

Wolfgang Brameshuber, Julia Steinhoff

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

F 2775

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. 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.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2011

ISBN 978-3-8167-8615-3

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

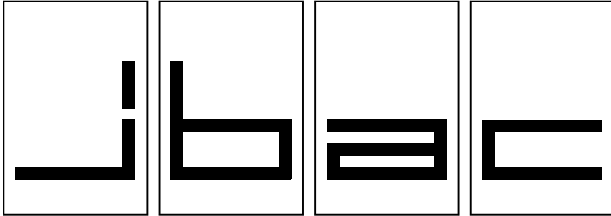
Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

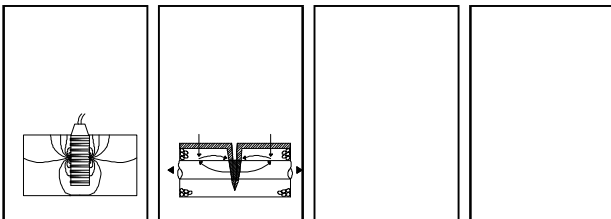
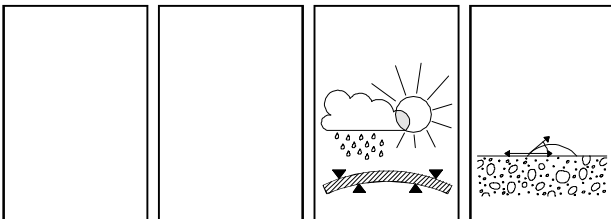
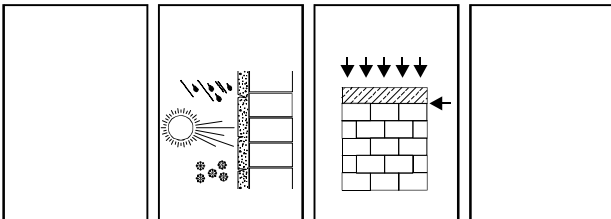
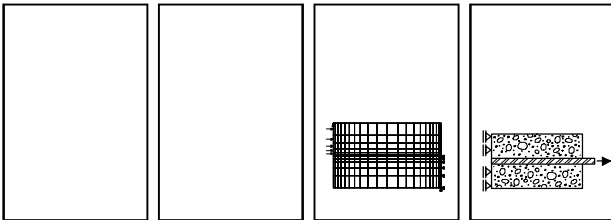
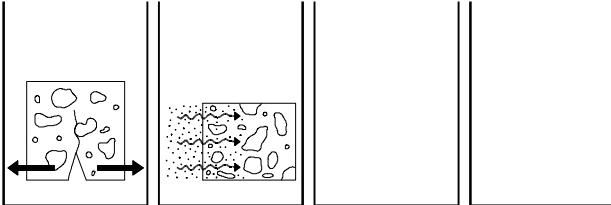
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG  
 ÜBERWACHUNG  
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-  
 WESTFÄLISCHE  
 TECHNISCHE  
 HOCHSCHULE  
 AACHEN  
**RWTH**  
 AACHEN  
 UNIVERSITY

## Forschungsbericht F960

Gemeinsame Verwendung von  
 Flugasche und Hüttensand als  
 Zusatzstoff im Beton

Sth/Fk

5. Ausfertigung

## **THEMA**

Gemeinsame Verwendung von Flugasche und  
Hüttensand als Zusatzstoff im Beton

- ABSCHLUSSBERICHT -

**Forschungsbericht Nr.**

F 960

vom 31.01.2011

**Projektbearbeitung**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. J. Steinhoff

**Auftraggeber/Förderer**

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn

**Vertragsdatum/Auftragsbestätigung** 18.12.2007

**Ihr Aktenzeichen** Z6-10.08.18.7-07.40

Dieser Bericht umfasst 118 Seiten, davon 64 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.

## FÖRDERHINWEIS

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

(Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7-07.40/ II 2 – F20-07-038)

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

### Abkürzungsverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
1	2	3
ABM	mm	Ausbreitmaß
AI	-	Aktivitätsindex
BiMi	-	Bindemittel
CEM I	-	Portlandzement
CEM II/B-S	-	Portlandhüttenzement
CEM III/A	-	Hochofenzement
CEN	-	Comité Européen de Normalisation - Europäisches Komitee für Normung
d	d	Zeit (Tag)
$d_k$	mm	Karbonatisierungstiefe
D	$m^2/s$	Diffusionskoeffizient
f, FA	-	Flugasche
GLV	-	Glühverlust
h, HSM	-	Hüttensandmehl
$h_{ges} = h + h_z$	-	Hüttensandmehl + Hüttensandmehl im Zement
$h_z$	-	Hüttensandmehl im Zement
k	-	Klinker
Max	-	Maximalwert
Min	-	Minimalwert
MW	-	Mittelwert
RFA	-	Röntgenfluoreszenz-Analyse
S	-	kapillarer Sättigungsgrad
$v_k$	$mm/\sqrt{d}$	Karbonatisierungsgeschwindigkeit
w	-	Wasser
$W_A$	M.-%	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck
$W_{kap}$	$g/m^2$	kapillare Wasseraufnahme
$W_{150bar}$	M.-%	Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar
w/b-Wert	-	Wasserbindemittelwert
w/z-Wert	-	Wasserzementwert
w/ $z_{eq}$ -Wert	-	äquivalenter Wasserzementwert $w/z_{eq} = w/(z+h+0,4 \cdot f)$
z, Z	-	Zement

**INHALTSVERZEICHNIS****Seite**

1	EINLEITUNG .....	1
2	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND VERSUCHSBESCHREIBUNGEN	2
2.1	Übersicht.....	2
2.2	Beschreibung der Mörteluntersuchungen .....	3
2.2.1	Mischungszusammensetzungen.....	3
2.2.2	Frischmörteleigenschaften.....	5
2.2.3	Wasseranspruch nach Punkte der Bindemittelgemische .....	5
2.2.4	Biegezug- und Druckfestigkeit .....	5
2.2.5	Aktivitätsindex und bezogene Festigkeit .....	6
2.2.6	Spaltzugfestigkeit.....	6
2.2.7	Karbonatisierung.....	6
2.3	Beschreibung der granulometrischen Untersuchungen .....	7
2.4	Beschreibung der Betonuntersuchungen.....	7
2.4.1	Betonzusammensetzungen .....	7
2.4.2	Frischbetonkennwerte.....	8
2.4.3	Druckfestigkeit .....	9
2.4.4	Karbonatisierung.....	9
2.4.5	Wasseraufnahme und kapillarer Sättigungsgrad .....	9
2.4.6	Sauerstoffdiffusion .....	11
2.4.7	Elektrolytwiderstand.....	12
3	VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG .....	12
3.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe.....	12
3.1.1	Allgemeines .....	12
3.1.2	Zemente.....	12
3.1.3	Flugasche .....	13
3.1.4	Hüttensandmehl.....	13
3.1.5	Gesteinskörnung.....	14
3.2	Mörtelprüfungen.....	14
3.2.1	Frischmörteleigenschaften.....	14
3.2.2	Wasseranspruch nach Punkte .....	15
3.2.3	Biegezug- und Druckfestigkeit .....	15

	<b>Seite</b>
3.2.4	Aktivitätsindex und bezogene Druckfestigkeit..... 22
3.2.4.1	Flugasche ..... 22
3.2.4.2	Hüttensandmehl..... 23
3.2.4.3	Bindemittelkombination Hüttensandmehl und Flugasche ..... 25
3.2.5	Spaltzugfestigkeit..... 26
3.2.6	Karbonatisierung..... 27
3.3	Granulometrische Untersuchungen ..... 29
3.3.1	Allgemeines ..... 29
3.3.2	Vorversuche..... 30
3.3.3	Optimierung der Sieblinie mit den Ausgangsstoffen aus Projektphase 2... 35
3.4	Betonprüfungen ..... 39
3.4.1	Frischbetonkennwerte (Ausbreitmaß, Luftgehalt, Rohdichte) ..... 39
3.4.2	Druckfestigkeit ..... 40
3.4.3	Karbonatisierung..... 45
3.4.4	Wasseraufnahme und kapillarer Sättigungsgrad ..... 48
3.4.5	Sauerstoffdiffusion ..... 52
3.4.6	Elektrolytwiderstand..... 53
4	ZUSAMMENFASSUNG ..... 55
5	LITERATUR ..... 58
	TABELLEN ..... A1-A21
	BILDER ..... B1-B33



## 1 EINLEITUNG

Flugasche (FA) wird seit über 30 Jahren als puzzolanischer Betonzusatzstoff im Beton eingesetzt. Der Einsatz ist in DIN EN 206-1:2005-09 /DIN05b/ in Verbindung mit DIN 1045-2:2008-08 /DIN08b/ geregelt. Die Norm DIN EN 15167-1:2006-12 /DIN06/ für Hüttensandmehl (HSM) als latent-hydraulischer Betonzusatzstoff des Typs II wurde in enger Anlehnung an das Konzept der europäischen Normen zu Flugasche (DIN EN 450-1:2008-05 /DIN08a/) und Silikastaub (DIN EN 13263-1:2009-07 /DIN09e/) erstellt. DIN EN 15167-1 ist als harmonisierte europäische Stoffnorm bereits in der Bauregelliste B, Teil 1 veröffentlicht /DIB08/. Sie regelt allerdings nicht die Anwendung im Beton. Dies ist eigentlich, wie für die anderen Betonbestandteile auch, Aufgabe der europäischen Betonnorm EN 206-1 /DIN05b/ sowie der zugehörigen deutschen Betonnorm DIN 1045-2 /DIN08b/. In diesen beiden Normen ist Hüttensandmehl aber zurzeit nicht erfasst. Der Einsatz von Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff ist daher momentan nur mit bauaufsichtlicher Zulassung möglich. Eine solche allgemeine bauaufsichtliche Zulassung wurde bisher nur einmal beantragt.

Hüttensand ist ein Nebenprodukt der Roheisenerzeugung im Hochofen und wird in Deutschland seit Jahrzehnten als Zementbestandteil verwendet. Hüttensand wird im Zementwerk gemeinsam mit den anderen Zementbestandteilen gemahlen bzw. separat aufbereitet und anschließend mit den anderen Zementbestandteilen oder mit Portlandzement zu Portlandhütten-, Portlandkomposit- oder zu Hochofenzement gemischt. Hüttensandhaltige Zemente haben mit der Zeit immer mehr an Bedeutung gewonnen, was nicht zuletzt auf ihre ökologischen Vorteile zurückzuführen ist. Erfahrungen mit Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff, der separat auf Zementfeinheit gemahlen wird und erst im Betonwerk mit den anderen Betonbestandteilen (Zement, Gesteinskörnung, andere Zusatzstoffe, Zusatzmittel) gemischt wird, existierten zwar auch in Deutschland seit den 1920er Jahren, enden aber zu Beginn der 1970er Jahre /DAF07/.

Die gemeinsame Verwendung verschiedener Betonzusatzstoffe, wie sie in anderen Ländern durchaus bereits üblich ist, bedarf daher weiterführender Forschung. Da der Einsatz von Flugasche in Deutschland dem Stand der Technik entspricht, werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens grundlegende Untersuchungen zu der gemeinsamen Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl im Beton durchgeführt. Es soll nachgewiesen werden, dass Betone, die bei gemeinsamer Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff hergestellt werden, die Normanforderungen nach DIN EN 1045-2 und DIN EN 206-1 /DIN08b, DIN05b/ sicher erfüllen bzw. vergleichbare Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen wie Betone, die unter Verwendung von

Hochofenzement und mit Flugasche hergestellt werden. Aufgrund der Ergebnisse eigener Voruntersuchungen ist bei einer gezielten Kombination der beiden Betonzusatzstoffe sogar mit signifikant besseren Eigenschaften des Betons zu rechnen /BRA06/. Dies wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand weiterer Prüfungen zur Leistungsfähigkeit von granulometrisch optimierten Mischungen näher untersucht. Durch die zielgerichtete Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl ist eine höhere Baustoff- und somit Bauteilqualität zu erwarten. Darüber hinaus werden durch den vermehrten Einsatz von Betonzusatzstoffen im Austausch gegen Zement Ressourcen im Sinne des nachhaltigen Bauens geschont und ein direkter Beitrag zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen geleistet.

## **2    UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND VERSUCHSBESCHREIBUNGEN**

### **2.1   Übersicht**

Das Untersuchungsprogramm dieses Forschungsvorhabens gliederte sich in insgesamt vier Projektphasen:

1.    Charakterisierung der Ausgangsstoffe
2.    Nachweis gleicher Leistungsfähigkeit von Mischungen mit und ohne gemeinsame Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff
3.    Granulometrische Optimierung von Mörteln
4.    Überprüfung der Ergebnisse im Betonmaßstab

Ein Schwerpunkt des Projektes ist die Untersuchung von herstellbedingten Schwankungen der Eigenschaftskennwerte unterschiedlicher Produktionschargen der Betonausgangsstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Dafür wurden innerhalb eines halben Jahres monatlich Proben der Betonausgangsstoffe entnommen und damit Mörtel gleicher Zusammensetzung hergestellt. Ziel ist der Nachweis, dass herstellbedingte Schwankungen keine Praxisrelevanz haben und die erforderlichen Frisch- und Festbetoneigenschaften beim Wechsel einer Ausgangsstoffcharge sicher erreicht werden. Die Zemente, Flugaschen und Hüttensandmehle liegen in 6 verschiedenen Chargen vor, mit denen die Mörteluntersuchungen durchgeführt wurden. Die Betonuntersuchungen erfolgten dagegen nur mit den Ausgangsstoffen der ersten Charge.

## **2.2 Beschreibung der Mörteluntersuchungen**

### **2.2.1 Mischungszusammensetzungen**

In Projektphase 2 soll der Nachweis erbracht werden, dass bei praxisnaher Zusammensetzung der Mörtel unter Verwendung von Zement, Flugasche und Hüttensandmehl vergleichbare Frisch- und Festmörteleigenschaften zu erzielen sind wie bei der Verwendung von Hochofenzement und Flugasche. Die Untersuchungen erfolgten an CEN-Normmörteln gemäß DIN EN 196-1:2005-05 /DIN05a/, wobei aber von einer Übertragbarkeit der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen auf den Beton ausgegangen werden kann, was in gesonderten Untersuchungen im Rahmen der Projektphase 4 überprüft wird. Die Mörtelmischungen enthalten nach Massenanteilen 1 Teil Zement und ggf. Zusatzstoffe, 3 Teile CEN-Normsand und einen halben Teil Wasser (Wasserbindemittelwert 0,50).

Die Untersuchung von herstellbedingten Schwankungen der Eigenschaftskennwerte unterschiedlicher Produktionschargen der Betonausgangsstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften erfolgte an jeweils 6 monatlich entnommenen Proben der Betonausgangsstoffe. Die Prüfmatrix mit den entsprechenden Mischungszusammensetzungen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Das X ist jeweils durch die Chargennummern 1 bis 6 zu ersetzen. Da bei allen Chargen des CEM II/B-S statt 35 M.-% Hüttensandmehl nur rd. 30 M.-% enthalten war, wurde die Referenzmischung M X.2.0 für die erste Charge mit Zudosierung von Hüttensandmehl hergestellt, um einen Anteil von Klinker zu Hüttensandmehl von 65/35 zu erreichen (Mischung 1.2.6). Im CEM III/A betrug der tatsächliche Anteil an Hüttensandmehl anstelle von 65 M.-% nur 50 M.-%. Auch hier wurde die Referenzmischung der ersten Charge unter Zugabe von Hüttensandmehl erneut hergestellt, um einen Anteil von Klinker zu Hüttensandmehl von 35/65 zu erreichen (Mischung 1.3.2). Diese beiden Kombinationen von CEM II/B-S bzw. CEM III/A mit HSM wurden auch in Kombination mit Flugasche geprüft (Mischungen 1.2.7 und 1.3.3). Die Zusatzmischungen sind ebenfalls in Tabelle 1 aufgelistet.

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

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

z Zement

f Flugasche

k Klinker

h Hüttensandmehl

h<sub>z</sub> Hüttensandmehl im Zementh<sub>ges</sub> = h + h<sub>z</sub>w/z<sub>eq</sub> = w/(z+h+0,4·f)

An den Mörteln wurden die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit an Prismen mit den Abmessungen 40 mm · 40 mm · 160 mm im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen geprüft. An Mischungen der ersten Charge wurde außerdem die Spaltzugfestigkeit bestimmt. Zusätzlich wurde das Karbonatisierungsverhalten nach 14, 28, 90, 180 und 365 Tagen geprüft.

An den Mischungen mit Betonzusatzstoffen wurde außerdem der Aktivitätsindex (AI) nach DIN EN 450-1: 2008-05 /DIN08a/ und DIN EN 15167-1:2006-12 /DIN06/ bzw. die auf die Druckfestigkeit des reinen Zementmörtels bezogene Festigkeit ermittelt.

## **2.2.2 Frischmörteleigenschaften**

An allen Mörtelmischungen wurden das Ausbreitmaß mit dem Hägermanntrichter nach DIN EN 1015-3:2007-05 /DIN07a/, die Rohdichte nach DIN EN 1015-6:2007-05 /DIN07b/ sowie der Luftgehalt nach DIN EN 1015-7:1998-12 /DIN98/ bestimmt.

## **2.2.3 Wasseranspruch nach Puntke der Bindemittelgemische**

Der Wasseranspruch nach Puntke kennzeichnet den Wasserbedarf zur Sättigung sämtlicher Haufwerksporen bei maximaler Packungsdichte des Korngefüges. Das Verfahren ist für feine, kohäsionsarme Körnungen geeignet. Die Packungsdichte bzw. das Haufwerksporenvolumen hängt nach vollständiger Verdichtung allein von der Korngrößenverteilung und der Kornform ab. Die Versuchsbeschreibung zur Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke ist der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ zu entnehmen /DAF03/. Im Unterschied dazu wurde jedoch die Verdichtung des Gefüges statt durch leichte Stöße mit Hilfe eines Vibrationstisches durchgeführt. Die Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke erfolgte einzeln an den verschiedenen Ausgangsstoffen sowie an den Bindemittelzusammensetzungen entsprechend Tabelle 1.

## **2.2.4 Biegezug- und Druckfestigkeit**

Das Verfahren nach /DIN05a/ umfasst die Bestimmung der Biegezug- und der Druckfestigkeit an Mörtelprismen mit den Abmessungen 40 mm · 40 mm · 160 mm. Diese Prüfkörper wurden aus einer Mörtelmischung von plastischer Konsistenz hergestellt. Der Mörtel wurde maschinell gemischt und in der Form mit Hilfe eines Schocktisches verdichtet. Die Prüfkörper wurden in den Formen 24 Stunden in feuchter Luft und nach dem Ausschalen bis zur Prüfung der Festigkeit nach 2, 7, 28 und 90 Tagen unter Wasser gelagert. Nach dem Erreichen des vorgesehenen Alters wurden die Prüfkörper im 3-Punkt-Biegeversuch geprüft. Jede Prüfkörperhälfte wurde anschließend auf ihre Druckfestigkeit geprüft.

## 2.2.5 Aktivitätsindex und bezogene Festigkeit

Nach DIN EN 450-1 /DIN08a/ ist der Aktivitätsindex das Verhältnis der Druckfestigkeiten von Mörtelprismen, die einen Massenanteil von 75 % Prüfzement und 25 % Flugasche enthalten, und Mörtelprismen, die ausschließlich mit Prüfzement hergestellt wurden. Für Hüttensandmehl ist zur Bestimmung des Aktivitätsindex nach DIN EN 15167-1 /DIN06/ ein Verhältnis von Hüttensandmehl zu Zement von 50/50 vorgeschrieben. Neben dem klassischen Aktivitätsindex wurden auch bezogene Druckfestigkeiten berechnet. Hier dient als Bezugswert nicht die Mörteldruckfestigkeit bei Verwendung des Prüfzements (CEM I 42,5 R), sondern die Festigkeit eines Mörtels ohne Zusatzstoffe mit einem beliebigen Zement (z. B. CEM II/B-S). Dieser Zement war dann jeweils auch im Prüfmörtel enthalten. Auf diese Weise kann festgestellt werden, wie die Zusatzstoffe die Festigkeitsentwicklung eines beliebigen Zements beeinflussen bzw. wie reaktiv der Zusatzstoff in Kombination mit diesem Zement ist.

## 2.2.6 Spaltzugfestigkeit

An den Mischungen der ersten Charge wurden zusätzlich die Spaltzugfestigkeiten nach 2, 7, 28 und 90 Tagen bestimmt. Dabei wird in Anlehnung an DIN 1048-5:1991-06 /DIN91/ die Last über Lastverteilungstreifen, die auf die Prismen aufgeklebt werden, aufgebracht und bis zum Spalten der Probekörper gesteigert.

## 2.2.7 Karbonatisierung

Zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe nach Heft 422 des DAfStb /BUN91/ 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. Es wurde die mittlere Karbonatisierungstiefe jeder Seite der Bruchfläche und die sich daraus ergebende mittlere Karbonatisierungstiefe  $d_K$  zu den Prüfzeitpunkten (14, 28, 90, 180 und 365 Tage) ermittelt. Die Karbonatisierungstiefe  $d_K$  wurde dann über der Zeit im Wurzelmaßstab aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgeraden gibt die mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeit in  $\text{mm}/\sqrt{d}$  an.

## **2.3 Beschreibung der granulometrischen Untersuchungen**

In der dritten Projektphase soll der Nachweis erbracht werden, dass durch eine gezielte granulometrische Optimierung der Sieblinie im Feinbereich durch eine Kombination von Zement, Flugasche und Hüttensandmehl mit unterschiedlichen Feinheiten die tatsächlichen Potentiale vollständig ausgeschöpft werden können. Ziel dieses Teilschrittes ist es, durch das bei der granulometrischen Optimierung erzielte dichtere Gefüge der Mörtel verbesserte Frisch- und Festbetoneigenschaften nachzuweisen. Da eine granulometrische Optimierung mit den vorliegenden Ausgangsstoffen nur sehr eingeschränkt möglich ist, werden hier weitere Ausgangsstoffe herangezogen.

## **2.4 Beschreibung der Betonuntersuchungen**

### **2.4.1 Betonzusammensetzungen**

In Projektphase 4 werden die Ergebnisse der Mörteluntersuchungen im Betonmaßstab validiert und die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Mörteluntersuchungen der Projektphase 2 in den Betonmaßstab überprüft.

Die Zusammensetzungen der 12 Betonmischungen sind Tabelle 2 zu entnehmen. Der Zusatz a an den jeweiligen Mischungsnummern kennzeichnet einen äquivalenten w/z-Wert von 0,5, b steht für  $w/z_{eq} = 0,6$ . Die b-Mischungen decken die Expositionsklassen XA1, XC1, XC2, XC3, XC4 und XF1 ab, die a-Mischungen zusätzlich XA2, XD2, XF2, XF3 und XF4.

**Tabelle 2:** Mischungszusammensetzungen der zu untersuchenden Betone (Projektphase 4)

Bezeichnung	Zementart	Gehalt				w/z <sub>eq</sub>	h/z	f/(z + h)
		z	h	f	w			
-	-	kg/m <sup>3</sup>				-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	320	0	0	160	0,5	0/100	0
M 1.0 b		280	0	0	168	0,6		
M 1.1 a		160	160	0	160	0,5	50/50	0
M 1.1 b		140	140	0	168	0,6		
M 1.2 a		135	135	90	152,8	0,5	50/50	0,33
M 1.2 b		135	135	90	183,4	0,6		
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R h <sub>z</sub> =30 M.-%	320	0	0	160	0,5	0/100	0
M 2.0 b		280	0	0	168	0,6		
M 2.1 a		160	160	0	160	0,5	50/50	0
M 2.1 b		140	140	0	168	0,6		
M 2.2 a		135	135	90	152,8	0,5	50/50	0,33
M 2.2 b		135	135	90	183,4	0,6		

## 2.4.2 Frischbetonkennwerte

Mit dem Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2009-08 /DIN09a/ wurde die Konsistenz der Frischbetone bestimmt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollte ein Ausbreitmaß von 420 bis 480 mm, d. h. Konsistenzklasse F3, eingestellt werden, was über eine Anpassung der Sieblinie der Gesteinskörnung erfolgte.

Die Rohdichte wurde nach DIN EN 12350-6:2009-08 /DIN09b/ bestimmt. Dabei wird der Frischbeton in einem biegesteifen und wasserdichten Behälter, dessen Volumen und Masse bekannt sind, verdichtet und gewogen.

Der Luftgehalt wurde nach DIN EN 12350-7:2009-08 /DIN09c/ ermittelt. Ein bekanntes Luftvolumen wird bei bekanntem Druck in einer dicht verschlossenen Kammer mit dem unbekanntem Luftvolumen in der Betonprobe ausgeglichen. Dabei ist die Skalenteilung des Druckmessers (Manometer) für den resultierenden Druck auf den prozentualen Luftgehalt der Betonprobe kalibriert.



### 2.4.3 Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3:2009-07 /DIN09d/ erfolgte im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen. Es wurden je Prüftermin 3 Würfel mit 150 mm Kantenlänge geprüft. Nach dem Ausschalen wurden die Würfel bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und anschließend im Normklima 20/65 gelagert.

### 2.4.4 Karbonatisierung

Das Karbonatisierungsverhalten wurde an Betonprismen ( $100 \cdot 100 \cdot 500 \text{ mm}^3$ ) untersucht, die jeweils aus derselben Betoncharge wie die Druckfestigkeitsproben hergestellt wurden. Es wurden jeweils 3 Prismen bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser vorgelagert. Die Hauptlagerung erfolgte im Normklima 20/65.

Die Ermittlung der Karbonatisierungstiefen und der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten erfolgte analog zu Abschnitt 2.2.7.

### 2.4.5 Wasseraufnahme und kapillarer Sättigungsgrad

Zur Bestimmung der Wasseraufnahme wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Nach dem Ausschalen lagerten die Probekörper bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser. Anschließend erfolgte die Lagerung im Normklima 20/65. Jeweils rund eine Woche vor dem Prüftermin wurden aus einem Prüfwürfel zwei Bohrkerne mit 80 mm Durchmesser gezogen und in Scheiben mit einer Dicke von 30 mm gesägt. Die Stirnseiten der Bohrkerne wurden verworfen. Auf diese Weise wurden je Beton und Prüftermin acht Betonscheiben hergestellt, die weiter im Normklima 20/65 gelagert wurden. Um Gefügeschädigungen wie z. B. Risse durch Trocknungsschwinden zu vermeiden, wurden die Proben entgegen der Vorgehensweise in /Bun91/ vor der Wasseraufnahme nicht getrocknet. Die Prüfung erfolgte im Alter von 28 und 90 Tagen. Vor Prüfbeginn wurden die Scheiben gewogen.

Bestimmt wurde zunächst die kapillare Wasseraufnahme ( $W_{\text{kap}}$ ). Dazu wurden die Proben so in Wasser mit einer Temperatur von 20 °C gestellt, dass sie ca. 5 mm tief eintauchten. Die Betonscheiben wurden mit einer Kunststoffhaube abgedeckt, deren Wandungen einen Abstand von rd. 10 mm zur Probe hatten. Die Scheiben wurden nach 1, 2, 4, 8, 24 und 48 Stunden gewogen. Die kapillare Wasseraufnahme wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$W_{\text{kap}}(t) = (m_t - m_{20/65}) / A \quad (1)$$

mit

$W_{\text{kap}}(t)$ : kapillare Wasseraufnahme zum Zeitpunkt  $t$  in  $\text{g}/\text{m}^2$

$m_t$ : Masse des Prüfkörpers nach der Saugzeit  $t$  in  $\text{g}$

$m_{20/65}$ : Masse des Prüfkörpers vor dem Saugen (Lagerung im Normklima 20/65) in  $\text{g}$

$A$ : Grundfläche der Probe; hier  $A = \pi \cdot (0,04 \text{ m})^2 = 0,00503 \text{ m}^2$

Direkt im Anschluss an die kapillare Wasseraufnahme wurde die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck ( $W_A$ ) bestimmt. Hierzu wurden die Betonscheiben zunächst eine Stunde bis zur Hälfte und anschließend vollständig mit Wasser bedeckt bei Atmosphärendruck gelagert (Überdeckung: rd. 20 mm). Die Lagerung erfolgte so lange, bis Massenkonzanz erreicht war. Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck wurde nach Abschluss der Prüfungen nach Gleichung (2) berechnet:

$$W_A = \frac{m_A - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad (2)$$

mit

$W_A$ : Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck in M.-%

$m_A$ : Masse des Prüfkörpers bei Massenkonzanz in  $\text{g}$

$m_d$ : Masse des Prüfkörpers nach Trocknung bei  $105^\circ\text{C}$  in  $\text{g}$

Die nassen Proben wurden anschließend in einen wassergefüllten Drucktopf gelegt und 24 Stunden einem Druck von 150 bar ausgesetzt, um die Wasseraufnahme unter Druck ( $W_{150\text{bar}}$ ) zu bestimmen.

$$W_{150\text{bar}} = \frac{m_{150\text{bar}} - m_d}{m_d} \cdot 100 \% \quad (3)$$

mit

$W_{150\text{bar}}$ : Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar in M.-%

$m_{150\text{bar}}$ : Masse des Prüfkörpers nach 24 Stunden im Drucktopf in  $\text{g}$

Im Anschluss wurden die Proben bis zur Massenkonzanz bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet, um  $m_d$  zu bestimmen.

Neben der Wasseraufnahme kann anhand der festgestellten Massen der kapillare Sättigungsgrad der Proben nach Gleichung (4) ermittelt werden. Der kapillare Sättigungsgrad gibt an, welcher Anteil der prinzipiell aufnehmbaren Wassermenge in der Probe enthalten ist.

$$S = \frac{m_i - m_d}{m_{150\text{bar}} - m_d} \quad (4)$$

mit

S: kapillarer Sättigungsgrad  
 m<sub>i</sub>: Masse der Probe im Zustand i in g;  
 der Sättigungsgrad bei Lagerung im Normklima ergibt sich z. B. durch m<sub>i</sub> = m<sub>20/65</sub>

## 2.4.6 Sauerstoffdiffusion

Für die Bestimmung der Gasdiffusion wurde Sauerstoff als Prüfmedium verwendet, da sich dieses Gas gegenüber Zementstein weitgehend inert verhält. Bei der Diffusion erfolgt der Gasstrom durch die Probe aufgrund eines Konzentrationsgefälles. Die Probe wird auf der einen Seite mit Sauerstoff und auf der anderen mit Stickstoff beaufschlagt. Gemessen wird die Sauerstoffkonzentration im Stickstoffstrom. Der Diffusionskoeffizient kann dann nach Gleichung (5) berechnet werden.

$$D = \frac{Q_V \cdot d}{A} \cdot \frac{\Delta c}{c_{O_2} - \Delta c} \quad (5)$$

mit

D: Gasdiffusionskoeffizient in m<sup>2</sup>/s  
 Q<sub>V</sub>: Stickstoffstrom in m<sup>3</sup>/s  
 d: Dicke des Prüfkörpers in m  
 Δc: Anstieg der O<sub>2</sub>-Konzentration im Stickstoffgas in Vol.-%  
 c<sub>O<sub>2</sub></sub>: Ausgangskonzentration des Sauerstoffgases, hier c<sub>O<sub>2</sub></sub> = 100 Vol.-%

Es wurden je Betonmischung zwei Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm hergestellt, nach einem Tag ausgeschalt und bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser gelagert. Anschließend wurden die Proben in Kunststoffolie verpackt und versiegelt bis zum Prüftermin von 28 bzw. 90 Tagen gelagert. Zum Prüftermin wurden aus je einem Zylinder drei Scheiben mit einer Dicke von rd. 50 mm herausgesägt, wobei die Stirnflächen verworfen wurden. Die Trocknung erfolgte im Vakuumschrank bei 60 °C bis zur Massekonstanz. Bis zur Messung wurden die Proben luftdicht in Kunststoffolie eingeschweißt.

## **2.4.7 Elektrolytwiderstand**

Der Elektrolytwiderstand wurde nach dem Wenner-Verfahren (Vier-Elektroden-Methode) nach ASTM G 57 /AST78/ gemessen. Es dient zur Abschätzung der Dichtigkeit des Betons. Alle fünf Schalseiten eines Würfels mit 200 mm Kantenlänge wurden diagonal und parallel zu den Rändern (in der Mitte des Würfels) geprüft, so dass jeweils 20 Messwerte vorlagen, die gemittelt wurden. Nach dem Ausschalen wurde der Probekörper unter Wasser gelagert. Die Prüfung wurde im Alter von 7, 28 und 90 Tagen durchgeführt.

## **3 VERSUCHSERGEBNISSE UND AUSWERTUNG**

### **3.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe**

#### **3.1.1 Allgemeines**

Die Ausgangsstoffe wurden chemisch-mineralogisch sowie physikalisch-technisch charakterisiert. Die chemische Analyse erfolgte dabei mittels Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA) bei nasschemischer Analyse der Alkalien und Anionen. Die mineralogischen Untersuchungen erfolgten röntgenbeugungsanalytisch. Im Rahmen der physikalisch-technischen Untersuchungen wurden die Kornrohichte und die spezifische Oberfläche nach Blaine sowie die Korngrößenverteilung ermittelt. Für die Ermittlung der Korngrößenverteilungen wurden Luftstrahlsiebung und Lasergranulometrie eingesetzt. Die Luftstrahlsiebung wird für die Korndurchmesser  $\geq 40 \mu\text{m}$ , die Lasergranulometrie für die Korndurchmesser  $< 40 \mu\text{m}$  verwendet.

