigkeiten (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. Wie erwartet sinken die relativen Festigkeiten mit steigendem Hüttensandgehalt des Zements und mit steigendem h/z-Verhältnis ab. Dies betrifft insbesondere die frühen Prüfetermine, da die latent-hydraulische Reaktion bei den hüttensandreichen Bindemittelsystemen deutlich verzögert ist. Mit dem reaktivsten Hüttensandmehl 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 einen deutlich geringeren Beitrag zur Festigkeit. Häufig wird auch bei moderaten Hüttensandgehalten und nach langen Hydratationszeiten die Festigkeit der Referenzmörtel nicht erreicht.

Im Betonmaßstab wurden Versuche an 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. 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. Anhand der vorliegenden Daten kann abgeschätzt werden, dass der minimale k-Wert normkonformer Hüttensandmehle im Alter von 28 Tagen je nach verwendeter Zementart 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. Alle anderen Portlandzement / Hüttensandmehl-Kombinationen erreichen die Festigkeit der Vergleichsbetone und -mörtel mit Portlandhütten- bzw. Hochofenzement nicht oder erst nach sehr langen Hydratationszeiten. Das heißt, Hüttensandmehl nach DIN EN 15167-1 /DIN06a/ kann nicht generell nach dem Austauschkonzept eingesetzt werden.

Neben den Druckfestigkeitsuntersuchungen wurde die Dauerhaftigkeit im Hinblick das Karbonatisierungsverhalten (s. Abschnitt 2.5.5), den Elektrolytwiderstand (s. Abschnitt 2.5.6) und den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand (s. Abschnitt 2.5.7) 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 mit steigendem Hüttensandgehalt und sinkendem Portlandzementgehalt zunimmt. Dabei ist es unerheblich, ob der Hüttensand aus dem Zement stammt oder als Zusatzstoff zugesetzt wird. Gerade im Hinblick auf die Kombination von Hüttensandmehl mit CEM II- und CEM III-Zementen erscheint es sinnvoll, einen Mindestklinkergehalt in den Anwendungsregeln festzulegen oder die verwendbaren Zementarten einzugrenzen. 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 die im Feinbetonmaßstab weniger stark karbonatisieren als im Betonmaßstab. Das Feinbeton-Prüfverfahren ist daher zur Bewertung nicht gut geeignet.

Bei der Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands wurden nur die drei weniger reaktiven Hüttensandmehle in Kombination mit dem Portland- und dem Portlandhüttenzement untersucht. Bei zwei Hüttensandmehlen wurde nur das h/z -Verhältnis 0,33 geprüft, ein Hüttensandmehl wurde zusätzlich mit $h/z = 1,0$ untersucht. Die Zusammensetzung der Referenzmischungen wurde so gewählt, dass sie den Anforderungen an die Expositions-kategorie 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 EN 1045-2 /DIN01/ festgelegt. Die Eignung für die Expositions-kategorie 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 Überschreitung der zulässigen Abwitterung von 1500 g/m^2 auf. Das heißt, die untersuchten Betone mit $h/z = 0,33$ sind für den Einsatz in der Expositions-kategorie XF4 geeignet. Bei $h/z = 1,0$ und gleichzeitiger Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen können in Abhängigkeit vom Hüttensandmehl im CDF-Verfahren Überschreitungen der Anforderungen auftreten.

Marktgängige 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 k-Werte erzielt (s. hierzu auch /Ras08/). Realistisch erscheint 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, die entsprechende Anforderungen an den Aktivitätsindex und die Mahlfeinheit definieren.

4 LITERATUR

- /DAf07/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff - Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Berlin: Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2007), Nr. 569
- /DIN90/ DIN EN 196-6:1990-03 Prüfverfahren für Zement; Teil 6: Bestimmung der Mahlfeinheit
- /DIN00/ DIN EN 206-1:2001-07 Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /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
- /DIN02/ DIN EN 934-2:2002-02 Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel, Teil 2: Betonzusatzmittel Definition, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; A1:2005-06, A2:2006-03
- /DIN03/ DIN EN 12620:2003-04 Gesteinskörnungen für Beton
- /DIN04/ DIN V 20000-103:2004-04 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken; Teil 103: Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2003-04
- /DIN05a/ DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- /DIN05b/ DIN EN 196-2:2005-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 2: Chemische Analyse von Zement
- /DIN05c/ DIN EN 196-3:2005-05 Prüfverfahren für Zement; Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit
- /DIN06a/ DIN EN 15167-1:2006-12 Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Teil 1: Definition, Anforderung und Konformitätskriterien
- /DIN06b/ DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 Prüfung von Festbeton; Teil 9: Frost und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung
- /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

Tabelle A1: Chemische Zusammensetzung der Hüttensandmehle (getrocknete Probe)

Bestandteil/Parameter		Einheit	Provenienz				
			A	C	D	E	F
1		2	3	4	5	6	7
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 CO ₂ (CSA)	M.-%	0,84	0,17	0,72	0,31	0,66
	als C		0,23	0,05	0,20	0,08	0,18
	Sulfat, SO ₃ (gravimetrisch)		0,16	0,01	0,37	0,01	0,01
	Sulfid, S ²⁻		0,93	0,99	1,20	0,73	0,71
	Gesamtschwefel als SO ₃ (CSA)		2,43	2,51	3,45	1,76	1,68
	Chlorid (HNO ₃ -Aufschluss)		0,03	0,01	0,02	0,01	0,03
	SiO ₂		34,1	37,5	36,9	38,3	37,5
	TiO ₂		0,60	0,42	0,30	0,46	0,23
	Al ₂ O ₃		10,1	12,23	7,25	9,26	8,73
	Fe ₂ O ₃		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 ₂ O ₅		0,18	0,15	0,15	0,01	0,10
	Na ₂ O		0,22	0,37	0,38	0,47	0,38
K ₂ O	0,35	1,00	0,39	0,41	0,30		
Na ₂ O-Äquivalent			0,45	1,03	0,64	0,74	0,58
Glasgehalt (lichtmikroskopisch)			94,6	99,1	70,8	87,4	66,9
Feuchtegehalt nach /DIN06a/			0,0	0,0	0,5	0,1	0,2

CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator

Tabelle A2: Physikalische und granulometrische Eigenschaften der Hüttensandmehle

Prüfparameter		Einheit	Prüfwert				
			A	C	D	E	F
1	2	3	4	5	6	7	
Dichte	kg/m ³	2,940	2,957	2,930	2,936	3,001	
spez. Oberfläche	cm ² /g	3181	3505	2919	2675	3174	
Kornanteil (Siebanalyse)	< 90 µm	M.-%	99,62	100,0	94,10	100,0	100,0
	< 63 µm		97,90	99,95	81,10	99,90	99,80
	< 50 µm		94,35	99,30	72,05	99,05	98,75
	< 40 µm		89,25	97,65	65,00	94,55	94,35
	< 20 µm		61,60	71,55	44,95	55,95	60,15
Kornanteil (Lasergranulometer)	< 90 µm	M.-%	91,65	95,10	84,38	92,31	93,11
	< 63 µm		84,75	89,10	76,43	84,38	86,12
	< 50 µm		79,30	83,72	70,73	77,81	80,24
	< 40 µm		73,49	77,62	65,02	70,77	73,84
	< 20 µm		54,17	56,06	47,57	48,12	52,43
	< 10 µm		36,79	36,35	32,75	29,54	33,74
	< 8 µm		32,06	31,10	28,77	24,88	28,85
	< 6 µm		26,66	25,21	24,21	19,78	23,39
	< 5 µm		23,63	21,98	21,64	17,04	20,39
	< 4 µm		20,32	18,51	18,82	14,16	17,19
	< 3 µm		16,66	14,75	15,66	11,10	13,72
	< 2 µm		12,50	10,63	12,03	7,82	9,92
	< 1 µm		7,55	5,99	7,57	4,25	5,62
	< 0,5 µm		4,51	3,34	4,72	2,29	3,16
< 0,1 µm	1,33	0,84	1,55	0,54	0,81		
Kennwerte der Kornverteilung (Lasergranulometer)	Medianwert	µm	17,1	16,4	22,1	21,2	18,4
	d'	µm	27,6	25,1	37,3	31,8	28,3
	n	-	0,767	0,864	0,702	0,906	0,852

-: nicht bestimmt

d' : Durchmesser bei 63,2 % Durchgang; n : Exponent der RRSB-Verteilung

Tabelle A3: Wasseranspruch, Raumbeständigkeit, Erstarrungszeiten und Mörteldruckfestigkeiten der Prüfzement-Hüttensandmehl-Gemische (50:50) im Vergleich zum Prüfzement

Bindemittel	Wasseranspruch	Raumbeständigkeit (C-A)	Erstarrungs-		Druckfestigkeit nach	
			beginn	ende	7 d	28 d
-	M.-%	mm	h:min		N/mm ²	
1	2	3	4	5	6	7
Prüfzement (CEM I 42,5 R)	27,2	1,00	2:35	3:10	40,8	49,5
HSM A + Prüfzement	28,2	0,50	2:55	3:15	30,0	50,9
HSM C + Prüfzement	28,6	1,20	3:00	3:55	23,7	41,9
HSM D + Prüfzement	24,8	1,10	2:30	3:20	20,3	36,8
HSM E + Prüfzement	27,8	0,65	2:45	4:00	18,2	31,6
HSM F + Prüfzement	20,8	0,80	2:55	3:45	22,1	42,3

HSM: Hüttensandmehl

Tabelle A4: Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Zemente (getrocknete Probe)

Bestandteil/Parameter		Einheit	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
1		2	3	4	5	6
Glühverlust an Luft			2,58	3,05	2,47	1,71
Glühverlust unter Argon			–	–	3,90	3,93
Unlöslicher Rückstand (HCl/Soda)			0,5	0,3	0,5	0,5
Unlöslicher Rückstand (EDTE)			–	–	26,78	49,09
Unlöslicher Rückstand (HNO ₃)			–	–	–	0,32
Hüttensandanteil			–	–	27,6	51,2
Haupt- und Neben- bestand- teile	Kohlenstoff als CO ₂ (CSA)	M.-%	2,44	2,63	2,82	2,57
	als C		0,67	0,72	0,77	0,70
	Sulfat, SO ₃ (gravimetrisch)		–	–	2,08	2,56
	Gesamtschwefel als SO ₃ (CSA)		2,88	3,35	3,19	5,25
	Chlorid (HNO ₃ -Aufschluss)		0,014	0,006	0,013	0,014
	SiO ₂		20,3	20,0	23,5	26,7
	TiO ₂		0,23	0,26	0,41	0,49
	Al ₂ O ₃		3,61	3,97	6,09	7,71
	Fe ₂ O ₃		3,62	3,62	2,62	1,57
	MnO		0,06	0,06	0,13	0,18
	MgO		0,88	1,06	2,84	4,31
	CaO		64,5	63,71	57,2	52,1
	P ₂ O ₅		< 0,08	< 0,11	< 0,08	0,17
	Na ₂ O		0,06	0,13	0,11	0,17
	K ₂ O		0,31	0,31	0,30	0,29
Na ₂ O-Äquivalent	0,26	0,33	0,31	0,36		
Mineral- phasen	C ₃ S	M.-%	60,2	59,3	–	–
	C ₂ S		17,2	14,5		
	C ₃ A		2,0	2,0		
	C ₄ AF		11,1	12,5		
	Anhydrit		2,4	3,5		
	Gips		1,5	2,0		
	Calcit		3,9	4,0		
	Periklas		0,3	0,6		
	Quarz		0,1	0,3		
	CA ₂		0,8	0,6		

CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator

–: nicht bestimmt

Tabelle A5: Physikalische und granulometrische Eigenschaften der Zemente

Prüfparameter	Einheit	Prüfwert				
		CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 32,5 N	
1	2	3	4	5	6	
Dichte	kg/m ³	3,114	3,126	3,031	3,017	
spez. Oberfläche (Blaine)	cm ² /g	2592	3887	3129	3658	
Kornanteil (Laser- granulometer)	< 90 µm	93,17	–	94,29	95,95	
	< 63 µm	86,07	92,81	87,71	90,36	
	< 50 µm	80,08	89,16	81,96	85,14	
	< 40 µm	73,56	84,83	75,56	79,09	
	< 20 µm	51,82	67,82	53,63	57,14	
	< 10 µm	33,03	49,41	34,24	36,80	
	< 8 µm	28,14	43,93	29,17	31,38	
	< 6 µm	22,71	37,40	23,52	25,32	
	< 5 µm	19,75	33,61	20,44	22,00	
	< 4 µm	16,59	29,37	17,15	18,45	
	< 3 µm	13,19	24,54	13,61	14,62	
	< 2 µm	9,48	18,86	9,75	10,45	
	< 1 µm	5,32	11,81	5,44	5,80	
	< 0,5 µm	2,96	7,27	3,01	3,19	
	< 0,1 µm	0,74	2,29	0,74	0,78	
Kennwerte der Kornverteilung (Lasergranulometer)	Medianwert	µm	18,8	10,2	17,8	15,9
	d'	µm	28,8	16,8	27,0	24,1
	n	-	0,865	0,734	0,875	0,885

–: nicht bestimmt

d' : Durchmesser bei 63,2 % Durchgang; n : Exponent der RRSB-Verteilung

Tabelle A6: Wasseranspruch, Raumbeständigkeit, Erstarrungszeiten und Mörteldruckfestigkeiten der ausgewählten Zemente

Zement	Wasser- anspruch	Raum- beständig- keit (C-A)	Erstarrungs-		Druckfestigkeit nach				
			beginn	ende	2 d	7 d	28 d	56 d	90 d
-	M.-%	mm	h:min		N/mm ²				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 32,5 R	25,0	0,85	3:35	4:35	13,5	27,8	37,6	44,8 ¹⁾	51,6
CEM I 42,5 R	27,2	1,00	2:35	3:05	26,1	40,8	49,5	54,7	60,2
CEM II/B-S 32,5 R	28,0	0,45	3:40	5:00	9,7	25,7	44,6	49,2	54,7
CEM III/A 32,5 N	28,2	0,84	2:50	3:30	8,9	22,8	42,3	49,7	52,9

1) interpoliert

Tabelle A7: Wasseranspruch, Raumbeständigkeit und Erstarrungszeiten der Bindemittelkombinationen mit $h/z = 1$

Zement	Hüttensand- mehl	Wasser- anspruch	Raumbestän- digkeit (C-A)	Erstarrungs- beginn	Erstarrungs- ende
-	-	M.-%	mm	h:min	
1	2	3	4	5	6
CEM I 32,5 R	A	26,20	1,35	03:25	04:30
	C	26,80	0,80	03:05	04:10
	D	23,20	1,00	03:00	04:15
	E	27,40	1,20	04:30	05:15
	F	27,20	2,45	04:20	05:40
CEM II/B-S 32,5 R	A	28,00	1,90	03:35	04:35
	C	29,00	0,80	03:40	04:35
	D	24,80	0,60	03:55	05:15
	E	28,60	1,35	04:05	04:55
	F	29,40	1,65	04:20	05:10
CEM III/A 32,5 N	A	28,20	0,75	03:20	04:30
	C	28,60	0,40	03:15	04:00
	D	24,80	1,00	03:10	04:10
	E	28,80	0,95	03:10	04:30
	F	28,80	2,30	03:40	04:40

Tabelle A8: Mörteldruckfestigkeiten der Bindemittelkombinationen

Zement	Hüttensand- mehl	h/z- Verhältnis	Druckfestigkeit nach			
			2 d	7 d	28 d	56 d
-	-	-	N/mm ²			
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R	A	0,25	13,7	25,2	39,3	48,3
		1,0	9,0	22,7	39,7	50,2
		1,5	7,7	23,1	43,4	53,5
	C	0,25	13,4	26,3	35,9	51,3
		1,0	8,0	18,7	37,3	51,0
		1,5	5,4	16,1	36,5	50,3
	D	0,25	10,9	21,9	33,1	43,2
		1,0	6,3	14,7	27,9	37,5
		1,5	4,8	12,5	26,2	34,1
	E	0,25	10,1	22,5	33,4	40,8
		1,0	6,0	13,7	25,9	34,2
		1,5	4,4	11,1	25,7	34,3
	F	0,25	10,5	22,2	33,2	40,9
		1,0	6,3	15,6	33,4	41,8
		1,5	4,8	13,3	32,0	39,8