#### **3.1.2 Zemente**

Im Rahmen der Untersuchungen werden ein handelsüblicher Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 42,5 R sowie ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S 32,5 R und ein Hochofenzement CEM III/A 32,5 N verwendet, die mit dem gleichen Klinker hergestellt wurden. Der ursprünglich vorgesehene Portlandzement CEM I 32,5 R mit demselben Ausgangsklinker wie die restlichen Zemente wurde mit Zustimmung des Beratergremiums aus dem Programm gestrichen, da er nicht mehr produziert wird. Nach der allgemeinen Markttendenz wird in naher Zukunft voraussichtlich auch bei anderen Herstellern kein CEM I 32,5 R mehr hergestellt, wodurch der Praxisbezug nicht mehr gegeben ist.

Die Zemente erfüllen die Anforderungen der DIN EN 197-1:2004-08 /DIN04/. Die chemische Zusammensetzung der Zemente ist in den Tabellen A1 und A2 (Anhang A) angegeben. Die sechs unterschiedlichen Zementchargen weisen eine hohe Gleichmäßigkeit auf. Die Tabellen enthalten den Minimal-, den Maximal- sowie den Mittelwert der Chargen. Die physikalischen Eigenschaften der 3 Zemente enthält Tabelle A3. Die Korngrößenverteilungen aller Chargen sind getrennt für die Zemente den Bildern B1 bis B3 (Anhang B) zu entnehmen. Die Chargen des CEM I sowie des CEM III/A sind jeweils sehr gleichmäßig, beim CEM II/B-S liegen geringfügig höhere Streuungen vor. Die hohe Gleichmäßigkeit der 6 Zementchargen ist auch bei Betrachtung des Wasseranspruchs nach Puntke zu beobachten (s. Bild B7).

### **3.1.3 Flugasche**

Die Flugasche für die Projektphasen 2 und 4 weist eine mittlere Feinheit auf. Sie wurde ausgewählt, da solche Flugaschen in der Praxis weit verbreitet sind und eine durchschnittliche Reaktivität aufweisen. Die chemischen Zusammensetzungen der 6 Chargen dieser Flugasche sind in Tabelle A4 enthalten. Die physikalischen Eigenschaften enthält Tabelle A5. Die Korngrößenverteilungen der Chargen sind in Bild B4 dargestellt. Auch hier liegt eine hohe Gleichmäßigkeit vor. Beim Wasseranspruch nach Puntke traten bei den in Phase 2 verwendeten Flugaschechargen höhere Streuungen als bei den Zementchargen auf. Die Flugasche hat im Vergleich zu den Zementen und dem Hüttensandmehl die geringste Feinheit und weist daher auch den kleinsten Wasseranspruch auf. Die Ergebnisse sind Bild B7 zu entnehmen.

### **3.1.4 Hüttensandmehl**

Bei der Auswahl des Hüttensandmehls wurde neben der Feinheit auch die chemisch-mineralogische Zusammensetzung untersucht. Im Rahmen der Projektphase 2 wird ein Hüttensandmehl der Mahlfineheitsstufe 4000 cm<sup>2</sup>/g (Blaine) eingesetzt. Dieses entspricht hinsichtlich der Reaktivität dem in Deutschland vermehrt anfallenden Hüttensandmehl. Es erfüllt die Anforderungen der DIN EN 15167-1 /DIN06/. In Tabelle A6 sind die chemischen Zusammensetzungen enthalten. Tabelle A7 enthält die physikalischen Eigenschaften sowie die Glasgehalte der Hüttensandmehlchargen. Die Glasgehalte wurden lichtmikroskopisch nach DIN-Fachbericht CEN/TR 196-4: 2007-11 /DIN07c/ bestimmt. Bei der Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke traten bei den 6 Chargen wie bei der Flugasche höhere Streuungen als bei den Zementchargen auf (Bild B7).

Die Korngrößenverteilungen der ersten Chargen der Ausgangsstoffe für Projektphase 2 sind Bild B6 zu entnehmen.

### 3.1.5 Gesteinskörnung

Als Gesteinskörnung für die Mörteluntersuchungen wurde ein CEN-Normsand verwendet. Als Gesteinskörnung für die Betonuntersuchungen wurden ein quarzitischer Rheinkies und -sand gemäß DIN EN 12620:2008-07 /DIN08c/ und DIN 1045-2 /DIN08b/ verwendet. Die Kornzusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches für die Betonuntersuchungen entspricht dem Sieblinienbereich A/B 32 gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 /DIN05b, DIN08b/.

## 3.2 Mörtelprüfungen

### 3.2.1 Frischmörteleigenschaften

Die Frischmörteleigenschaften Ausbreitmaß, Rohdichte und Luftgehalt sind für alle Chargen in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Frischmörteleigenschaften der einzelnen Chargen sind den Tabellen A8 bis A13 zu entnehmen. Die Ausbreitmaße (ABM) aller Mischungen liegen zwischen 201 mm und 242 mm. Es ist keine Korrelation zwischen Ausbreitmaß und Mischungszusammensetzung zu erkennen. Die Luftgehalte variieren zwischen 1,4 und 2,5 Vol.-%. Die Rohdichten liegen zwischen 2,23 g/cm<sup>3</sup> und 2,31 g/m<sup>3</sup>.

Tabelle 3: Streubreiten der Frischmörteleigenschaften

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	k/h <sub>ges</sub>	f/(z + h)
-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-
1	2	3	4	5	6
M X.1.0	209 - 221	1,6 - 2,4	2,29 - 2,30	100/0	0
M X.1.1	204 - 227	1,7 - 2,5	2,24 - 2,27		0,33
M X.1.2	212 - 225	1,8 - 2,5	2,27 - 2,29	65/35	0
M X.1.3	220 - 242	1,6 - 2,2	2,24 - 2,27		0,33
M X.1.4	206 - 224	1,4 - 2,3	2,26 - 2,30	50/50	0
M X.1.5	221 - 229	1,7 - 2,2	2,23 - 2,29		0,33
M X.1.6	215 - 226	1,8 - 2,3	2,27 - 2,30	35/65	0
M X.1.7	225 - 230	1,4 - 2,2	2,24 - 2,27		0,33
M X.2.0	206 - 228	2,0 - 2,2	2,25 - 2,30	70/30	0
M X.2.1	214 - 230	1,5 - 2,2	2,24 - 2,27		0,33
M X.2.2	205 - 222	1,7 - 2,2	2,26 - 2,29	54/46	0
M X.2.3	215 - 235	1,8 - 2,3	2,24 - 2,27		0,33
M X.2.4	206 - 225	1,6 - 2,4	2,26 - 2,31	38/62	0
M X.2.5	213 - 233	1,5 - 2,3	2,24 - 2,28		0,33
M X.3.0	201 - 224	2,1 - 2,4	2,26 - 2,28	50/50	0
M X.3.1	210 - 227	1,8 - 2,3	2,23 - 2,25		0,33

### 3.2.2 Wasseranspruch nach Punkte

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurde hier nicht der Wasseranspruch der Mörtel, sondern der Bindemittelgemische bestimmt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um deutlichere Unterschiede zwischen den einzelnen Bindemitteln zu erhalten. Bild 1 enthält die Wasseransprüche der verschiedenen Mischungen mit dem CEM I. Die Ergebnisse für die anderen Zemente sind den Bildern B8 und B9 zu entnehmen. Erwartungsgemäß weisen die flugaschehaltigen Mischungen geringere Werte auf. Die Streuungen sind insgesamt gering.

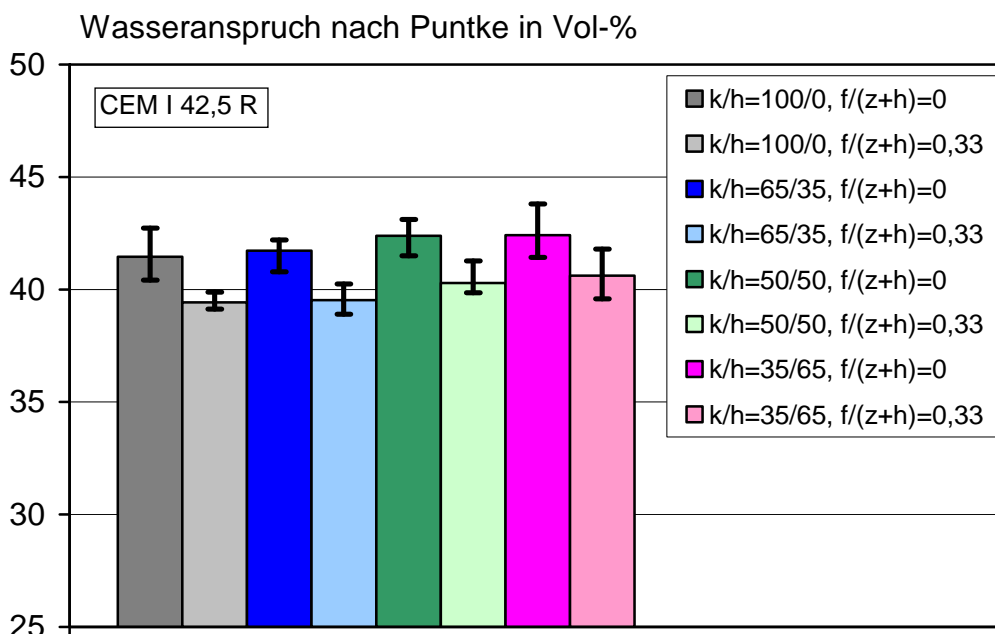
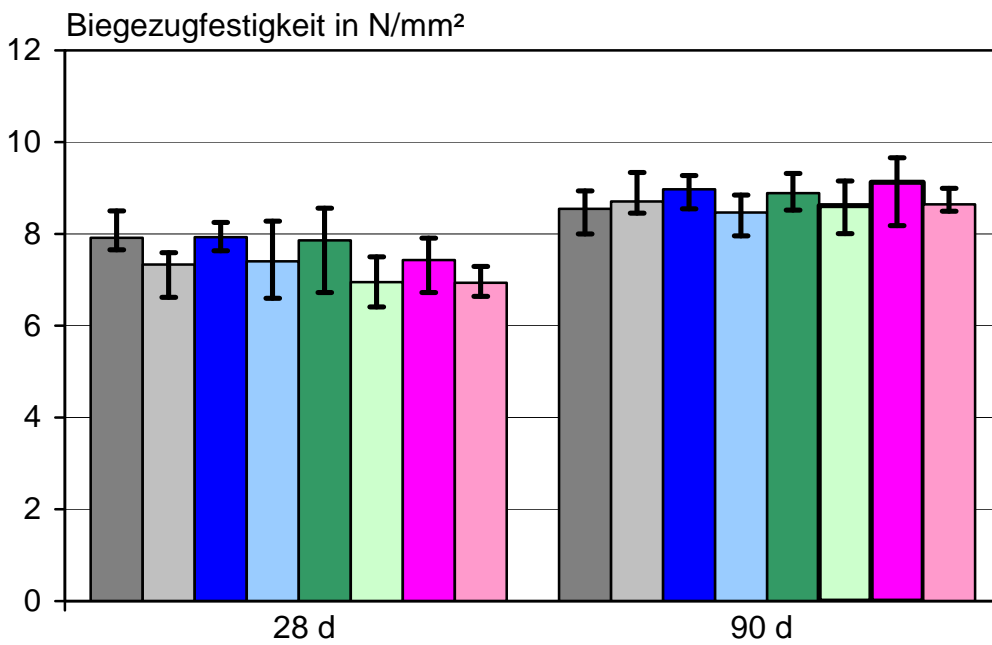
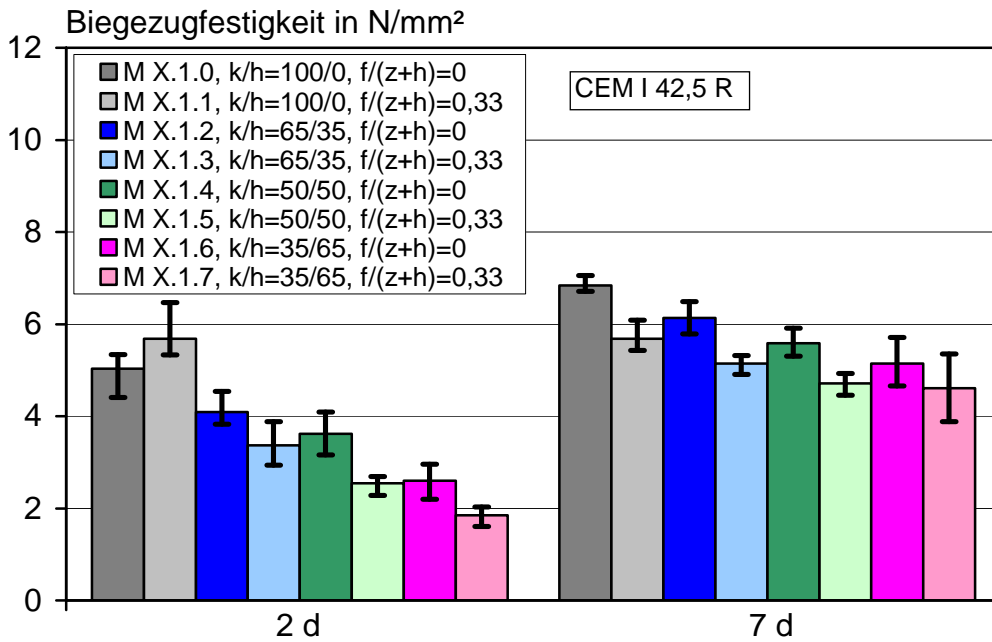


Bild 1: Wasseranspruch (inkl. Streubreiten) der Mischungen mit CEM I

### 3.2.3 Biegezug- und Druckfestigkeit

Die Streubreiten der Biegezugfestigkeiten der verschiedenen Chargen für die Mischungen mit dem CEM I sind für die verschiedenen Zeitpunkte in Bild 2 dargestellt. Die Ergebnisse für die Mischungen mit dem CEM II und dem CEM III sind den Bildern B10 und B11 zu entnehmen. Die Biegezugfestigkeiten nach 2, 7, 28 und 90 Tagen sind ebenfalls tabellarisch in den Tabellen A14 bis A17 enthalten. Mit zwei Ausnahmen bei 2 und 90 Tagen weisen bei allen Zementen die jeweiligen Mischungen ohne Flugasche zu jedem Zeitpunkt höhere Biegezugfestigkeiten gegenüber den entsprechenden flugaschehaltigen Mischungen auf. Dies war zu erwarten, da alle Mischungen mit demselben w/b-Wert hergestellt worden sind, d. h. die Flugasche wurde voll angerechnet, sie leistet jedoch nicht denselben Beitrag zur Festigkeit wie der Zement.



**Bild 2:** Biegezugfestigkeiten (inkl. Streubreiten aller Chargen) der Mörtel mit dem CEM I zu den untersuchten Prüfterminen



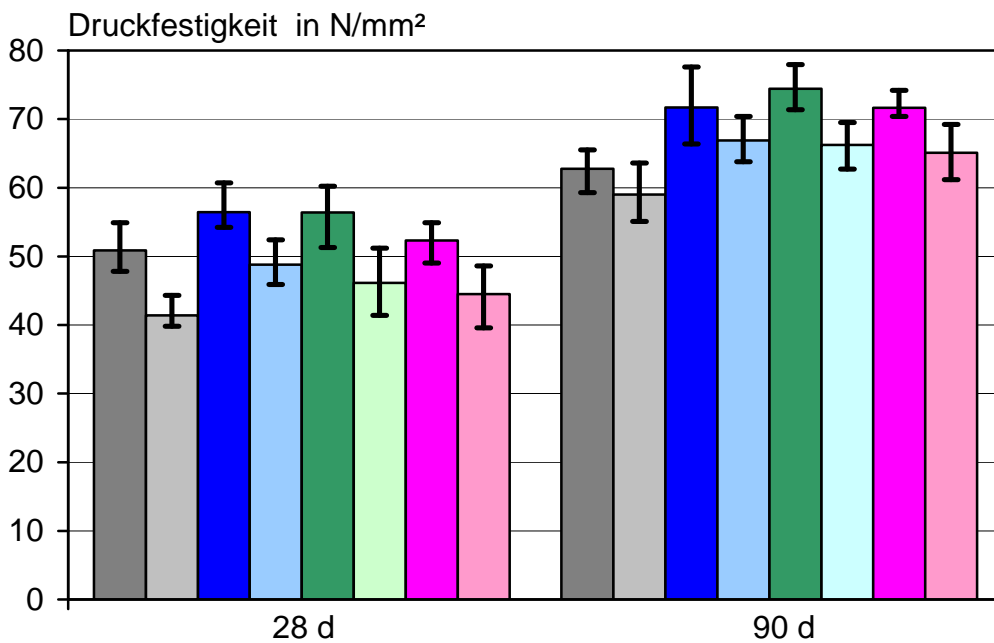
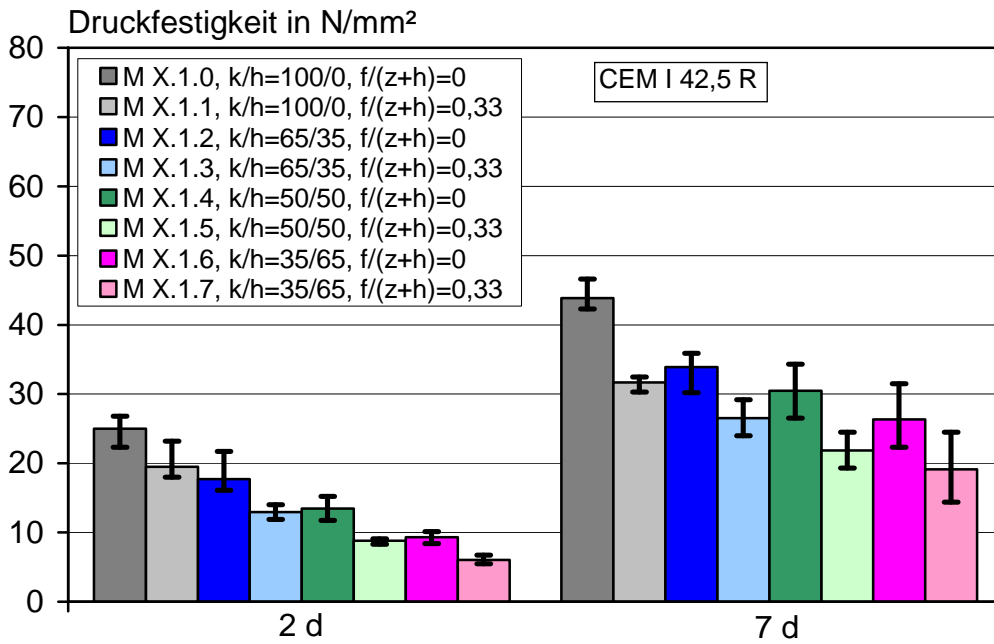
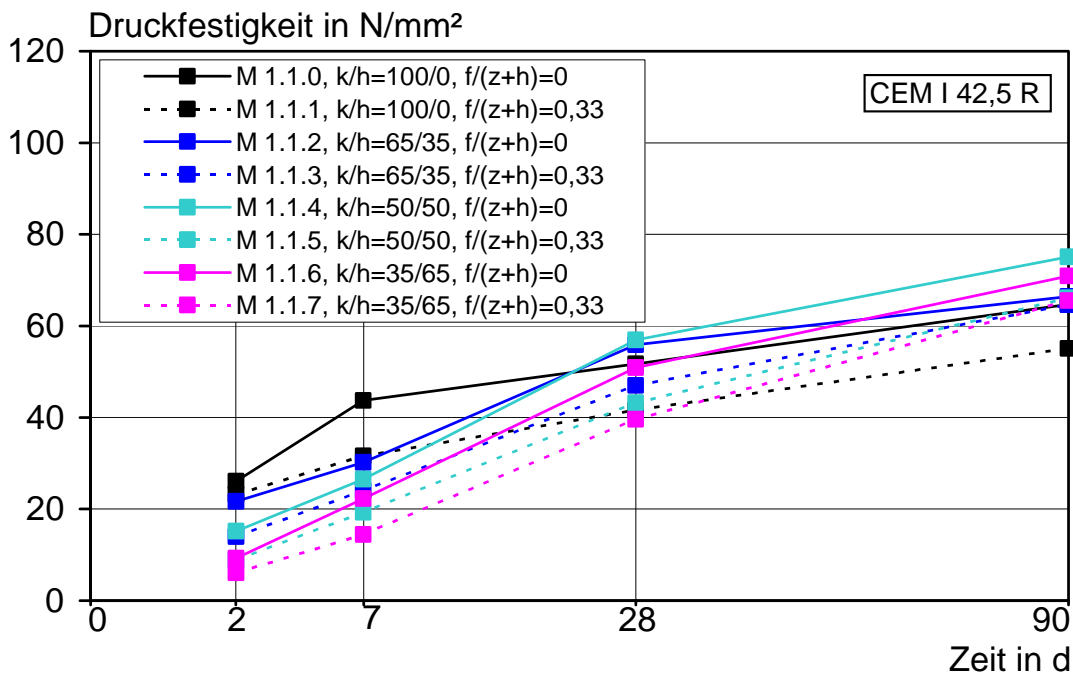


Bild 3: Mörteldruckfestigkeiten (inkl. Streubreiten aller Chargen) der Mischungen mit dem CEM I zu den untersuchten Prüfterminen

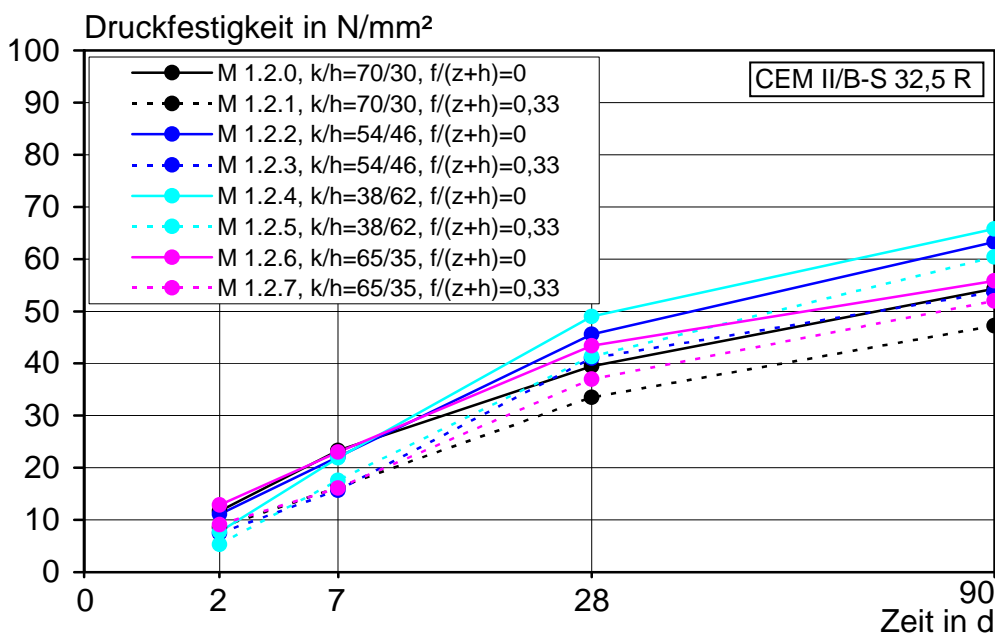
In Bild 3 sind die Streubreiten der Druckfestigkeiten der verschiedenen Mischungen mit dem CEM I dargestellt. Die Druckfestigkeiten der Mischungen mit dem CEM II sind in Bild B12 enthalten, die der Mischungen mit dem CEM III in Bild 7 (s. u.). Die Ergebnisse finden sich ebenfalls in den Tabellen A18 bis A21 wieder. Bild 3 zeigt, dass die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen bei unterschiedlichen Zugabemengen an Hüttensandmehl höher sind als die der Referenzmischung mit dem CEM I. Wie bei der Biegezugfestigkeit weisen auch hier die flugaschehaltigen Mischungen eine geringere Festigkeit auf als die Referenz, weil die Flugasche voll angerechnet wurde. Im Falle des CEM II/B-S 32,5 R (Bild B12) wird dagegen trotz voller Anrechnung der Flugasche nach 28 Tagen die Festigkeit der Referenz (M X.2.0) bei Kombination von Hüttensand und Flugasche erreicht (M X.2.3 und M X.2.5). Diese Bindemittelkombination scheint demnach sehr günstig zu sein.

Zur Verdeutlichung der Festigkeitsentwicklung sind in Bild 4 die Druckfestigkeiten mit dem CEM I der 1. Charge über die Zeit dargestellt. Nach 2 und 7 Tagen weisen die Referenzmischungen noch die höchsten Druckfestigkeiten auf. Nach 28 Tagen liegen sie jedoch unter denen der hüttensandhaltigen Mischungen. Bei Zugabe von Flugasche sind grundsätzlich bei allen Mischungen die Druckfestigkeiten wie erwartet geringer als die der jeweiligen Mischungen ohne Flugasche.



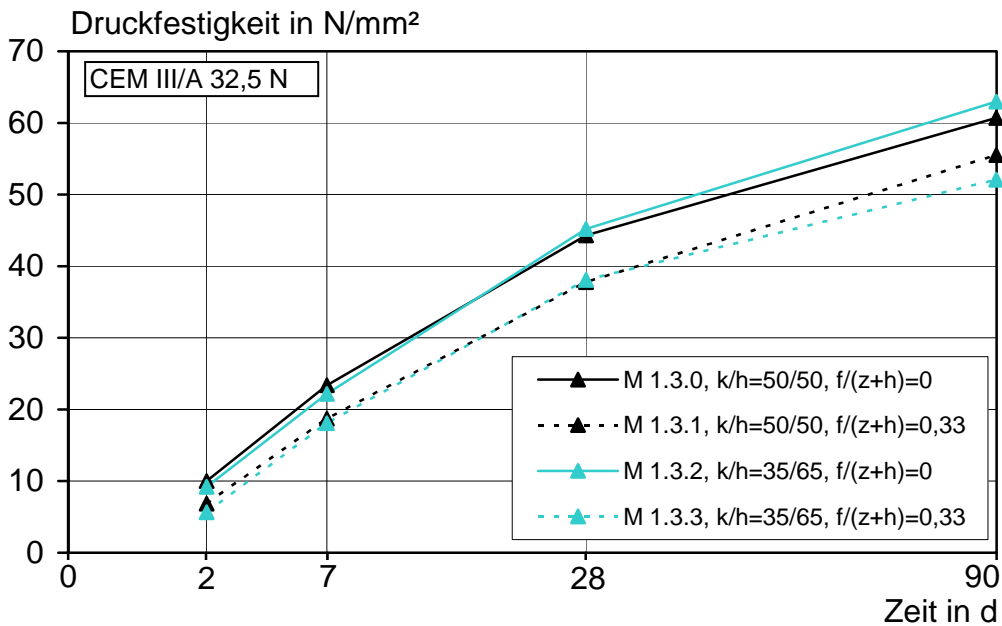
**Bild 4:** Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit CEM I der ersten Charge

Bei Verwendung des Portlandhüttenzements liegen die Festigkeiten der Mischungen mit gleichem  $w/z$ -Wert nach 2 und 7 Tagen im gleichen Bereich (s. Bild 5). Die Ergebnisse der Mischungen 1.2.6 und 1.2.7, die einen tatsächlichen Anteil von  $k/h_{\text{ges}} = 65/35$  enthalten, sind ebenfalls im Diagramm enthalten. Die Mischungen mit dem höchsten Hüttsandmehlanteil weisen nach 28 Tagen sowohl mit Flugasche als auch ohne die höchsten Festigkeiten auf.



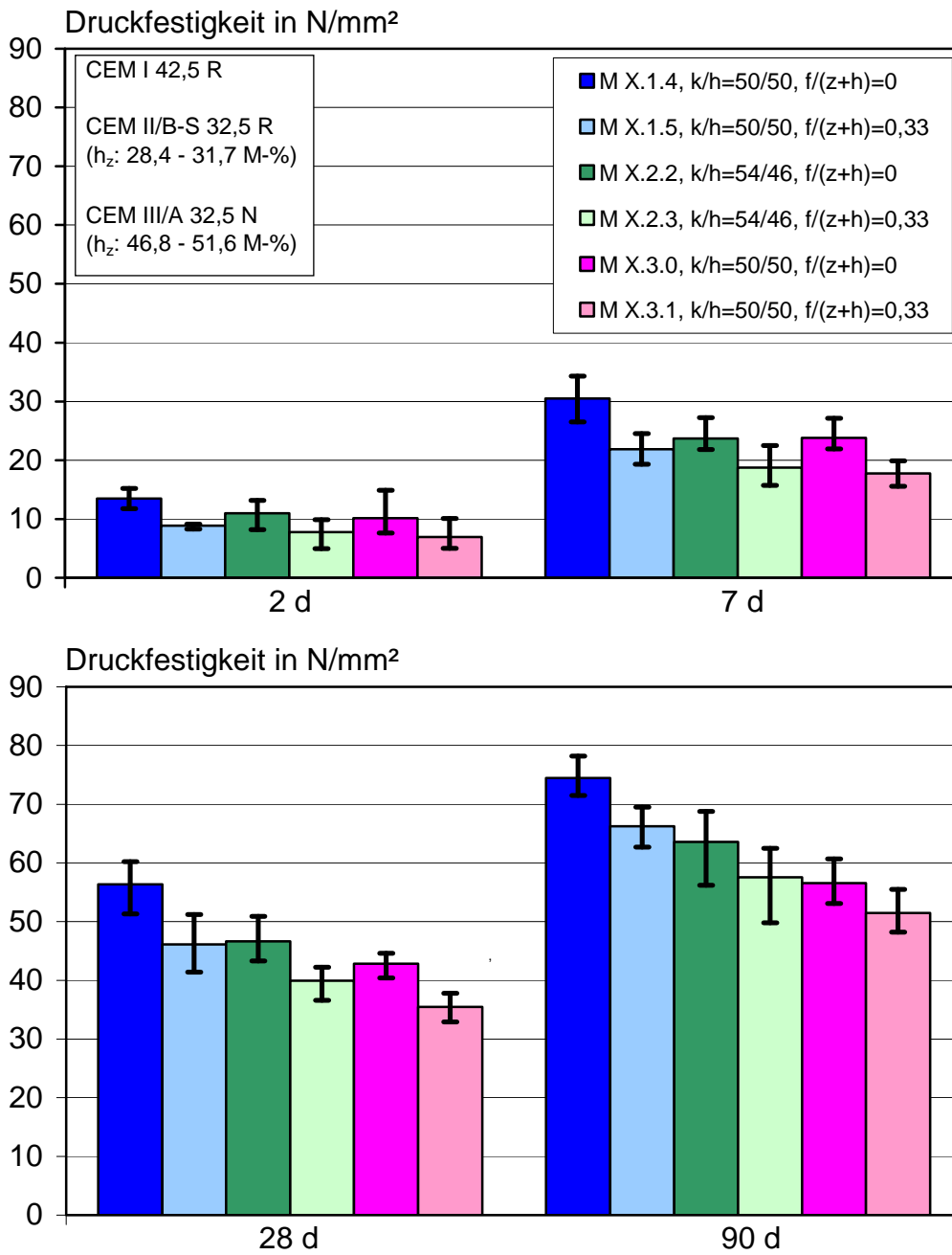
**Bild 5:** Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit dem CEM II der ersten Charge

In Bild 6 sind die Festigkeitsentwicklungen der Mischungen mit dem CEM III der ersten Charge dargestellt. Die Referenzmischung mit dem höheren Hüttsandmehlgehalt weist nach 28 Tagen eine geringfügig höhere Festigkeit auf. Die Festigkeit der entsprechenden flugaschehaltigen Mischung liegt geringfügig unter der der anderen Mischung.



**Bild 6:** Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit dem CEM III der ersten Charge

In Bild 7 sind die Druckfestigkeiten der hüttensandhaltigen Mischungen mit  $k/h_{\text{ges}} \approx 50/50$  gegenübergestellt. Allerdings wird die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dadurch beeinträchtigt, dass die Portlandzementmischungen mit einem Zement der Festigkeitsklasse 42,5 R hergestellt worden sind, während der Portlandhüttenzement und der Hochofenzement die Festigkeitsklasse 32,5 R bzw. N aufweisen. So weisen natürlich die Mischungen mit dem CEM I die höchsten Festigkeiten auf. Beim Vergleich des CEM II mit dem CEM III sind die Festigkeiten des CEM II mit dem geringfügig niedrigeren Hüttensandmehlgehalt ca. 5 N/mm<sup>2</sup> höher. Die Frühfestigkeiten nach 2 und 7 Tagen sind in etwa gleich, nach 90 Tagen weist die Mischung mit CEM II ebenfalls höhere Festigkeiten auf.

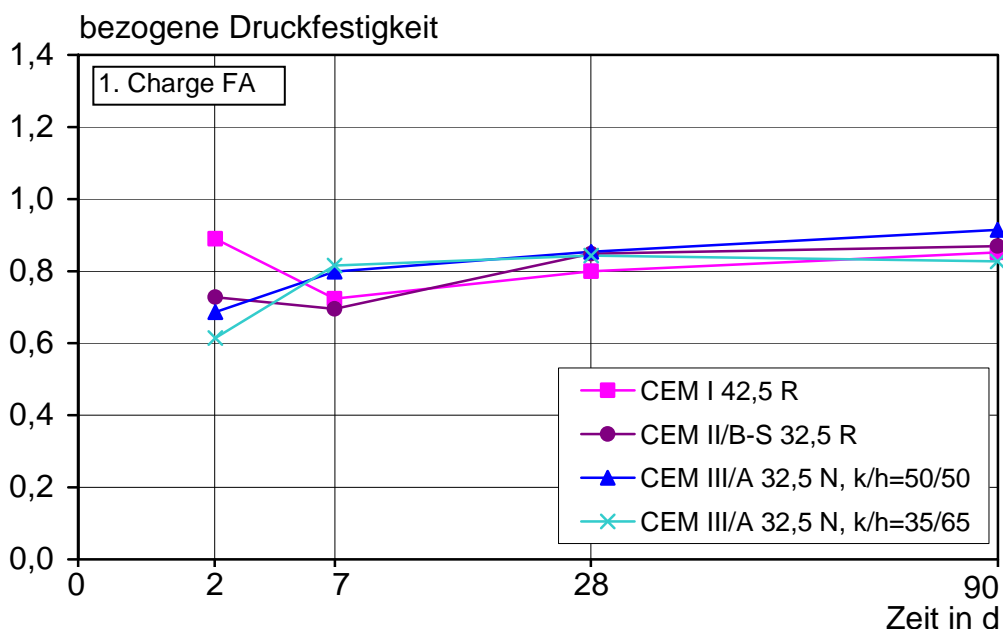


**Bild 7:** Vergleich der Druckfestigkeiten (inkl. Streubreiten) der hütten-sandhaltigen Mischungen mit  $k/h_{ges} \approx 50/50$  zu den untersuchten Prüfterminen

### 3.2.4 Aktivitätsindex und bezogene Druckfestigkeit

#### 3.2.4.1 Flugasche

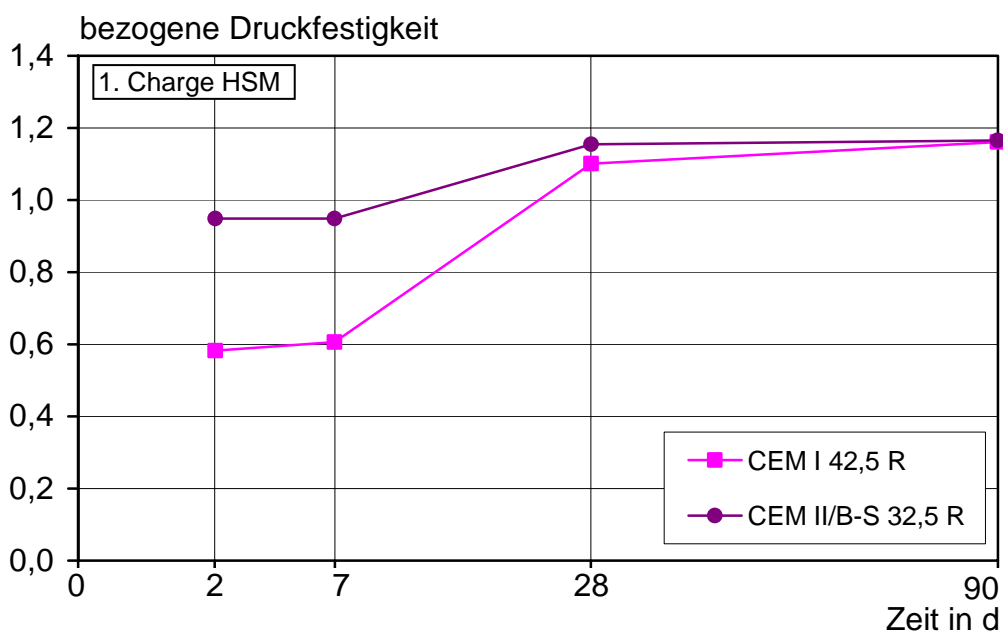
In Bild 8 sind die zeitlichen Entwicklungen der Aktivitätsindizes (CEM I) bzw. der bezogenen Druckfestigkeiten (CEM II und CEM III) für die Flugasche dargestellt. Die Flugasche weist in Kombination mit dem CEM I einen sehr hohen AI nach 2 Tagen auf, ansonsten ist die Entwicklung bei allen Zementen leicht ansteigend. Im Anhang sind die Aktivitätsindizes und die bezogenen Druckfestigkeiten in Kombination mit CEM II/B-S und CEM III für die verschiedenen Prüfzeitpunkte tabellarisch (A22 bis A24) für die verschiedenen Flugaschechargen dargestellt. Außer Charge 4 erreichen alle Chargen den nach /DIN08a/ geforderten Aktivitätsindex von 75 % nach 28 Tagen. Allerdings liegt bei Charge 4 nur eine geringfügige Unterschreitung des AI vor. Nach 90 Tagen weisen alle Chargen einen Aktivitätsindex von mindestens 85 % auf. Wird hüttensandhaltiger Zement anstelle von CEM I verwendet, so wirkt sich das bei den Frühfestigkeiten (2 d) negativ auf die bezogene Druckfestigkeit aus. Bei den späteren Zeitpunkten wird jedoch eine vergleichbare, z. T. sogar leicht höhere Reaktivität festgestellt.



**Bild 8:** Aktivitätsindex (CEM I 42,5 R) bzw. bezogene Druckfestigkeiten (CEM II/B-S, CEM III/A) für die Flugasche

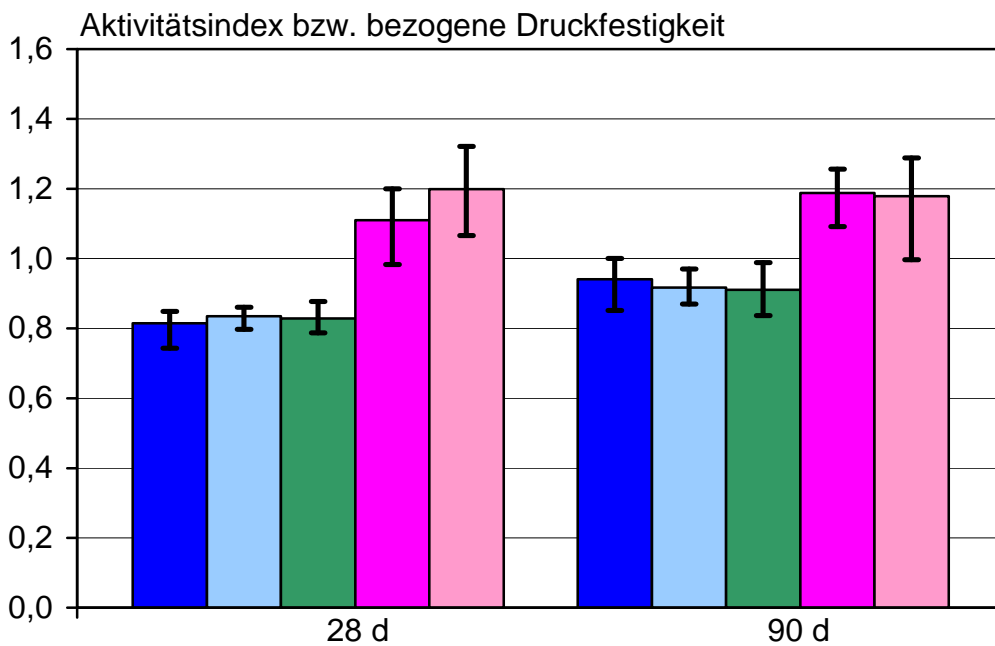
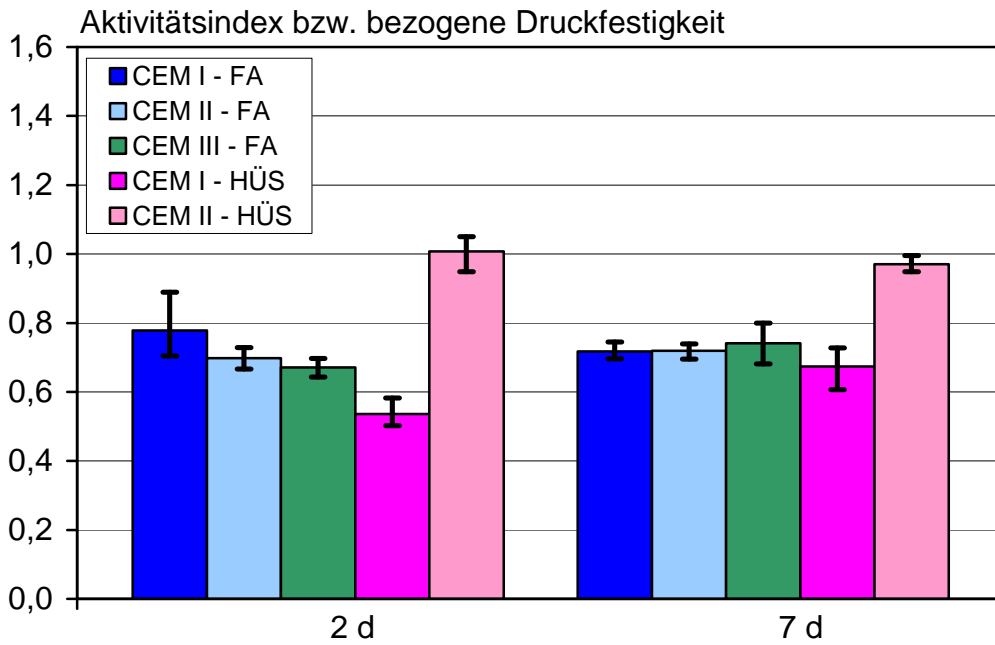
### 3.2.4.2 Hüttensandmehl

Zur Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklung enthält Bild 9 die Ergebnisse für das Hüttensandmehl der ersten Charge. Das Hüttensandmehl weist in Kombination mit dem CEM II in jungem Alter deutlich höhere bezogene Druckfestigkeiten auf, nach 28 und 90 Tagen gleichen sie sich jedoch dem Aktivitätsindex an. Die nach /DIN06/ erforderlichen AI von 45 % nach 7 Tagen bzw. 70 % nach 28 Tagen werden eingehalten. Die Einzelwerte der AI und der bezogenen Druckfestigkeit von Hüttensandmehl sind den Tabellen A25 und A26 zu entnehmen.



**Bild 9:** Aktivitätsindex (CEM I 42,5 R) bzw. bezogene Druckfestigkeiten (CEM II/B-S) für das Hüttensandmehl

In Bild 10 sind die Streuungen der AI bzw. der bezogenen Druckfestigkeiten der 6 verschiedenen Chargen für alle Zeitpunkte dargestellt. Bei den bezogenen Druckfestigkeiten der Hüttensandmehle treten vor allem in höherem Alter größere Streuungen als bei der Flugasche auf.

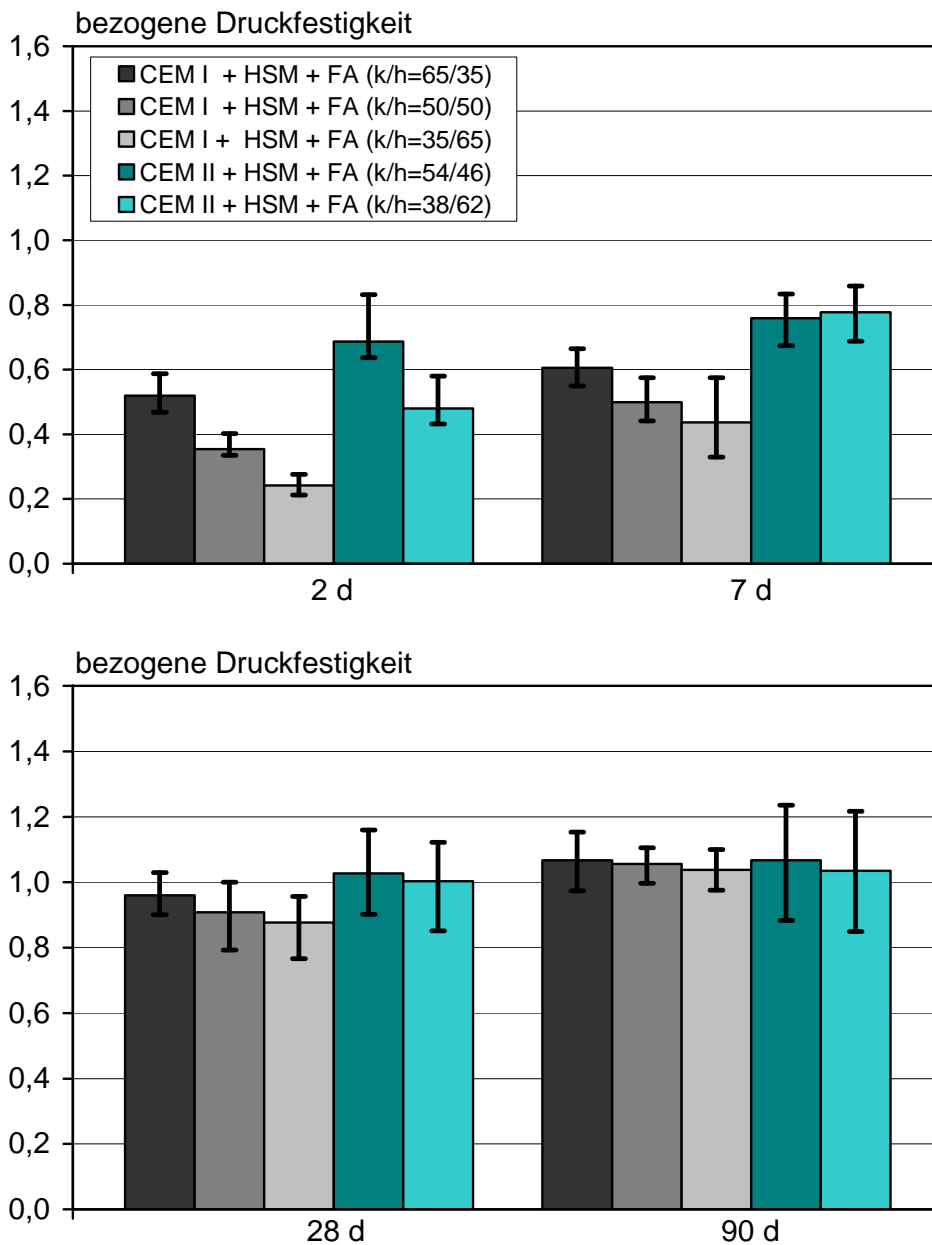


**Bild 10:** AI bzw. bezogene Druckfestigkeiten (inkl. Streubreiten der verschiedenen Chargen) zu den untersuchten Prüfterminen



### 3.2.4.3 Bindemittelkombination Hüttensandmehl und Flugasche

In Bild 11 sind sowohl für den CEM I als auch für den CEM II die Streuungen der bezogenen Druckfestigkeiten der hüttensandhaltigen Mischungen, die zusätzlich Flugasche enthalten, dargestellt.

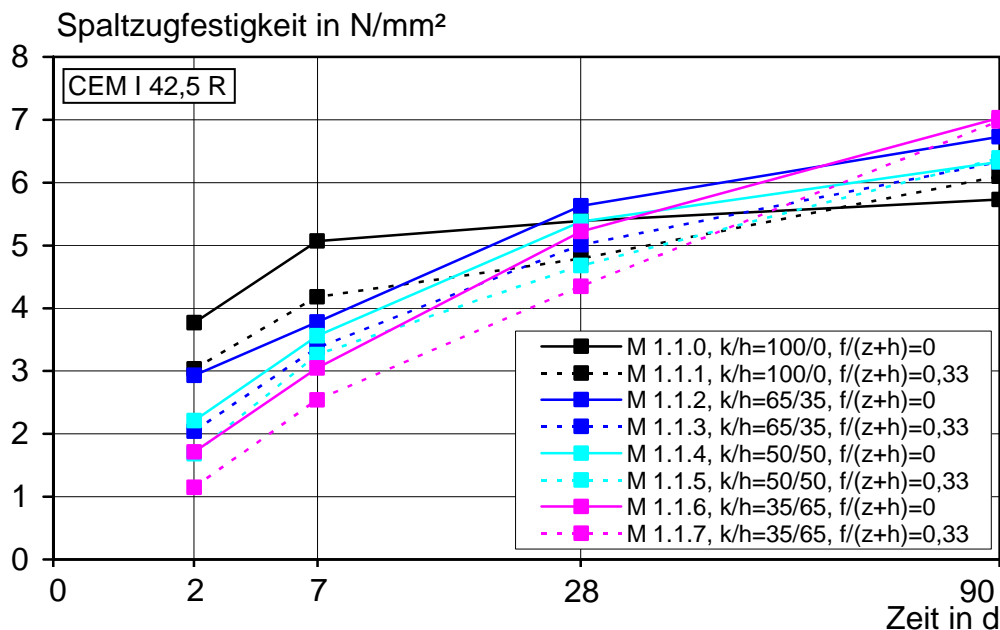


**Bild 11:** Bezogene Druckfestigkeiten (inkl. Streubreiten der verschiedenen Chargen) der hüttensand- und flugaschehaltigen Mischungen zu den untersuchten Prüfterminen

Bei Verwendung des CEM I ist deutlich die altersabhängige Reaktivität der Zusatzstoffe zu erkennen. Nach 2 und 7 Tagen weisen die Mischungen mit dem höchsten Hüttesandmehlgehalt die geringste bezogene Druckfestigkeit auf. Nach 90 Tagen sind die Festigkeiten etwa gleich. Bei Verwendung des CEM II weist die Mischung mit dem höheren Hüttesandmehlgehalt nach 2 Tagen ebenfalls die geringere bezogene Druckfestigkeit auf. Ab einem Alter von 7 Tagen ist jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Mischungen mehr vorhanden. Vergleicht man die Zemente, so ist bis zum Alter von 28 Tagen der Portlandhüttenzement für die Kombination mit Hüttesandmehl und Flugasche wesentlich günstiger. Nach 28 Tagen wird eine bezogene Druckfestigkeit von 1 erreicht. Nach 90 Tagen entsprechen die bezogenen Druckfestigkeiten der CEM I-haltigen Mischungen denen der Mischungen mit CEM II.

### **3.2.5 Spaltzugfestigkeit**

Die Spaltzugfestigkeiten sind nur für die Mischungen der ersten Charge ermittelt worden. Die einzelnen Ergebnisse sind Tabelle A27 zu entnehmen. Entsprechend der Druckfestigkeit sind auch bei der Spaltzugfestigkeit die Anfangsfestigkeiten der Referenzmischung höher, nach 28 Tagen weisen die hüttesandhaltigen Mischungen zum Teil bereits höhere Spaltzugfestigkeiten auf (Bild 12). Die Mischung mit dem höchsten Anteil an Hüttesandmehl weist sowohl mit als auch ohne Flugasche nach 90 Tagen die größten Festigkeiten auf. Das gilt auch für die Mischungen mit dem CEM II (Bild B13). Die Festigkeiten der Mischungen M 1.2.6 und M 1.3.2 (Bild B14) erfahren zwischen 28 und 90 Tagen kaum noch eine Steigerung.



**Bild 12:** Entwicklung der Spaltzugfestigkeiten der Mischungen mit CEM I

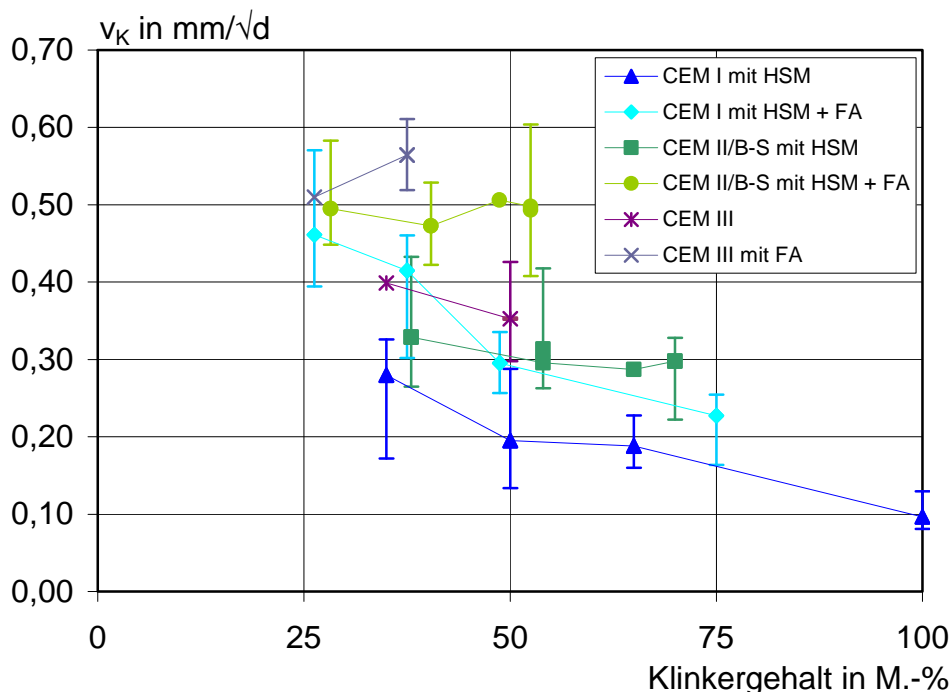
### 3.2.6 Karbonatisierung

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten wurden bis zum Alter von 365 Tagen bestimmt. Sie ergeben sich aus den Mittelwerten der einzelnen Chargen. Bei einigen Mischungen wurden die 180-d-Werte nicht gemessen, weshalb in einigen Bildern Ergebnisse nach 309 Tagen aufgeführt sind. Die Karbonatisierungstiefen der verschiedenen Mischungen sind den Bildern B15 bis B34 zu entnehmen. Es traten z. T. erhebliche Streuungen der 6 Ausgangsstoffchargen auf. Bei den flugaschehaltigen Mischungen sind sie i. d. R. höher. In Tabelle 4 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der einzelnen Mischungen nach 365 Tagen dargestellt. Erwartungsgemäß karbonatisieren die zusatzstoffhaltigen Mischungen schneller als die Referenzmischungen. Mit steigendem Hüttensandmehlanteil nimmt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit zu. Durch Zugabe von Flugasche verstärkt sich dieser Effekt zusätzlich. Die CEM II- und die CEM III-Mischungen weisen generell gegenüber den Portlandzementmischungen bei ähnlichen Hüttensandmehlgehalten höhere Karbonatisierungen auf.

**Tabelle 4:** mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtelmischungen nach 365 Tagen

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

In Bild 13 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Klinkergehalt dargestellt. Auch hier nehmen die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten mit zunehmendem Klinkergehalt ab. Die Streuungen der verschiedenen Chargen sind durch den Fehlerbalken kenntlich gemacht. Die Zusatzmischungen M 1.2.6, M 1.2.7, M 1.3.2 und M 1.3.3 sind ebenfalls in dem Diagramm enthalten. Da es sich bei den dargestellten Ergebnissen nur um Einzelwerte handelt, ist eine Aussage zum Verlauf der Mischung mit CEM III und FA nur eingeschränkt möglich.



**Bild 13:** Karbonatisierungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Klinkergehalt

### 3.3 Granulometrische Untersuchungen

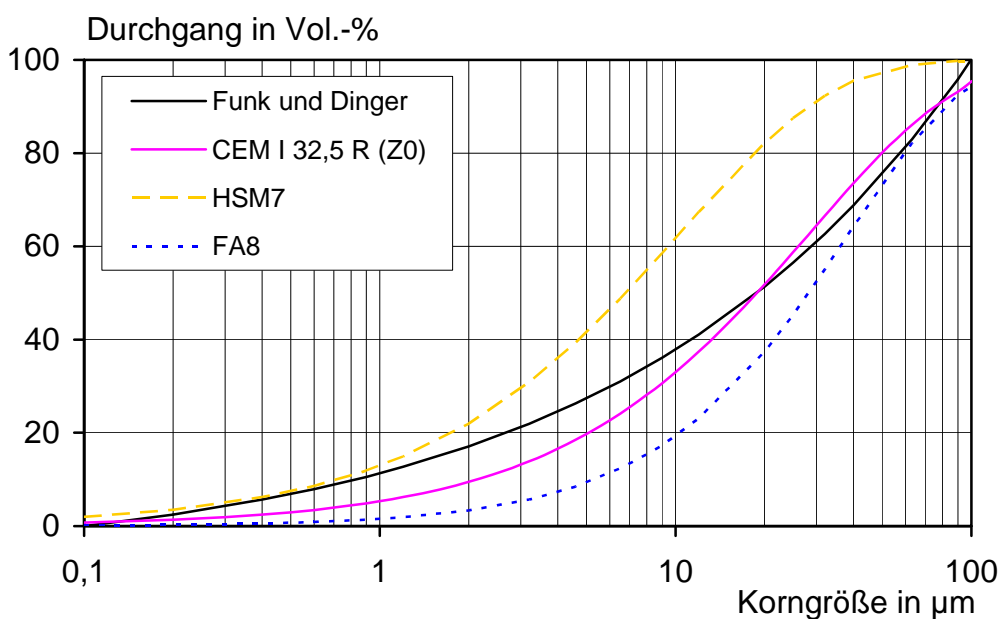
#### 3.3.1 Allgemeines

Vor Auswahl der Ausgangsstoffe für die Untersuchungen der Projektphase 2 wurden diverse Ausgangsstoffe charakterisiert, um die endgültige Auswahl für Projektphase 2 zu treffen. Bei der Bestimmung der Sieblinien verschiedener Zemente, Flugaschen und Hüttsandmehle stellte sich heraus, dass diese alle sehr nahe beieinander liegen (s. Bilder B35 bis B37). So befanden sich die Sieblinien der Hüttsandmehle (s. Bild B37, HSM 2 entspricht dem HSM aus Projektphase 2) etwa in demselben Bereich wie die Sieblinien der Zemente (s. Bild B35). Die beiden Sieblinien der Flugasche „mittlerer“ Feinheit (FA2, entspricht der FA aus Projektphase 2) sowie der Flugasche „geringer“ Feinheit (FA1) lagen ebenfalls übereinander (s. Bild B36). Um bei der granulometrischen Optimierung ein besseres Ergebnis zu erzielen, wurden in Projektphase 3 gezielt weitere Zemente, Flugaschen und Hüttsandmehle mit sehr geringer sowie sehr hoher Feinheit eingesetzt (s. Bilder B38 bis B40).

### 3.3.2 Vorversuche

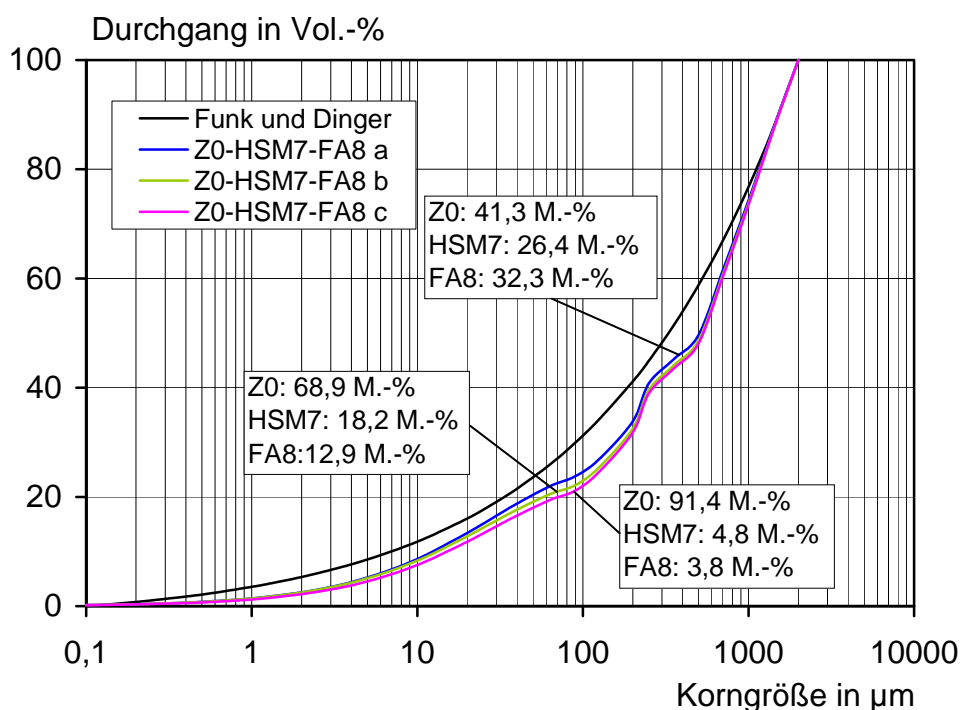
Die Untersuchungen erfolgten zunächst an CEN-Normmörteln. Die Mörtel wurden unter Verwendung von Zement, Flugasche und Hüttensand so zusammengesetzt, dass die Sieblinien im Feinbereich der Idealsieblinie von Funk und Dinger entsprechen /FUN94/. Aus baupraktischer Sicht sollte dabei ein Klinkergehalt von 35 M.-% nicht unterschritten werden. Der Wassergehalt der Mischungen wurde abweichend zu den Mischungen aus Projektphase 2 so gewählt, dass die Mörtel die gleiche Konsistenz aufwiesen. Zielkonsistenz war ein Ausbreitmaß mit dem Hägermanntrichter von 200 mm. Dadurch wurden die granulometrischen Effekte, die bei der Annäherung der Sieblinie an eine „dichteste Packung“ entstehen, besonders deutlich.

Bei den Ausgangsstoffen, die zu Beginn in Projektphase 1 charakterisiert wurden, ergaben sich Sieblinien, die relativ nahe beieinander liegen (s. Bilder B6 und B41). Bei Verwendung eines fein aufgemahlene Hüttensandmehls (HSM7), einer Flugasche sehr geringer Feinheit (FA8) sowie eines Zementes mittlerer Feinheit (Z0) zeigte sich eine deutlich bessere Verteilung der Sieblinien (s. Bild 14). Zum Erreichen einer dichtesten Packung sind aufeinander abgestimmte Kornfraktionen bzw. Korngrößenverteilungen notwendig, damit alle Zwischelräume mit Körnern gefüllt werden.



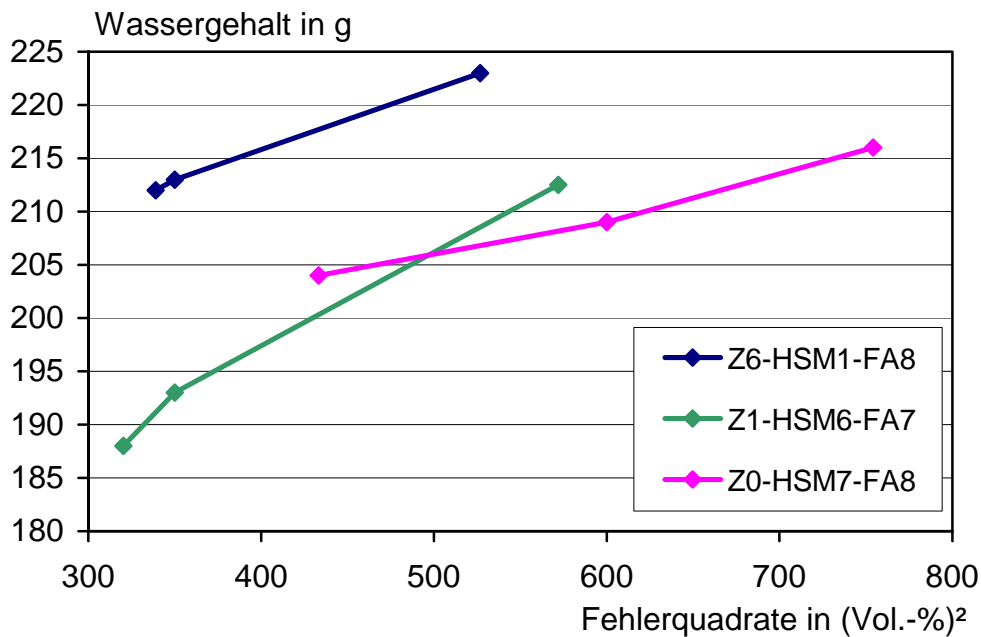
**Bild 14:** Sieblinien des Zementes (Z0), der Flugasche (FA8) sowie des Hüttensandmehls (HSM7)

Allerdings waren bei der granulometrischen Optimierung mit dem CEN-Normsand im Feinbereich und insbesondere im Bereich  $< 1000 \mu\text{m}$  Abweichungen von der Sieblinie nach Funk und Dingler (s. Bild 15) vorhanden. Dieses Phänomen trat auch bei anderen Mischungen auf (s. Bilder B42 bis B46). Die Buchstaben a, b, c hinter der Bezeichnung stehen für eine möglichst optimale, eine mittlere und eine schlechte Annäherung an die Sollsieblinie. Die Zement- und Zusatzstoffgehalte wurden konstant bei 25 M.-% der gesamten Mischungszusammensetzung gehalten, die jeweiligen Anteile wurden jedoch variiert.



**Bild 15:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit dem CEN-Normsand (Z0-HSM7-FA8)

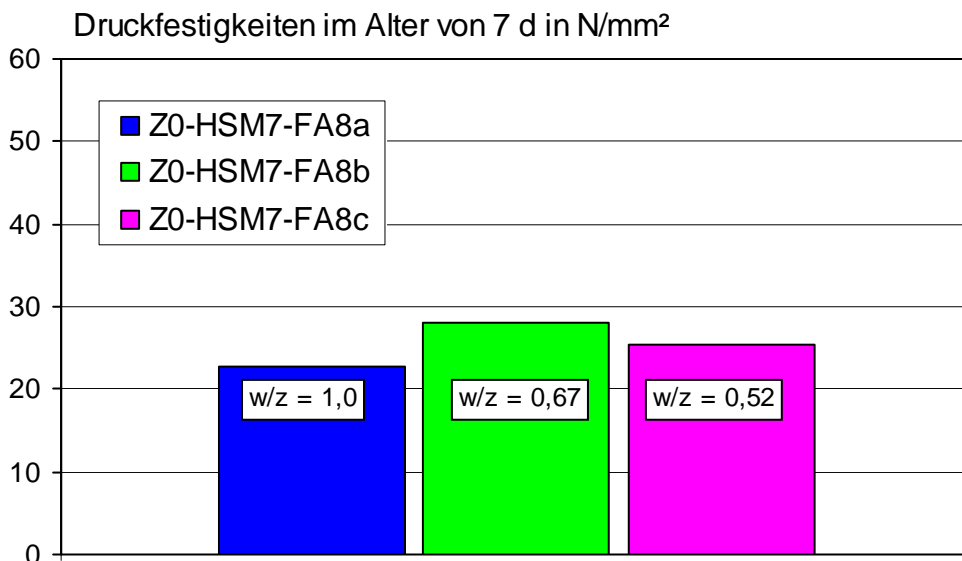
Bei den Mischungen, bei denen die granulometrisch optimierten Sieblinien die geringsten Fehlerquadrate aufwiesen, ergab sich ein geringerer Wasseranspruch für die Einstellung des Ausbreitmaßes auf 200 mm (s. Bild 16) als bei den Sieblinien mit den höheren Fehlerquadraten. Die Methode der kleinsten Quadrate ist ein mathematisches Standardverfahren, bei dem die Kurvenparameter (d. h. die Anteile der verschiedenen Korngrößen) der Ist-Sieblinie so bestimmt werden, dass die Summe der quadratischen Abweichungen der Ist-Sieblinie von der Soll-Sieblinie minimiert wird. Das heißt, je geringer die Differenz zwischen den Siebdurchgängen der einzelnen Korngrößendurchmesser ist, desto besser liegt eine Sieblinie an der Idealsieblinie. Die Einheit der Fehlerquadrate ist  $(\text{Vol.-%})^2$ .