Tabelle A8: Fortsetzung

Zement	Hüttensand- mehl	h/z- Verhältnis	Druckfestigkeit nach				
			2 d	7 d	28 d	56 d	
-	-	-	N/mm ²				
1	2	3	4	5	6	7	
CEM II/B-S 32,5 R	A	0,25	11,0	24,0	45,0	51,5	
		1,0	8,0	24,7	45,6	53,8	
		1,5	5,6	20,7	44,5	48,6	
	C	0,25	10,1	21,1	42,1	52,4	
		1,0	5,3	17,9	42,0	53,6	
		1,5	3,5	15,3	36,3	46,0	
	D	0,25	9,7	20,0	44,2	59,9	
		1,0	4,7	13,8	33,7	44,4	
		1,5	3,2	10,8	31,6	41,0	
	E	0,25	9,2	19,4	37,4	49,3	
		1,0	4,1	9,1	29,4	41,9	
		1,5	2,6	11,2	26,2	35,7	
	F	0,25	10,4	21,2	41,6	52,6	
		1,0	4,6	14,2	38,6	49,6	
		1,5	3,1	12,1	37,0	45,5	
	CEM III/A 32,5 N	A	0,25	8,9	22,2	41,0	49,7
			1,0	6,7	22,3	39,2	47,1
			1,5	5,7	21,4	36,8	44,2
C		0,25	8,1	22,2	43,1	52,6	
		1,0	4,4	17,7	35,0	41,8	
		1,5	3,4	14,8	31,7	37,6	
D		0,25	7,0	19,2	40,6	48,6	
		1,0	4,0	13,9	28,2	33,2	
		1,5	2,7	11,6	24,7	29,2	
E		0,25	6,3	18,1	35,7	44,2	
		1,0	3,3	11,4	26,9	34,7	
		1,5	2,4	9,7	23,8	29,8	
F		0,25	7,1	18,2	41,6	50,8	
		1,0	4,1	14,4	34,2	38,9	
		1,5	2,9	13,2	27,4	32,5	

Tabelle A9: Relative Festigkeiten der Hüttensandmehle in den untersuchten Bindemittelkombinationen (bezogen auf die Festigkeiten der Referenzmörtel in Tabelle A6)

Zement	Hüttensandmehl	h/z-Verhältnis	Relative Festigkeit nach				
			2 d	7 d	28 d	56 d	
1	2	3	4	5	6	7	
CEM I 32,5 R	A	0,25	1,02	0,91	1,04	1,08	
		1,0	0,66	0,82	1,06	1,12	
		1,5	0,57	0,83	1,16	1,19	
	C	0,25	0,99	0,95	0,95	1,15	
		1,0	0,60	0,67	0,99	1,14	
		1,5	0,40	0,58	0,97	1,12	
	D	0,25	0,81	0,79	0,88	0,96	
		1,0	0,47	0,53	0,74	0,84	
		1,5	0,36	0,45	0,70	0,76	
	E	0,25	0,75	0,81	0,89	0,91	
		1,0	0,44	0,49	0,69	0,76	
		1,5	0,33	0,40	0,68	0,77	
	F	0,25	0,78	0,80	0,88	0,91	
		1,0	0,46	0,56	0,89	0,93	
		1,5	0,36	0,48	0,85	0,89	
	CEM II/B-S 32,5 R	A	0,25	1,14	0,93	1,01	1,05
			1,0	0,82	0,96	1,02	1,09
			1,5	0,58	0,81	1,00	0,99
C		0,25	1,04	0,82	0,94	1,07	
		1,0	0,55	0,69	0,94	1,09	
		1,5	0,36	0,60	0,81	0,94	
D		0,25	1,00	0,78	0,99	1,22	
		1,0	0,49	0,54	0,76	0,90	
		1,5	0,33	0,42	0,71	0,83	
E		0,25	0,95	0,76	0,84	1,00	
		1,0	0,42	0,36	0,66	0,85	
		1,5	0,27	0,44	0,59	0,73	
F		0,25	1,08	0,82	0,93	1,07	
		1,0	0,48	0,55	0,86	1,01	
		1,5	0,32	0,47	0,83	0,93	

Tabelle A9: Fortsetzung

Zement	Hüttensand- mehl	h/z- Verhältnis	Relative Festigkeit nach			
			2 d	7 d	28 d	56 d
1	2	3	4	5	6	7
CEM III/A 32,5 N	A	0,25	1,00	0,97	0,97	1,00
		1,0	0,75	0,98	0,93	0,95
		1,5	0,64	0,94	0,87	0,89
	C	0,25	0,91	0,97	1,02	1,06
		1,0	0,49	0,78	0,83	0,84
		1,5	0,38	0,65	0,75	0,76
	D	0,25	0,78	0,84	0,96	0,98
		1,0	0,44	0,61	0,67	0,67
		1,5	0,30	0,51	0,58	0,59
	E	0,25	0,71	0,79	0,84	0,89
		1,0	0,37	0,50	0,63	0,70
		1,5	0,26	0,42	0,56	0,60
	F	0,25	0,80	0,80	0,98	1,02
		1,0	0,46	0,63	0,81	0,78
		1,5	0,33	0,58	0,65	0,65

Tabelle A10: Druckfestigkeiten der Betone zur k-Wert Bestimmung

Zement	Hütten sand- mehl	h/z	Mischung A Druckfestigkeit im Alter von				Mischung B Druckfestigkeit im Alter von				Mischung C Druckfestigkeit im Alter von			
			2 d	7 d	28 d	56 d	2 d	7 d	28 d	56 d	2 d	7 d	28 d	56 d
-	-	-	N/mm ²											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CEM I 32,5 R	-	0	20,5	37,1	54,0	61,7	16,9	29,1	43,0	48,6	11,4	21,0	33,3	39,4
	A	0,33	21,4	37,6	56,6	63,4	14,7	26,2	44,7	49,5	11,2	22,2	34,5	40,9
		1,00	12,6	28,9	50,5	58,7	7,8	20,4	40,1	44,8	6,6	16,5	32,4	38,0
		1,50	11,1	28,8	49,8	58,5	8,1	22,1	41,3	49,0	6,3	18,2	33,4	39,3
	C	0,33	17,9	32,4	54,4	61,8	12,2	23,4	41,3	46,7	9,8	18,6	35,7	40,3
		1,00	10,6	21,5	48,1	53,8	6,8	15,8	36,4	41,6	6,4	12,1	27,5	32,7
	E	0,33	14,4	27,4	46,3	52,0	11,1	21,0	36,6	40,9	8,8	16,7	28,0	33,2
		1,00	8,8	18,6	34,8	40,9	6,6	13,6	27,3	33,3	5,5	11,1	21,4	26,7
	F	0,33	14,9	27,0	45,2	51,7	12,0	23,2	38,6	44,4	8,4	16,4	28,3	33,7
		1,00	8,3	18,8	36,6	46,2	6,6	15,3	30,7	35,0	4,5	10,6	23,4	27,0
CEM II/B-S 32,5 R	-	0	18,3	32,0	50,9	61,7	14,3	24,7	43,9	49,4	9,9	18,3	33,9	39,1
	A	0,33	15,2	31,0	51,5	57,1	11,5	23,2	40,3	45,7	9,1	20,0	35,8	37,5
		1,00	9,4	25,9	49,8	57,7	7,5	20,9	42,0	47,3	4,8	14,5	32,9	36,0
	C	0,33	13,4	26,9	53,2	59,2	9,9	19,6	39,8	45,8	7,0	14,7	31,9	35,6
		1,00	7,4	20,1	49,1	56,7	4,7	13,2	34,1	40,3	4,2	11,9	31,5	38,7
	E	0,33	10,6	22,6	43,1	50,1	8,4	18,2	36,2	40,2	6,1	14,1	28,8	34,4
		1,00	4,8	14,4	33,8	42,1	3,7	9,9	25,7	32,0	1,9	7,9	21,6	25,0
	F	0,33	11,1	23,0	50,6	57,8	8,7	18,3	40,0	45,9	6,4	14,5	32,9	37,5
		1,00	7,2	18,0	42,6	49,2	5,4	14,5	35,5	40,2	3,7	10,4	29,0	32,7
	CEM III/A 32,5 N	-	0	16,6	32,2	54,1	62,8	10,9	21,6	39,2	47,0	8,6	19,2	36,6
A		0,33	12,0	30,0	51,0	57,2	9,7	23,5	39,6	46,6	6,6	18,5	35,4	40,7
		1,00	8,8	25,1	47,3	53,1	6,7	20,1	38,0	48,1	4,9	15,7	30,2	36,1
C		0,33	10,2	24,5	49,1	54,8	8,1	18,6	38,2	44,3	5,2	13,4	30,2	34,0
		1,00	5,8	20,9	39,6	45,4	4,2	16,2	31,3	36,2	3,1	11,8	25,3	27,6
E		0,33	8,7	21,2	43,8	52,4	6,5	15,6	34,8	40,8	4,7	11,4	26,4	31,9
		1,00	4,9	14,7	34,5	40,4	3,8	10,2	25,4	30,8	2,7	7,9	21,6	25,3
F		0,33	9,1	24,2	47,1	54,0	6,2	17,3	37,1	42,1	5,1	14,4	32,4	36,2
		1,00	4,7	19,7	38,9	45,0	3,4	14,9	32,1	37,2	2,4	10,9	23,7	28,3

Tabelle A11: Karbonatisierungstiefen der Betone (b-Mischung) bei 7 Tagen Vorlagerung

Zement	Hütten- sand- mehl	h/z	Karbonatisierungstiefe nach einer Hauptlagerungsdauer von							
			28 d	56 d	90 d	180 d	365 d	2 a	5 a	
-	-	-	mm							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
CEM I 32,5 R	-	0	1,5	1,8	2,3	2,5	4,0	4,5	1)	
	A	0,33	1,6	1,6	2,4	3,1	4,3	1)	1)	
		1,00	n. b.	2,5	3,4	4,5	5,5	1)	1)	
		1,50	1,8	2,0	2,9	3,8	5,4	1)	1)	
	C	0,33	2,0	2,5	2,7	4,3	4,7	5,3	1)	
		1,00	3,0	3,8	3,8	5,2	6,7	1)	1)	
	E	0,33	1,9	3,1	4,1	4,2	5,1	1)	1)	
		1,00	3,6	4,6	5,3	5,7	8,1	1)	1)	
	F	0,33	2,0	2,7	3,3	3,5	4,5	1)	1)	
		1,00	3,3	3,4	3,4	5,4	7,6	1)	1)	
	CEM II/B-S 32,5 R	-	0	1,7	2,2	2,6	3,0	3,8	1)	1)
		A	0,33	1,9	2,1	2,8	4,0	5,2	1)	1)
			1,00	2,9	3,1	4,3	4,9	5,8	1)	1)
		C	0,33	2,4	3,4	3,6	4,1	5,7	7,8	1)
1,00			3,4	4,1	4,1	5,7	8,1	1)	1)	
E		0,33	3,0	3,2	4,3	4,9	6,4	1)	1)	
		1,00	4,4	5,6	6,8	8,6	11,4	1)	1)	
F		0,33	2,5	3,0	3,6	3,6	5,2	1)	1)	
		1,00	3,0	3,6	4,5	5,6	7,0	1)	1)	
CEM III/A 32,5 N		-	0	2,0	2,4	3,6	4,6	5,5	1)	1)
	A	0,33	2,0	2,3	3,3	4,3	4,8	1)	1)	
		1,00	2,4	3,1	3,1	5,2	6,3	1)	1)	
	C	0,33	1,3	3,0	3,3	5,0	7,0	1)	1)	
		1,00	2,0	4,6	5,3	5,4	9,0	1)	1)	
	E	0,33	2,5	3,8	4,4	5,0	7,8	1)	1)	
		1,00	3,9	5,2	6,1	8,0	11,4	1)	1)	
	F	0,33	1,9	2,9	4,1	5,6	7,8 ²⁾	1)	1)	
		1,00	3,4	3,6	5,5	6,5	7,5	1)	1)	

1) Prüfung steht noch aus

2) nach 378 d gemessen, zusätzlich wurde nach 300 d ein Wert von 7,1 mm ermittelt

n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A12: Karbonatisierungstiefen der Feinbetone

Zement	Vor- lagerung	Hütten- sand- mehl	h/z	Karbonatisierungstiefe nach einer Hauptlagerungsdauer von							
				14 d	28 d	56 d	98 d	140 d	365 d	2 a	5 a
-	d	-	-	mm							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CEM I 32,5 R	7	A ¹⁾	0,33	0,8	1,3	1,6	1,9	1,9	2)	2)	2)
		E	0,33	1,1	1,9	2,2	2,6	2,7	2)	2)	2)
	28	A	0,33	0,6	0,6	0,6	1,3	1,4	2)	2)	2)
		E	0,33	0,4	0,5	0,5	1,4	1,6	2)	2)	2)
CEM II/B-S 32,5 R	7	A	0,33	1,2	1,6	2,1	2,6	3,4	2)	2)	2)
		E	0,33	1,4	1,7	2,2	3,1	3,7	2)	2)	2)
	28	A	0,33	0,3	0,5	1,0	1,0	1,1	2)	2)	2)
		E	0,33	0,4	0,5	0,9	1,2	1,3	2)	2)	2)
CEM III/A 32,5 N	7	A	0,33	1,0	1,4	2,2	2,7	3,5	2)	2)	2)
		E	0,33	1,6	2,4	3,2	3,7	4,9	2)	2)	2)
	28	A	0,33	0,7	1,1	1,4	1,5	2,3	2)	2)	2)
		E	0,33	1,0	1,2	1,9	2,1	2,7	2)	2)	2)

1) zusätzlicher Prüftermin nach 170 Tagen: 2,4 mm

2) Prüfung steht noch aus

Tabelle A13: Druckfestigkeiten der Feinbetone

Zement	Hütten- sand- mehl	h/z	Druckfestigkeiten bei einer Vorlagerung von 7 d im Alter von			Druckfestigkeiten bei einer Vorlagerung von 28 d im Alter von		
			7 d	35 d	147 d	28 d	35 d	168 d
-	-	-	N/mm ²					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CEM I 32,5 R	A	0,33	26,9	47,5	51,9	46,1	51,1	59,0
	E	0,33	21,8	38,7	46,3	36,0	42,0	55,2
CEM II/B-S 32,5 R	A	0,33	26,1	45,8	50,6	45,8	54,5	64,6
	E	0,33	20,9	39,4	41,2	39,4	46,7	62,7
CEM III/A 32,5 N	A	0,33	24,0	43,3	48,3	41,9	47,7	59,6
	E	0,33	17,3	34,9	38,1	37,9	42,4	53,6

Tabelle A14: Elektrolytwiderstand der Betone (Mischung B) bei 7 Tagen Vorlagerung

Zement	Hütten- sandmehl	h/z	Elektrolytwiderstand im Alter von				
			7 d	14 d	28 d	56 d	
-	-	-	Ωm				
1	2	3	4	5	6	7	
CEM I 32,5 R	-	0	37,5	44,5	45,5	70,5	
	A	0,33	36,0	56,0	71,6	44,5	
		1,00	65,0	92,0	161,5	242,0	
		1,50	84,0	129,5	226,5	307,5	
	C	0,33	4,5	24,0	44,5	87,5	
		1,00	23,5	35,0	62,0	148,5	
	E	0,33	54,0	68,0	83,0	114,0	
		1,00	47,0	65,0	134,0	224,5	
	F	0,33	60,5	75,0	110,5	136,0	
		1,00	64,5	91,0	169,5	244,5	
	CEM II/B-S 32,5 R	-	0	57,5	71,0	77,0	122,0
		A	0,33	7,2	47,0	70,5	251,0
			1,00	60,5	124,0	214,5	302,5
		C	0,33	11,6	38,5	72,0	134,0
1,00			15,5	44,5	67,0	158,0	
E		0,33	48,0	78,0	120,5	223,5	
		1,00	49,0	74,0	164,5	407,0	
F		0,33	42,5	76,0	153,5	266,5	
		1,00	51,0	108,0	268,0	357,5	
CEM III/A 32,5 N		-	0	120,0	126,5	226,0	373,0
		A	0,33	98,5	176,5	320,5	423,5
			1,00	155,0	284,0	453,0	655,5
	C	0,33	98,0	169,5	321,0	502,5	
		1,00	125,0	261,0	407,5	693,0	
	E	0,33	74,0	145,5	297,5	462,0	
		1,00	72,5	92,0	415,5	634,5	
	F	0,33	103,0	193,0	304,5	450,5	
		1,00	95,5	332,5	494,5	589,5	

Tabelle A15: Abwitterungen der Betone bei der Untersuchung des Frostwiderstands (Würfelverfahren)

Zement	Hütten- sandmehl	h/z	Abwitterung nach					
			14 FTW	28 FTW	42 FTW	56 FTW	74 FTW	100 FTW
-	-	-	M.-%					
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CEM I 32,5 R	-	0	0,03	0,07	0,09	0,12	0,28	0,66
	C	0,33	0,05	0,22	0,48	0,71	1,11	1,65
		1,00	0,14	0,39	0,70	1,02	1,40	1,98
	E	0,33	0,03	0,12	0,28	0,47	0,79	1,23
	F	0,33	0,06	0,25	0,49	0,75	1,10	1,67
CEM II/B-S 32,5 R	-	0	0,05	0,09	0,13	0,16	0,24	0,48
	C	0,33	0,03	0,07	0,12	0,18	0,24	0,32
		1,00	0,17	0,69	1,06	1,37	1,89	2,43
	E	0,33	0,06	0,26	0,51	0,78	1,29	1,81
	F	0,33	0,15	0,48	0,84	1,14	1,71	2,45

Tabelle A16: Druckfestigkeit der Betone zur Untersuchung des Frostwiderstands im Alter von 28 Tagen

Zement	Hütten- sandmehl	h/z	Druckfestigkeit
-	-	-	N/mm ²
1	2	3	4
CEM I 32,5 R	-	0	53,8 ¹⁾
	C	0,33	46,9
		1,00	51,0
	E	0,33	53,2
	F	0,33	55,8
CEM II/B-S 32,5 R	-	0	47,4
	C	0,33	44,8
		1,00	50,1
	E	0,33	58,2
	F	0,33	47,0