**Bild 16:** Wassergehalte verschiedener Mischungen in Abhängigkeit der Fehlerquadrate, die die Annäherung an die Sollsieblinie von Funk und Dinger charakterisieren

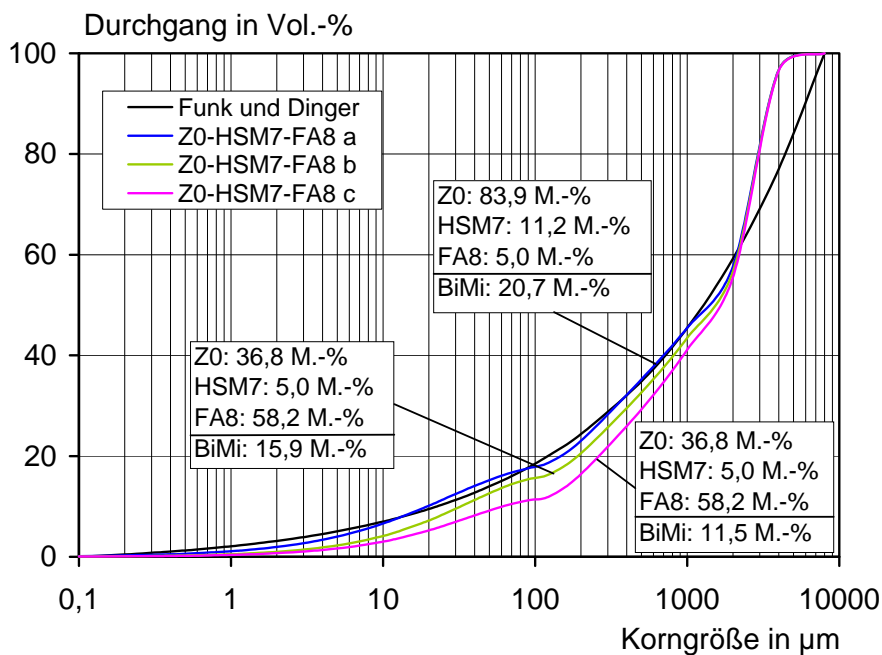
Bei den mit CEN-Normsand granulometrisch optimierten Mischungen, die die beste Annäherung an Funk und Dinger aufwiesen, waren die geringsten Frühfestigkeiten festzustellen (s. Bilder B47 bis B50). Dies ist jedoch zum einen auf den deutlich geringeren Zementgehalt bzw. den höheren w/z-Wert der möglichst optimierten Mischung und zum anderen auf die verzögerte Festigkeitsentwicklung von Flugasche und Hüttensandmehl zurückzuführen. Dennoch zeigt sich bei der Mischung Z0-HSM7-FA8b trotz eines deutlich geringeren Zementgehaltes bzw. eines höheren w/z-Wertes im Vergleich zu Mischung Z0-HSM7-FA8c eine höhere Frühfestigkeit (s. Bild 17).





**Bild 17:** 7-d-Druckfestigkeit der Mischung Z0-HSM7-FA8 mit Angabe der w/z-Werte (ohne Anrechnung der Flugasche und des Hüttensandmehls)

Um eine größere Annäherung an die Sollsieblinie nach Funk und Dinger zu erreichen, erschien es sinnvoll, an dieser Stelle die granulometrische Optimierung nicht an CEN-Normmörteln mit Normsand zu optimieren, sondern vielmehr mit verschiedenen Sandkornfraktionen. Dies wurde exemplarisch für die Mischung (Z0-HSM7-FA8) durchgeführt. Hier ergab sich bis zu einer Korngröße von 2 mm eine sehr gute Annäherung an die Sieblinie nach Funk und Dinger (s. Bild 18) mit einem Exponenten von  $n = 0,37$ . Bei der Mischung mit Ausgangsstoffen aus Projektphase 1 ergab sich hingegen trotz der Verwendung verschiedener Kornfraktionen in unterschiedlichen Anteilen keine sehr gute Annäherung an die Sieblinie nach Funk und Dinger (s. Bild B51).



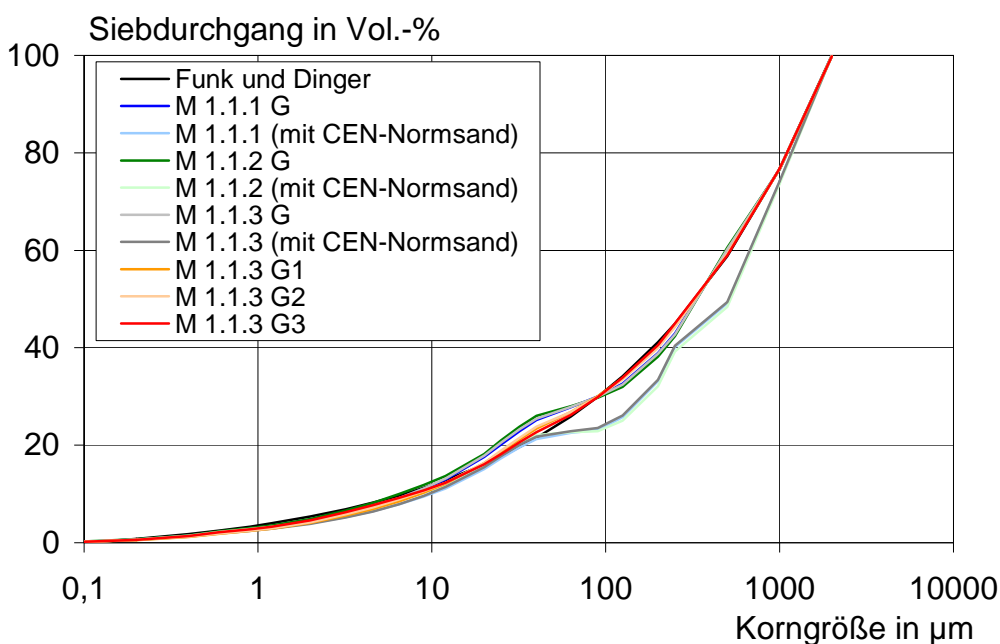
**Bild 18:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit verschiedenen Sandkornfraktionen (Z0-HSM7-FA8)

Es hat sich gezeigt, dass durch die gemeinsame Verwendung von Zement, Flugasche sowie Hüttensandmehl eine gezielte granulometrische Optimierung bei Hinzunahme verschiedener Sandkornfraktionen eine wesentlich bessere Annäherung an die Sieblinie nach Funk und Dinger möglich ist. Da es sich bei den Ausgangsstoffen Z0, HSM 7 und FA8 jedoch nicht um marktübliche Produkte handelte, wurde die granulometrische Optimierung nach Beschluss des Beratergremiums im nächsten Schritt anhand der in Projektphase 2 verwendeten Ausgangsstoffe fortgeführt.

### 3.3.3 Optimierung der Sieblinie mit den Ausgangsstoffen aus Projektphase 2

Im nächsten Schritt wurden die Zementgehalte konstant gehalten, um nicht mehrere Komponenten gleichzeitig zu verändern und sie mit verschiedenen Mischungen aus Projektphase 2 vergleichen zu können. In den Vorversuchen wurde festgestellt, dass die Sieblinie des CEN-Normsands den größten Einfluss auf die Gesamtsieblinie hat. Aus diesem Grund wurde dieser durch verschiedene Quarzsand- und Quarzmehlfractionen und ggf. Kalksteinschlacke ersetzt und der Bindemittelgehalt bei den mit G gekennzeichneten Mischungen (s. Tabelle 5) konstant gehalten. Bei den übrigen Mischungen (G1 - G3) wurden der Zementgehalt konstant gehalten und die Zusatzstoffe ganz oder teilweise ersetzt. Die Wassermenge blieb entsprechend den Mischungen aus Projektphase 2 unverändert. In Tabelle 5 sind die Bezeichnungen der granulometrisch optimierten Mischungen den Mischungen aus Projektphase 2 gegenübergestellt und näher erläutert.

In Bild 19 sind die Sieblinien der granulometrisch optimierten Mischungen mit dem CEM I den entsprechenden Mischungen aus Projektphase 2 mit CEN-Normsand gegenübergestellt. Die Mischungen M 1.1.3 G1 - G3 weisen mit Fehlerquadraten von max. 20 (Vol.-%)<sup>2</sup> die beste Annäherung an die Sollsieblinie nach Funk und Dinger auf. Die entsprechenden Sieblinien für die Mischungen mit dem CEM II sind in Bild B52 dargestellt.



**Bild 19:** Sieblinien der Mischungen mit dem CEM I

Tabelle 5: Bezeichnungen und Erläuterungen der optimierten Mischungen

Bezeichnung	Zementart	entsprechende Mischung aus Phase 2	Bemerkung
1	2	3	4
M 1.1.1 G	CEM I 42,5 R	M 1.1.1	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.1.2 G		M 1.1.2	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.1.3 G		M 1.1.3	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.1.3 G1		M 1.1.3	ohne HSM, aber gleiche Mengen an Zement und FA wie in M 1.1.3 G
M 1.1.3 G2		M 1.1.3	ohne FA, aber gleiche Mengen an Zement und HSM wie in M 1.1.3 G
M 1.1.3 G3		M 1.1.3	ohne FA und HSM, aber gleiche Menge an Zement wie in M 1.1.3 G
M 1.2.1 G	CEM II/B-S 32,5 R $h_z = 30 \text{ M-\%}$	M 1.2.1	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl und Kalksteinmehl optimiert
M 1.2.2 G		M 1.2.2	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.2.3 G		M 1.2.3	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.2.3 G1		M 1.2.3	ohne HSM, aber gleiche Mengen an Zement und FA wie in M 1.2.3 G
M 1.2.3 G2		M 1.2.3	ohne FA, aber gleiche Mengen an Zement und HSM wie in M 1.2.3 G
M 1.2.3 G3		M 1.2.3	ohne FA und HSM, aber gleiche Menge an Zement wie in M 1.2.3 G
M 1.2.5 G		M 1.2.5	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert
M 1.2.7 G		M 1.2.7	gleiche Menge Bindemittel, Sieblinie durch Quarzsand und -mehl optimiert

In Tabelle 6 sind die Frischmörteleigenschaften der granulometrisch optimierten Mischungen den Mischungen aus Projektphase 2 gegenübergestellt. Beim Vergleich ist zu erkennen, dass die granulometrisch optimierten Mischungen bei gleicher Wasserzugabe ein geringeres Ausbreitmaß aufweisen. Durch den höheren Feinanteil erhöht sich demnach der Wasseranspruch. Die Luftgehalte sind zum Teil deutlich höher als die der Mischungen aus Projektphase 2. Aus den erhöhten Luftgehalten resultiert eine geringere Rohdichte der optimierten Mischungen, jedoch nicht ein entsprechender Festigkeitsverlust (z. B. M 1.1.3 G2, s. Tabelle 7).

**Tabelle 6:** Frischmörteleigenschaften der optimierten Mischungen im Vergleich zu den Mischungen aus Projektphase 2

Bezeichnung	ABM	entsprechende Mischung aus Phase 2	Luftgehalt	entsprechende Mischung aus Phase 2	Rohdichte	entsprechende Mischung aus Phase 2
-	mm		Vol-%		g/cm <sup>3</sup>	
1	2	3	4	5	6	7
M 1.1.1 G	187,5	220,0	1,7	1,7	2,22	2,25
M 1.1.2 G	185,0	212,0	4,3	1,8	2,21	2,29
M 1.1.3 G	184,0	225,0	3,0	1,6	2,23	2,26
M 1.1.3 G1	219,0	225,0	2,4	1,6	2,19	2,26
M 1.1.3 G2	181,0	225,0	4,2	1,6	2,23	2,26
M 1.1.3 G3	175,0	225,0	4,5	1,6	2,20	2,26
M 1.2.1 G	192,0	219,0	1,9	1,5	2,20	2,26
M 1.2.2 G	177,5	209,0	2,2	1,7	2,19	2,28
M 1.2.3 G	179,5	217,0	2,5	1,8	2,21	2,27
M 1.2.3 G1	174,0	217,0	2,4	1,8	2,20	2,27
M 1.2.3 G2	172,0	217,0	1,6	1,8	2,23	2,27
M 1.2.3 G3	177,5	217,0	4,2	1,8	2,18	2,27
M 1.2.5 G	174,5	219,0	2,5	1,5	2,21	2,26
M 1.2.7 G	183,0	223,0	2,8	2,2	2,20	2,25

In Tabelle 7 sind die Festigkeiten der granulometrisch optimierten Mischungen den Mischungen aus Projektphase 2 gegenübergestellt. Die Festigkeiten wurden sowohl nach 7 als auch nach 28 Tagen bestimmt, um den Festigkeitsbeitrag des HSM und der FA zu erfassen. Die optimierten Mischungen weisen im Vergleich zu den Mischungen aus Projektphase 2 größtenteils ähnliche bzw. deutlich geringere Festigkeiten auf. Bei einigen optimierten Mischungen sind nach 7 Tagen geringfügig höhere Festigkeiten vorhanden. Nach 28 Tagen entsprechen diese Festigkeiten jedoch der Festigkeit der vergleichbaren Mischung bzw. liegen im Streubereich. Die optimierten Mischungen mit den Kennzeichnungen G1 und G3, deren Sieblinien am nächsten an der Idealparabel nach Funk und Dinger liegen und die kein HSM enthalten, haben nach 28 Tagen die höchsten Festigkeitsverluste.

**Tabelle 7:** Festigkeiten der optimierten Mischungen im Vergleich zu den Mischungen aus Projektphase 2

Bezeichnung	Druckfestigkeit nach 7 d		Druckfestigkeit nach 28 d	
	optimierte Mischung	Mischung aus Phase 2	optimierte Mischung	Mischung aus Phase 2
-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5
M 1.1.1 G	29,7	31,6	43,0	41,6
M 1.1.2 G	32,7	30,2	52,3	55,9
M 1.1.3 G	23,8	24,0	46,2	47,0
M 1.1.3 G1	16,9	24,0	25,7	47,0
M 1.1.3 G2	24,3	24,0	45,1	47,0
M 1.1.3 G3	16,0	24,0	19,9	47,0
M 1.2.1 G	19,7	16,2	36,8	33,5
M 1.2.2 G	27,2	22,1	48,3	45,6
M 1.2.3 G	21,1	15,7	42,6	41,0
M 1.2.3 G1	13,2	15,7	26,6	41,0
M 1.2.3 G2	20,9	15,7	38,3	41,0
M 1.2.3 G3	13,7	15,7	22,4	41,0
M 1.2.5 G	21,8	17,6	41,1	41,3
M 1.2.7 G	20,9	16,1	39,1	37,0

Anhand der Ergebnisse der granulometrisch optimierten Mischungen ist festzustellen, dass durch den Ersatz des CEN-Normsands durch Quarzmehl und –sand und ggf. Kalksteinehl nach 28 Tagen im Vergleich zu den Mischungen aus Phase 2 keine wesentlichen Festigkeitssteigerungen erzielt werden konnten. Des Weiteren traten bei gleich bleibendem Zementgehalt und Austausch des Hüttensandmehls durch Quarzmehl bzw. -sand (M 1.1.3 G1 bzw. M 1.2.3 G1) erhebliche Festigkeitsverluste auf. Diese Festigkeitsverluste traten bei den Mischungen, bei denen die Flugasche durch Quarzmehl bzw. -sand ersetzt wurde (M 1.1.3 G2 und M 1.2.3 G2), nicht auf, was dafür spricht, dass die Reaktion der Flugasche erst nach der Reaktion des Hüttensandmehls eintritt. Hier müsste die Festigkeit nach 90 Tagen mit der entsprechenden Mischung aus Phase 2 verglichen werden.

An den mit Quarzsand optimierten Mischungen sollten die Bindemittel anteilig durch entsprechende Bindemittel mit anderen Korngrößenverteilungen ausgetauscht werden, um zu überprüfen, ob so eine Festigkeitssteigerung möglich ist. Die Anpassung der Sieblinie an die Idealparabel nach Funk und Dinger durch den ausschließlichen Ersatz des CEN-Normsands war hier nicht zielführend. Da die granulometrische Optimierung nicht im Vordergrund des Projektes stand und die Versuchsmatrix schließlich gering gehalten werden sollte, wurden jedoch keine weiteren Mischungen untersucht.

Generell muss im Mehlkornbereich hinterfragt werden, ob das so praktizierte Verfahren insbesondere im Sub- $\mu$ -Bereich überhaupt anwendbar ist. Hier bedarf es zweifelsfrei noch weiterer grundlegender Forschungsarbeiten.

### **3.4 Betonprüfungen**

#### **3.4.1 Frischbetonkennwerte (Ausbreitmaß, Luftgehalt, Rohdichte)**

In Tabelle 8 sind die Frischbetoneigenschaften Ausbreitmaß (ABM), Luftgehalt und Rohdichte der 12 Betonmischungen dargestellt. Zur Verdeutlichung der Mischungszusammensetzung sind zusätzlich die w/z-Werte, die h/z-Anteile sowie die Flugascheanteile angegeben. Bei den Mischungen M 1.2 a und M 2.2 a musste trotz Anpassung der Sieblinie Betonverflüssiger zugegeben werden, um das gewünschte Ausbreitmaß zu erzielen. Bei der Mischung M 1.2 b konnte trotz Verschiebung der Sieblinie auf B 16 das gewünschte Ausbreitmaß von max. 480 mm nicht eingehalten werden. Die Luftgehalte liegen i. d. R. zwischen 0,8 und 1,1 Vol.-% und sind sehr gleichmäßig. Diese vergleichsweise geringen Werte resultieren aus der Anpassung der Sieblinie. Die Rohdichten liegen im Bereich üblicher Normalbetone zwischen 2,34 und 2,41 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabelle 8:** Frischbetonkennwerte

Bezeichnung	Zementart	ABM	Luft- gehalt	Roh- dichte	$w/z_{eq}^{1)}$	h/z	f/(z + h)
-	-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	410	1,1	2,41	0,5	0/100	0
M 1.0 b		450	0,9	2,40	0,6		
M 1.1 a		420	0,8	2,40	0,5	50/50	0
M 1.1 b		460	1,1	2,39	0,6		
M 1.2 a		420 <sup>2)</sup>	0,8	2,38	0,5	50/50	0,33
M 1.2 b		520	0,9	2,35	0,6		
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R h <sub>z</sub> = 30 M-%	420	0,9	2,40	0,5	0/100	0
M 2.0 b		440	1,6	2,37	0,6		
M 2.1 a		430	0,8	2,40	0,5	50/50	0
M 2.1 b		480	1,5	2,36	0,6		
M 2.2 a		420 <sup>2)</sup>	0,9	2,40	0,5	50/50	0,33
M 2.2 b		480	1,0	2,34	0,6		

1)  $w/z_{eq} = w / (z + h + 0,4 \cdot f)$

2) Betonverflüssigerzugabe

### 3.4.2 Druckfestigkeit

In Tabelle 9 sind die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen zusammengestellt.



Tabelle 9: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen der Betone

Bezeichnung	Zementart	Druckfestigkeit nach			
		2 d	7 d	28 d	90 d
-	-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	30,3	44,6	59,3	65,8
M 1.0 b		22,3	34,8	46,9	52,8
M 1.1 a		16,7	28,6	50,2	61,6
M 1.1 b		10,9	21,0	42,2	48,3
M 1.2 a		12,3	25,0	47,8	54,9
M 1.2 b		8,5	17,9	36,8	42,2
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R h <sub>z</sub> =30 M.-%	16,2	27,0	44,9	48,6
M 2.0 b		10,6	18,4	31,6	38,8
M 2.1 a		7,7	22,4	42,8	51,6
M 2.1 b		5,5	17,8	36,2	43,6
M 2.2 a		7,3	27,6	49,4	58,1
M 2.2 b		4,0	15,9	34,2	42,0

In Bild 20 sind die Druckfestigkeiten für die verschiedenen Mischungen mit dem Portlandzement dargestellt. Erwartungsgemäß weisen die Betone mit dem geringeren w/z-Wert von 0,5 (durchgezogene Linien) höhere Festigkeiten auf als die Betone mit w/z = 0,6 (gestrichelte Linien). Die Referenzmischung ohne Zusatzstoffe erreicht die höchsten Druckfestigkeiten, die Mischungen mit Hüttensandmehl und Flugasche die geringsten. Das heißt, dass die bei der Mischungskonzeption unterstellten Wirksamkeiten der Zusatzstoffe im Hinblick auf ihren Beitrag zur Festigkeit überschätzt wurden. Vergleicht man die Betondruckfestigkeiten mit den Mörteldruckfestigkeiten aus Bild 4, so ist zu erkennen, dass der Festigkeitsbeitrag der Zusatzstoffe im Betonmaßstab deutlich geringer ist.

In Bild 21 sind die Druckfestigkeiten für die Mischungen mit dem Portlandkompositzement dargestellt. Bei Verwendung des CEM II/B-S ist auffällig, dass die Mischung mit Hüttensandmehl und Flugasche (M 2.2 a) bei einem w/z<sub>eq</sub>-Wert von 0,5 ab einem Alter von 7 Tagen durchgängig die höchsten Werte aufweist. Auch die Mischung, der nur Hüttensandmehl zugesetzt wurde, weist nach 90 Tagen eine höhere Festigkeit auf als die Referenzmischung. Bei einem w/z-Wert von 0,6 liegen ab 28 Tagen die Druckfestigkeiten beider zusatzstoffhaltigen Mischungen über denen der Referenzmischung.

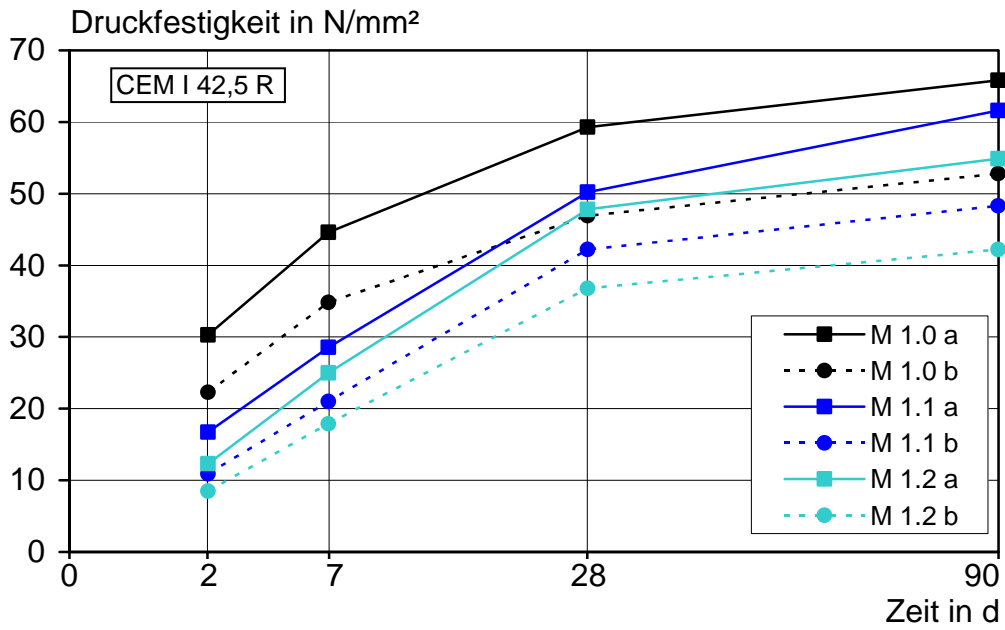


Bild 20: Druckfestigkeiten der Betone mit dem CEM I

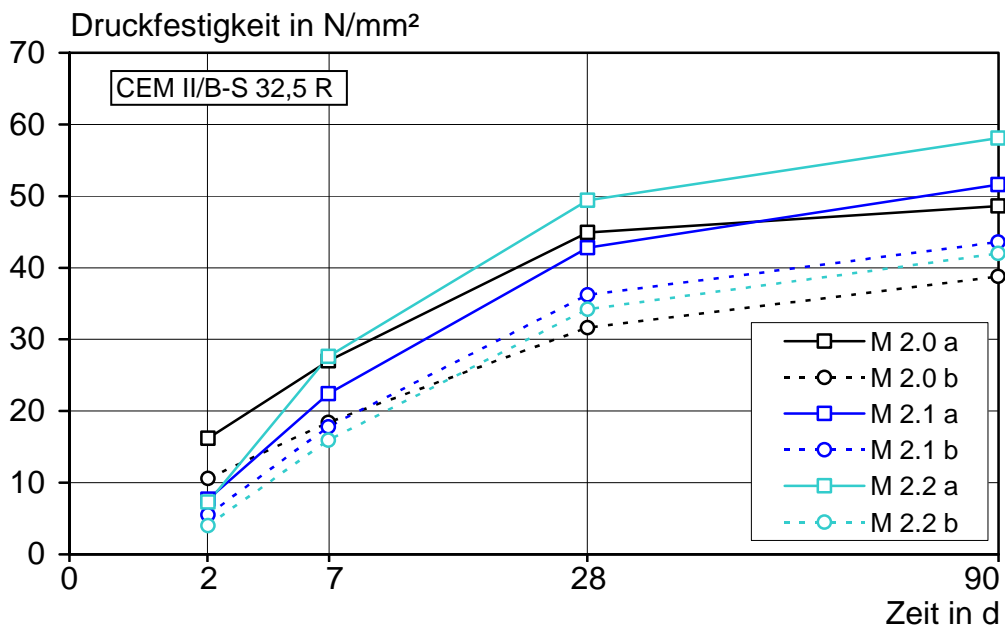


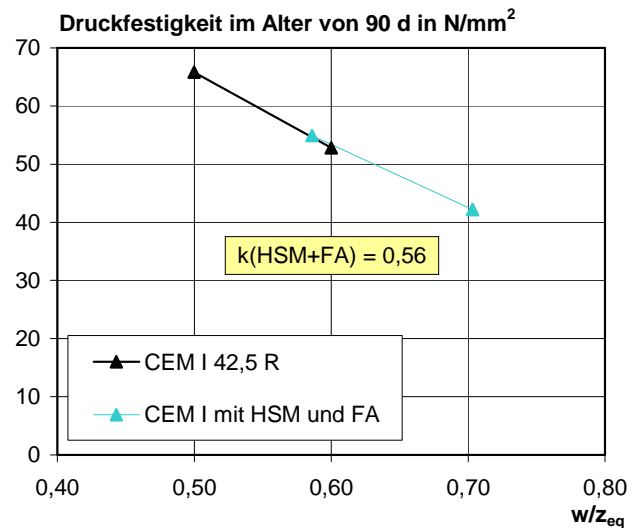
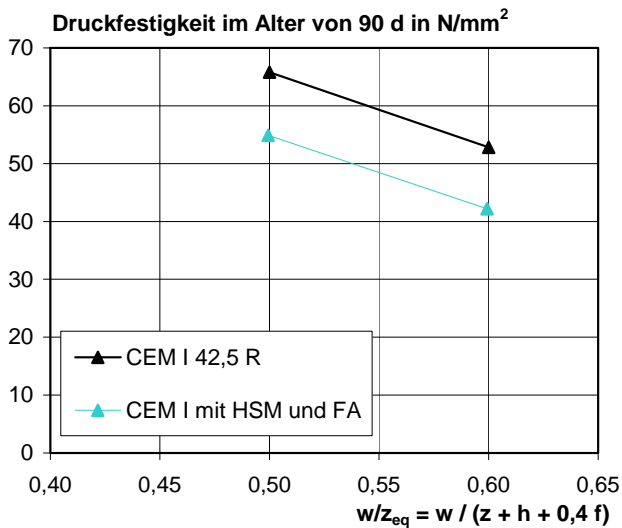
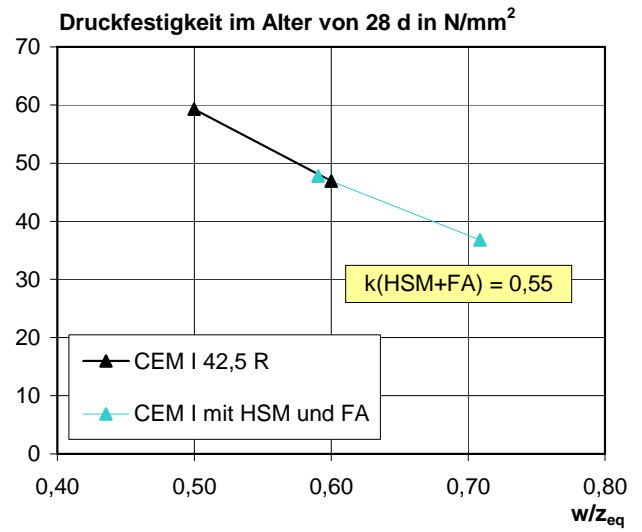
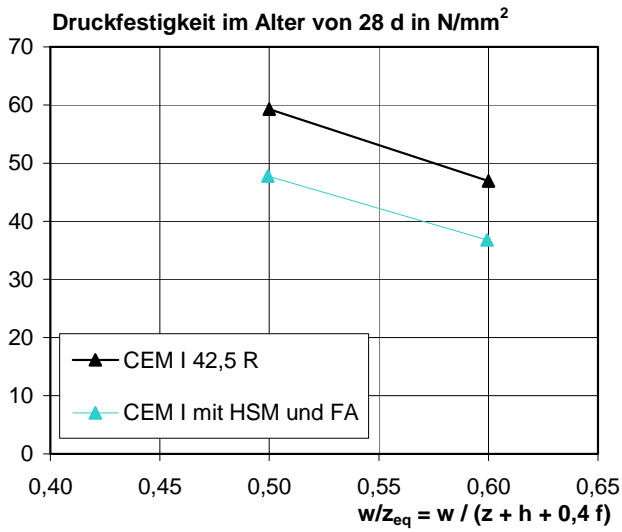
Bild 21: Druckfestigkeiten der Betone mit dem CEM II/B-S

Im Anhang sind in den Diagrammen B53 und B54 die Druckfestigkeiten der Betone mit beiden Zementen getrennt für die w/z-Werte 0,5 und 0,6 aufgetragen. Erwartungsgemäß sind die Festigkeiten für den CEM II geringer, da er mit 32,5 N/mm<sup>2</sup> eine andere Festigkeitsklasse besitzt als der CEM I 42,5 R. Die Mischung mit CEM II, Hüttensandmehl und Flugasche bildet bei w/z = 0,5 jedoch wieder eine Ausnahme. Die Festigkeit liegt nach 90 Tagen etwa 3 N/mm<sup>2</sup> höher als bei Verwendung des CEM I. Bei einem w/z-Wert von 0,6 ist die Festigkeit bei beiden Zementen etwa gleich.

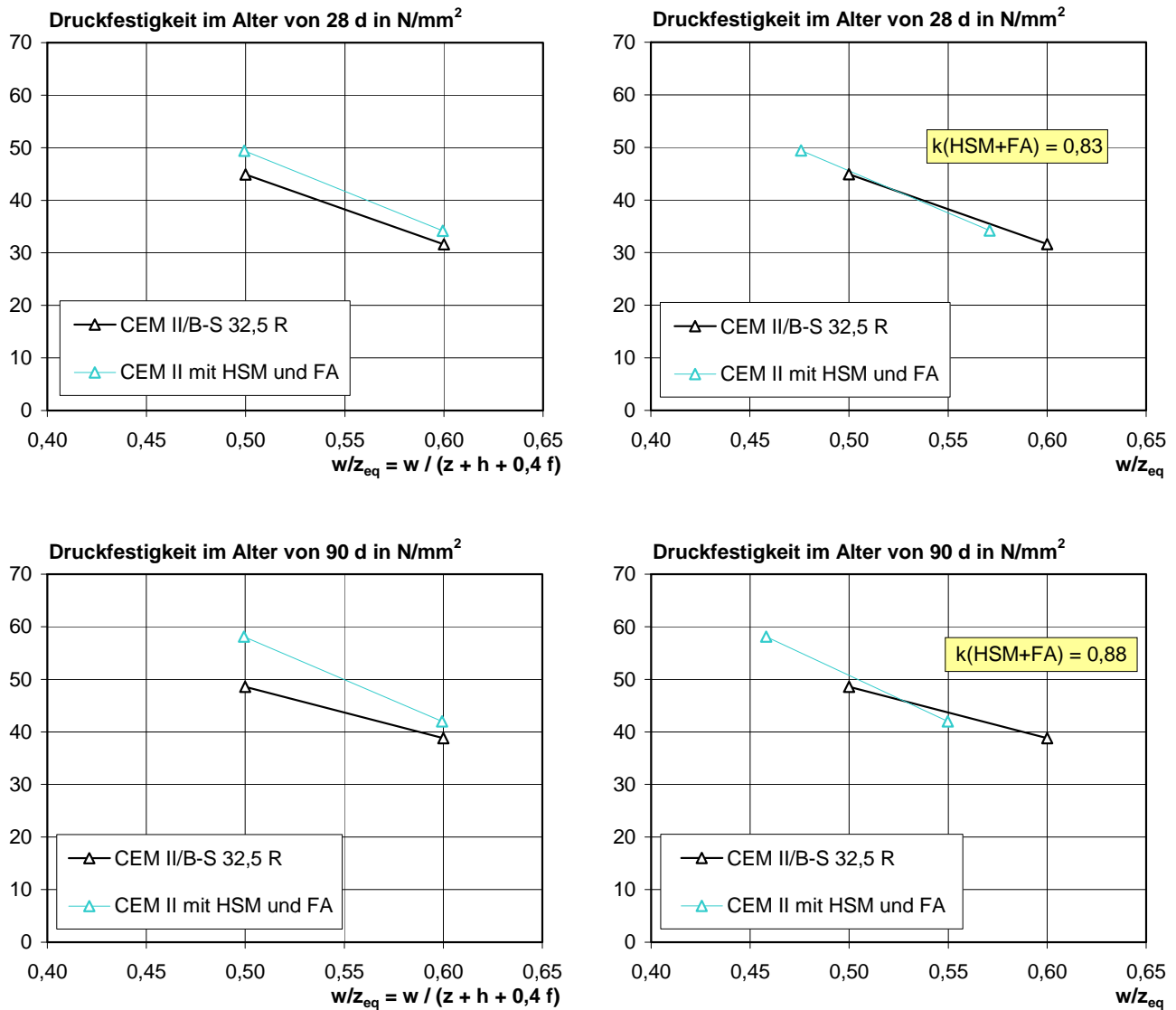
Bei der Mischungskonzeption wurde von  $k_{\text{HSM}} = 1,0$  und  $k_{\text{FA}} = 0,4$  ausgegangen. Anhand der vorhandenen Druckfestigkeiten wurde ein gemeinsamer k-Wert für die Flugasche und das Hüttensandmehl der jeweiligen Mischungen ermittelt (Bilder 22 und 23). Dabei ist jedoch zu beachten, dass es sich hier nur um eine Abschätzung handelt, da die k-Wert-Bestimmung üblicherweise anhand von 3 verschiedenen w/z-Werten erfolgt. Im vorliegenden Fall wurden jedoch nur die Druckfestigkeiten bei den w/z-Werten 0,5 und 0,6 bestimmt. Der k-Wert wird dabei so gewählt, dass die Druckfestigkeiten der Referenzmischungen und der Prüfmischungen auf einer Geraden liegen. Die Bestimmung der einzelnen k-Werte konnte nur für das Hüttensandmehl vorgenommen werden, da keine Mischung vorhanden war, die nur Flugasche enthielt.

In Bild 22 sind die ermittelten k-Werte der Mischungen mit dem CEM I sowohl nach 28 als auch nach 90 Tagen dargestellt. Es ergibt sich zu beiden Zeitpunkten ein  $k_{\text{HSM+FA}}$ -Wert von ca. 0,55. Für die Mischung M 1.1, die nur Hüttensandmehl enthält, ergab sich nach 28 Tagen ein  $k_{\text{HSM}} = 0,77$  und nach 90 Tagen ein  $k_{\text{HSM}} = 0,89$  (Bild B55).

Beim Portlandhüttenzement ist die Reaktivität der Zusatzstoffe höher (s. Bild 23). Der gemeinsame k-Wert ergibt sich nach 28 Tagen zu 0,83 und nach 90 Tagen zu 0,88. Der k-Wert für das HSM ergab sich nach 28 Tagen zu  $k_{\text{HSM}} = 1,0$  bzw. nach 90 Tagen zu 1,15 (Bild B56).



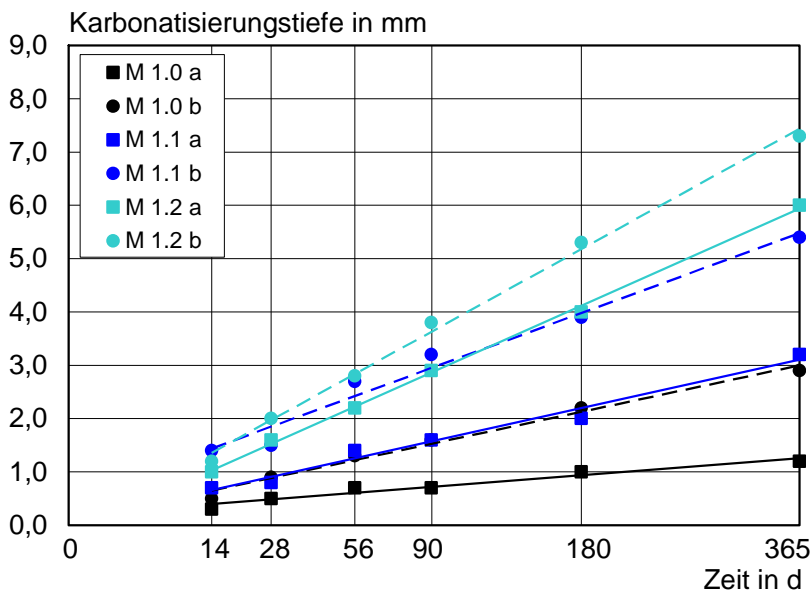
**Bild 22:** Relation zwischen Druckfestigkeit und  $w/z_{eq}$ -Wert der Mischungen mit CEM I nach 28 und 90 Tagen



**Bild 23:** Relation zwischen Druckfestigkeit und  $w/z_{eq}$ -Wert der Mischungen mit CEM II/B-S nach 28 und 90 Tagen

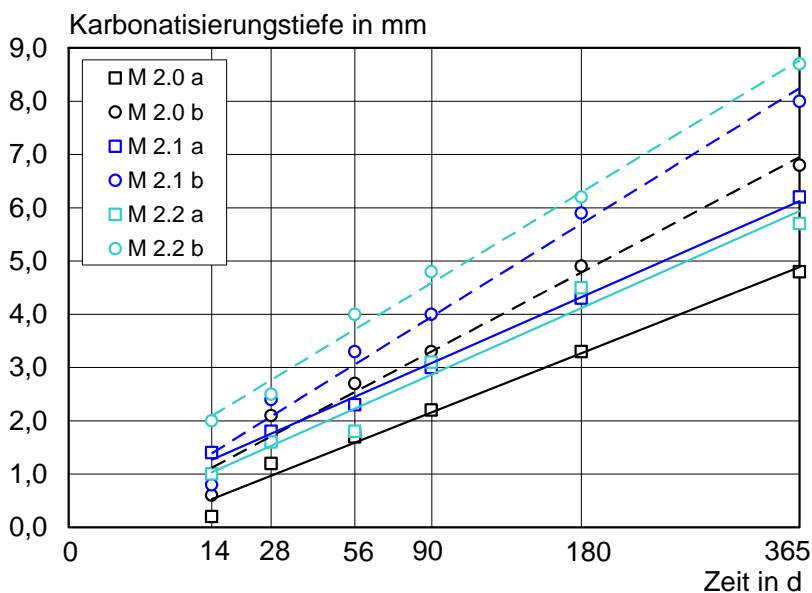
### 3.4.3 Karbonatisierung

Beim Karbonatisierungsverhalten zeigte sich wie erwartet der Trend, dass mit zunehmendem Zusatzstoffgehalt die Karbonatisierungstiefen und -geschwindigkeiten ansteigen. In Bild 24 sind die Karbonatisierungstiefen für die Mischungen mit dem Portlandzement dargestellt. Die Mischungen mit  $w/z = 0,6$  (gestrichelte Linien) weisen erwartungsgemäß höhere Karbonatisierungen auf als die mit dem geringeren  $w/z$ -Wert (durchgezogene Linien). Die Mischungen mit Hüttensandmehl karbonatisieren stärker als die Referenzmischung, die Mischungen mit Hüttensandmehl und Flugasche karbonatisieren am schnellsten.



**Bild 24:** Karbonatisierung der Betone mit CEM I

Die Karbonatisierungstiefen der Mischungen mit dem Portlandhüttenzement fallen grundsätzlich höher aus als die der Mischungen mit dem Portlandzement (s. Bild 25).



**Bild 25:** Karbonatisierung der Betone mit CEM II/B-S

Zur besseren Übersicht sind die ermittelten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone in Tabelle 10 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Mischungen mit Hüttenessandmehl und Flugasche sind bei  $w/z = 0,5$  (M1.2 a und M 2.2 a) sehr ähnlich, bei den anderen Mi-

schungen sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten beim Vergleich der beiden Zemente untereinander jedoch sehr unterschiedlich.

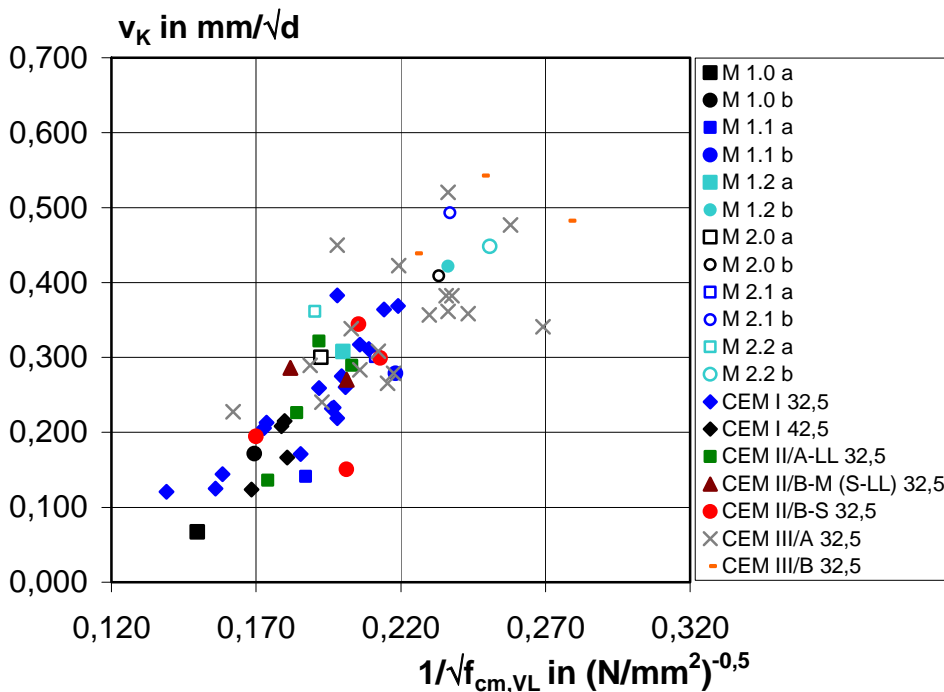
In Tabelle 10 sind ebenfalls die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der den Betonmischungen entsprechenden Mörtelmischungen dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtel meist etwas höher sind als die der Betone. Bei den Mischungen M 1.0 a und M 1.1 a sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtel deutlich höher. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der flugaschehaltigen Mörtelmischung mit CEM I ist nur leicht erhöht. Bei Verwendung des CEM II ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mörtelmischung ebenfalls nur leicht erhöht, die der hüttensandhaltigen Mischung ist etwas geringer und die der hüttensand- und flugaschehaltigen Mörtelmischung deutlich höher.

**Tabelle 10:** Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone nach 365 Tage

Bezeichnung	Zementart	h/z	f/(z + h)	$v_k$	$v_k^{1)}$
-	-	-	-	mm/ $\sqrt{d}$	
1	2	3	4	5	6
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	0/100	0	0,056	0,116
M 1.0 b				0,153	-
M 1.1 a		50/50	0	0,159	0,207
M 1.1 b				0,263	-
M 1.2 a		50/50	0,33	0,320	-
M 1.2 b				0,396	0,400
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R $h_z = 30 \text{ M-\%}$	0/100	0	0,283	0,291
M 2.0 b				0,380	-
M 2.1 a		50/50	0	0,316	0,296
M 2.1 b				0,446	-
M 2.2 a		50/50	0,33	0,319	-
M 2.2 b				0,435	0,493

1) Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der äquivalenten Mörtelmischungen

In Bild 26 werden die Ergebnisse der Betonmischungen mit Karbonatisierungsgeschwindigkeiten aus der ibac-Datenbank verglichen, wobei nur Betone ohne Zusatzstoffe aus der Datenbank ausgewählt wurden. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten sind über dem Kehrwert der Wurzel der Druckfestigkeit nach Vorlagerung aufgetragen. Dabei zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten im Bereich üblicher Normbetone liegen.

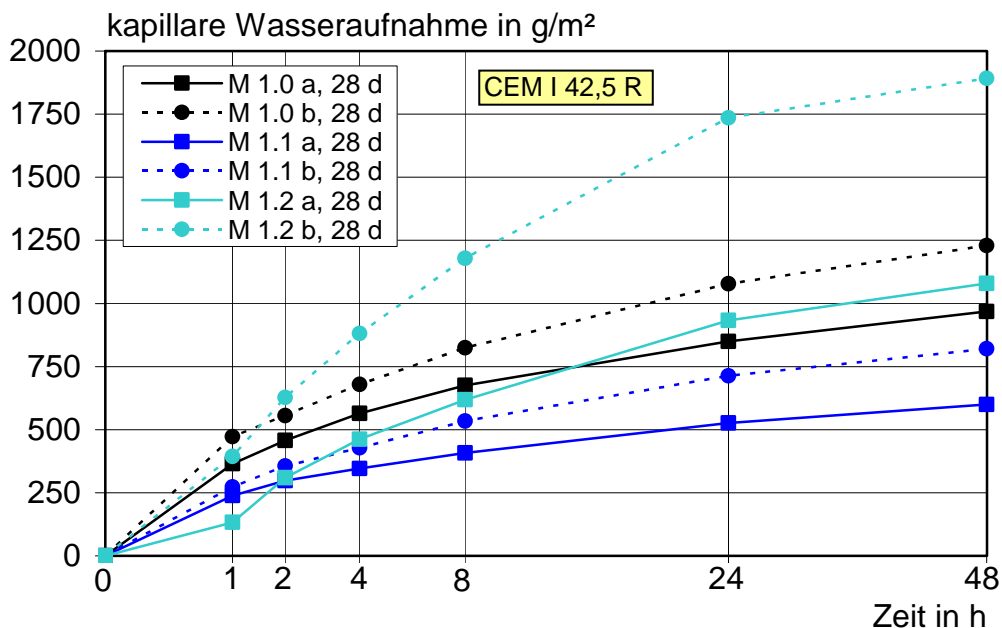


**Bild 26:** Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone im Vergleich zu Normalbetonen ohne weitere Zusatzstoffe

### 3.4.4 Wasseraufnahme und kapillarer Sättigungsgrad

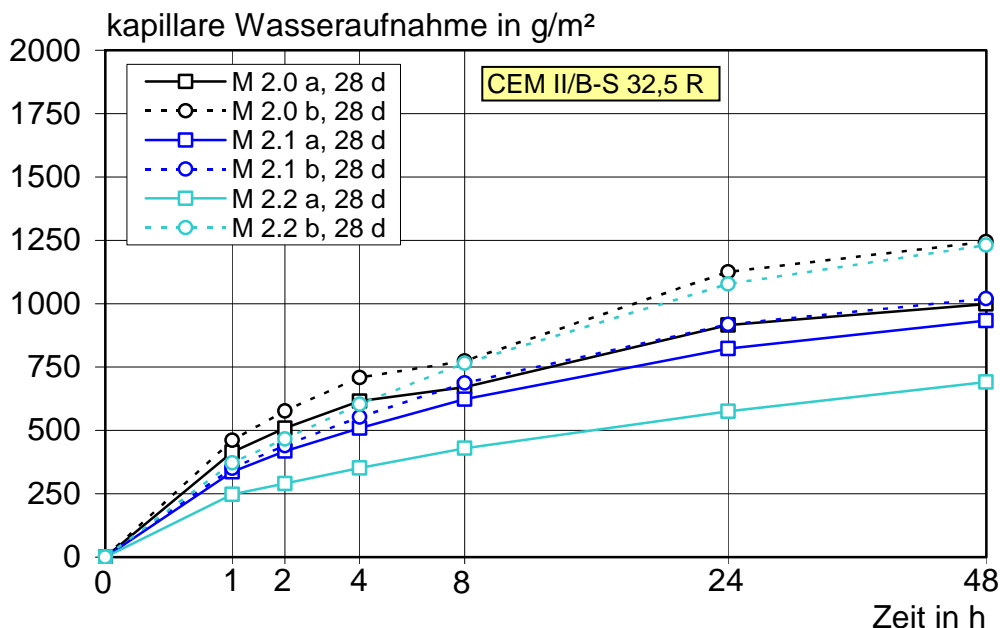
Die ermittelten Werte für die Wasseraufnahme unter den verschiedenen Randbedingungen sind in Tabelle A28 zusammengestellt. Die zeitlichen Entwicklungen der kapillaren Wasseraufnahme nach 28 Tagen sind in den Bildern 27 für den CEM I und 28 für den CEM II sowie nach 90 Tagen in den Bildern B57 und B58 dargestellt. Beim Portlandzement zeigen die Mischungen mit Hüttensandmehl und Flugasche bei einem w/z-Wert von 0,6 eine deutlich höhere kapillare Wasseraufnahme als die Referenzmischung (Bild 27). Beim w/z-Wert von 0,5 entspricht die Mischung M 1.2 a in etwa der Referenzmischung. Die Ergebnisse der Mischungen, denen nur Hüttensandmehl zugegeben wurde, liegen unter denen der Referenzmischungen. Nach 90 Tagen weisen die hüttensand- und flugaschehaltigen Mischungen die höchsten Wasseraufnahmen auf, die Ergebnisse der Referenzmischung und der Mischung, der nur Hüttensandmehl zugegeben wurde, entsprechen sich (Bild B57).





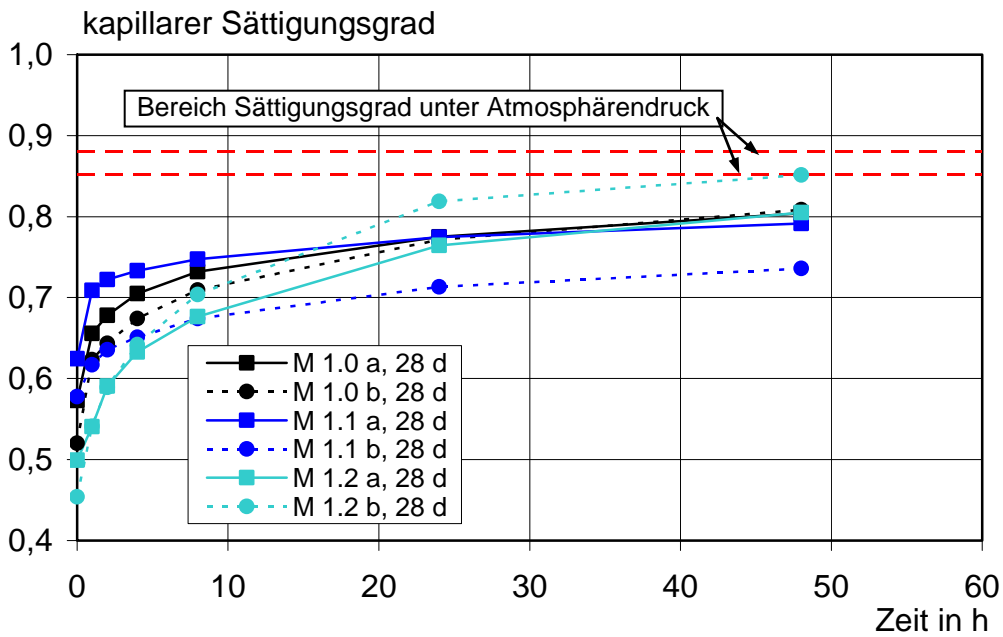
**Bild 27:** kapillare Wasseraufnahme nach 28 Tagen für die Mischungen mit CEM I

Bei Verwendung des Portlandkompositzements entspricht das Ergebnis der hüttensand- und flugaschehaltigen Mischung beim w/z-Wert von 0,6 dem der Referenzmischung (Bild 28). Beim w/z-Wert von 0,5 ist die Wasseraufnahme geringer als bei der Referenzmischung. Die Ergebnisse beider Mischungen, denen nur Hüttensandmehl zugegeben wurde, liegen im Bereich der Referenzmischung mit w/z = 0,6. Nach 90 Tagen sind die Wasseraufnahmen bei beiden zusatzstoffhaltigen Mischungen und beiden w/z-Werten geringer als die der Referenzmischungen (Bild B58).



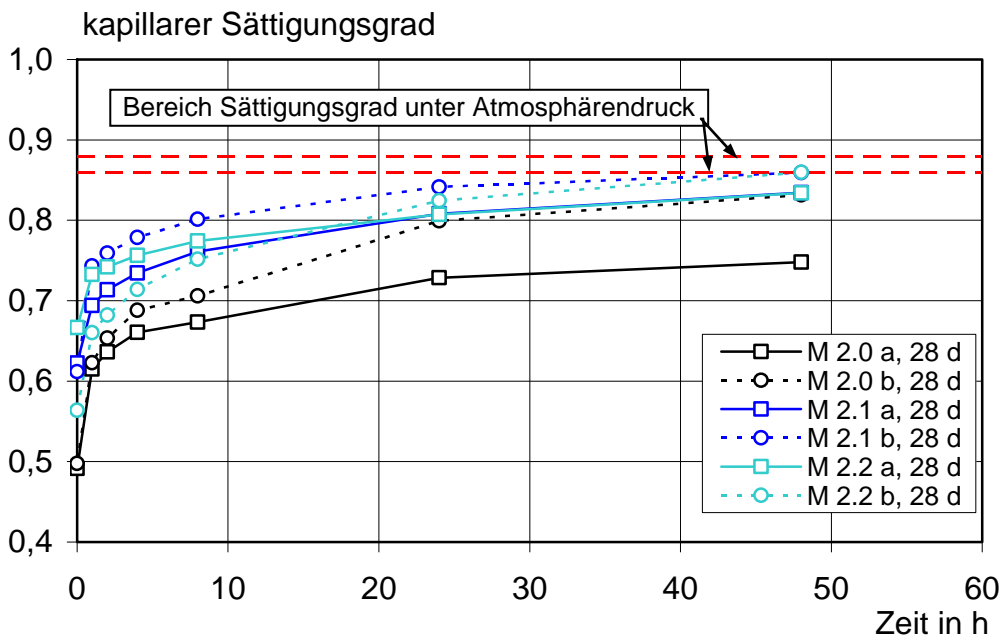
**Bild 28:** kapillare Wasseraufnahme nach 28 Tagen für die Mischungen mit CEM II/B-S

Die kapillaren Sättigungsgrade der verschiedenen Mischungen nach 28 Tagen sind den Bildern 29 und 30 zu entnehmen. Sie finden sich ebenfalls in Tabelle A29 wieder. Die Ergebnisse nach 90 Tagen sind in den Bildern B59 und B60 enthalten. Erwartungsgemäß müssten die Mischungen mit dem höheren w/z-Wert einen höheren Sättigungsgrad aufweisen. Die Mischung M 1.1b bildet hier jedoch eine Ausnahme. Sie weist den geringsten Sättigungsgrad auf. Nach 90 Tagen weisen die zusatzstoffhaltigen Mischungen sowohl mit w/z = 0,5 als auch mit 0,6 einen ähnlichen Sättigungsgrad auf, die Referenzmischungen einen geringeren (s. Bild B59).



**Bild 29:** kapillarer Sättigungsgrad nach 28 Tagen für die Mischungen mit CEM I

Bei den Mischungen mit dem CEM II weisen ebenfalls die Referenzmischungen sowohl nach 28 als auch nach 90 Tagen (Bild B60) die geringsten Sättigungsgrade auf.

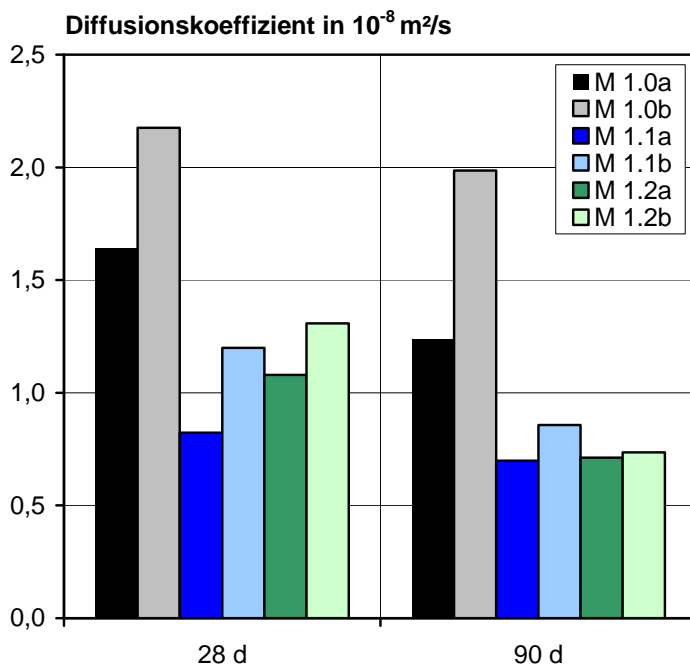


**Bild 30:** kapillarer Sättigungsgrad nach 28 Tagen für die Mischungen mit CEM II/B-S

Die Unterschiede der Sättigungsgrade zwischen den Mischungen mit den  $w/z$ -Werten 0,5 und 0,6 sind bei den vorliegenden Mischungen sehr gering und liegen üblicherweise weiter auseinander. Eine Aussage zum Frostwiderstand ist anhand dieser Ergebnisse nicht zu treffen. Dazu müsste ein kritischer Sättigungsgrad ermittelt werden, was mit dem vorliegenden Verfahren allerdings nicht möglich ist.

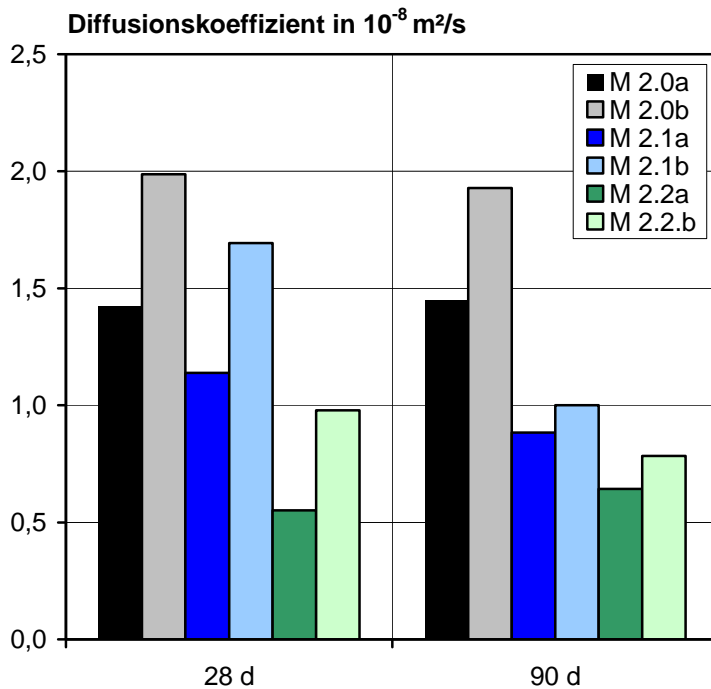
### 3.4.5 Sauerstoffdiffusion

In Bild 31 sind die Diffusionskoeffizienten der Mischungen mit dem CEM I dargestellt. Bei geringerem  $w/z$ -Wert ist das Kapillarporenvolumen kleiner und das Gefüge dichter. Durch den Ersatz von Zement durch Hüttensandmehl wird eine Erhöhung der Gefügedichtheit erreicht. Die flugaschehaltigen Mischungen M 1.2 a und M 1.2 b sind nach 28 Tagen auffällig, da gegenüber den Mischungen M 1.1 a und b ein dichteres Gefüge erwartet wurde, was jedoch nicht der Fall ist. Bei Berücksichtigung der tatsächlichen  $k$ -Werte weisen die Mischungen mit der FA jedoch höhere  $w/z_{eq}$ -Werte auf als die hüttensandhaltigen Mischungen ( $w/z_{M\ 1.1a} = 0,56$  im Vergleich zu  $w/z_{M\ 1.2a} = 0,59$  und  $w/z_{M\ 1.1b} = 0,68$  im Vergleich zu  $w/z_{M\ 1.2b} = 0,71$ ). Daher sind die höheren Diffusionskoeffizienten durchaus schlüssig.



**Bild 31:** Diffusionskoeffizienten der Mischungen mit CEM I

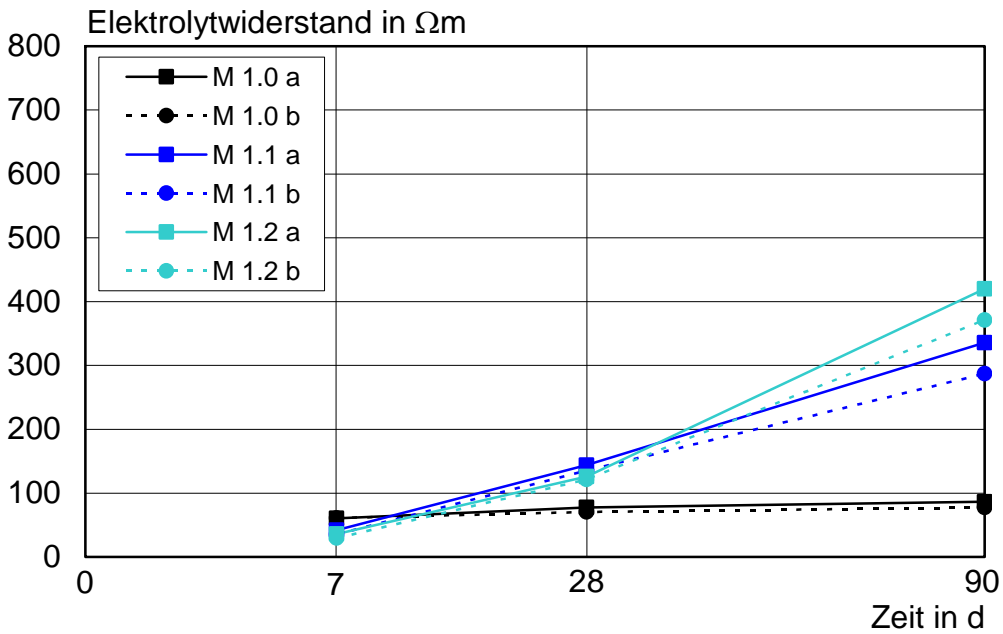
Die Diffusionskoeffizienten der Mischungen mit dem CEM II/B-S sind in Bild 32 dargestellt. Auch hier wird durch den Ersatz von Zement durch Hüttensandmehl eine Erhöhung der Gefügedichtheit erreicht. Dieser Effekt wird bei Verwendung des CEM II durch die Zugabe von Flugasche noch verstärkt.



**Bild 32:** Diffusionskoeffizienten der Mischungen mit CEM II/B-S

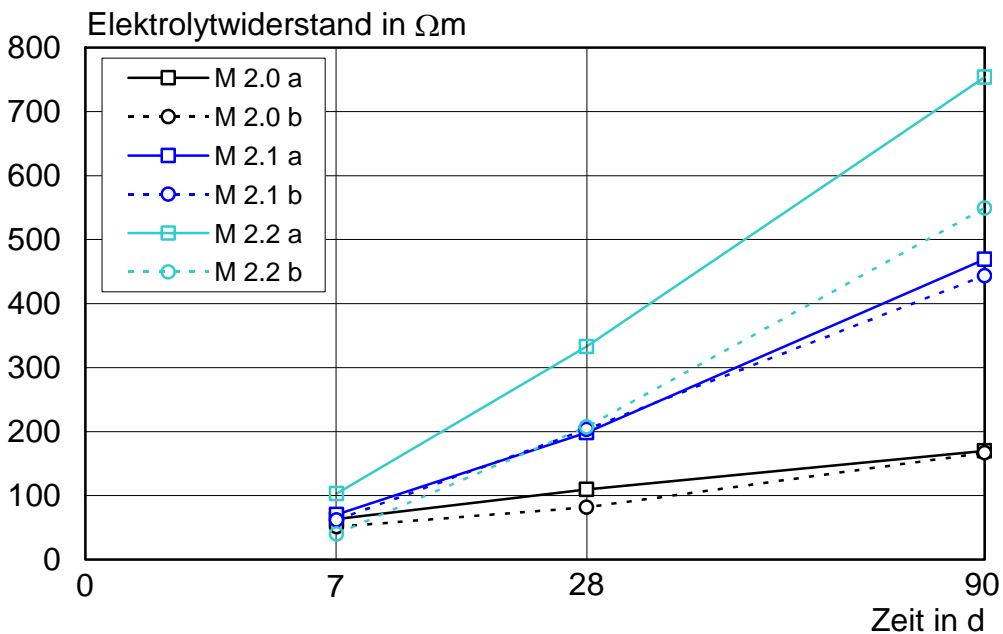
### 3.4.6 Elektrolytwiderstand

Die Elektrolytwiderstände der Mischungen sind in Tabelle A30 zusammengestellt und in den Bildern 33 und 34 graphisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die hüttensandhaltigen Mischungen sowie die hüttensand- und flugaschehaltigen Mischungen bereits nach 28 Tagen einen höheren Elektrolytwiderstand als die Referenzmischungen aufweisen. In höherem Alter steigen die Elektrolytwiderstände erheblich über die der Referenzbetone an, was wiederum darauf hindeutet, dass die zusatzstoffhaltigen Mischungen eine höhere Dichte als die Referenzbetone aufweisen. Die Elektrolytwiderstände der Mischungen mit  $w/z = 0,6$  (gestrichelte Linie) sind geringfügig geringer als die der Mischungen mit einem  $w/z$ -Wert von 0,5 (durchgezogene Linie).