1) versehentlich erst nach 37 Tagen ermittelt. Anhand des Verlaufs der Festigkeitsentwicklung der Referenz-b-Mischung nach Abschnitt 2.5.3 mit diesem Zement kann abgeschätzt werden, dass die **28-Tage Druckfestigkeit** bei etwa 95,5 % der Druckfestigkeit nach 37 Tagen liegt, d. h. bei **51,4 N/mm²**

Tabelle A17: Abwitterungen der Betone bei der Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF-Verfahren)

Zement	Hütten- sandmehl	h/z	Abwitterung nach						
			6 FTW	14 FTW	20 FTW	28 FTW	34 FTW	44 FTW	56 FTW
-	-	-	g/m ²						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 32,5 R	–	0	76	118	152	190	221 ³⁾	264	303
	C	0,33	112	172	225	288	340	482 ⁵⁾	567
		1,00	365	603	800	1011	1174	1495 ⁵⁾	1694
	E	0,33	101	161	207	261	302 ³⁾	396	516
	F	0,33	74	129	178	243	291 ³⁾	383	502
CEM II/B-S 32,5 R	–	0	126	210	289	371	n. b.	670 ⁵⁾	871
	C	0,33	281	497	702	990	1192	1463 ⁶⁾	1806
		1,00	780	1260	1576	1855	2063	2318 ⁶⁾	2669
	E	0,33	407	701 ¹⁾	923 ²⁾	1139	1311 ⁴⁾	1471	1686
	F	0,33	185	342	494	676	850	1089 ⁶⁾	1411

- 1) abweichend nach 16 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
2) abweichend nach 22 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
3) abweichend nach 32 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
4) abweichend nach 36 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
5) abweichend nach 48 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
6) abweichend nach 42 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A18: Dynamischer E-Modul der Betone bei der Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF-Verfahren)

Zement	Hütten- sandmehl	h/z	Dyn. E-Modul nach						
			6 FTW	14 FTW	20 FTW	28 FTW	34 FTW	44 FTW	56 FTW
-	-	-	% vom E-Modul vor Versuchsbeginn						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 32,5 R	–	0	100	100	100	98	101 ³⁾	99	102
	C	0,33	99	100	100	102	99	101 ⁵⁾	102
		1,00	100	99	100	99	97	95 ⁵⁾	96
	E	0,33	100	100	100	100	102 ³⁾	98	99
	F	0,33	100	100	100	99	101 ³⁾	99	98
CEM II/B-S 32,5 R	–	0	100	101	101	101	n. b.	99 ⁵⁾	95
	C	0,33	100	100	98	94	97	100 ⁶⁾	104
		1,00	100	98	94	92	92	94 ⁶⁾	99
	E	0,33	98	100 ¹⁾	100 ²⁾	100	101 ⁴⁾	101	102
	F	0,33	100	100	99	100	100	101 ⁶⁾	105

- 1) abweichend nach 16 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 2) abweichend nach 22 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 3) abweichend nach 32 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 4) abweichend nach 36 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 5) abweichend nach 48 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 6) abweichend nach 42 Frost-Tau-Wechseln bestimmt
 n. b.: nicht bestimmt

Tabelle A19: Druckfestigkeit der Betone zur Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstands im Alter von 28 Tagen

Zement	Hüttensandmehl	h/z	Druckfestigkeit
-	-	-	N/mm ²
1	2	3	4
CEM I 32,5 R	-	0	36,3
	C	0,33	33,7
		1,00	42,7
	E	0,33	36,1
	F	0,33	41,0
CEM II/B-S 32,5 R	-	0	34,1
	C	0,33	36,3
		1,00	43,2
	E	0,33	49,1
	F	0,33	38,6

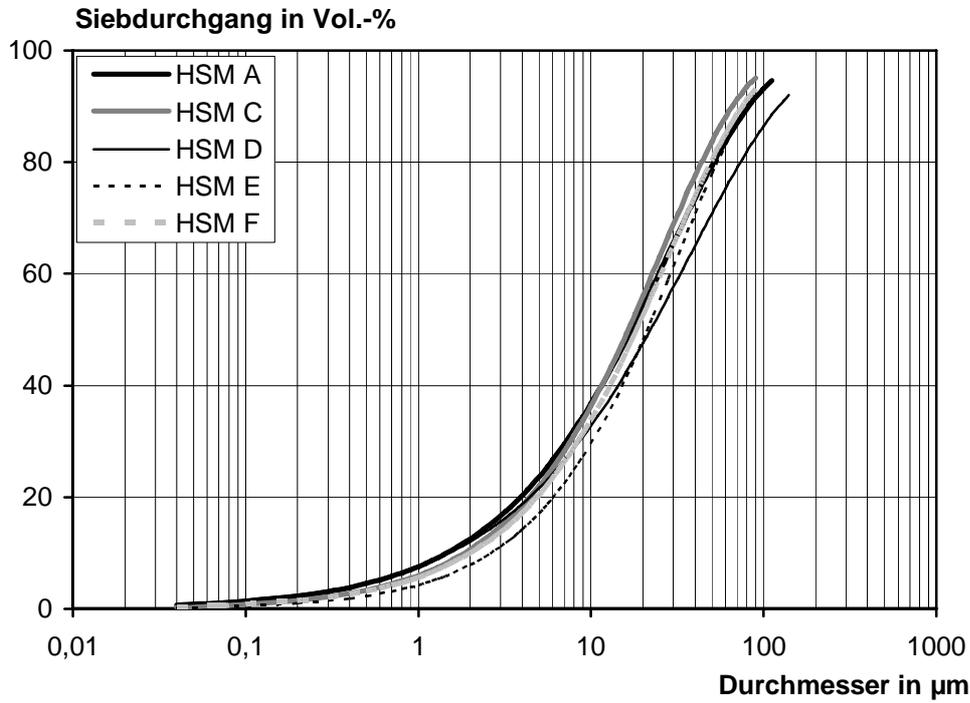


Bild B1: Sieblinien der fünf Hüttensandmehle (bestimmt mittels Lasergranulometrie)

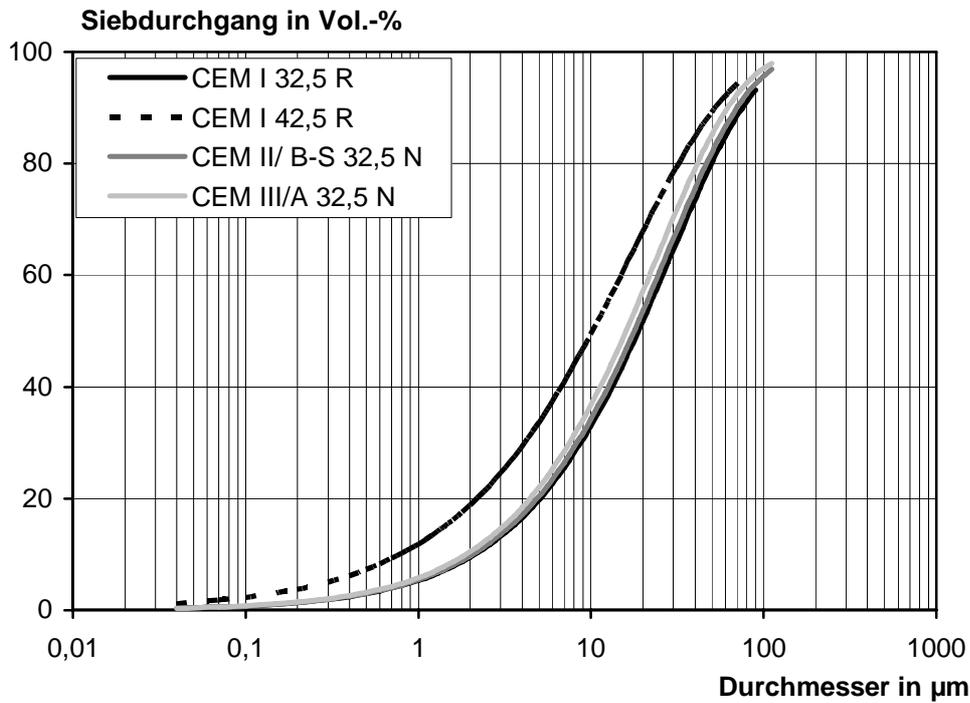


Bild B2: Sieblinien der vier Zemente (bestimmt mittels Lasergranulometrie)

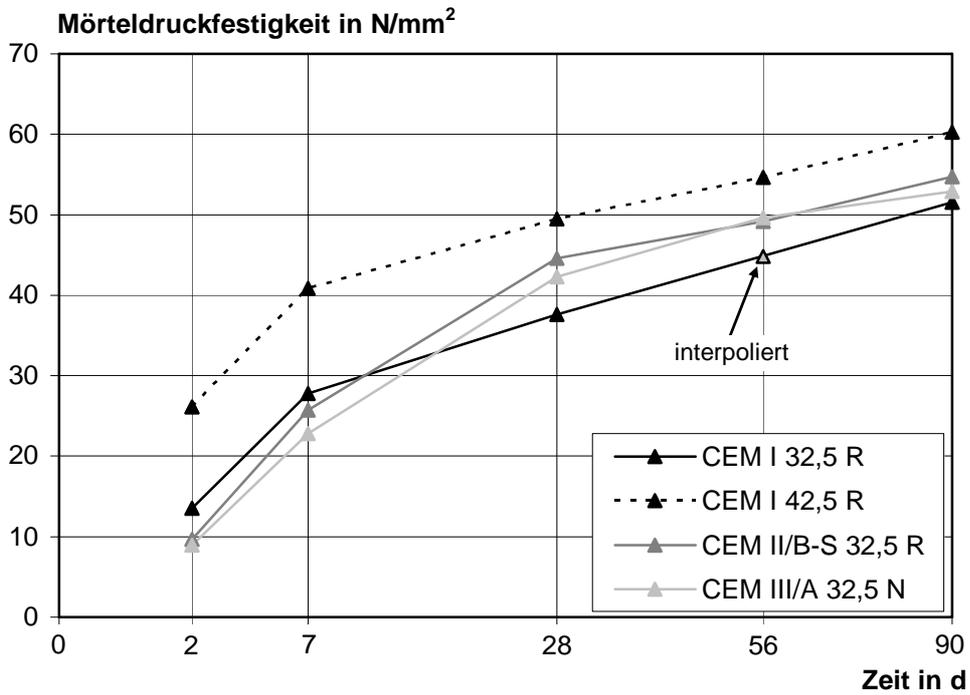


Bild B3: Zeitliche Entwicklung der Normmörteldruckfestigkeiten der vier Zemente (Wurzelmaßstab)

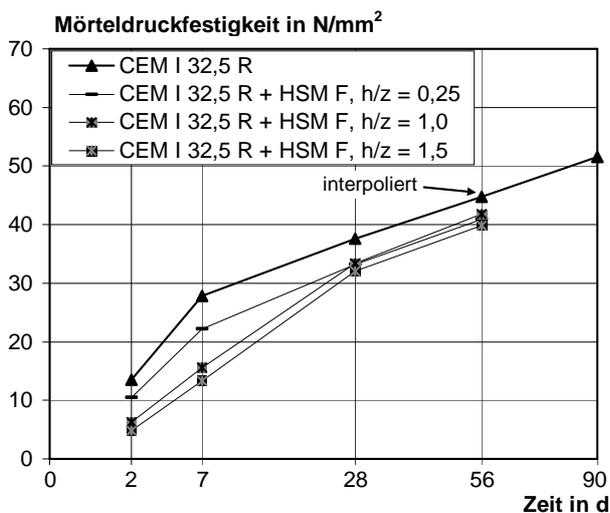
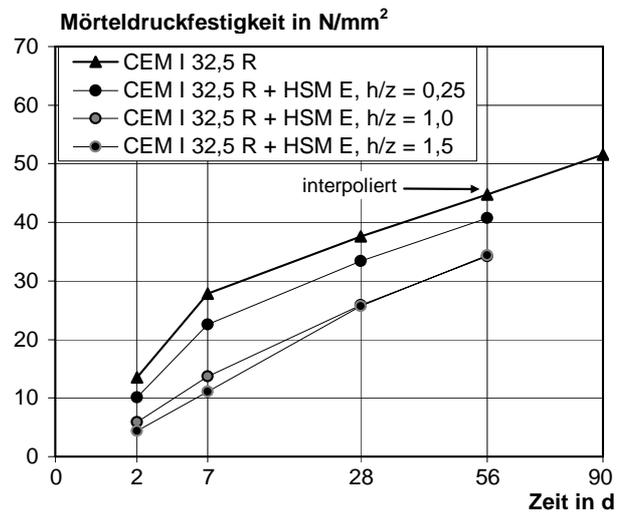
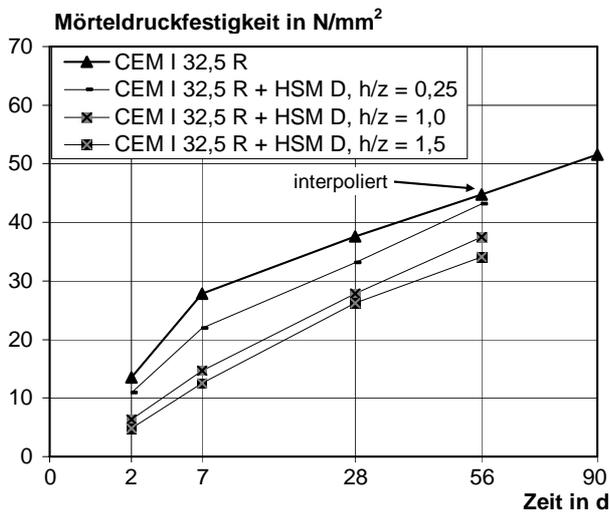
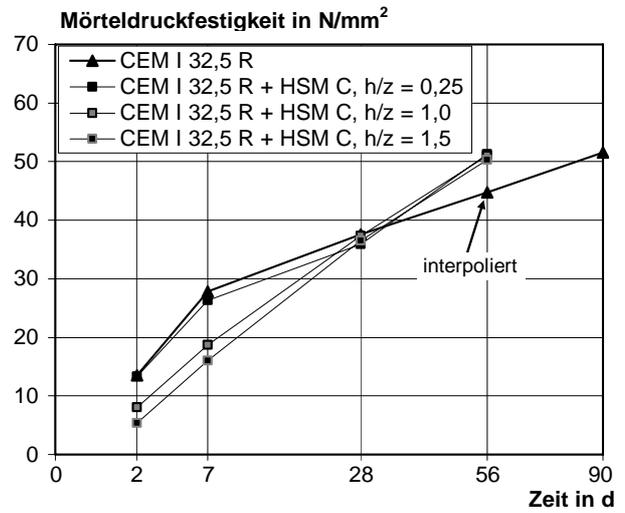
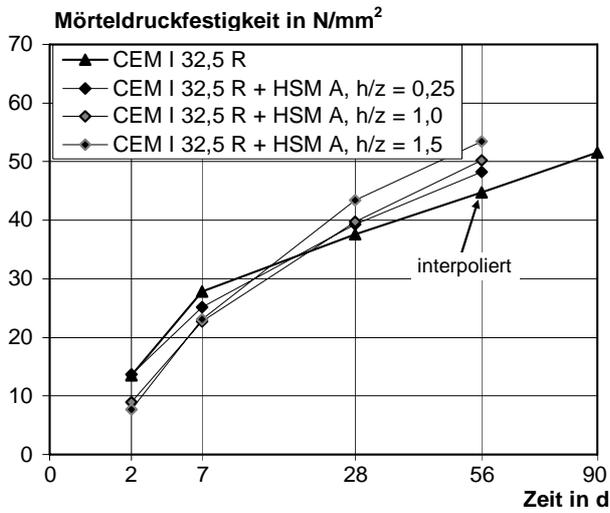


Bild B4: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeiten von Mörteln mit CEM I 32,5 R und den fünf Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