**Bild 33:** Elektrolytwiderstände der Betone mit CEM I

Bei Verwendung des Portlandhüttenzements steigen die Elektrolytwiderstände der Mischungen mit zusätzlichem Hüttsandmehl bzw. mit Hüttsandmehl und Flugasche bereits nach 28 Tagen deutlich an (s. Bild 34). Mischung 2.2 mit einem w/z-Wert von 0,5 (durchgezogene Linie) ist wie bei der kapillaren Wasseraufnahme auffällig und weist einen erheblich höheren Elektrolytwiderstand gegenüber den anderen Mischungen auf.



**Bild 34:** Elektrolytwiderstände der Betone mit CEM II/B-S

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollten zum einen der Nachweis gleicher Leistungsfähigkeit von Mischungen mit und ohne gemeinsame Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff erbracht werden und zum anderen herstellbedingte Schwankungen der Eigenschaftskennwerte unterschiedlicher Produktionschargen der Betonausgangsstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht werden. Des Weiteren sollte nachgewiesen werden, dass durch eine gezielte granulometrische Optimierung der Sieblinie im Feinbereich durch eine Kombination von Zement, Flugasche und Hüttensandmehl die tatsächlichen Potentiale vollständig ausgeschöpft werden können. Durch das bei der granulometrischen Optimierung erzielte dichtere Gefüge der Mörtel wurden verbesserte Frisch- und Festbetoneigenschaften erwartet.

In Projektphase 1 wurden zunächst verschiedene Ausgangsstoffe charakterisiert, von denen anschließend für Projektphase 2 marktgängige Produkte ausgewählt wurden. In Projektphase 2 wurden an diversen Mörtelmischungen die Frisch- und Festmörteleigenschaften überprüft. Zur Erfassung der herstellbedingten Schwankungen wurden die Untersuchungen an jeweils 6 Chargen der Ausgangsstoffe durchgeführt. Insgesamt war eine hohe Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe festzustellen. Die Streuungen der Frisch- und Festmörteleigenschaften der einzelnen Chargen war gering. Der Nachweis, dass bei praxisnaher Zusammensetzung der Mörtel unter Verwendung von Zement, Flugasche und Hüttensandmehl vergleichbare Frisch- und Festmörteleigenschaften zu erzielen sind wie bei der Verwendung von Hochofenzement und Flugasche konnte indes jedoch nur teilweise erbracht werden. Es wurden ein CEM I 42,5 R, ein CEM II/B-S 32,5 R und ein CEM III/A 32,5 N verwendet. Die Mischungen wurden so zusammengesetzt, dass sie zur Vergleichbarkeit ohne bzw. mit Flugasche gleiche Klinker- und Hüttensandmehlanteile aufwiesen. Bei den Frischmörteleigenschaften war keine Korrelation zwischen Ausbreitmaß, Luftgehalt, Rohdichte und Mischungszusammensetzung zu erkennen. Bei den Mischungen mit dem CEM I 42,5 R stellte sich heraus, dass nach 28 Tagen die Festigkeiten bei Verwendung des Hüttensandmehls höher als die der Referenzmischung waren. Die flugaschehaltigen Mischungen wiesen eine geringere Festigkeit auf als die Referenz, da die Flugasche voll angerechnet wurde. Im Falle des CEM II/B-S 32,5 R wurde dagegen trotz voller Anrechnung der Flugasche nach 28 Tagen die Festigkeit der Referenz bei Kombination von Hüttensand und Flugasche erreicht. Diese Bindemittelkombination war demnach sehr günstig. Für die Mischungen mit dem CEM II ergaben sich geringfügig höhere Festigkeiten gegenüber den Mischungen mit dem CEM III. Ein Vergleich zwischen den CEM I-Mischungen und den anderen Mischungen konnte aufgrund der unterschiedlichen

Zementfestigkeitsklassen nicht durchgeführt werden. Die Ermittlung der Aktivitätsindizes bzw. bezogenen Druckfestigkeiten ergab eine deutliche altersabhängige Reaktivität der Zusatzstoffe. Bis zum Alter von 28 Tagen ist die Kombination des CEM II mit Flugasche und Hüttensandmehl wesentlich günstiger als mit dem CEM I. Nach 90 Tagen jedoch sind die bezogenen Druckfestigkeiten vergleichbar. Die zusatzstoffhaltigen Mischungen karbonatisierten erwartungsgemäß schneller als die Referenzmischungen. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der CEM II- und CEM III-Mischungen waren höher als die der CEM I-Mischungen bei ähnlichen Hüttensandmehlgehalten.

In Projektphase 3 wurden granulometrische Optimierungen zum Nachweis verbesserter Frisch- und Festbetoneigenschaften durchgeführt. Teilweise konnten geringere Wasseransprüche erreicht werden, die sich jedoch nicht in einer Festigkeitssteigerung der optimierten Mischungen bemerkbar machten. Generell ist festzuhalten, dass die in diesem Projekt durchgeführten granulometrischen Optimierungen nicht zielführend waren.

In Projektphase 4 wurde schließlich die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Projektphase 2 auf den Betonmaßstab überprüft. Die Druckfestigkeiten der Mischungen mit dem CEM I waren bei der Referenzmischung am höchsten, da die bei der Mischungskonzeption unterstellten Wirksamkeiten der Zusatzstoffe im Hinblick auf ihren Beitrag zur Festigkeit überschätzt wurden. Der Festigkeitsbeitrag im Mörtelmaßstab war deutlich höher. Bei Verwendung des CEM II wiesen die zusatzstoffhaltigen Betonmischungen ab einem Alter von 28 Tagen gleiche oder höhere Festigkeiten gegenüber der Referenzmischung auf. D. h., auch im Betonmaßstab war diese Kombination sehr günstig. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten waren für die zusatzstoffhaltigen Mischungen am höchsten. Wie im Mörtelmaßstab fielen die Karbonatisierungstiefen bei den Mischungen mit dem CEM II höher aus als bei den Mischungen mit dem CEM I. Größtenteils waren die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Mörtel höher als die der Betone, die im Bereich üblicher Normalbetone lagen. Die Dichte der zusatzstoffhaltigen Mischungen war erwartungsgemäß höher als die der Referenzmischungen.

Generell ist festzuhalten, dass die verschiedenen Ausgangsstoffchargen eine hohe Gleichmäßigkeit und somit vergleichbare Frisch- und Festbetoneigenschaften aufwiesen. Der Nachweis gleicher Leistungsfähigkeit von Mischungen mit und ohne gemeinsame Verwendung von Flugasche und Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff konnte nur teilweise erbracht werden. Die Mischungen mit dem CEM II stellten eine sehr günstige Kombination dar, mit der zum einen die Festigkeit der Referenzmischung und zum anderen auch die Festigkeiten der Mischungen mit dem CEM III geringfügig übertroffen werden konnten.



Bei Verwendung des CEM I wiesen die hüttensandmehl- und flugaschehaltigen Mischungen jedoch eine geringere Festigkeit auf als die Referenz. Auch im Betonmaßstab war die Kombination mit dem CEM II am günstigsten, insofern ist eine Übertragbarkeit gegeben. Tendenziell verliefen auch die Karbonatisierungen der Betone entsprechend den Mörteln, d. h. je mehr Zusatzstoffe enthalten waren, desto höher waren die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten.

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

## 5 LITERATUR

- /AST78/ ASTM G 57-06: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method
- /BRA06/ Brameshuber, W. ; Uebachs, S.: Einfluss der Granulometrie des Zementes und der Betonzusatzstoffe auf die rheologischen Eigenschaften von selbstverdichtenden Mörteln. Weimar : F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2006. - In: 16. Internationale Baustofftagung, ibausil, 20. - 23. September 2006, Weimar, Tagungsbände, Band 2, S. 2-0109-2-0116
- /BUN91/ Bunke, N.: Prüfung von Beton : Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422
- /DAF03/ DAfStb ; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton ; SVB-Richtlinie: DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton. (SVB-Richtlinie) (Ausg. 11.03) Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
- /DAF07/ DAfStb ; Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Hüttensandmehl als Betonzusatzstoff - Sachstand und Szenarien für die Anwendung in Deutschland. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2007), Nr. 569
- /DIB08/ DIBt Mitteilungen ; Bauregelliste: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C (Ausgabe 2008/1). In: DIBt Mitteilungen 39 (2008), Nr. 36 Sonderheft
- /DIN91/ DIN 1048-5:1991-06 Prüfverfahren für Beton ; Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Prüfkörper
- /DIN98/ DIN EN 1015-7:1998-12 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk ; Teil 7: Bestimmung des Luftgehaltes von Frischmörtel
- /DIN04/ DIN EN 197-1:2004-08 Zement ; Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
- /DIN05a/ DIN EN 196-1:2005-05 Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- /DIN05b/ DIN EN 206-1:2005-09 Beton ; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- /DIN06/ DIN EN 15167-1:2006-12 Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel ; Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien

- /DIN07a/ DIN EN 1015-3:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk ; Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)
- /DIN07b/ DIN EN 1015-6:2007-05 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte von Frischmörtel
- /DIN07c/ DIN-Fachbericht CEN/TR 196-4:2007-11 Prüfverfahren für Zement – Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile
- /DIN08a/ DIN EN 450-1:2008-05 Flugasche für Beton ; Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /DIN08b/ DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton ; Teil 2: Beton ; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 + A1:2005
- /DIN08c/ DIN EN 12620:2008-07 Gesteinskörnungen für Beton
- /DIN09a/ DIN EN 12350-5:2009-08 Prüfung von Frischbeton ; Teil 5: Ausbreitmaß
- /DIN09b/ DIN EN 12350-6:2009-08 Prüfung von Frischbeton ; Teil 6: Frischbetonrohddichte
- /DIN09c/ DIN EN 12350-7:2009-08 Prüfung von Frischbeton ; Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren
- /DIN09d/ DIN EN 12390-3:2009-07 Prüfung von Festbeton ; Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- /DIN09e/ DIN EN 13263-1:2009-07 Silikastaub für Beton ; Teil 1: Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien
- /FUN94/ Funk, J. E. ; Dinger, D. R.: Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1994

Tabelle A1: Chemische Analyse der 6 Chargen der Zemente mittels RFA

Bestandteile	Einheit	CEM I 42,5 R			CEM II/B-S 32,5 R			CEM III/A 32,5 N		
		Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
GLV	M.-%	2,93	3,68	3,31	2,68	3,01	2,83	2,74	3,66	3,12
SiO <sub>2</sub>		19,69	20,21	20,01	23,67	25,18	24,35	26,98	28,23	27,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,19	4,50	4,37	6,11	6,76	6,4	7,94	8,48	8,19
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3,94	4,16	4,04	2,89	3,14	3,01	1,89	2,14	2,00
CaO		63,06	63,85	63,38	55,74	57,40	56,51	49,00	50,67	50,18
MgO		0,92	1,08	0,99	2,62	3,13	2,82	3,62	4,77	4,34
SO <sub>3</sub>		2,77	3,08	2,91	3,04	3,47	3,27	2,83	3,32	3,07
K <sub>2</sub> O		0,41	0,48	0,45	0,44	0,51	0,47	0,44	0,49	0,46
Na <sub>2</sub> O		0,10	0,15	0,11	0,13	0,17	0,15	0,18	0,20	0,20
TiO <sub>2</sub>		0,21	0,24	0,22	0,35	0,49	0,43	0,43	0,64	0,58
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,15	0,19	0,17	0,12	0,13	0,12	0,07	0,09	0,08
MnO		0,06	0,07	0,06	0,15	0,17	0,15	0,21	0,26	0,24
SrO		0,09	0,10	0,09	-	-	-	-	-	-
Total			99,86	100,51	100,13	100,29	101,01	100,52	99,53	101,02

Tabelle A2: Analyse der 6 Chargen der Zemente mittels RDA und Rietveld-Analyse

Bestandteile	Einheit	CEM I 42,5 R			CEM II/B-S 32,5 R			CEM III/A 32,5 N		
		Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C <sub>3</sub> S	M.-%	56,33	61,83	59,53	34,74	42,24	39,33	23,69	27,31	25,09
C <sub>2</sub> S		13,54	19,83	15,67	8,79	14,95	10,64	5,91	9,39	6,89
C <sub>3</sub> A (kubisch)		1,26	2,77	2,30	1,25	2,09	1,73	1,04	1,45	1,22
C <sub>3</sub> A (orthorhombisch)		0,39	1,44	0,78	0,00	0,48	0,29	0,07	0,43	0,26
C <sub>4</sub> AF		11,12	11,92	11,55	7,55	8,23	7,92	4,91	5,46	5,12
MgO		0,09	0,21	0,16	0,07	0,22	0,16	0,05	0,13	0,09
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		0,32	0,53	0,43	0,16	0,29	0,25	0,23	0,43	0,35
Gips		0,22	0,97	0,59	1,40	2,00	1,65	1,53	1,88	1,71
Halbhydrat		0,50	1,24	0,83	0,46	1,16	0,77	0,58	1,08	0,76
Anhydrit		2,61	3,43	2,91	2,66	3,02	2,79	2,53	3,30	2,99
Calcit		4,54	5,84	5,21	4,78	5,11	4,99	4,20	6,27	5,16
Quarz		0,27	0,78	0,53	0,37	0,68	0,50	0,46	0,93	0,75
CaO (Freikalk)		0,34	0,66	0,54	0,20	0,71	0,45	0,08	0,19	0,12
HSM			-	-	-	28,41	31,65	29,63	46,83	51,63

**Tabelle A3:** Physikalische Eigenschaften der Zemente

Bestandteile	Einheit	CEM I 42,5 R			CEM II/B-S 32,5 R			CEM III/A 32,5 N		
		Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	3,03	3,13	3,08	2,59	3,06	2,98	2,52	2,96	2,79
spez. Oberfläche (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3670	3920	3800	2420	3460	3000	2930	3930	3390

MW Mittelwert

**Tabelle A4:** Analyse der Flugaschen

Bestandteil / Parameter		Einheit	Min	Max	Mittelwert
1		2	3	4	5
GLV an Luft <sup>1)</sup>			2,46	3,79	3,27
Haupt- und Nebenbestandteile <sup>1)</sup>	Kohlenstoff als CO <sub>2</sub> (CSA)	M.-%	5,02	8,95	7,61
	als C		1,37	2,44	2,01
	Gesamtschwefel als SO <sub>3</sub> (CSA)		1,02	1,19	1,13
	Chlorid (HNO <sub>3</sub> -Aufschluss)		0,004	0,014	0,011
	SiO <sub>2</sub>		49,16	52,13	50,74
	TiO <sub>2</sub>		1,11	1,28	1,18
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		24,17	29,63	25,97
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		6,88	9,29	8,49
	MnO		0,05	0,07	0,06
	MgO		1,47	1,77	1,64
	CaO		2,58	3,28	2,97
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,37	0,55	0,47
	Na <sub>2</sub> O		0,97	1,51	1,34
K <sub>2</sub> O	2,45	2,96	2,81		

1) bezogen auf die getrocknete Probe

CSA: Kohlenstoffschwefelanalysator

Tabelle A5: Physikalische Eigenschaften der Flugaschen

Prüfparameter	Einheit	Min	Max	Mittelwert
1	2	3	4	5
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,24	2,30	2,27
spez. Oberfläche (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3150	3600	3370
Kornanteil > 90 µm	M.-%	8,1	12,0	10,2
Kornanteil > 40 µm		19,9	26,3	23,9

Tabelle A6: Chemische Analyse der Hüttensandmehle mittels RFA

Bestandteile	Einheit	Prüfwert		
		Min	Max	Mittelwert
1	2	3	4	5
GLV	M.-%	0,36	0,42	0,41
SiO <sub>2</sub>		35,05	35,86	35,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		10,89	11,17	11,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,54	0,91	0,67
CaO		42,92	43,72	43,34
MgO		5,98	6,32	6,18
TiO <sub>2</sub>		0,70	0,86	0,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,01	0,02	0,01
MnO		0,18	0,23	0,21
Total		99,51	100,20	100,01

Tabelle A7 Physikalische Eigenschaften der Hüttensandmehle

Prüfparameter	Einheit	Min	Max	Mittelwert
1	2	3	4	5
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	2,87	2,92	2,91
spez. Oberfläche (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	3880	4120	4022
Glasgehalt (lichtmikroskopisch)	M.-%	91,7	97,8	95,1

Tabelle A8 Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 1 mit der ersten Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	k/h <sub>ges</sub>	f/(z + h)
-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-
1	2	3	4	5	6
M 1.1.0	218	1,6	2,30	100/0	0
M 1.1.1	220	1,7	2,25		0,33
M 1.1.2	212	1,8	2,29	65/35	0
M 1.1.3	225	1,6	2,26		0,33
M 1.1.4	217	1,4	2,26	50/50	0
M 1.1.5	228	1,7	2,29		0,33
M 1.1.6	219	1,8	2,29	35/65	0
M 1.1.7	230	1,4	2,27		0,33
M 1.2.0	206	2,0	2,28	70/30	0
M 1.2.1	219	1,5	2,26		0,33
M 1.2.2	209	1,7	2,28	54/46	0
M 1.2.3	217	1,8	2,27		0,33
M 1.2.4	211	1,6	2,29	38/62	0
M 1.2.5	219	1,5	2,26		0,33
M 1.2.6	203	2,3	2,28	65/35	0
M 1.2.7	223	2,2	2,25		0,33
M 1.3.0	205	2,1	2,27	50/50	0
M 1.3.1	217	1,8	2,25		0,33
M 1.3.2	214	2,1	2,27	35/65	0
M 1.3.3	216	1,7	2,25		0,33

Tabelle A9: Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 2 mit der zweiten Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	k/h <sub>ges</sub>	f/(z + h)
-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-
1	2	3	4	5	6
M 2.1.0	221	2,2	2,30	100/0	0
M 2.1.1	226	2,3	2,26		0,33
M 2.1.2	214	2,0	2,28	65/35	0
M 2.1.3	224	2,0	2,24		0,33
M 2.1.4	216	1,9	2,28	50/50	0
M 2.1.5	221	2,0	2,23		0,33
M 2.1.6	218	2,3	2,29	35/65	0
M 2.1.7	225	2,1	2,24		0,33
M 2.2.0	228	2,0	2,30	70/30	0
M 2.2.1	228	2,2	2,25		0,33
M 2.2.2	205	2,2	2,29	54/46	0
M 2.2.3	220	2,3	2,26		0,33
M 2.2.4	212	2,1	2,31	38/62	0
M 2.2.5	213	2,1	2,25		0,33
M 2.3.0	204	2,4	2,27	50/50	0
M 2.3.1	212	2,3	2,23		0,33

Tabelle A10: Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 3 mit der dritten Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	k/h <sub>ges</sub>	f/(z + h)
-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-
1	2	3	4	5	6
M 3.1.0	209	2,3	2,30	100/0	0
M 3.1.1	227	2,1	2,27		0,33
M 3.1.2	225	2,5	2,28	65/35	0
M 3.1.3	242	2,2	2,26		0,33
M 3.1.4	224	2,3	2,29	50/50	0
M 3.1.5	227	2,2	2,23		0,33
M 3.1.6	215	2,2	2,30	35/65	0
M 3.1.7	226	2,1	2,24		0,33
M 3.2.0	222	2,2	2,29	70/30	0
M 3.2.1	216	2,0	2,26		0,33
M 3.2.2	216	2,0	2,28	54/46	0
M 3.2.3	227	1,8	2,25		0,33
M 3.2.4	206	2,0	2,30	38/62	0
M 3.2.5	227	1,9	2,28		0,33
M 3.3.0	204	2,2	2,28	50/50	0
M 3.3.1	210	2,2	2,24		0,33



Tabelle A11: Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 4 mit der vierten Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	$k/h_{\text{ges}}$	$f/(z + h)$
-	mm	Vol.-%	$\text{g/cm}^3$	-	-
1	2	3	4	5	6
M 4.1.0	217	1,9	2,29	100/0	0
M 4.1.1	225	2,1	2,24		0,33
M 4.1.2	217	2,3	2,27	65/35	0
M 4.1.3	223	2,0	2,24		0,33
M 4.1.4	206	2,3	2,26	50/50	0
M 4.1.5	223	2,0	2,23		0,33
M 4.1.6	217	2,1	2,27	35/65	0
M 4.1.7	229	1,9	2,25		0,33
M 4.2.0	220	2,2	2,28	70/30	0
M 4.2.1	230	1,7	2,25		0,33
M 4.2.2	218	2,1	2,26	54/46	0
M 4.2.3	235	1,8	2,25		0,33
M 4.2.4	221	2,2	2,26	38/62	0
M 4.2.5	233	2,1	2,24		0,33
M 4.3.0	224	2,2	2,27	50/50	0
M 4.3.1	227	1,8	2,24		0,33

Tabelle A12: Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 5 mit der fünften Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	$k/h_{\text{ges}}$	$f/(z + h)$
-	mm	Vol.-%	$\text{g/cm}^3$	-	-
1	2	3	4	5	6
M 5.1.0	216	2,0	2,29	100/0	0
M 5.1.1	204	2,4	2,25		0,33
M 5.1.2	225	2,3	2,27	65/35	0
M 5.1.3	220	1,7	2,27		0,33
M 5.1.4	221	1,7	2,3	50/50	0
M 5.1.5	224	1,7	2,25		0,33
M 5.1.6	226	2,3	2,27	35/65	0
M 5.1.7	225	2,0	2,24		0,33
M 5.2.0	224	2,1	2,29	70/30	0
M 5.2.1	214	2,2	2,24		0,33
M 5.2.2	222	1,9	2,27	54/46	0
M 5.2.3	228	2,2	2,26		0,33
M 5.2.4	225	2,0	2,27	38/62	0
M 5.2.5	226	2,0	2,26		0,33
M 5.3.0	208	2,4	2,26	50/50	0
M 5.3.1	221	2,2	2,24		0,33

Tabelle A13: Frischmörteleigenschaften der Mischungen M 6 mit der sechsten Charge

Bezeichnung	ABM	Luftgehalt	Rohdichte	k/h <sub>ges</sub>	f/(z + h)
-	mm	Vol.-%	g/cm <sup>3</sup>	-	-
1	2	3	4	5	6
M 6.1.0	214	2,4	2,29	100/0	0
M 6.1.1	219	2,5	2,26		0,33
M 6.1.2	215	2,5	2,29	65/35	0
M 6.1.3	229	1,9	2,27		0,33
M 6.1.4	213	2,3	2,30	50/50	0
M 6.1.5	229	2,2	2,26		0,33
M 6.1.6	220	2,2	2,28	35/65	0
M 6.1.7	227	2,2	2,25		0,33
M 6.2.0	209	2,1	2,25	70/30	0
M 6.2.1	225	2,1	2,27		0,33
M 6.2.2	209	2,2	2,28	54/46	0
M 6.2.3	215	2,3	2,24		0,33
M 6.2.4	210	2,4	2,27	38/62	0
M 6.2.5	221	2,3	2,24		0,33
M 6.3.0	201	2,2	2,27	50/50	0
M 6.3.1	218	2,3	2,25		0,33

Tabelle A14: Biegezugfestigkeiten aller Chargen nach 2 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	5,3	4,4	5,2	4,9	5,2	5,2	5,0
M X.1.1		5,0	3,8	3,9	4,2	4,2	4,1	4,2
M X.1.2		4,5	3,9	3,8	4,0	4,3	4,1	4,1
M X.1.3		3,9	2,9	3,2	3,9	3,2	3,2	3,4
M X.1.4		4,1	3,3	3,2	3,9	3,8	3,6	3,6
M X.1.5		2,7	2,3	2,6	2,6	2,7	2,4	2,5
M X.1.6		2,7	2,5	2,6	2,6	3,0	2,2	2,6
M X.1.7		2,0	1,8	1,8	<sup>1)</sup>	2,0	1,6	1,8
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	3,3	2,8	2,7	2,9	2,8	2,0	2,7
M X.2.1		2,2	1,9	1,9	1,9	2,2	1,4	1,9
M X.2.2		3,0	2,7	2,7	3,4	3,3	2,3	2,9
M X.2.3		2,1	2,6	2,2	2,6	2,5	1,5	2,2
M X.2.4		2,4	3,0	2,6	2,7	2,7	1,9	2,5
M X.2.5		1,7	2,2	1,8	1,7	1,9	1,0	1,7
M X.2.6		3,3	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		2,4	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	2,6	3,2	3,0	2,4	2,4	2,0	2,6
M X.3.1		1,9	2,6	2,2	1,7	1,6	1,4	1,9
M X.3.2		2,8	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		1,8	-	-	-	-	-	-

Tabelle A15: Biegezugfestigkeiten aller Chargen nach 7 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	6,9	6,7	6,8	7,1	6,9	6,7	6,8
M X.1.1		6,1	5,4	5,5	5,7	5,6	5,9	5,7
M X.1.2		6,4	6,1	6,2	6,2	6,2	5,8	6,1
M X.1.3		4,9	5,2	5,3	5,3	5,2	5,0	5,1
M X.1.4		5,4	5,7	5,4	5,9	5,9	5,3	5,6
M X.1.5		4,5	4,8	4,6	4,9	4,9	4,7	4,7
M X.1.6		4,7	5,7	5,1	5,4	5,4	4,7	5,1
M X.1.7		3,9	5,4	4,9	4,8	4,7	4,0	4,6
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	4,5	5,0	4,7	4,6	4,7	4,5	4,6
M X.2.1		3,5	4,0	3,5	3,7	4,2	3,7	3,8
M X.2.2		4,6	5,5	4,5	5,0	5,2	4,5	4,9
M X.2.3		3,9	4,9	4,3	4,4	4,4	3,9	4,3
M X.2.4		5,0	5,7	5,4	5,1	5,1	4,2	5,1
M X.2.5		4,2	5,2	5,0	3,9	4,2	4,0	4,4
M X.2.6		4,8	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		3,8	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	4,8	5,3	5,8	4,9	4,6	4,8	5,0
M X.3.1		4,0	4,3	4,5	3,6	4,0	4,3	4,1
M X.3.2		4,7	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		4,2	-	-	-	-	-	-

Tabelle A16: Biegezugfestigkeiten aller Chargen nach 28 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	7,8	7,8	7,7	7,9	8,5	7,7	7,9
M X.1.1		7,6	6,6	7,5	7,4	7,3	7,6	7,3
M X.1.2		7,8	7,8	8,3	8,2	7,9	7,6	7,9
M X.1.3		7,4	7,1	6,6	8,0	8,3	7,0	7,4
M X.1.4		7,9	8,1	7,9	8,6	8,0	6,7	7,9
M X.1.5		6,6	7,2	6,8	7,5	7,3	6,4	7,0
M X.1.6		7,5	7,2	7,7	7,9	7,6	6,7	7,4
M X.1.7		7,3	6,8	7,0	6,8	7,1	6,6	6,9
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	7,2	6,9	6,6	6,8	7,2	8,1	7,1
M X.2.1		7,0	6,7	6,1	6,3	6,4	7,3	6,6
M X.2.2		7,3	7,6	7,2	7,4	7,7	8,1	7,5
M X.2.3		6,8	6,3	6,7	7,1	6,6	7,3	6,8
M X.2.4		7,8	7,5	7,6	7,9	7,8	7,8	7,7
M X.2.5		7,3	7,5	7,0	5,7	7,2	7,2	7,0
M X.2.6		7,5	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		6,6	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	8,3	7,9	8,5	8,5	7,5	7,9	8,1
M X.3.1		6,7	6,8	7,1	7,2	6,7	7,0	6,9
M X.3.2		7,8	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		7,1	-	-	-	-	-	-

Tabelle A17: Biegezugfestigkeiten aller Chargen nach 90 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	8,8	8,0	8,1	8,8	8,7	8,9	8,6
M X.1.1		9,3	8,5	8,7	8,6	8,5	8,7	8,7
M X.1.2		8,7	9,2	9,0	9,1	9,3	8,6	9,0
M X.1.3		8,0	8,6	8,3	8,8	8,9	8,3	8,5
M X.1.4		9,1	9,3	8,9	8,8	8,5	8,7	8,9
M X.1.5		8,6	8,5	8,6	9,2	8,8	8,0	8,6
M X.1.6		9,5	9,1	9,4	9,7	9,0	8,2	9,1
M X.1.7		8,6	8,6	8,8	9,0	8,5	8,5	8,6
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	8,8	8,4	8,3	8,3	8,4	9,3	8,6
M X.2.1		9,2	8,3	7,9	8,4	8,4	9,3	8,6
M X.2.2		9,6	9,1	8,6	9,0	8,9	9,2	9,1
M X.2.3		8,0	8,6	8,2	7,9	8,9	8,5	8,4
M X.2.4		8,9	9,3	8,4	8,9	9,0	9,1	8,9
M X.2.5		9,0	8,7	8,4	6,5	8,5	8,2	8,2
M X.2.6		8,9	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		8,5	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	9,5	8,9	10,0	9,9	9,3	8,7	9,4
M X.3.1		9,1	8,4	8,9	8,6	8,5	8,5	8,7
M X.3.2		8,9	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		8,4	-	-	-	-	-	-

Tabelle A18: Mörteldruckfestigkeiten aller Chargen nach 2 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	26,1	22,4	22,3	26,8	26,5	25,9	25,0
M X.1.1		23,2	18,0	18,2	18,9	19,5	19,3	19,5
M X.1.2		21,7	16,5	16,1	16,8	17,4	17,7	17,7
M X.1.3		14,0	11,9	13,1	13,4	12,4	12,9	13,0
M X.1.4		15,2	12,5	11,8	14,2	14,1	13,0	13,5
M X.1.5		8,8	8,3	9,0	9,0	9,1	8,8	8,8
M X.1.6		9,3	8,7	9,4	9,9	10,1	8,4	9,3
M X.1.7		6,0	5,5	6,2	6,2	6,8	5,5	6,0
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	11,7	11,9	11,5	11,8	12,9	7,8	11,3
M X.2.1		8,5	7,9	7,6	7,9	9,3	5,3	7,8
M X.2.2		11,1	11,4	10,1	11,9	13,2	8,2	11,0
M X.2.3		7,5	9,9	7,3	8,5	8,5	4,9	7,8
M X.2.4		7,7	11,0	8,7	8,4	9,6	6,3	8,6
M X.2.5		5,3	6,9	5,6	5,1	6,4	3,4	5,4
M X.2.6		12,9	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		9,1	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	10,0	14,9	10,1	9,4	8,9	7,6	10,1
M X.3.1		6,9	10,1	7,5	6,1	6,2	5,0	6,9
M X.3.2		9,2	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		5,7	-	-	-	-	-	-

Tabelle A19: Mörteldruckfestigkeiten aller Chargen nach 7 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	43,7	42,6	42,3	46,6	44,8	43,1	43,9
M X.1.1		31,6	32,0	30,3	32,5	31,6	32,1	31,7
M X.1.2		30,2	35,5	34,2	35,9	34,5	33,0	33,9
M X.1.3		24,0	28,3	26,7	29,2	25,9	25,1	26,5
M X.1.4		26,5	34,3	28,1	32,8	32,6	28,7	30,5
M X.1.5		19,3	24,5	22,3	21,1	22,5	21,4	21,9
M X.1.6		22,3	31,5	27,6	27,5	25,4	23,7	26,3
M X.1.7		14,4	24,5	20,7	18,8	19,1	17,2	19,1
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	23,3	27,9	24,1	24,7	25,7	21,9	24,6
M X.2.1		16,2	19,6	16,3	16,4	19,0	15,8	17,2
M X.2.2		22,1	27,2	22,3	24,2	24,6	21,8	23,7
M X.2.3		15,7	22,5	18,9	20,6	18,4	16,2	18,7
M X.2.4		21,9	28,1	24,8	22,5	22,8	22,7	23,8
M X.2.5		17,6	23,5	20,7	17,0	19,3	16,8	19,1
M X.2.6		23,0	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		16,1	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	23,4	27,1	24,8	22,9	21,9	22,6	23,8
M X.3.1		18,7	19,9	19,3	15,6	15,6	17,5	17,8
M X.3.2		22,2	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		18,1	-	-	-	-	-	-



Tabelle A20: Mörteldruckfestigkeiten aller Chargen nach 28 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	51,7	47,8	48,4	54,9	50,2	52,2	50,9
M X.1.1		41,6	39,8	41,0	40,8	40,8	44,3	41,4
M X.1.2		55,9	55,7	54,2	60,7	57,4	54,8	56,5
M X.1.3		47,0	49,2	45,9	52,4	51,2	47,0	48,8
M X.1.4		56,9	54,8	55,2	59,9	60,2	51,3	56,4
M X.1.5		43,2	46,7	44,1	51,2	50,2	41,4	46,1
M X.1.6		50,9	53,2	51,7	54,9	54,3	49,0	52,3
M X.1.7		39,6	45,7	45,4	48,6	46,9	40,7	44,5
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	39,5	40,6	37,2	36,4	39,5	40,6	39,0
M X.2.1		33,5	33,1	30,8	31,3	31,5	34,9	32,5
M X.2.2		45,6	47,8	44,0	48,1	50,9	43,3	46,6
M X.2.3		41,0	39,3	38,7	42,2	41,7	36,6	39,9
M X.2.4		49,0	49,9	45,2	49,2	51,3	43,7	48,1
M X.2.5		41,3	42,7	39,0	31,0	44,3	36,5	39,1
M X.2.6		43,4	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		37,0	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	44,3	40,4	44,6	40,7	43,3	43,7	42,8
M X.3.1		37,8	32,9	35,1	35,7	36,1	35,2	35,5
M X.3.2		45,2	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		38,1	-	-	-	-	-	-