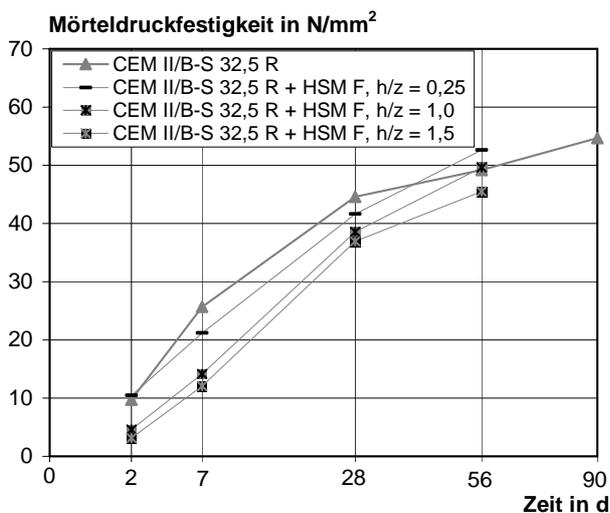
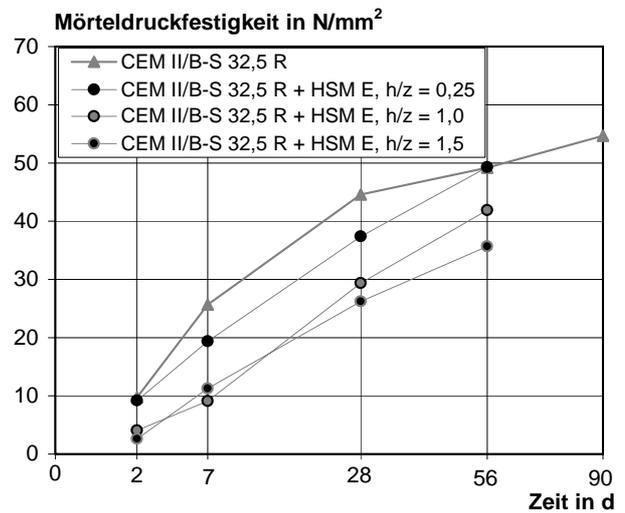
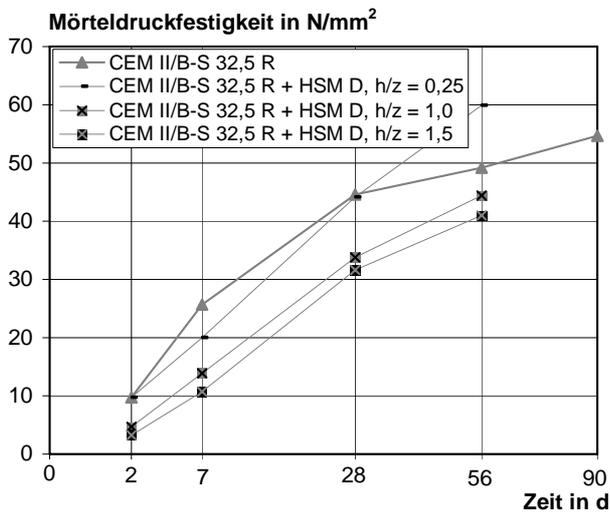
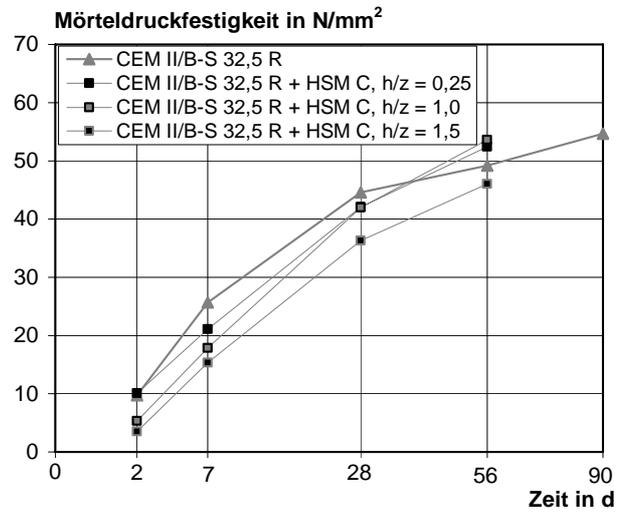
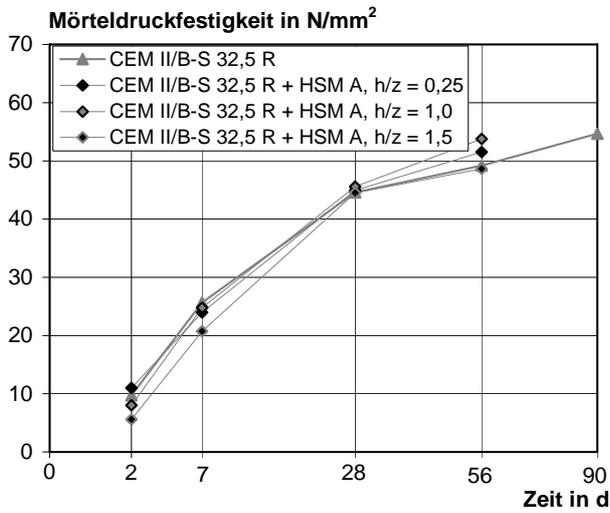


Bild B5: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeiten von Mörteln mit CEM II/B-S 32,5 R und den fünf Hüttensandmehlen (Wurzelsmaßstab)

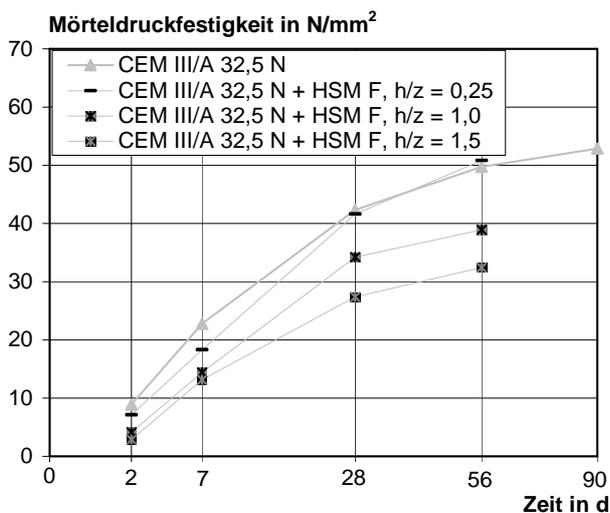
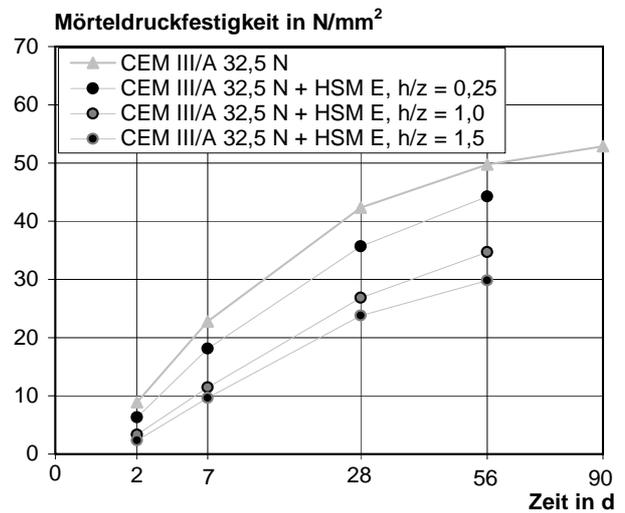
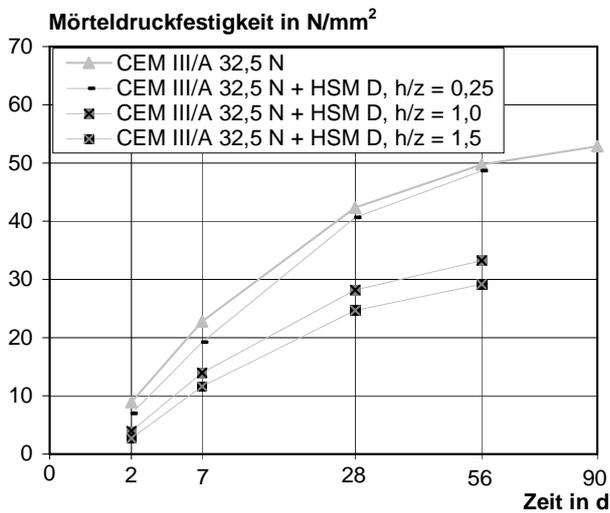
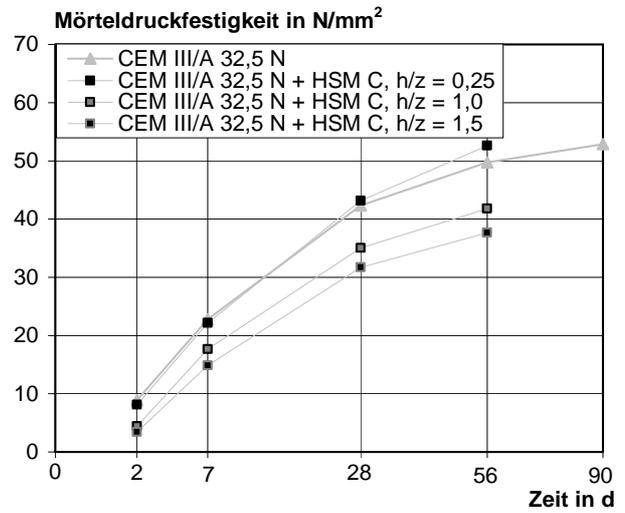
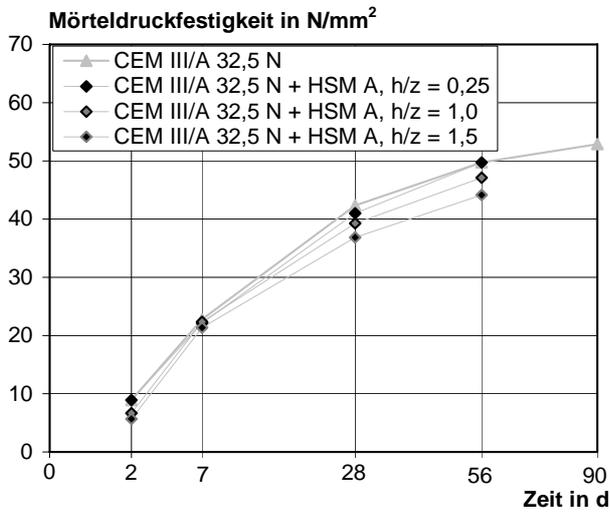


Bild B6: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeiten von Mörteln mit CEM III/A 32,5 N und den fünf Hüttensandmehlen (Wurzelsmaßstab)

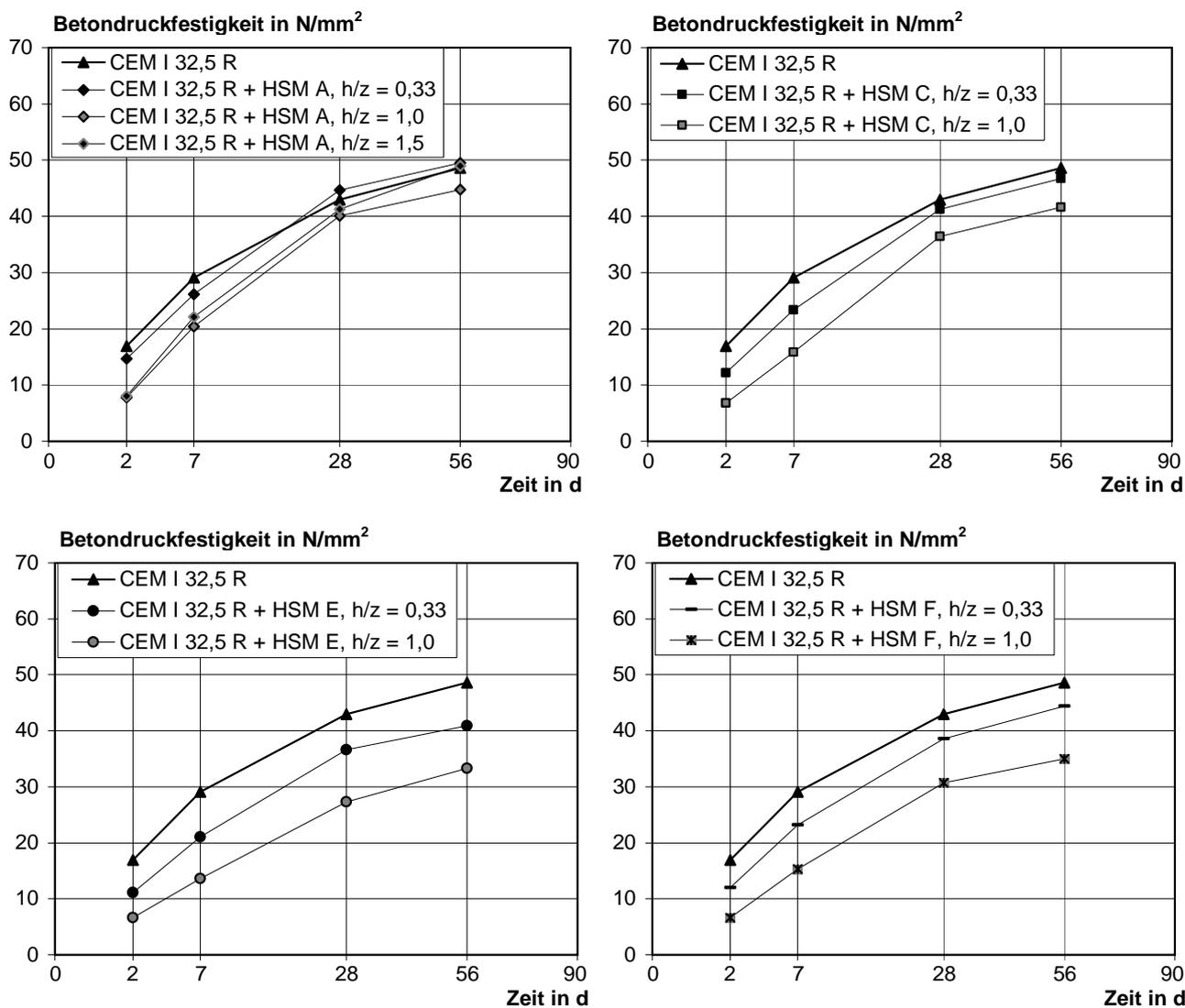


Bild B7: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeiten der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM I 32,5 R und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

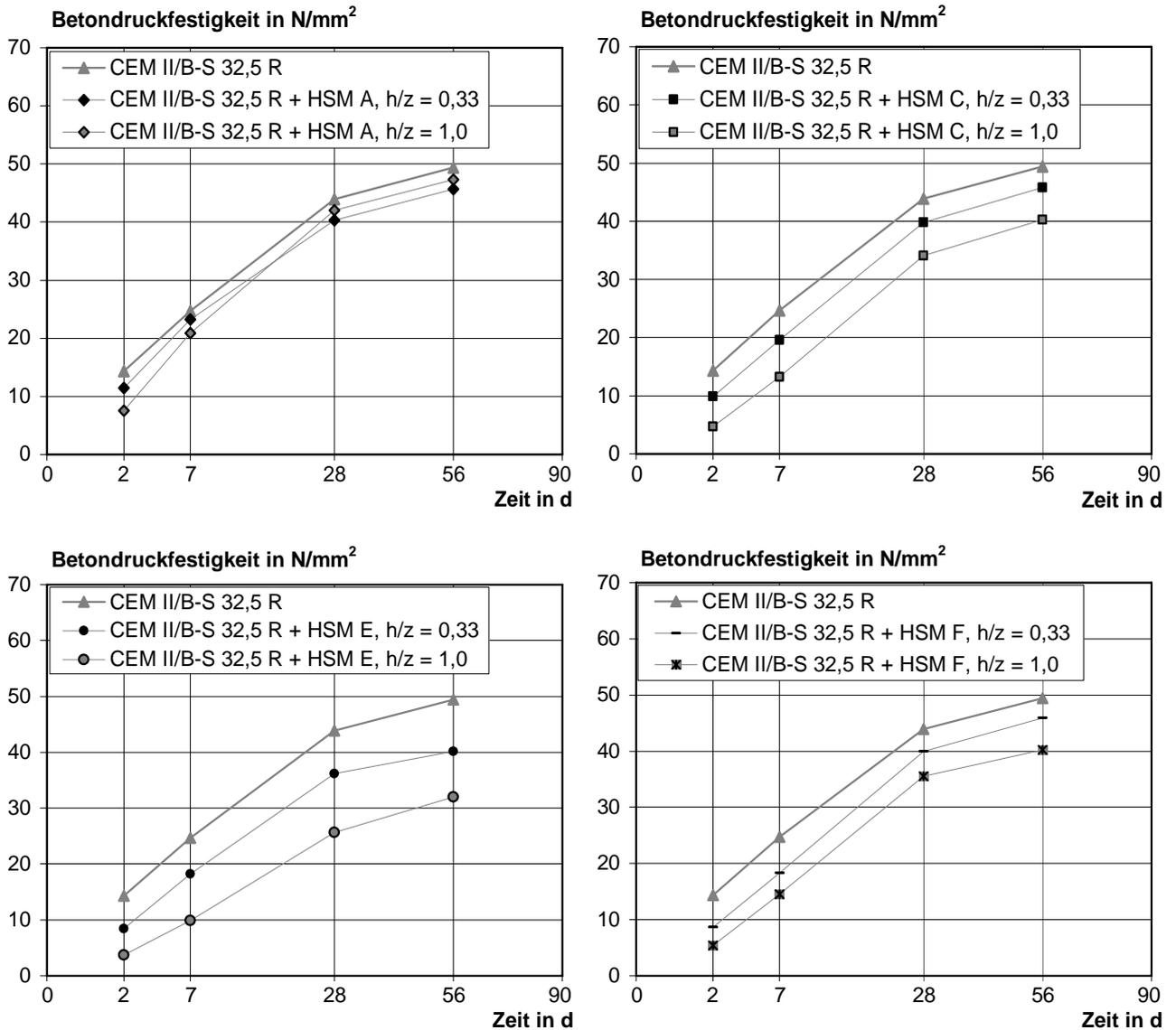


Bild B8: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeiten der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM II/B-S 32,5 R und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

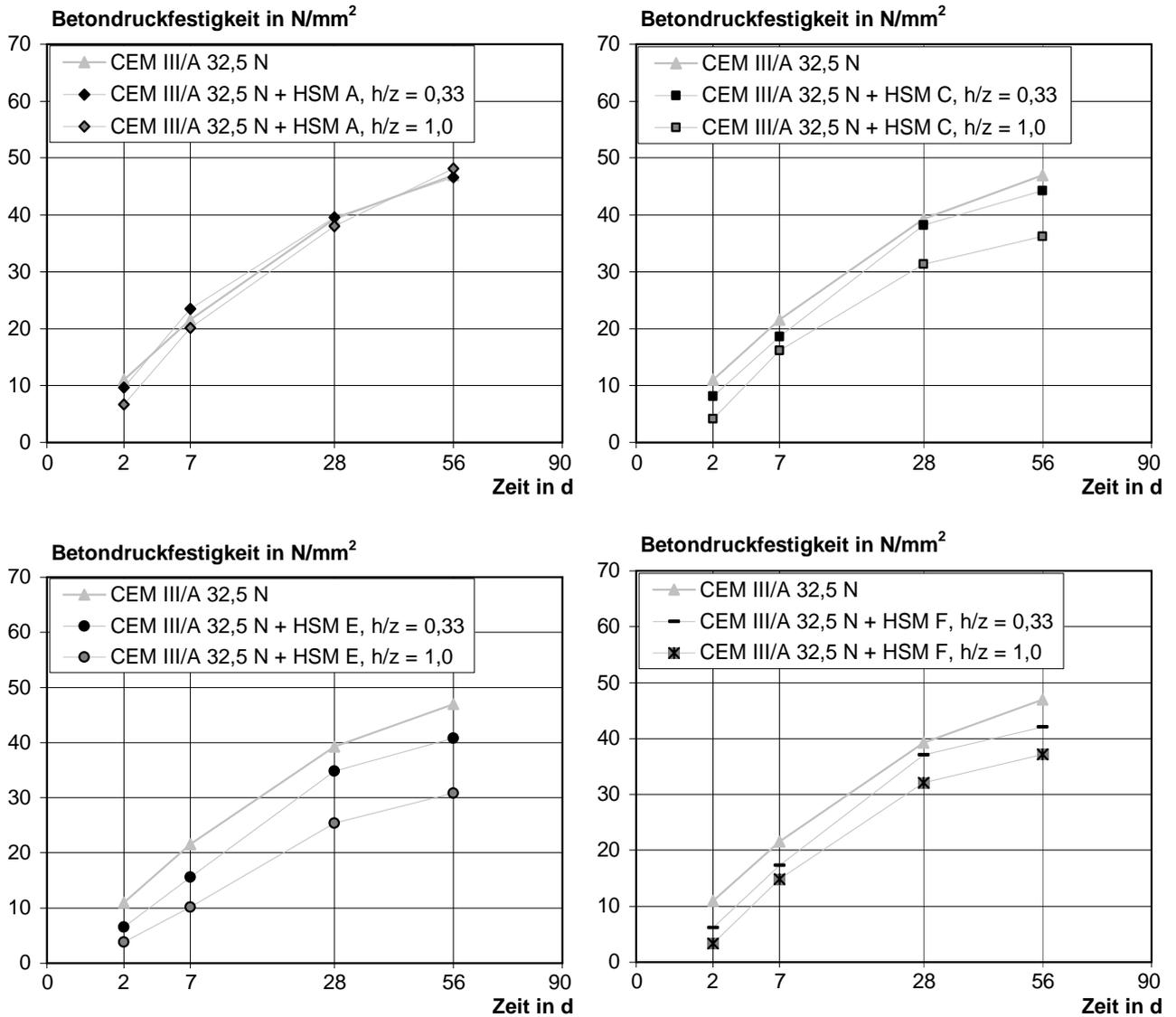


Bild B9: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeiten der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM III/A 32,5 N und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

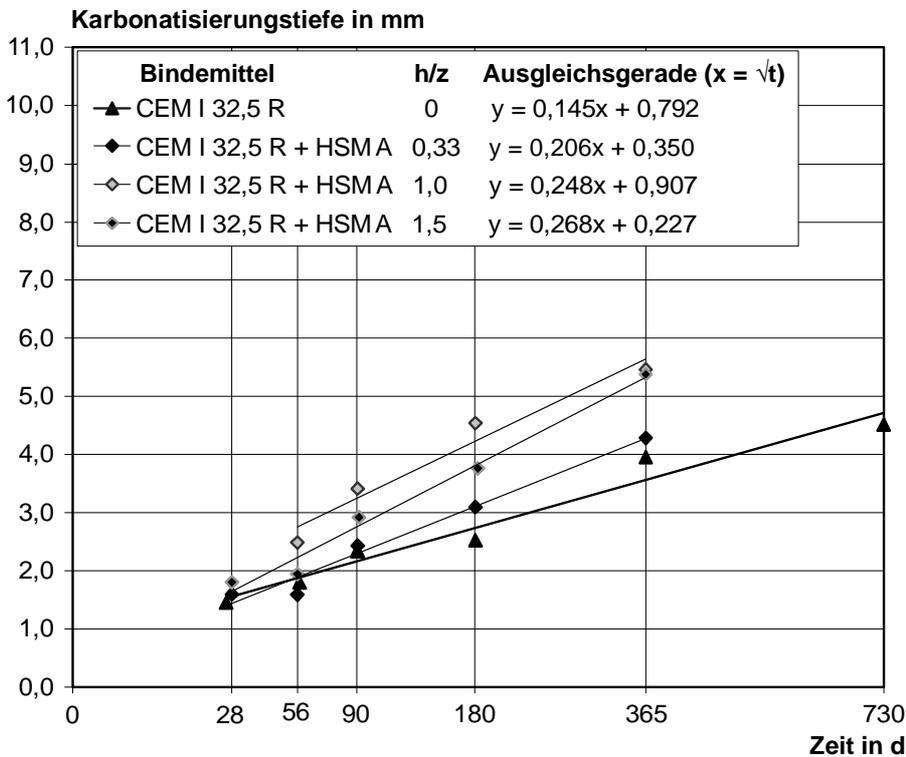


Bild B10: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM I 32,5 R und dem Hüttensandmehl A (Wurzelmaßstab)

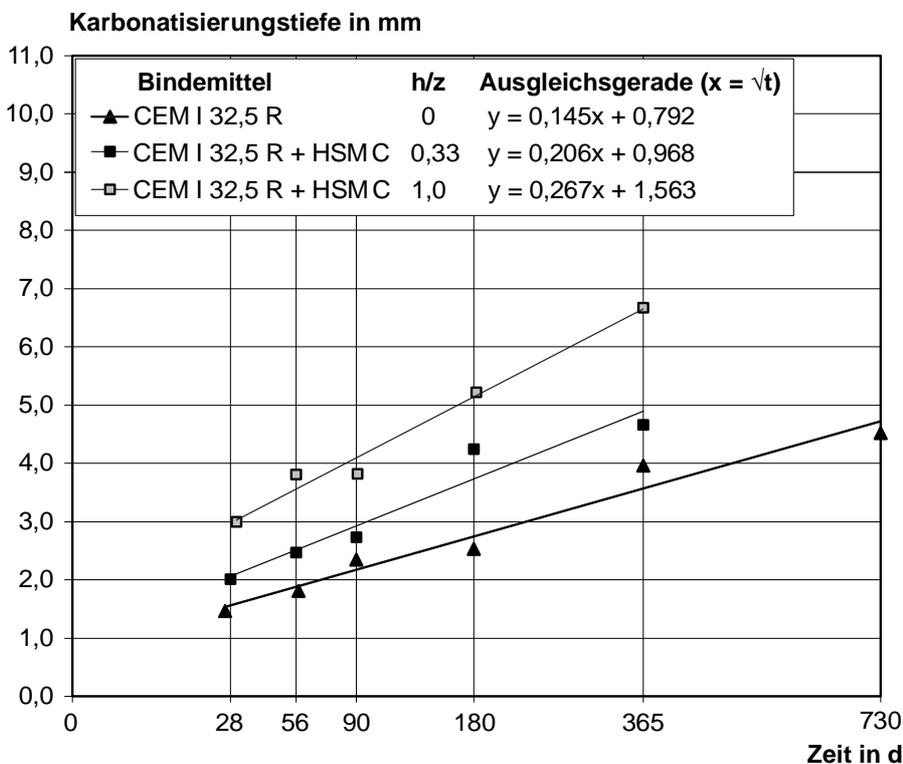


Bild B11: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM I 32,5 R und dem Hüttensandmehl C (Wurzelmaßstab)

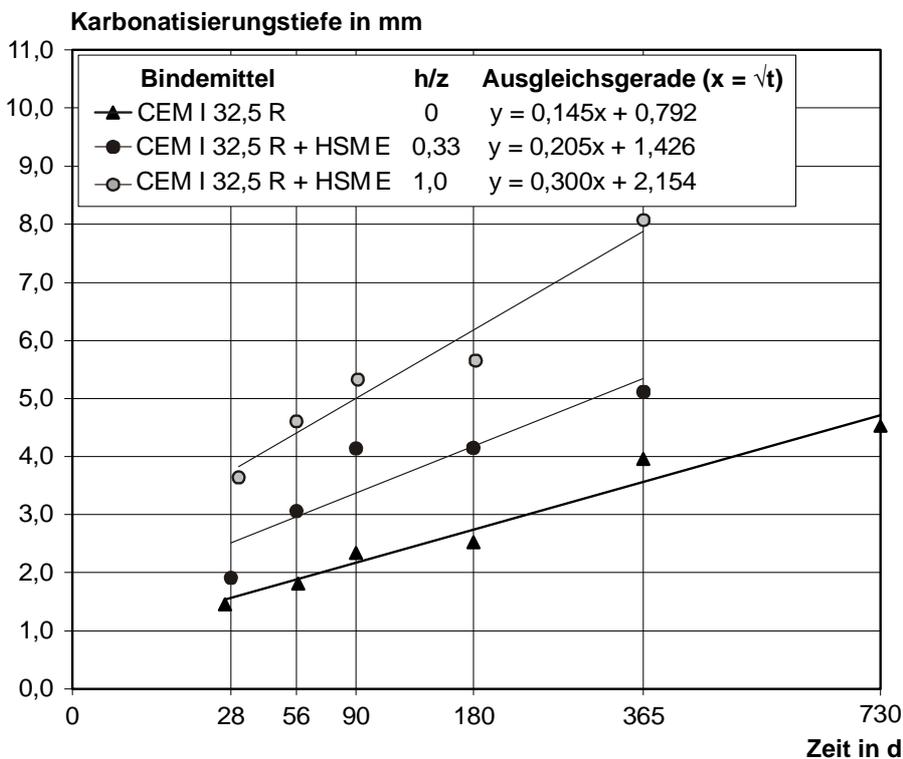


Bild B12: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM I 32,5 R und dem Hüttensandmehl E (Wurzelmaßstab)

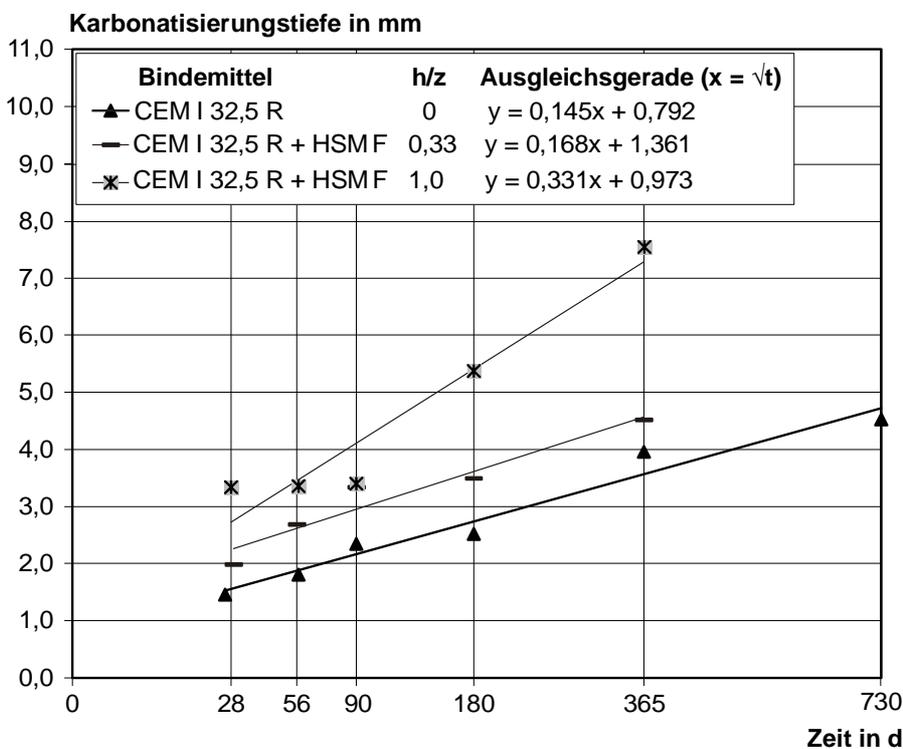


Bild B13: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM I 32,5 R und dem Hüttensandmehl F (Wurzelmaßstab)

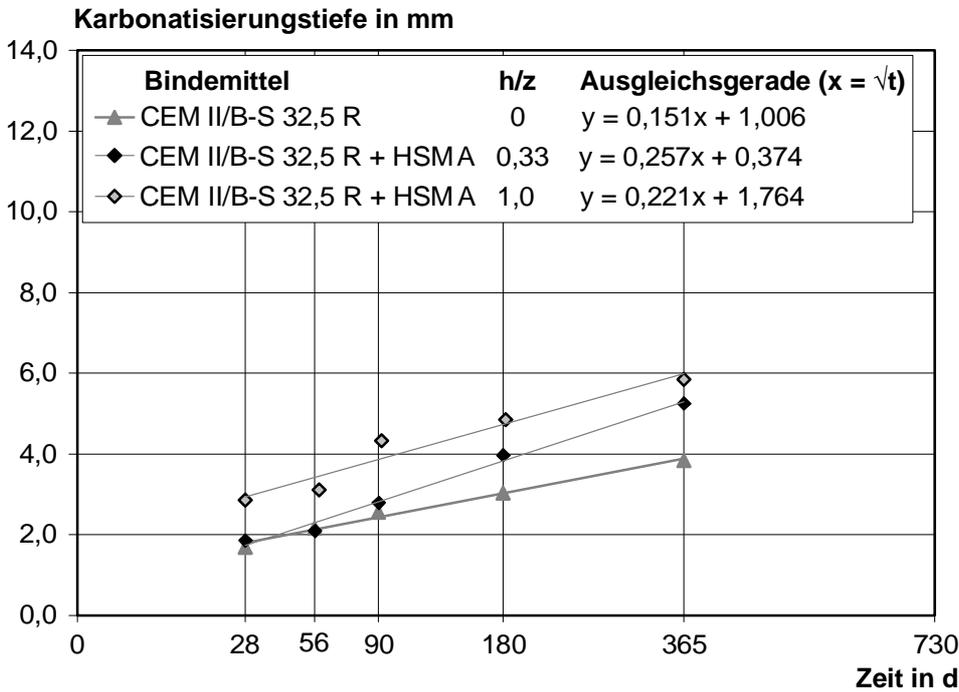


Bild B14: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R und dem Hüttensandmehl A (Wurzelmaßstab)

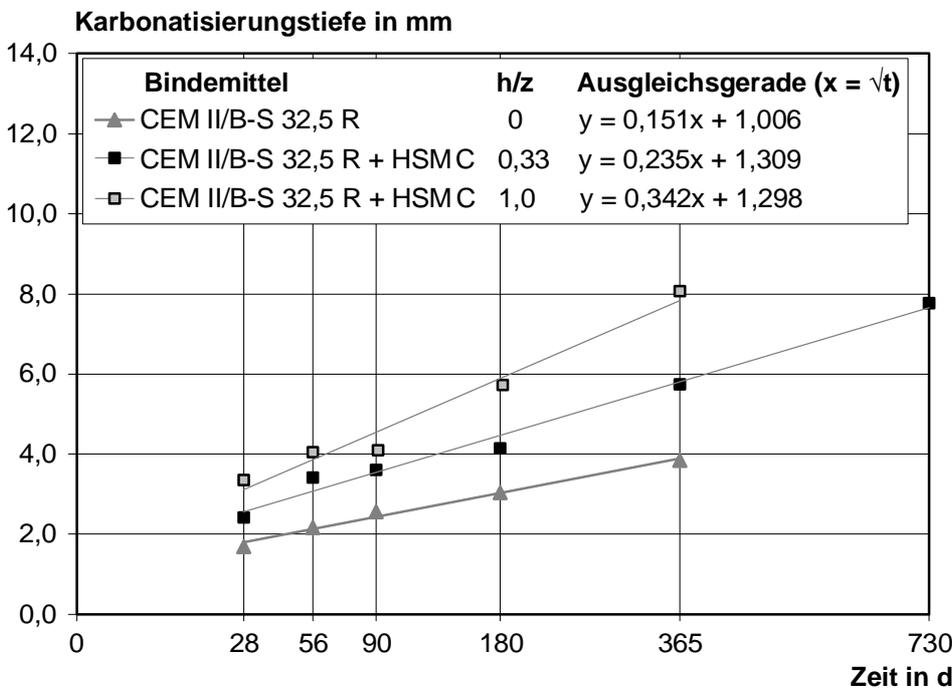


Bild B15: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R und dem Hüttensandmehl C (Wurzelmaßstab)