Tabelle A21: Mörteldruckfestigkeiten aller Chargen nach 90 Tagen

Bezeichnung	Zementart	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	-	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0	CEM I 42,5 R	64,7	59,3	60,1	64,1	62,9	65,5	62,8
M X.1.1		55,1	59,3	58,5	60,3	57,2	63,6	59,0
M X.1.2		66,4	74,4	72,0	77,6	72,8	66,8	71,7
M X.1.3		64,6	64,8	69,3	70,4	68,4	63,8	66,9
M X.1.4		75,1	74,5	72,7	74,6	78,2	71,5	74,4
M X.1.5		66,1	65,4	62,7	68,4	69,5	65,3	66,2
M X.1.6		70,9	71,1	70,4	72,6	70,6	74,2	71,6
M X.1.7		65,5	64,9	61,2	65,8	69,2	63,9	65,1
M X.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	54,3	56,8	53,1	50,6	53,4	56,4	54,1
M X.2.1		47,2	51,8	48,0	49,1	50,3	51,1	49,6
M X.2.2		63,3	66,4	62,8	64,1	68,8	56,2	63,6
M X.2.3		53,7	59,6	57,2	62,5	62,4	49,8	57,5
M X.2.4		65,8	72,6	67,3	71,0	72,9	56,9	67,8
M X.2.5		60,4	60,8	58,8	43,2	65,0	47,9	56,0
M X.2.6		55,8	-	-	-	-	-	-
M X.2.7		52,0	-	-	-	-	-	-
M X.3.0	CEM III/A 32,5 N	60,7	54,4	55,3	53,1	58,2	57,6	56,6
M X.3.1		55,5	48,9	49,1	52,5	54,7	48,2	51,5
M X.3.2		63,0	-	-	-	-	-	-
M X.3.3		52,1	-	-	-	-	-	-

**Tabelle A22:** Aktivitätsindizes für die verschiedenen Chargen der Flugasche  
(Mischung M X.1.1 bezogen auf M X.1.0)

Bezeichnung	Prüfalter	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	d	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0 M X.1.1	2	0,89	0,80	0,82	0,70	0,74	0,75	0,78
	7	0,72	0,75	0,72	0,70	0,71	0,74	0,72
	28	0,80	0,83	0,85	0,74	0,81	0,85	0,81
	90	0,85	1,00	0,97	0,94	0,91	0,97	0,94

**Tabelle A23:** Bezogene Druckfestigkeiten für die verschiedenen Chargen der Flugasche in Kombination mit CEM II/B-S 32,5 R  
(Mischung M X.2.1 bezogen auf M X.2.0)

Bezeichnung	Prüfalter	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	d	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.2.0 M X.2.1	2	0,73	0,66	0,66	0,67	0,72	0,68	0,69
	7	0,70	0,70	0,68	0,66	0,74	0,72	0,70
	28	0,85	0,82	0,83	0,86	0,80	0,86	0,83
	90	0,87	0,91	0,90	0,97	0,94	0,91	0,92

**Tabelle A24:** Bezogene Druckfestigkeiten für die verschiedenen Chargen der Flugasche in Kombination mit CEM III/A 32,5 N  
(Mischung M X.3.1 bezogen auf M X.3.0)

Bezeichnung	Prüfalter	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	d	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.3.0 M X.3.1	2	0,69	0,68	0,74	0,64	0,70	0,66	0,68
	7	0,80	0,73	0,78	0,68	0,71	0,77	0,75
	28	0,85	0,81	0,79	0,88	0,83	0,81	0,83
	90	0,91	0,90	0,89	0,99	0,94	0,84	0,91

**Tabelle A25:** Aktivitätsindizes für die verschiedenen Chargen der Hüttensandmehle  
(Mischung M X.1.4 bezogen auf M X.1.0)

Bezeichnung	Prüfalter	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	d	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.1.0 M X.1.4	2	0,58	0,56	0,53	0,53	0,53	0,50	0,54
	7	0,61	0,81	0,66	0,70	0,73	0,67	0,70
	28	1,10	1,15	1,14	1,09	1,20	0,98	1,11
	90	1,16	1,26	1,21	1,16	1,24	1,09	1,19

**Tabelle A26:** Bezogene Druckfestigkeiten für die verschiedenen Chargen der  
Hüttensandmehle in Kombination mit CEM II/B-S 32,5 R  
(Mischung M X.2.2 bezogen auf M X.2.0)

Bezeichnung	Prüfalter	Charge						Mittelwert
		1	2	3	4	5	6	
-	d	N/mm <sup>2</sup>						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
M X.2.0 M X.2.2	2	0,95	0,95	0,88	1,01	1,02	1,05	0,98
	7	0,95	0,97	0,93	0,98	0,96	1,00	0,96
	28	1,15	1,18	1,18	1,32	1,29	1,07	1,20
	90	1,17	1,17	1,18	1,27	1,29	1,00	1,18

Tabelle A27: Spaltzugfestigkeiten der ersten Charge

Bezeichnung	Zementart	Spaltzugfestigkeit nach			
		2 d	7 d	28 d	90 d
-	-	N/mm <sup>2</sup>			
1	2	3	4	5	6
M 1.1.0	CEM I 42,5 R	3,8	5,1	5,4	5,7
M 1.1.1		3,0	4,2	4,8	6,1
M 1.1.2		2,9	3,8 <sup>1)</sup>	5,6	6,7
M 1.1.3		2,0	3,4	5,0	6,3
M 1.1.4		2,2	3,6	5,4	6,3
M 1.1.5		1,7 <sup>2)</sup>	3,3	4,7	6,4
M 1.1.6		1,7	3,1	5,2	7,0
M 1.1.7		1,2	2,5	4,3	7,0
M 1.2.0	CEM II/B-S 32,5 R	1,9	3,1	4,9	5,9
M 1.2.1		1,6	2,7	4,0	5,9
M 1.2.2		2,0	3,2	5,0 <sup>2)</sup>	6,3
M 1.2.3		1,4	2,6	4,6	6,3
M 1.2.4		1,4	3,2	5,0	6,7
M 1.2.5		1,0	2,7	4,7	6,4 <sup>2)</sup>
M 1.2.6		2,3	3,5	4,9	5,1
M 1.2.7		1,8	2,4	4,0	5,5
M 1.3.0	CEM III/A 32,5 N	1,6	3,4	5,3	6,4
M 1.3.1		1,2	2,8	4,4	5,8
M 1.3.2		2,0	3,4	4,9	5,5
M 1.3.3		1,1	3,3	4,7	6,2

1) nur ein Wert gemessen

2) zwei Werte gemessen

Tabelle A28: Kapillare Wasseraufnahme

Bezeichnung	Zementart	Prüfalter	W <sub>kap</sub> bei abgedeckter Oberfläche nach						W <sub>A</sub>	W <sub>150bar</sub>
			1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h		
-	-	d	g/m <sup>2</sup>						M.-%	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	28	365	457	564	675	849	968	5,16	5,99
		90	275	325	383	483	638	755	5,00	5,85
M 1.0 b		28	472	555	679	824	1077	1228	5,39	6,28
		90	362	431	521	700	944	1110	5,51	6,37
M 1.1 a		28	239	297	345	408	526	599	4,75	5,57
		90	229	280	337	422	580	644	4,68	5,14
M 1.1 b		28	273	356	428	533	713	820	5,16	6,04
		90	392	484	624	781	1045	1126	5,20	5,89
M 1.2 a		28	132	309	462	619	933	1079	4,51	5,23
		90	439	615	815	934	1173	1211	4,66	5,47
M 1.2 b		28	394	627	881	1179	1735	1892	6,06	6,90
		90	583	777	1081	1263	1600	1671	5,98	6,89
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R	28	604	796	1001	1088	1608	1691	5,75	6,65
		90	253	328	403	504	698	838	5,74	6,50
M 2.0 b		28	461	577	708	774	1125	1244	5,37	6,21
		90	372	488	617	809	1119	1263	5,72	6,64
M 2.1 a		28	336	418	508	623	823	933	5,21	5,90
		90	290	347	405	484	612	678	5,05	5,40
M 2.1 b		28	350	440	553	687	918	1021	6,47	7,51
		90	258	322	390	443	588	752	5,62	6,66
M 2.2 a		28	248	290	351	430	575	691	5,71	6,54
		90	205	256	310	367	471	542	5,99	6,11
M 2.2 b		28	372	467	603	765	1078	1231	6,12	6,92
		90	344	433	543	673	905	998	6,38	7,00

W<sub>kap</sub>: kapillare Wasseraufnahme nach Lagerung im Normklima 20/65

W<sub>A</sub>: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

W<sub>150bar</sub>: Wasseraufnahme unter Druck von 150 bar

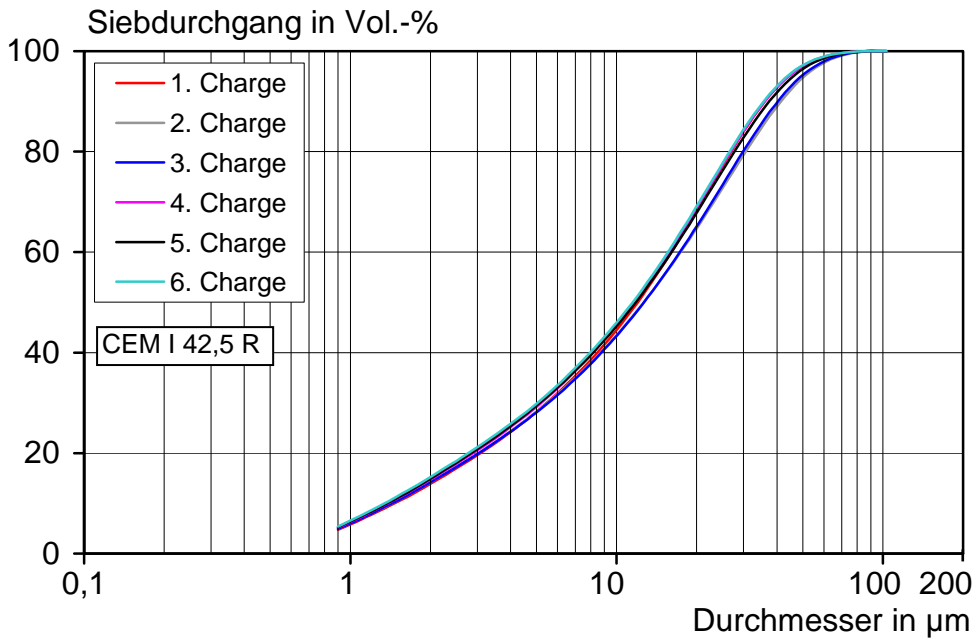
Tabelle A29: Kapillarer Sättigungsgrad

Bezeichnung	Zementart	Prüfalter	Kapillarer Sättigungsgrad bei							wasser- gelagerter Probe	
			Norm- klima 20/65	abgedeckter Oberfläche nach							
-	-	d		1 h	2 h	4 h	8 h	24 h	48 h	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	28	0,57	0,66	0,68	0,70	0,73	0,77	0,80	0,86	
		90	0,58	0,65	0,66	0,68	0,70	0,74	0,77	0,85	
M 1.0 b		28	0,52	0,62	0,64	0,67	0,71	0,77	0,81	0,86	
		90	0,53	0,62	0,63	0,66	0,70	0,76	0,80	0,86	
M 1.1 a		28	0,62	0,71	0,72	0,73	0,75	0,77	0,79	0,85	
		90	0,64	0,71	0,72	0,74	0,76	0,81	0,82	0,91	
M 1.1 b		28	0,58	0,62	0,64	0,65	0,67	0,71	0,74	0,86	
		90	0,54	0,64	0,66	0,70	0,74	0,81	0,83	0,88	
M 1.2 a		28	0,50	0,54	0,59	0,63	0,68	0,76	0,81	0,86	
		90	0,50	0,62	0,67	0,72	0,75	0,82	0,83	0,85	
M 1.2 b		28	0,45	0,54	0,59	0,64	0,70	0,82	0,85	0,88	
		90	0,46	0,60	0,64	0,71	0,75	0,83	0,84	0,87	
M 2.0 a		CEM II/B-S 32,5 R	28	0,49	0,58	0,62	0,66	0,68	0,79	0,81	0,87
			90	0,60	0,65	0,67	0,69	0,71	0,76	0,79	0,88
M 2.0 b	28		0,50	0,62	0,65	0,69	0,71	0,80	0,83	0,87	
	90		0,52	0,60	0,63	0,66	0,71	0,78	0,81	0,86	
M 2.1 a	28		0,62	0,69	0,71	0,73	0,76	0,81	0,83	0,88	
	90		0,70	0,78	0,80	0,81	0,83	0,87	0,89	0,93	
M 2.1 b	28		0,61	0,74	0,76	0,78	0,80	0,84	0,86	0,86	
	90		0,63	0,69	0,71	0,72	0,73	0,77	0,81	0,84	
M 2.2 a	28		0,67	0,73	0,74	0,76	0,77	0,81	0,83	0,87	
	90		0,70	0,75	0,76	0,77	0,79	0,81	0,83	0,90	
M 2.2 b	28		0,59	0,66	0,68	0,71	0,75	0,82	0,86	0,88	
	90		0,65	0,73	0,75	0,77	0,80	0,85	0,88	0,91	

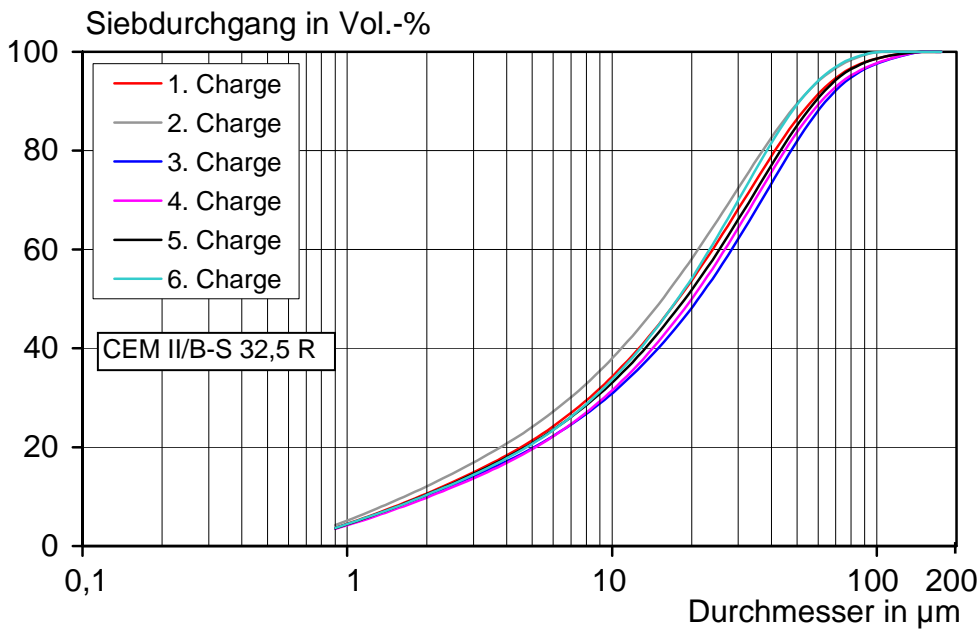
Tabelle A30: Elektrolytwiderstände der Betone

Bezeichnung	Zementart	Elektrolytwiderstand im Alter von		
		7 d	28 d	90 d
-	-	$\Omega\text{m}$		
1	2	3	4	5
M 1.0 a	CEM I 42,5 R	60,5	77,5	86,5
M 1.0 b		61,0	70,5	77,5
M 1.1 a		42,0	144,0	335,5
M 1.1 b		35,5	135,5	287,0
M 1.2 a		36,0	126,0	420,0
M 1.2 b		29,5	121,5	371,0
M 2.0 a	CEM II/B-S 32,5 R $h_z = 30 \text{ M.-%}$	63,5	109,5	170,0
M 2.0 b		51,5	81,5	167,0
M 2.1 a		70,0	198,5	469,0
M 2.1 b		62,0	203,0	443,5
M 2.2 a		103,0	333,0	753,5
M 2.2 b		40,0	207,0	549,0

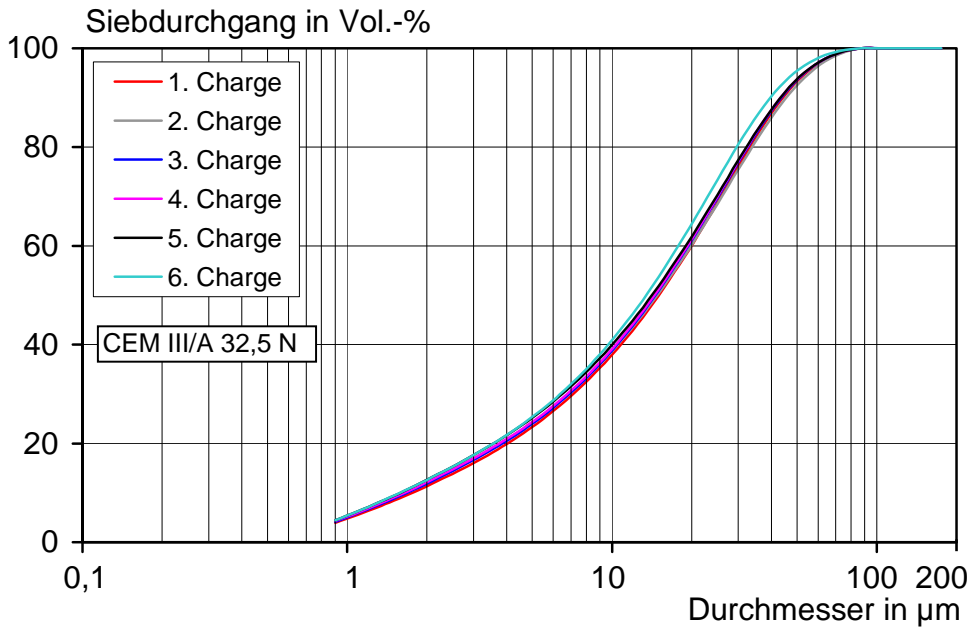




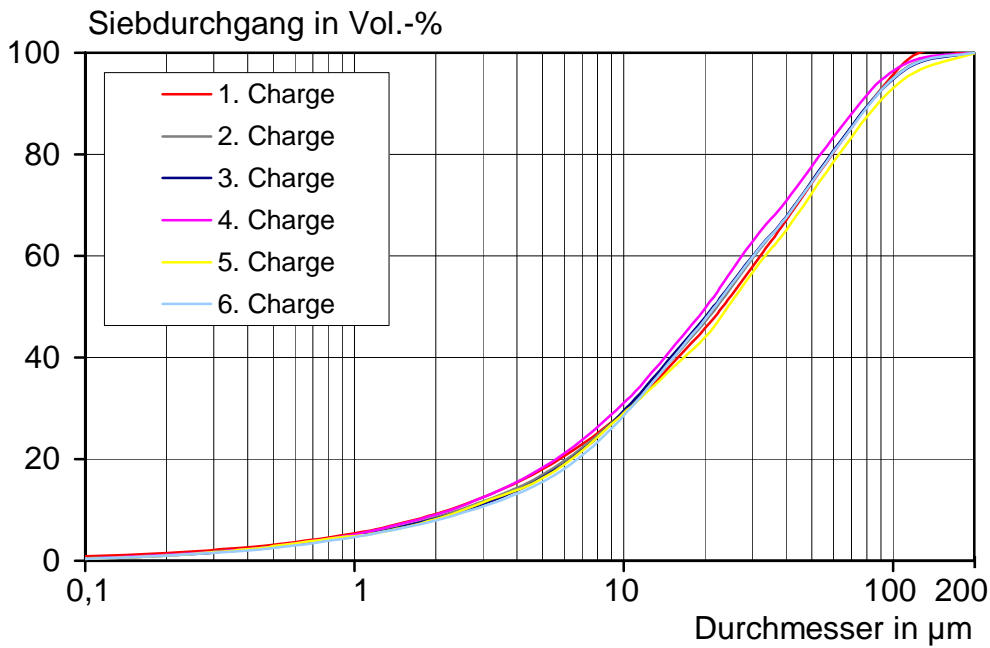
**Bild B1:** Korngrößenverteilung der 6 Chargen des CEM I 42,5 R



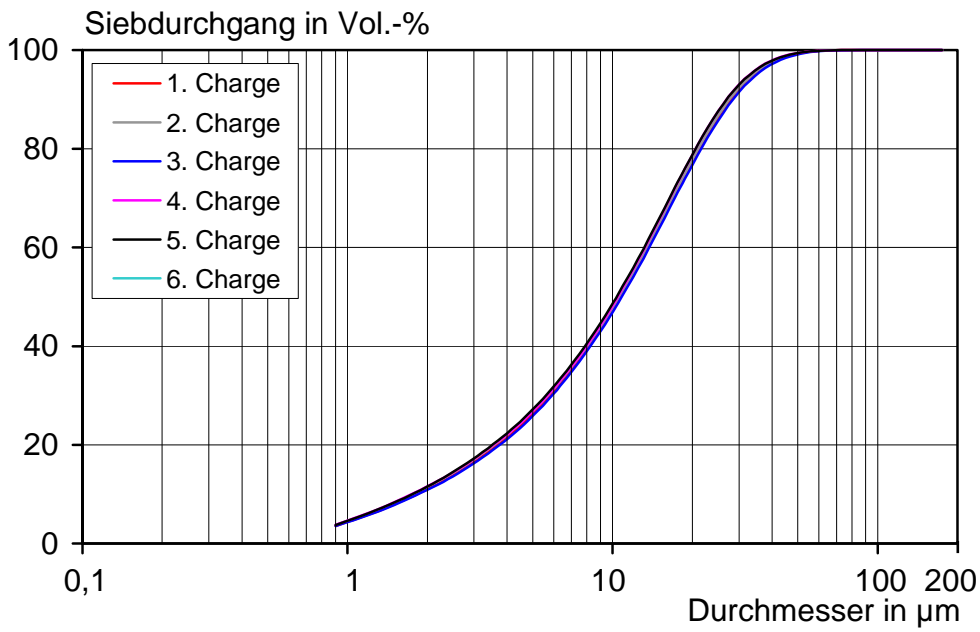
**Bild B2:** Korngrößenverteilung der 6 Chargen des CEM II/B-S 32,5 R



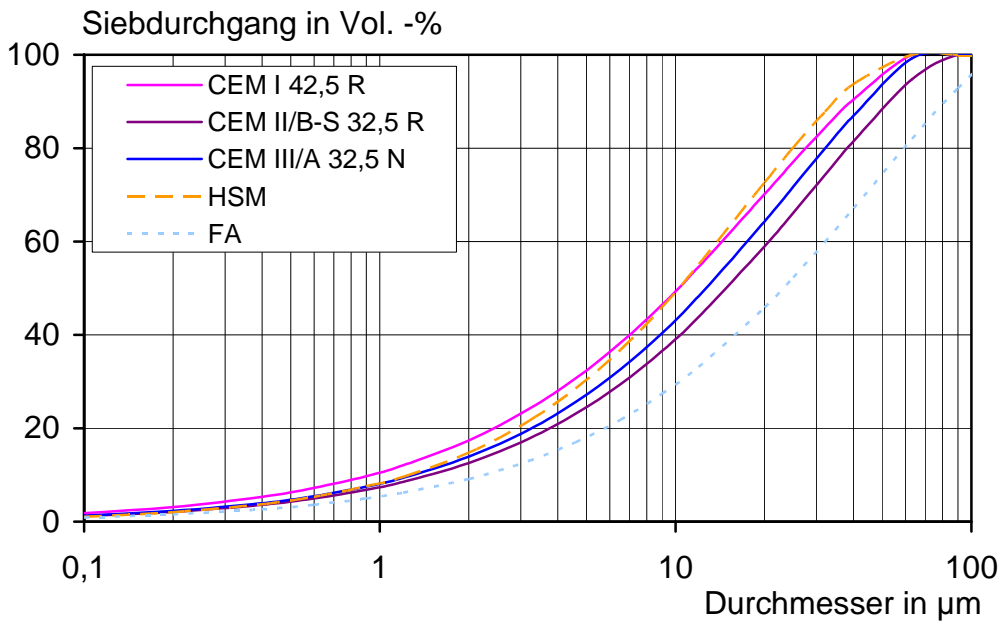
**Bild B3:** Korngrößenverteilung der 6 Chargen des CEM III/A 32,5 N



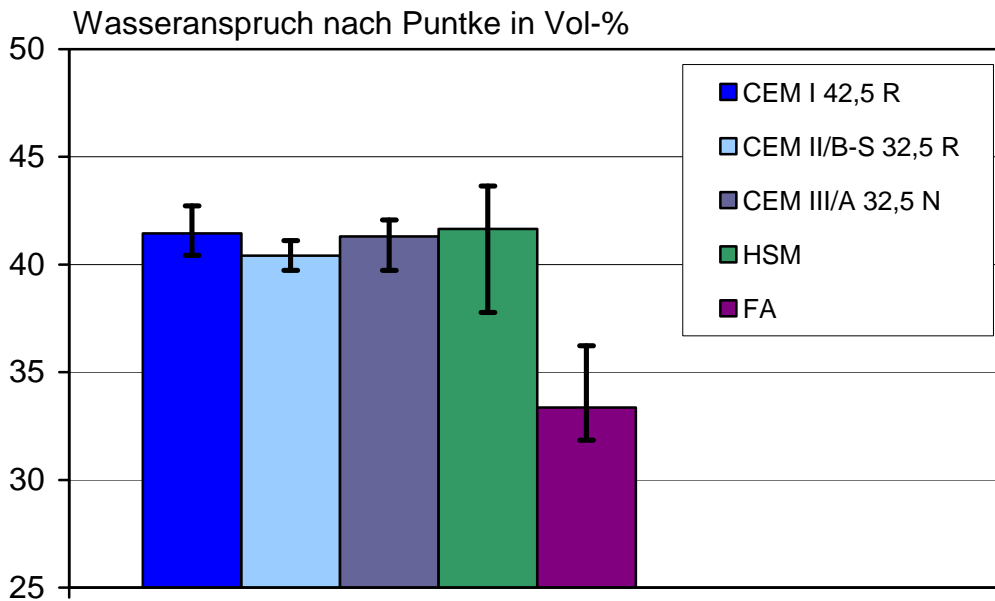
**Bild B4:** Korngrößenverteilung der 6 Chargen der Flugasche



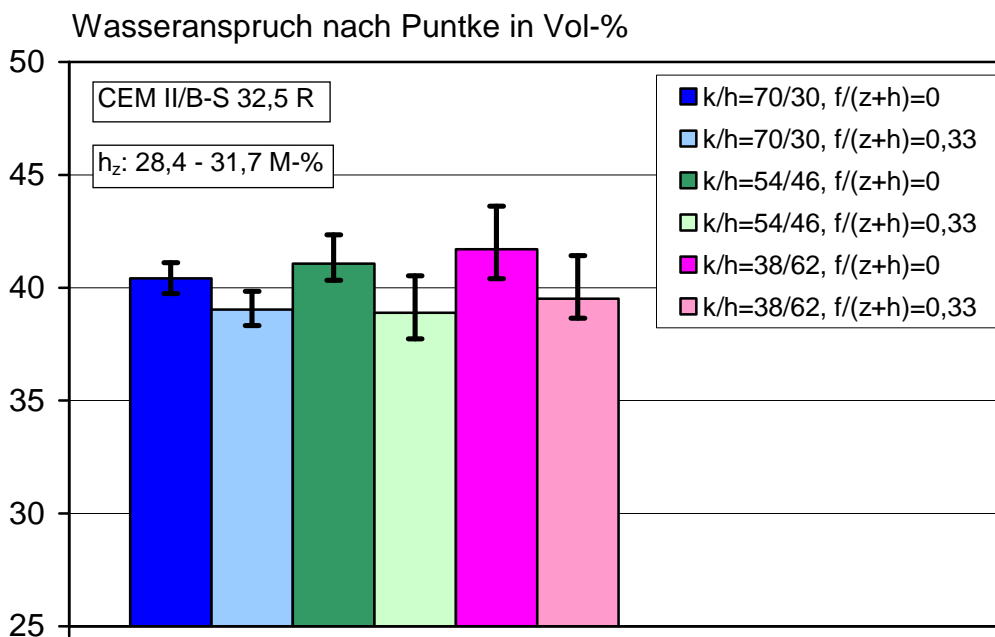
**Bild B5:** Korngrößenverteilung der 6 Chargen des Hüttensandmehls



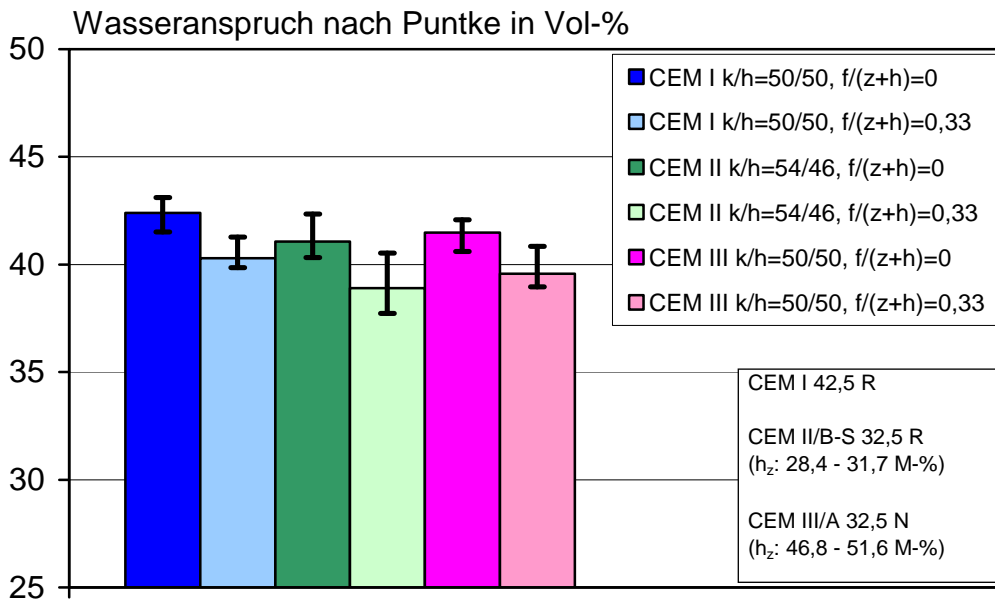
**Bild B6:** Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe der 1. Charge für Projektphase 2



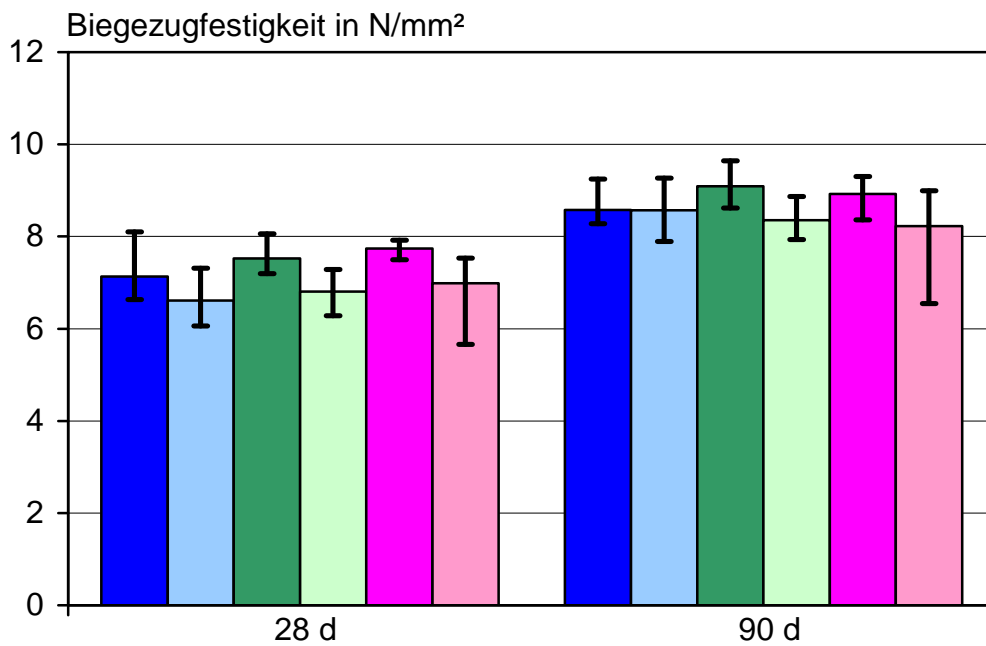
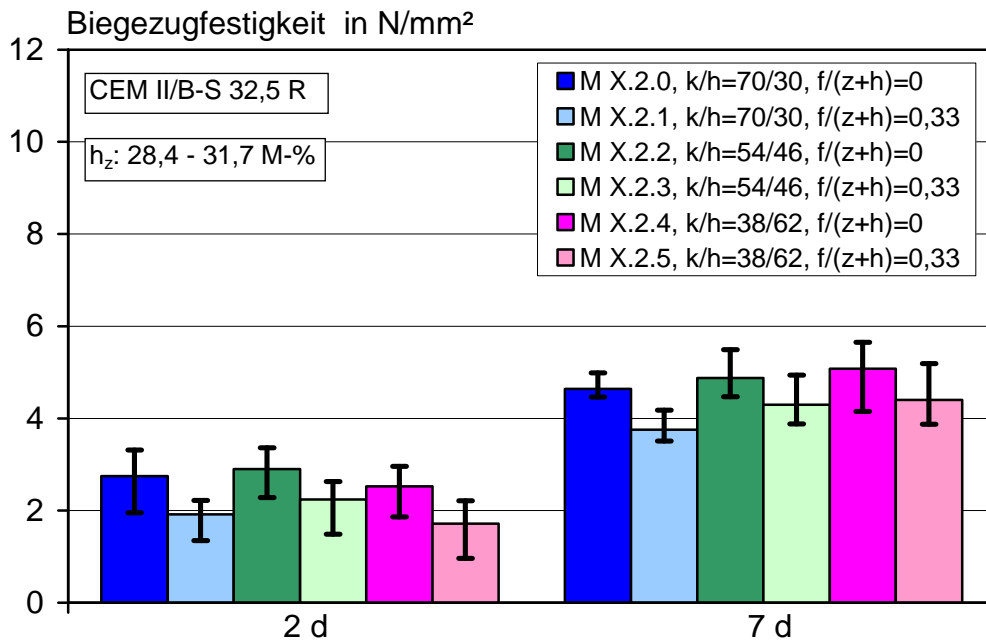
**Bild B7:** Wasseranspruch (inkl. Streubreiten) der Ausgangsstoffe