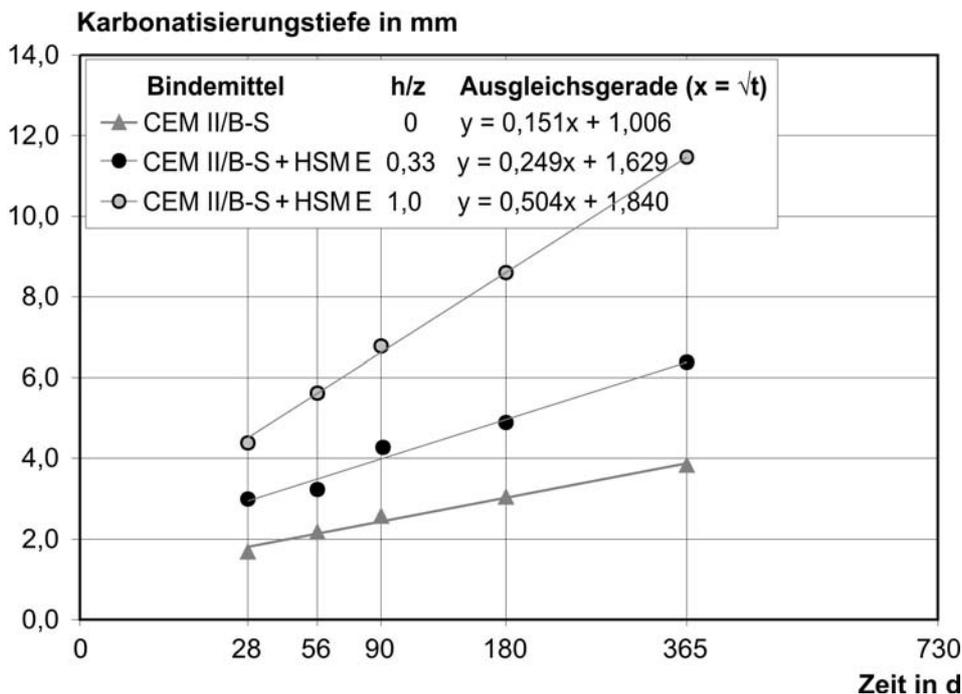


Bild B16: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R und dem Hüttensandmehl E (Wurzelmaßstab)

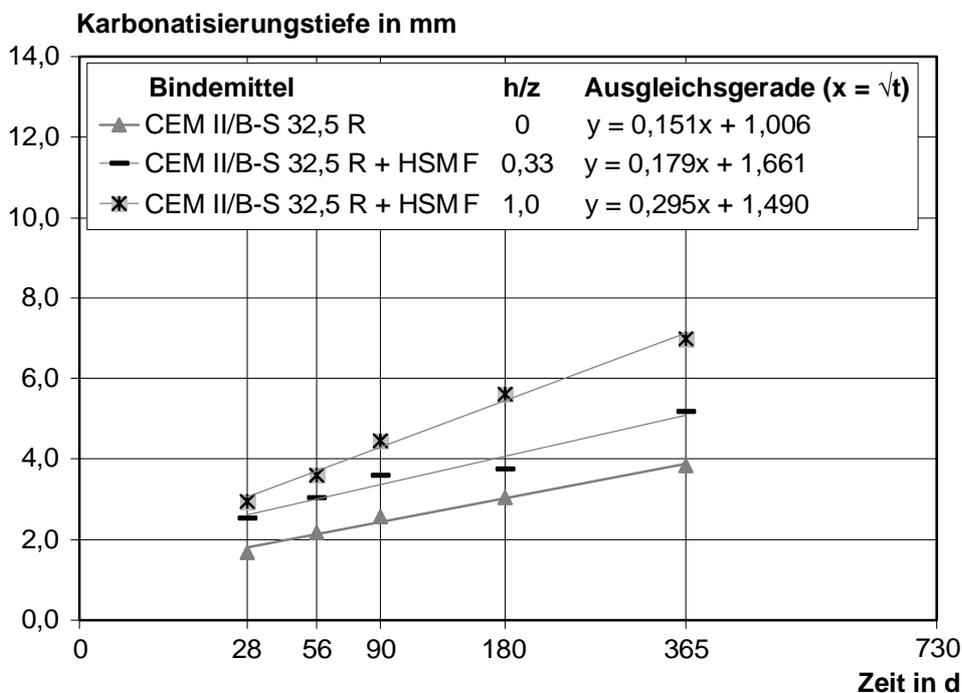


Bild B17: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R und dem Hüttensandmehl F (Wurzelmaßstab)

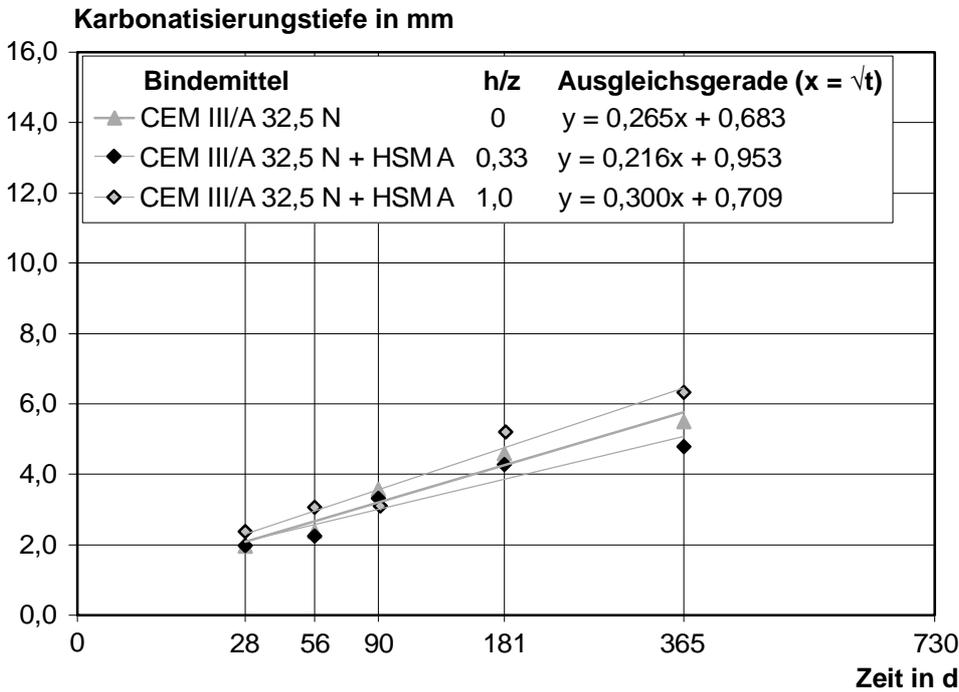


Bild B18: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM III/A 32,5 N und dem Hüttensandmehl A (Wurzelmaßstab)

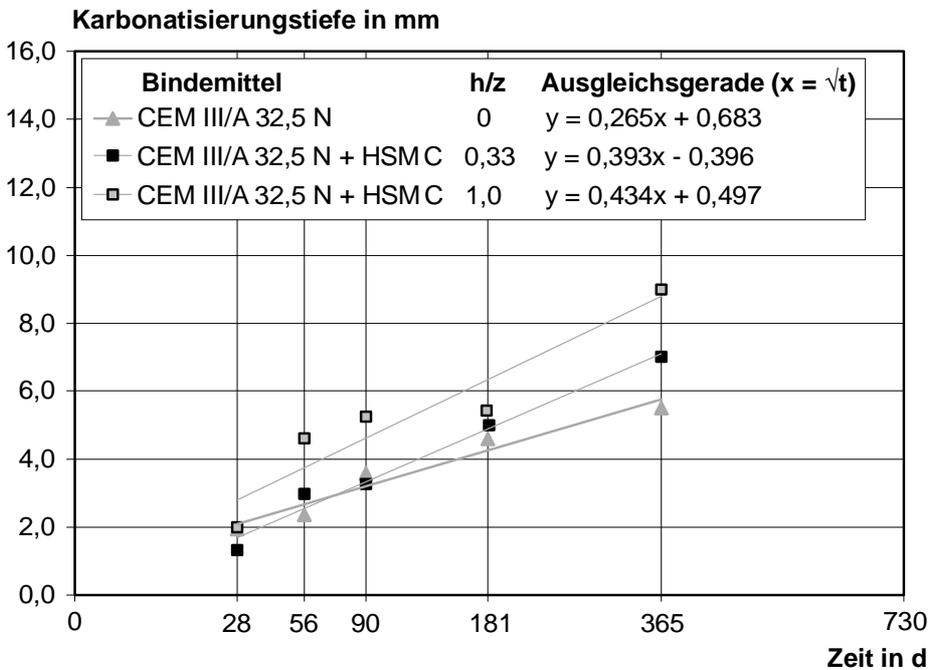


Bild B19: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM III/A 32,5 N und dem Hüttensandmehl C (Wurzelmaßstab)

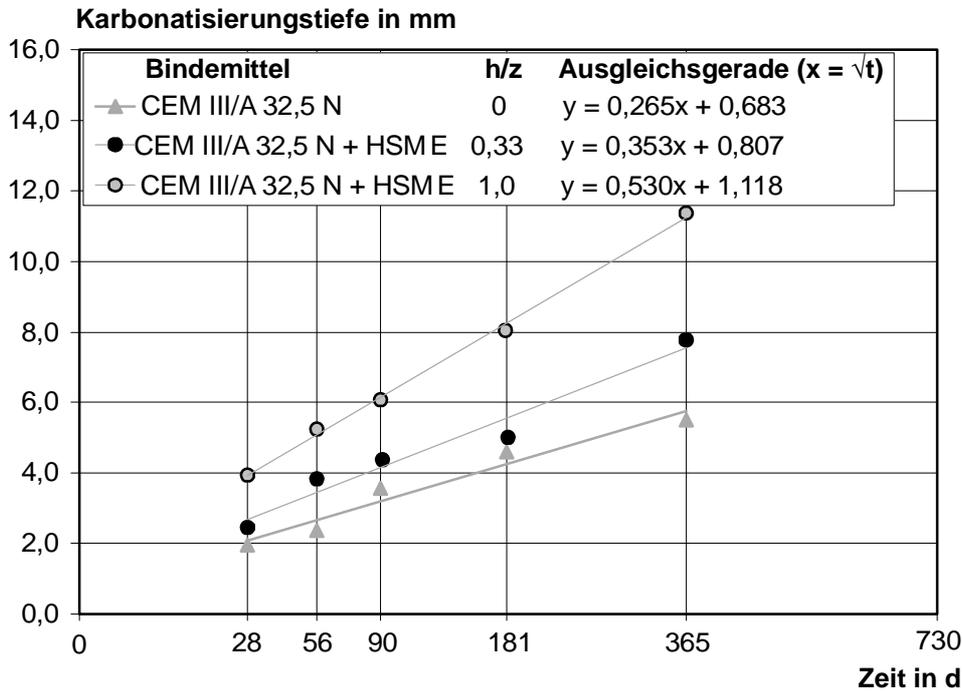


Bild B20: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM III/A 32,5 N und dem Hüttensandmehl E (Wurzelmaßstab)

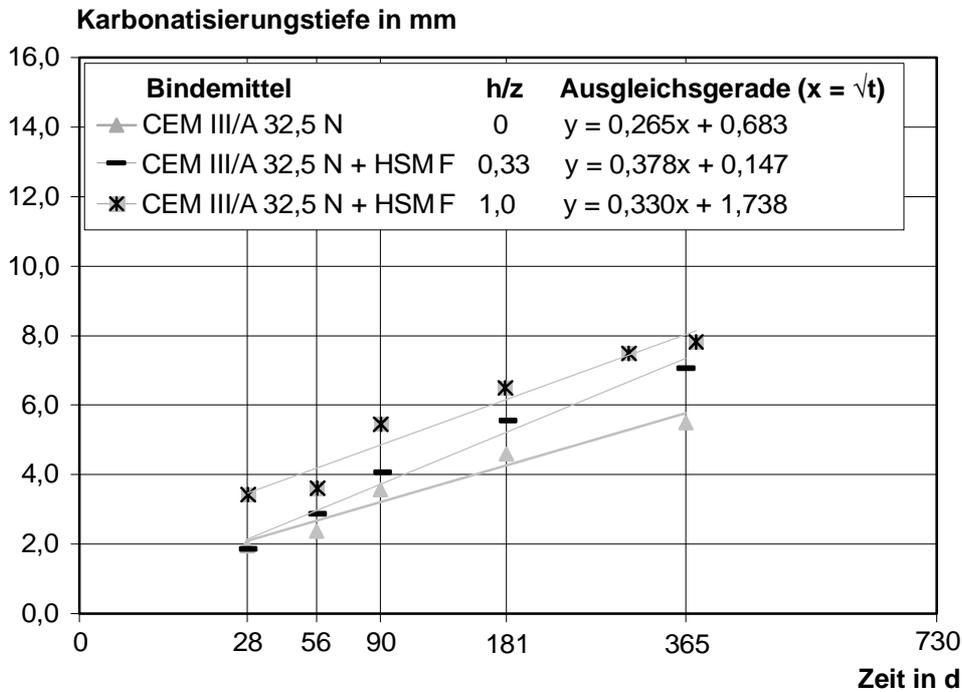


Bild B21: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Betone mit CEM III/A 32,5 N und dem Hüttensandmehl F (Wurzelmaßstab)

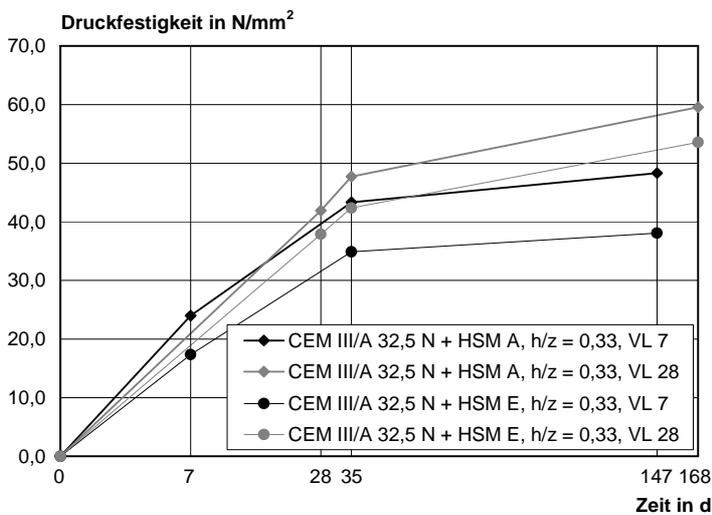
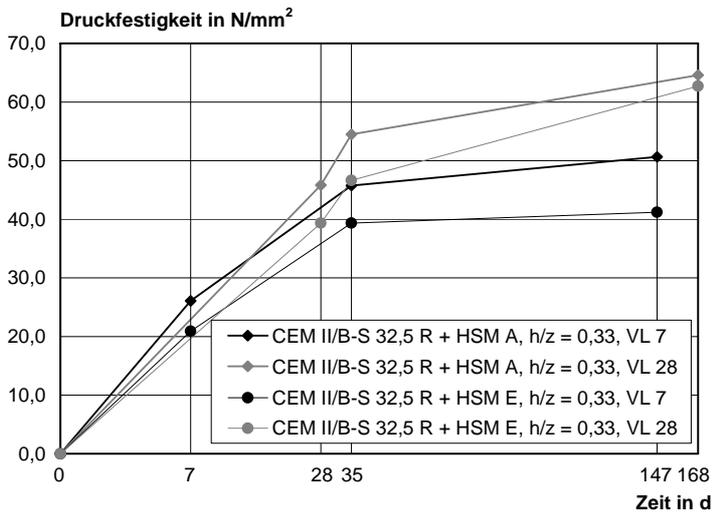
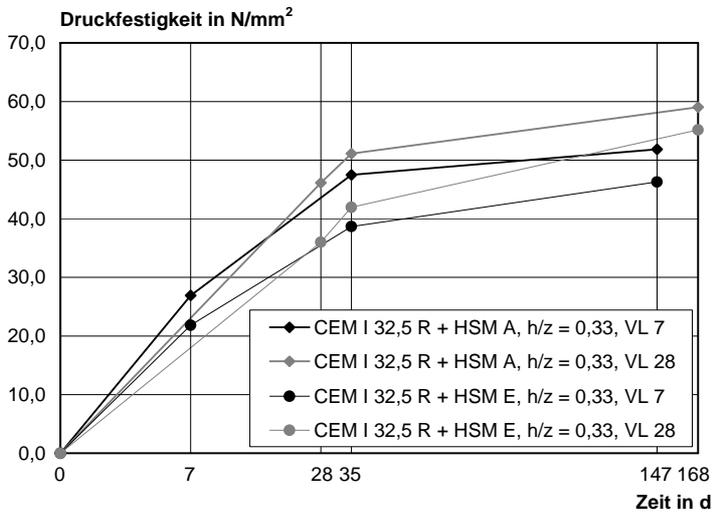


Bild B22: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeiten der Feinbetone für die Karbonatisierungsprüfung (Wurzelmaßstab)

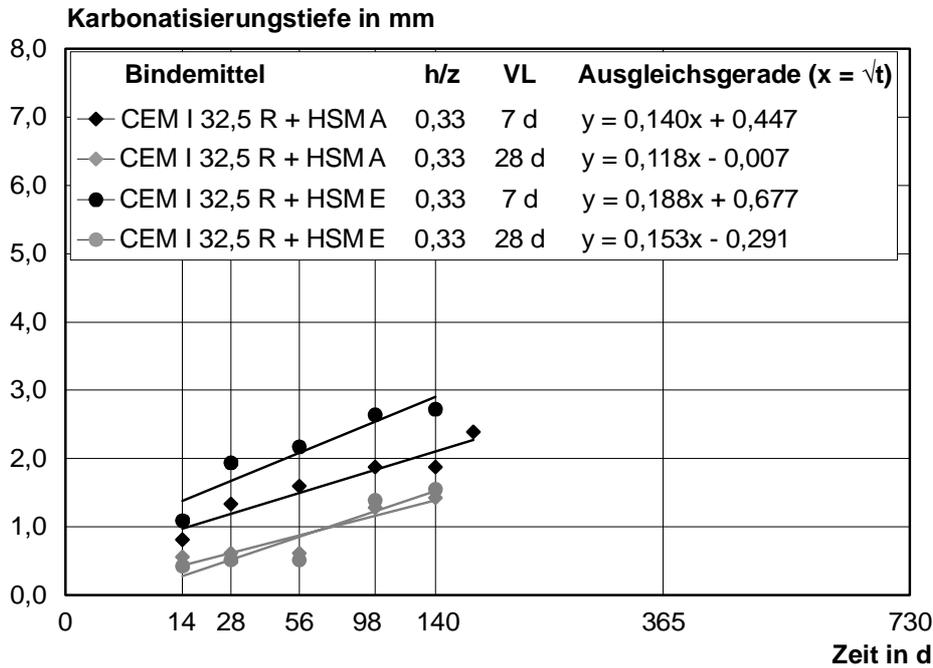


Bild B23: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Feinbetone mit CEM I 32,5 R und den Hütten sandmehlen A und E bei einer Vorlagerung von 7 und 28 Tagen (Wurzelmaßstab)

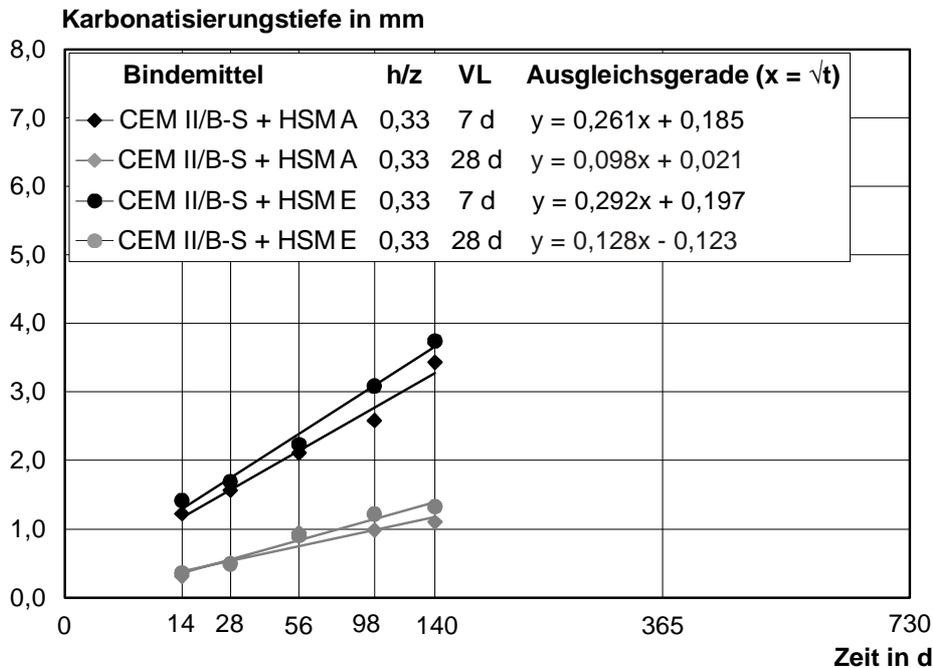


Bild B24: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Feinbetone mit CEM II/B-S 32,5 R und den Hütten sandmehlen A und E bei einer Vorlagerung von 7 und 28 Tagen (Wurzelmaßstab)

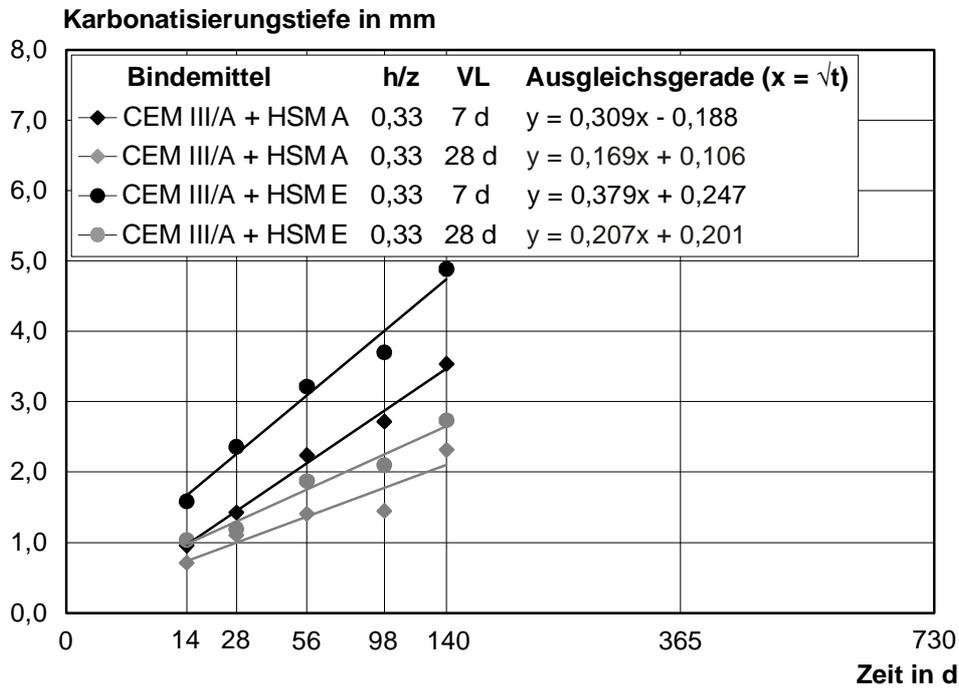


Bild B25: Zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungstiefen der Feinbetone mit CEM III/A 32,5 N und den Hüttensandmehlen A und E bei einer Vorlagerung von 7 und 28 Tagen (Wurzelmaßstab)

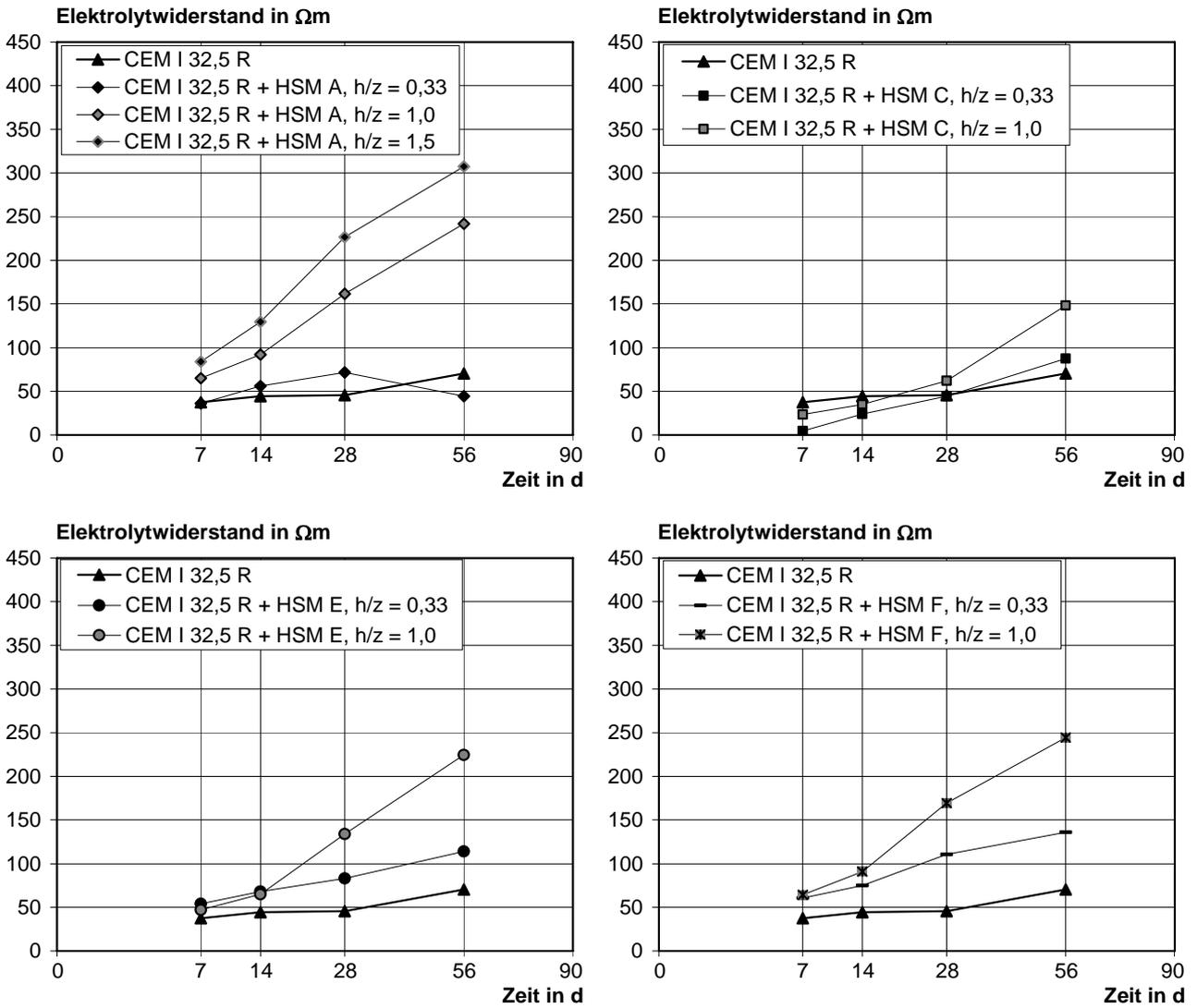


Bild B26: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands von Betonen der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM I 32,5 R und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

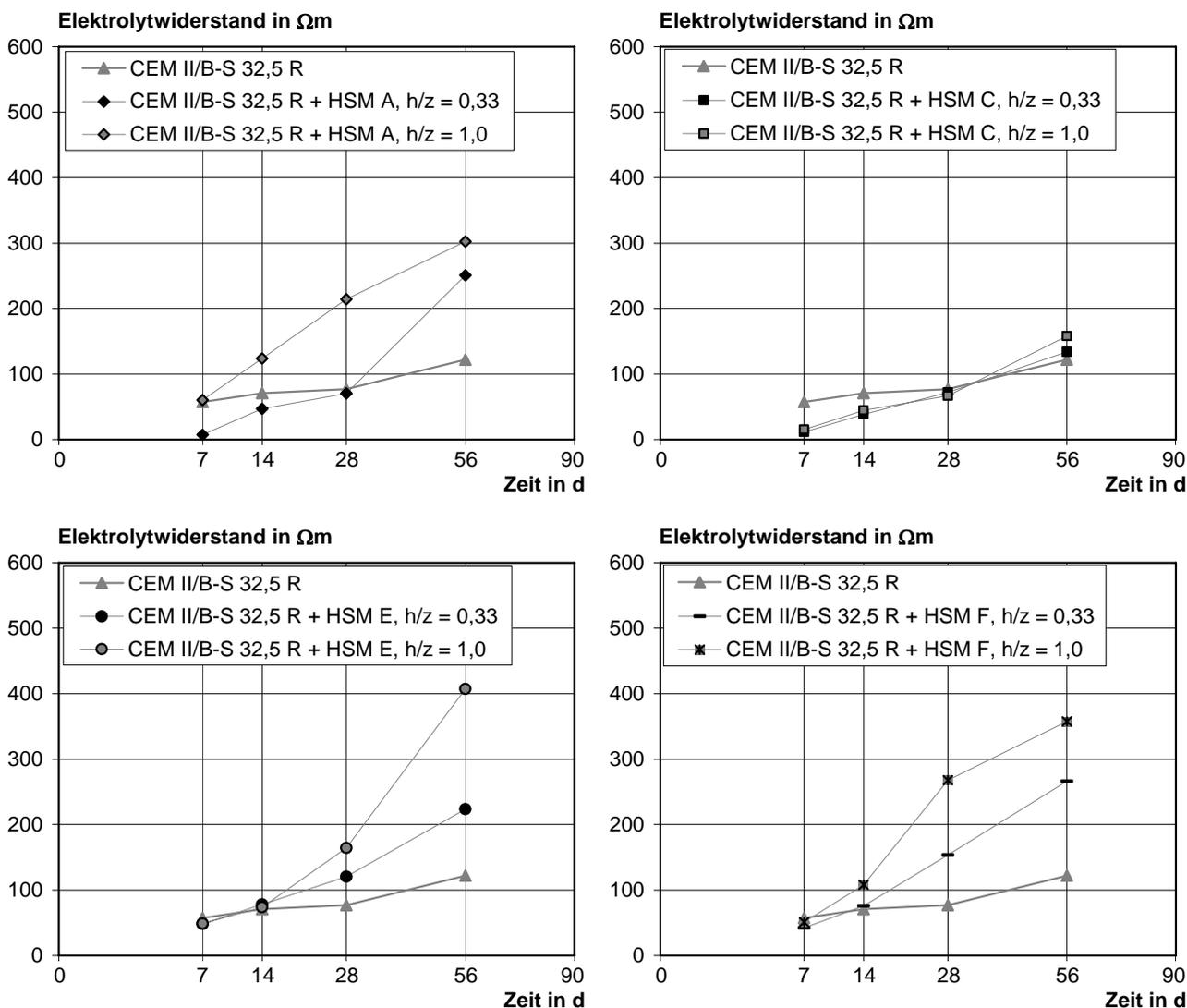


Bild B27: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands von Betonen der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM II/B-S 32,5 R und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

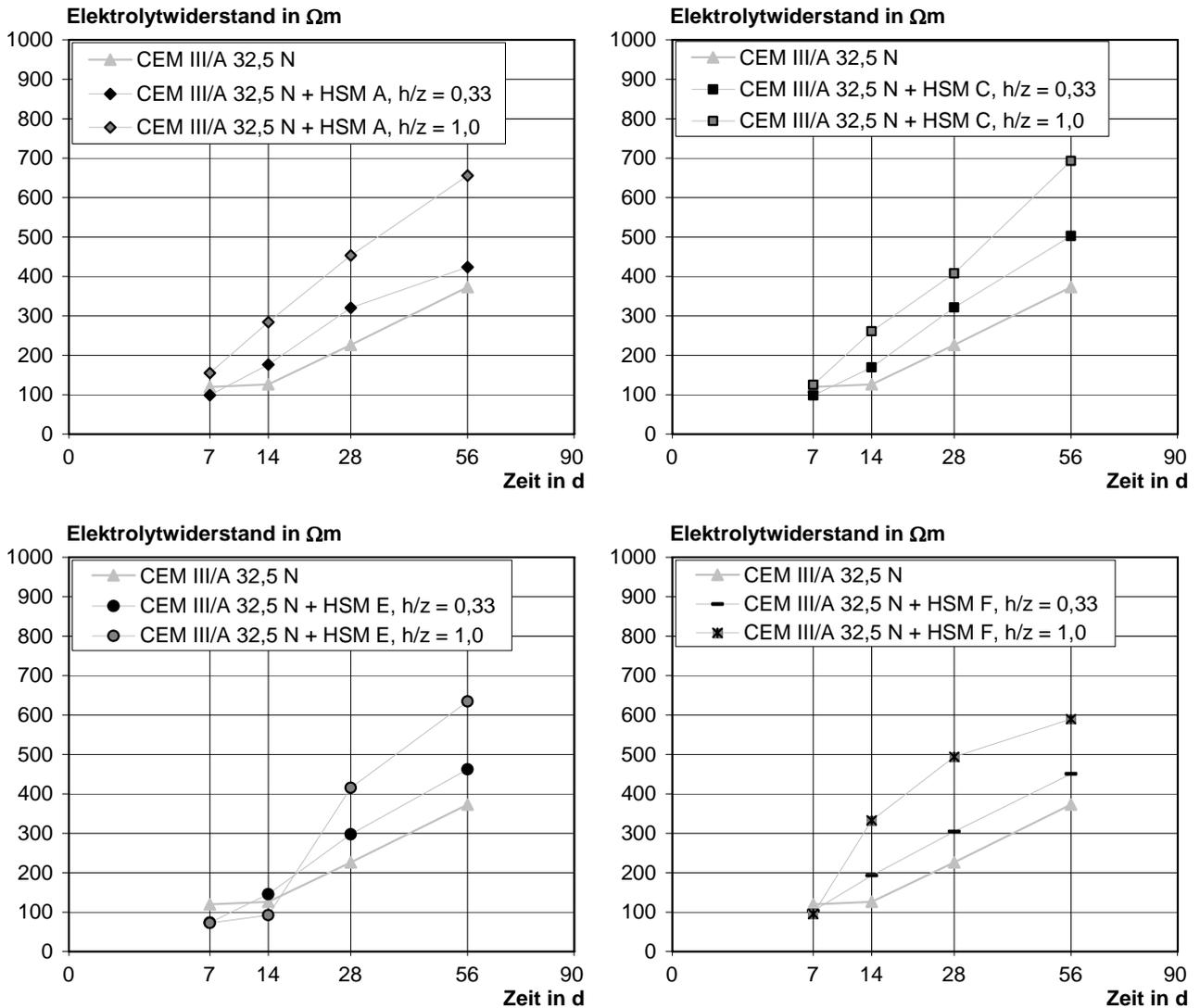


Bild B28: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands von Betonen der b-Mischung nach Tabelle 5 mit CEM III/A 32,5 N und den vier untersuchten Hüttensandmehlen (Wurzelmaßstab)