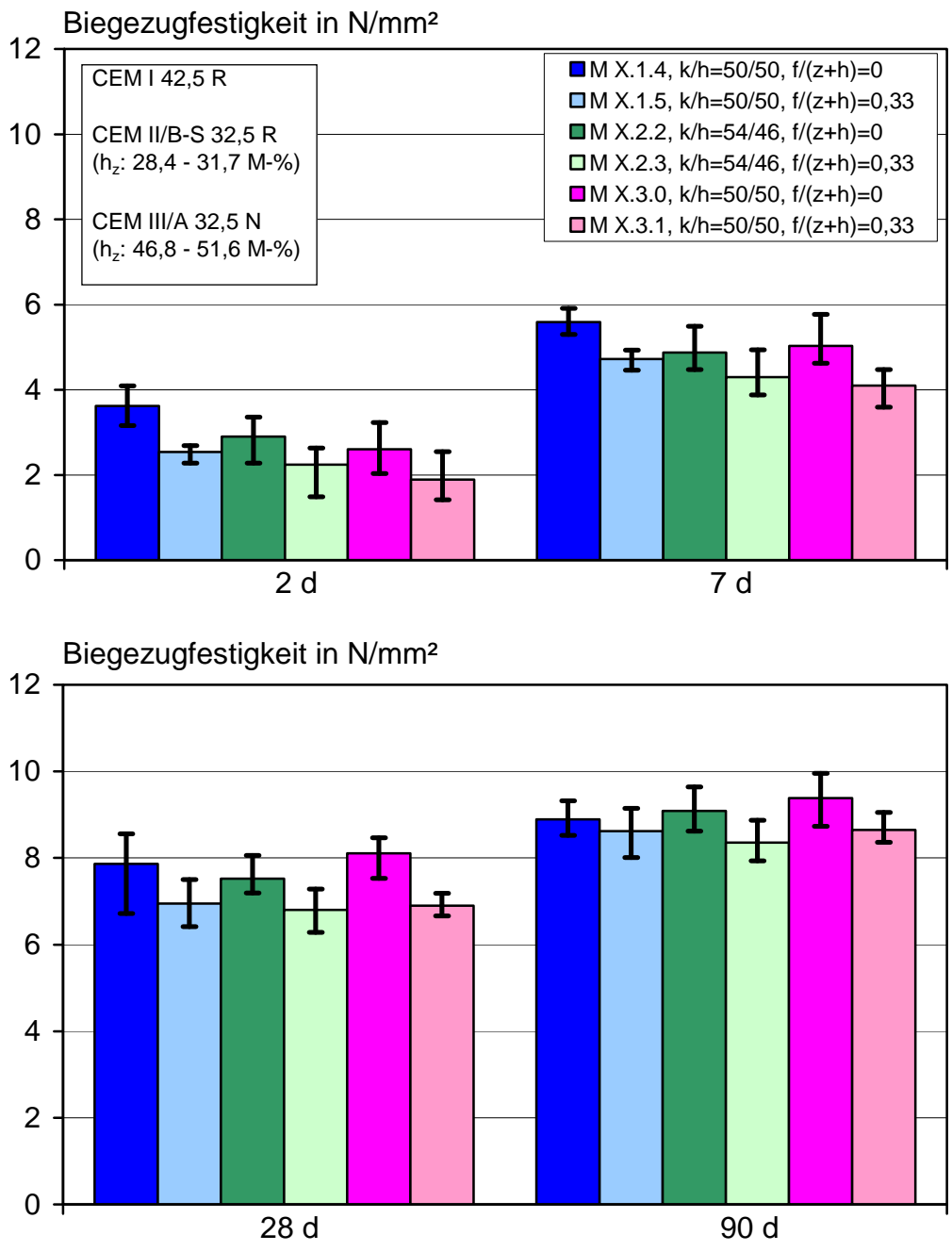
**Bild B8:** Wasseranspruch (inkl. Streubreiten) der Mischungen mit CEM II



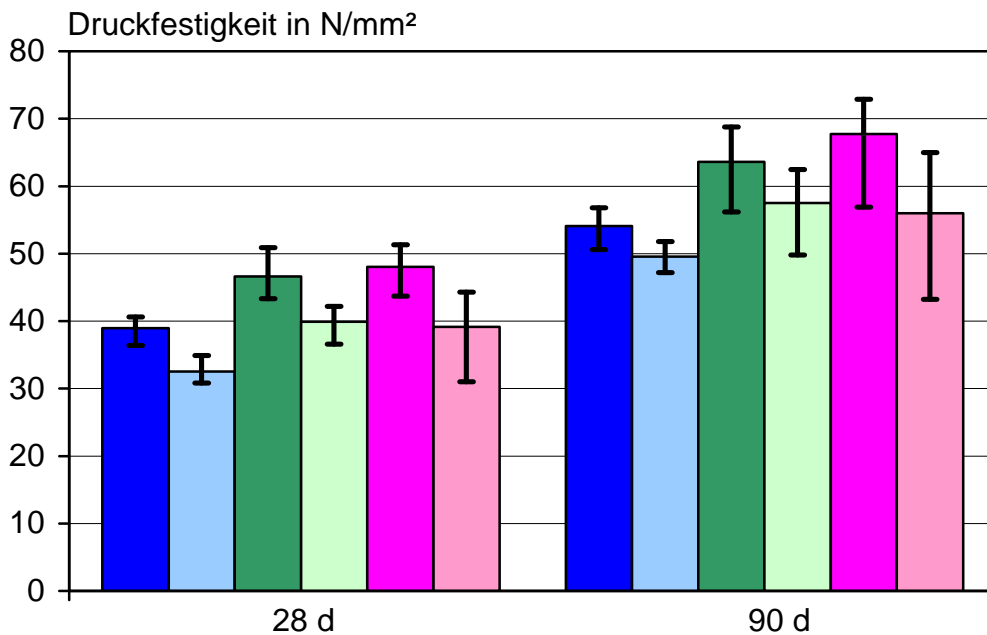
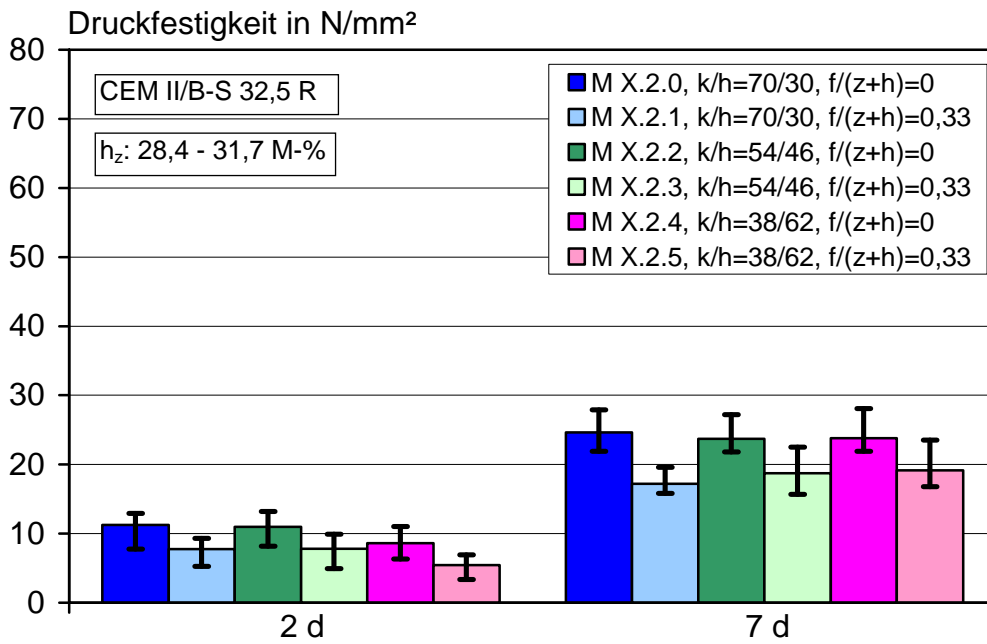
**Bild B9:** Wasseranspruch (inkl. Streubreiten) der hüttensandhaltigen Mischungen ( $k/h_{\text{ges}} \approx 50/50$ )



**Bild B10:** Biegezugfestigkeiten (inkl. Streubreiten aller Chargen) der Mischungen mit CEM II zu den untersuchten Prüfterminen



**Bild B11:** Vergleich der Biegezugfestigkeiten (inkl. Streubreiten) der hüttensandhaltigen Mischungen mit  $k/h_{ges} \approx 50/50$  zu den untersuchten Prüfterminen



**Bild B12:** Mörteldruckfestigkeiten (inkl. Streubreiten aller Chargen) der Mischungen mit CEM II zu den untersuchten Prüfterminen



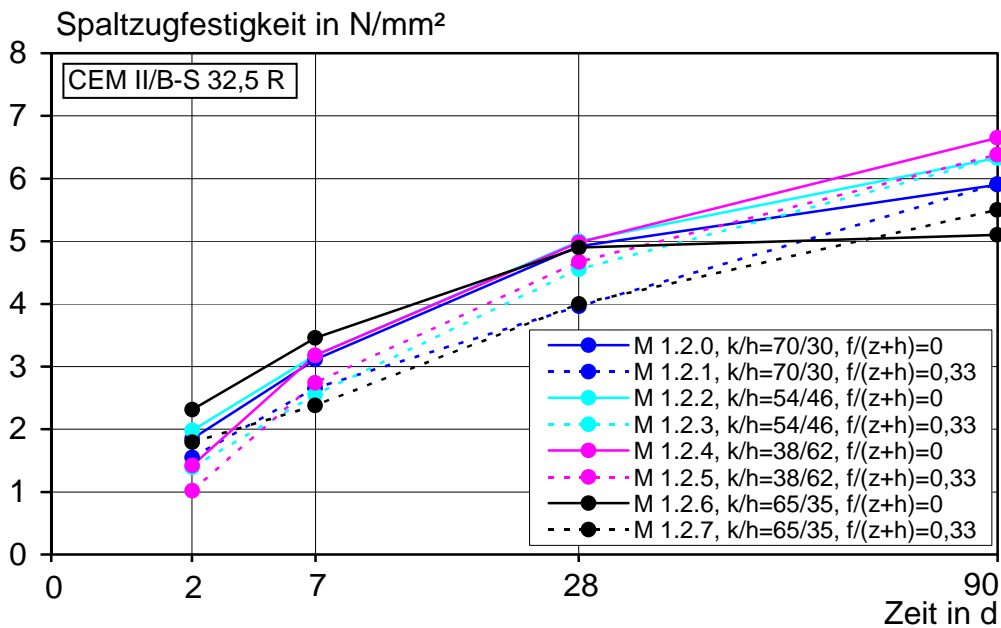


Bild B13: Entwicklung der Spaltzugfestigkeiten der Mischungen mit CEM II

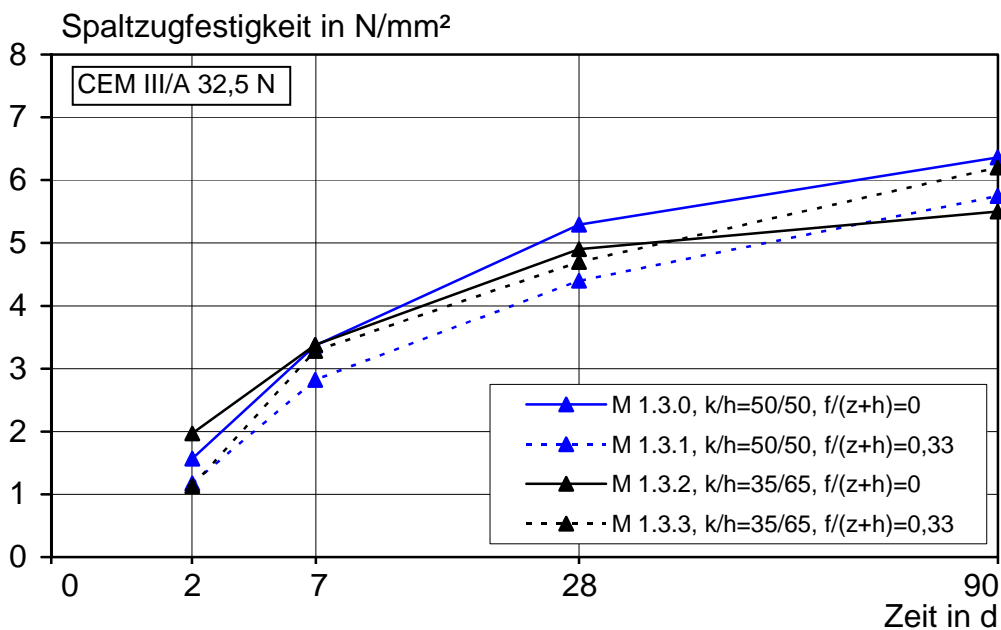


Bild B14: Entwicklung der Spaltzugfestigkeiten der Mischungen mit CEM III

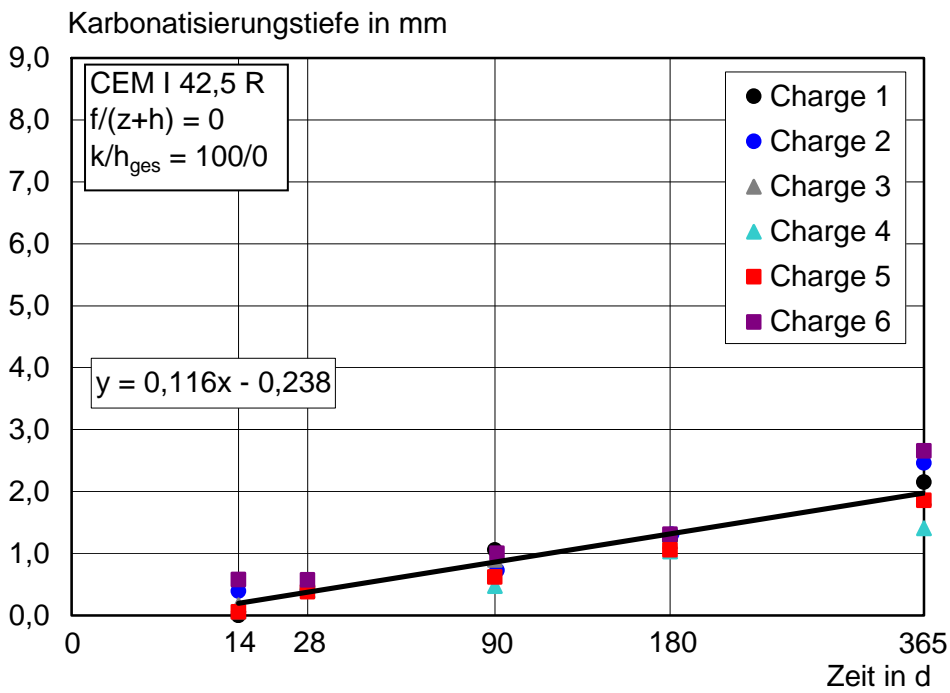


Bild B15: Karbonatisierungstiefen der Referenzmischungen M X.1.0

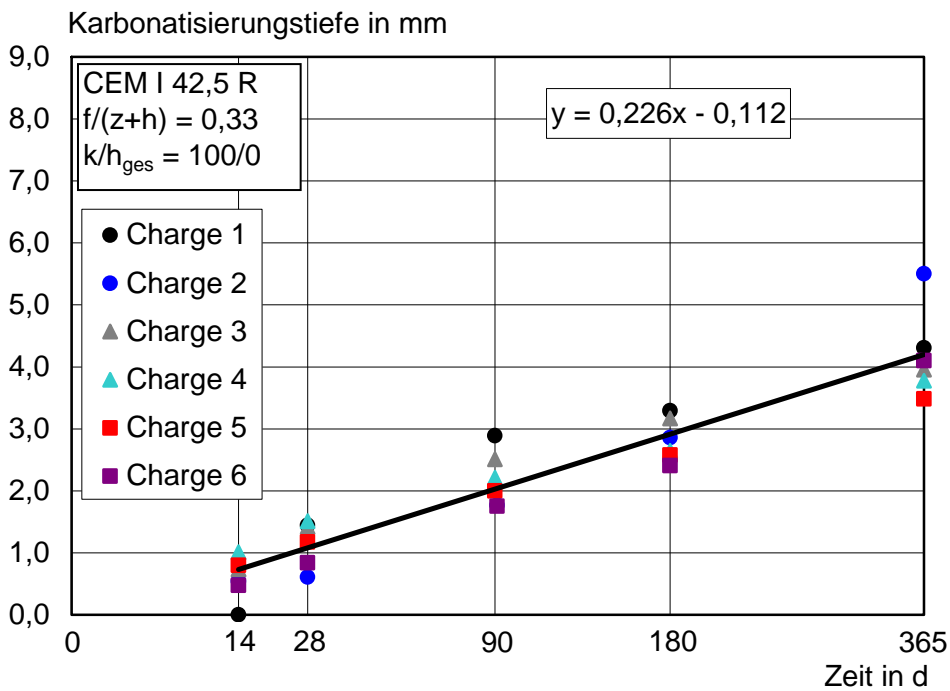


Bild B16: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.1

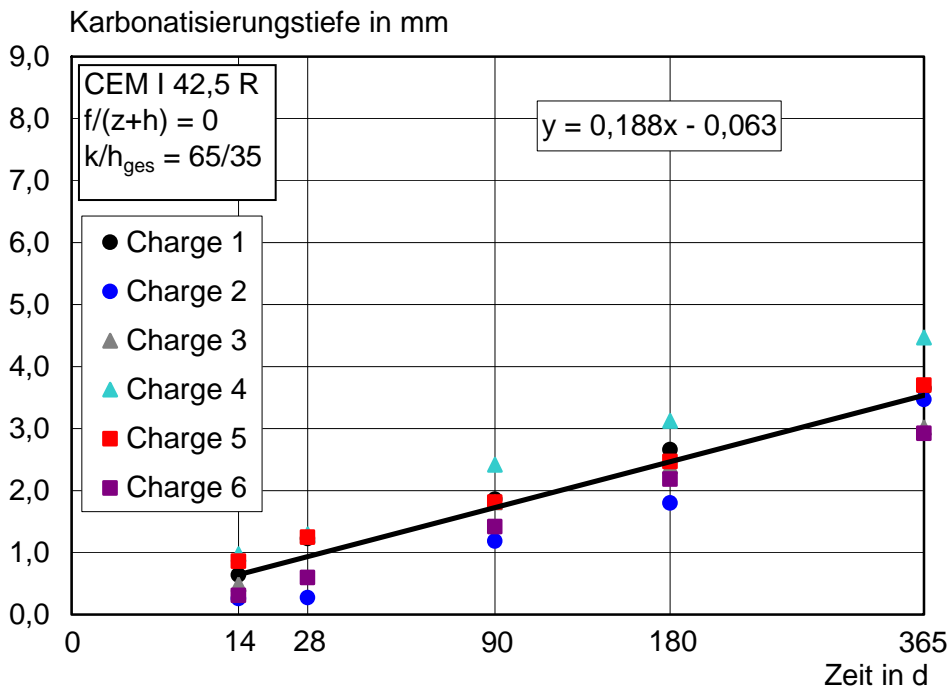


Bild B17: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.2

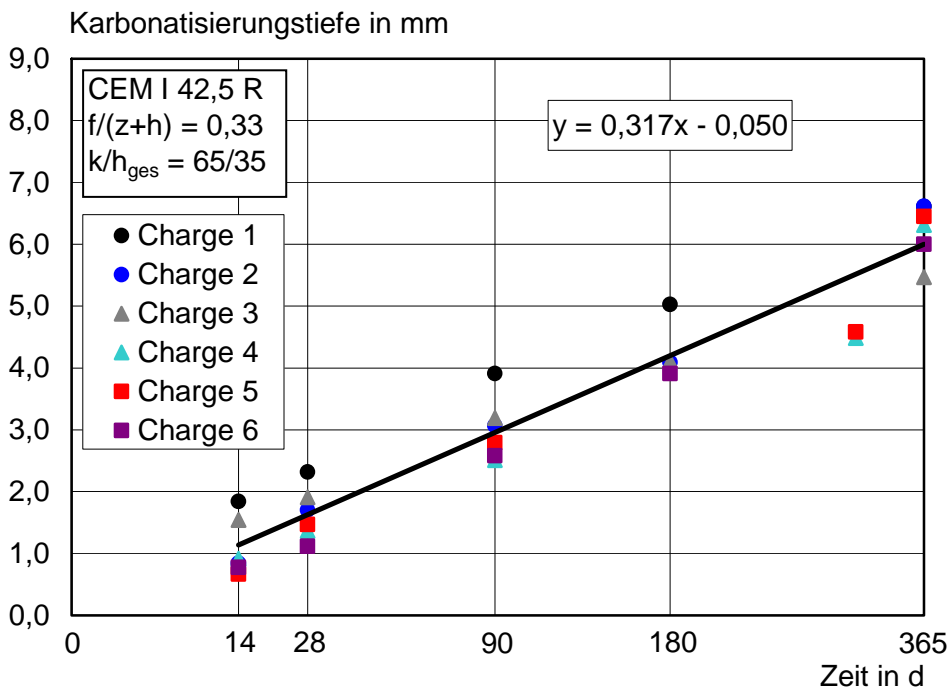


Bild B18: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.3

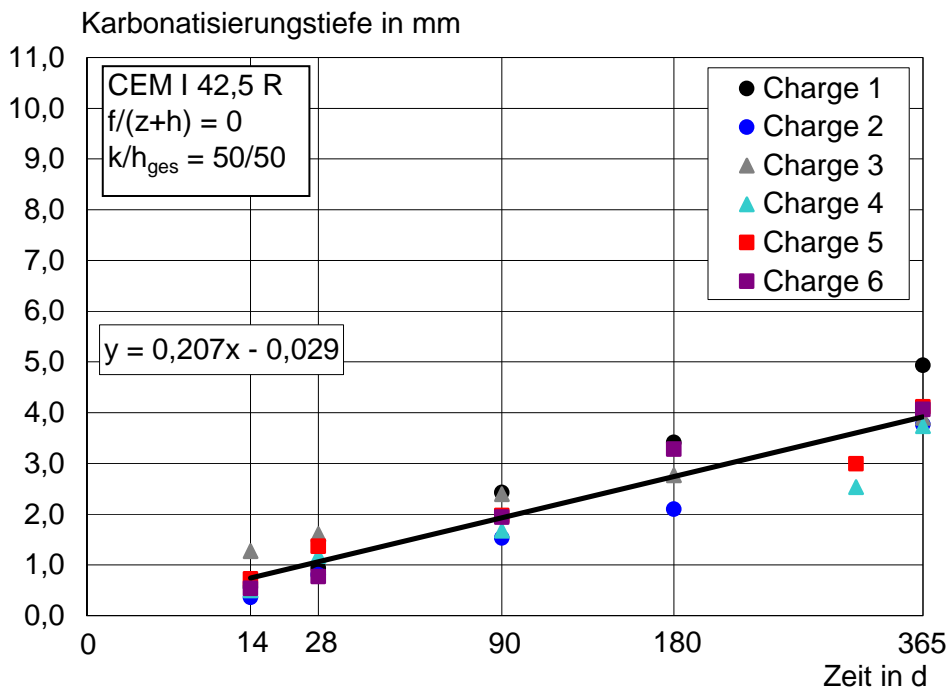


Bild B19: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.4

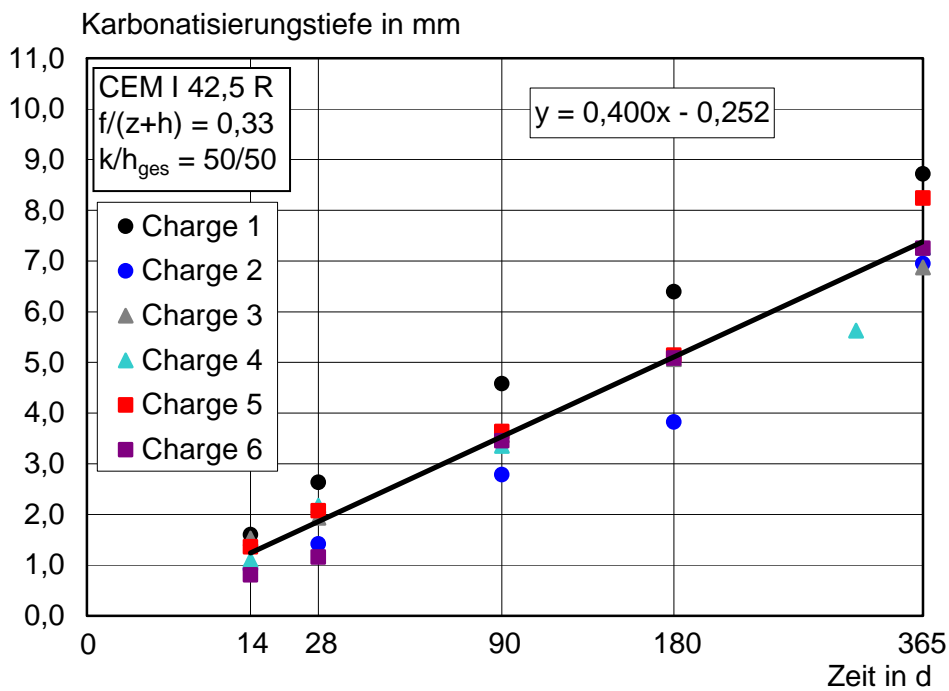


Bild B20: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.5

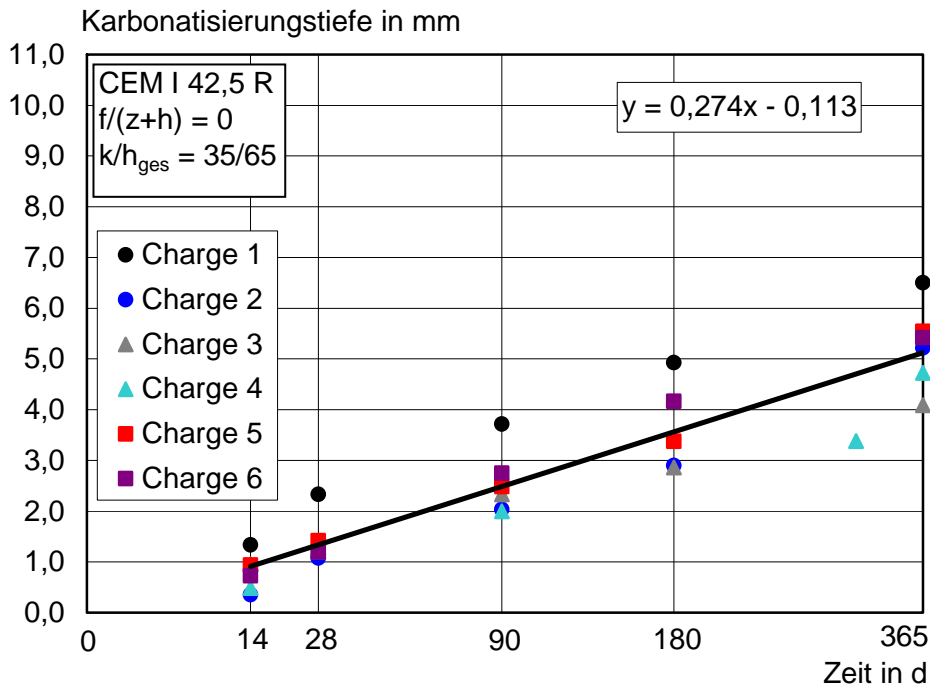


Bild B21: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.6

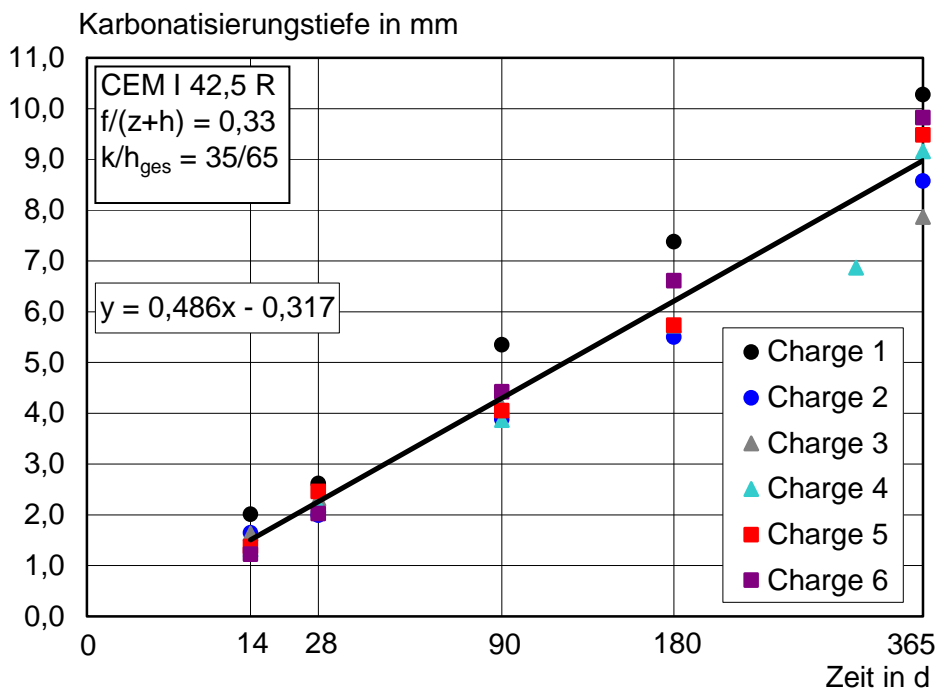


Bild B22: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.1.7

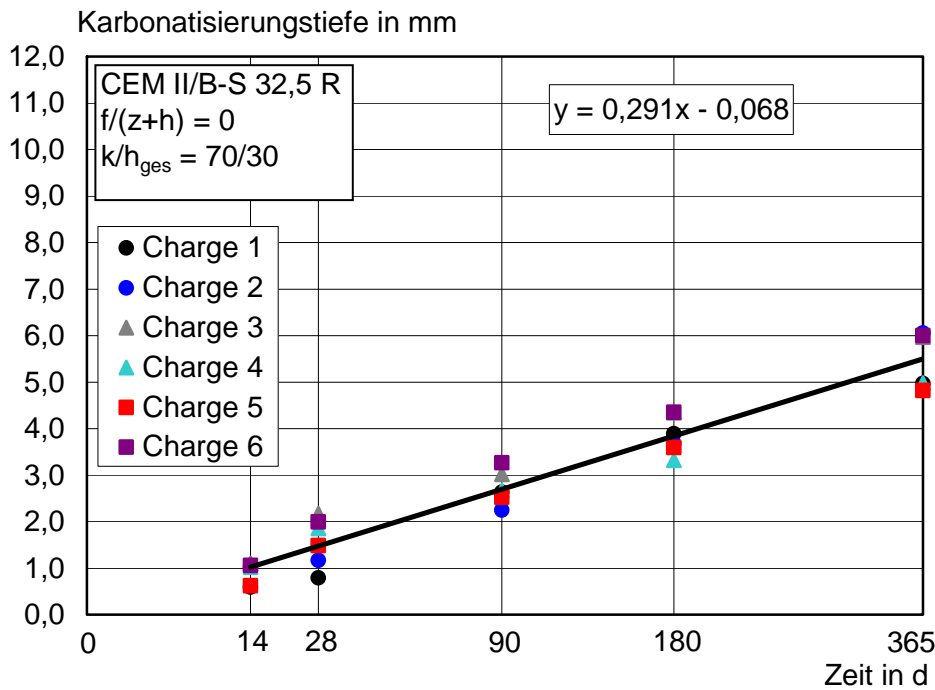


Bild B23: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.0

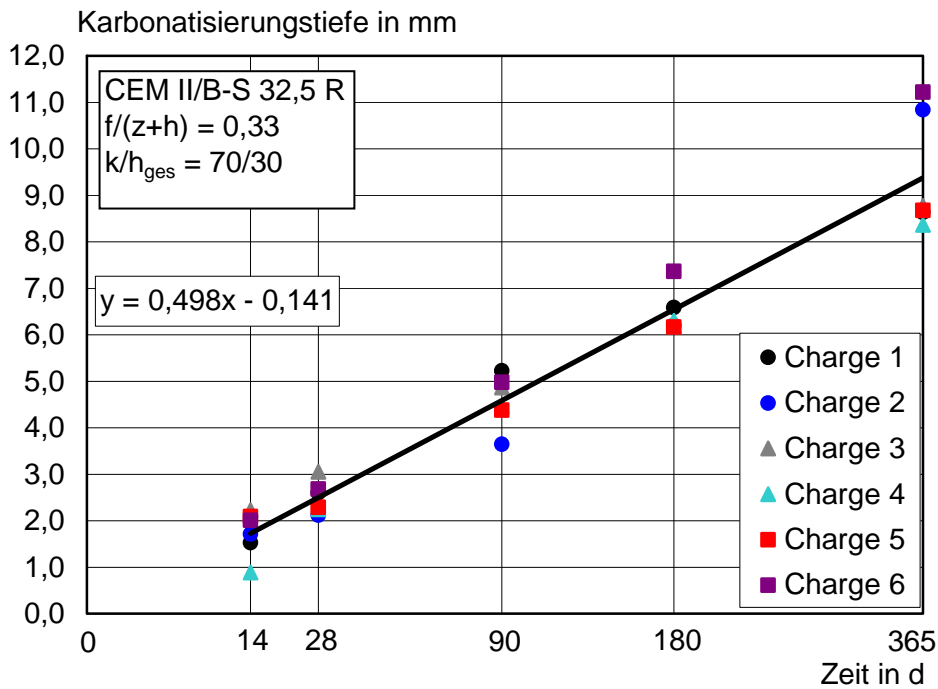