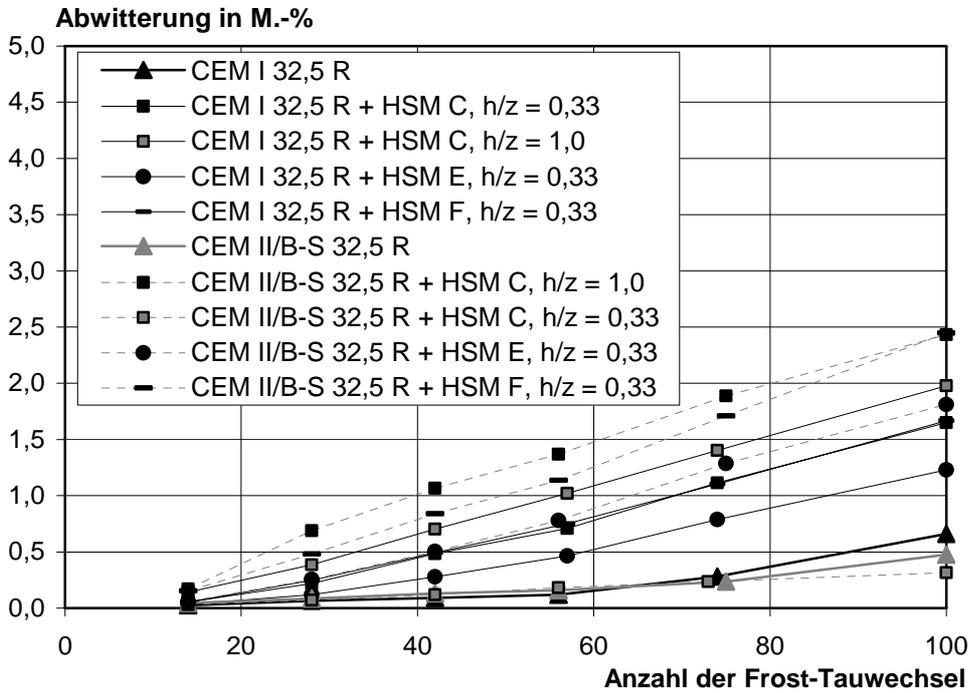


Bild B29: Abwitterung im Würfelverfahren (Bestimmung des Frostwiderstands)

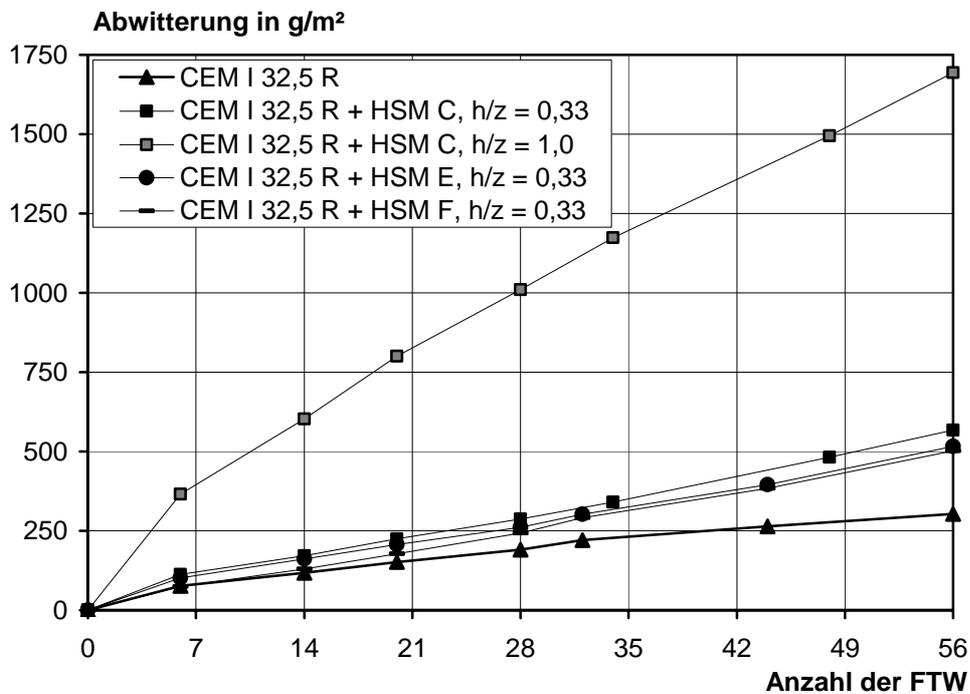


Bild B30: Abwitterung der Betone mit CEM I 32,5 R im CDF-Verfahren (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)

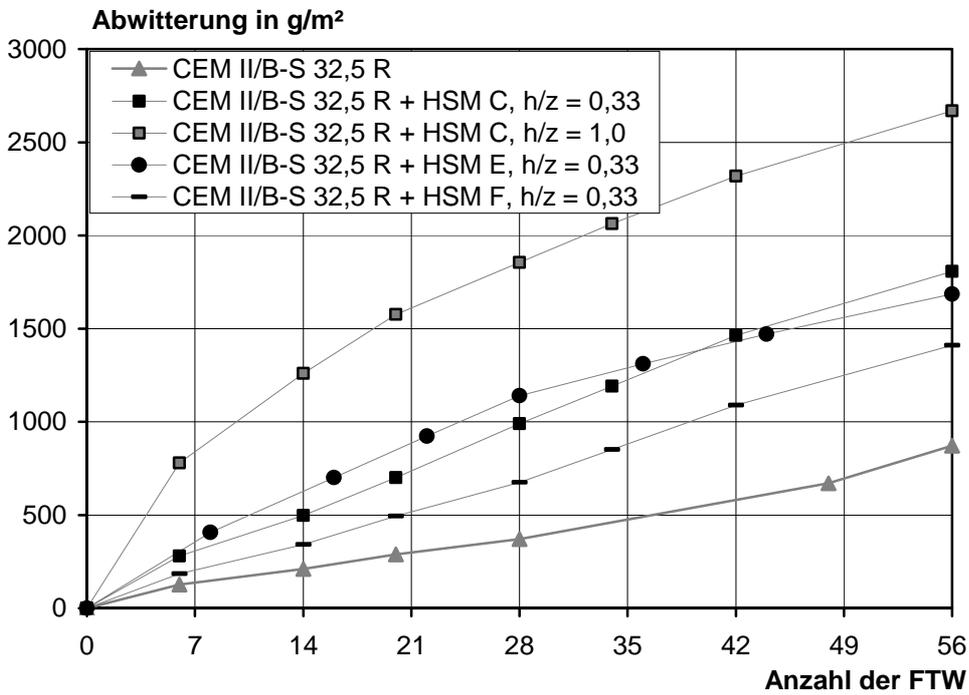


Bild B31: Abwitterung der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R im CDF-Verfahren (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)

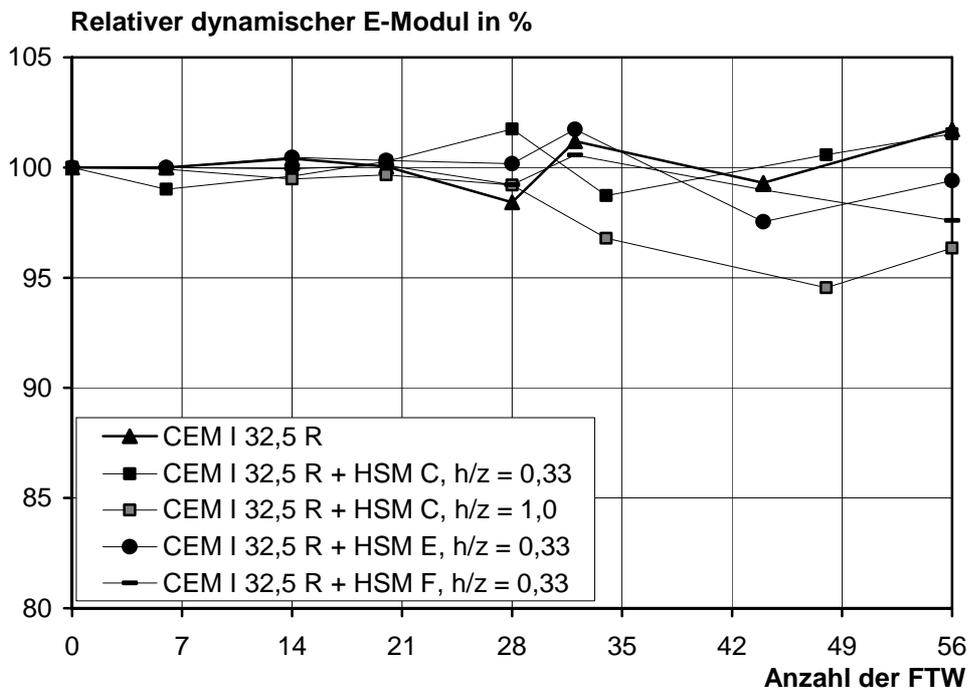


Bild B32: Relativer dynamischer E-Modul der Betone mit CEM I 32,5 R im CDF-Verfahren (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)

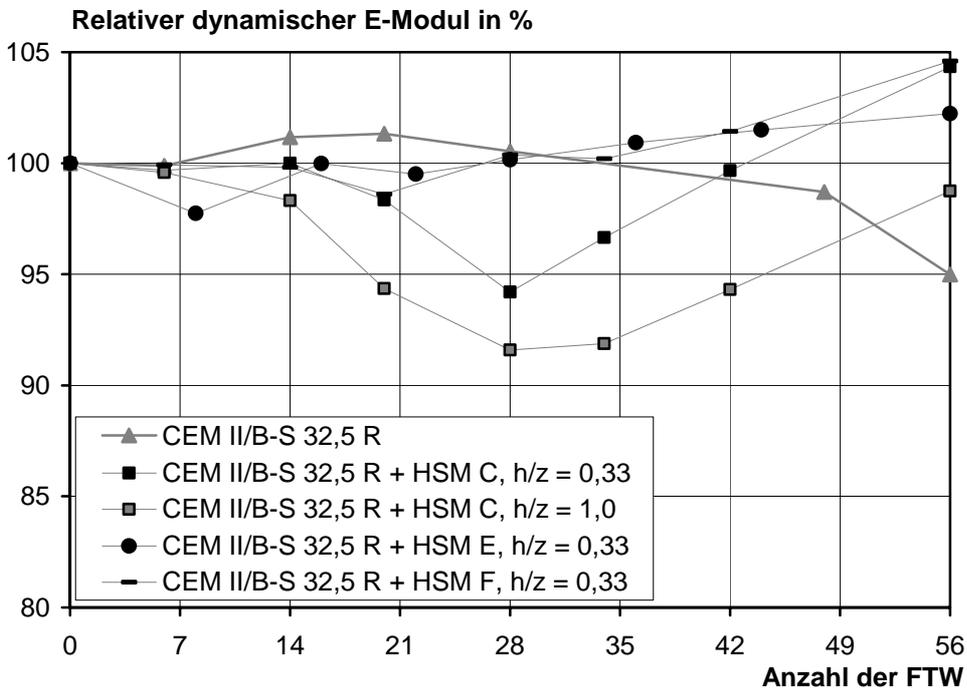


Bild B33: Relativer dynamischer E-Modul der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R im CDF-Verfahren (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)

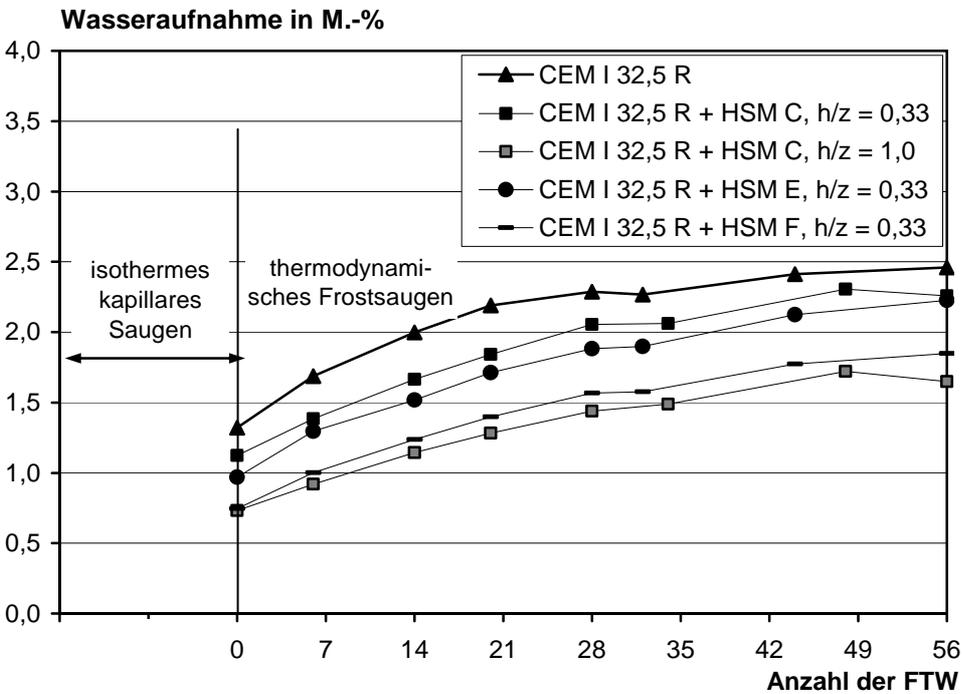


Bild B34: Wasseraufnahme der Betone mit CEM I 32,5 R während des CDF-Verfahrens (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)

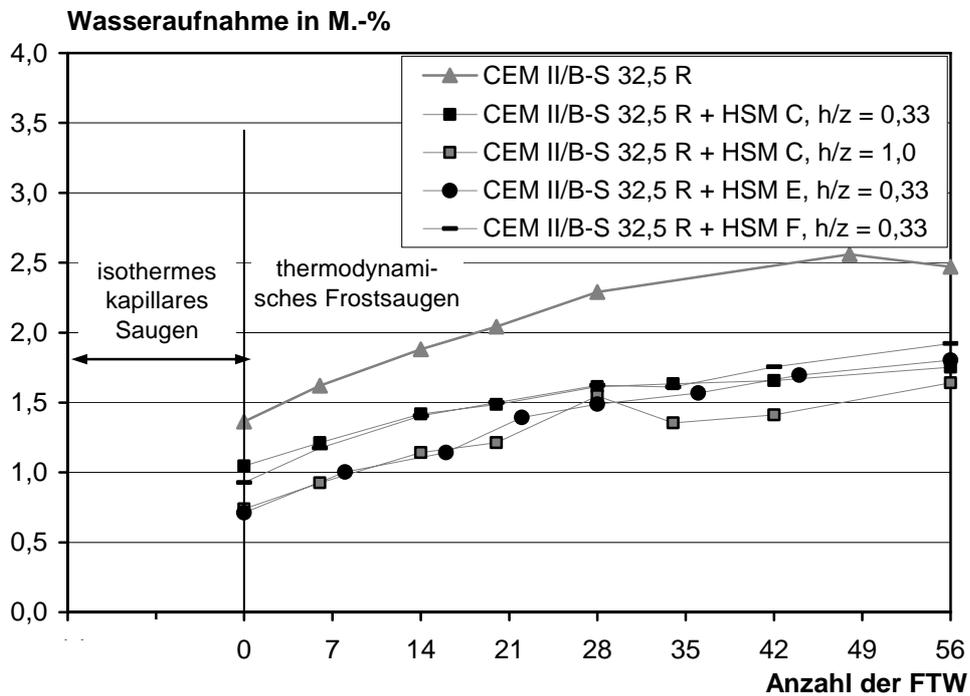


Bild B35: Wasseraufnahme der Betone mit CEM II/B-S 32,5 R während des CDF-Verfahrens (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands)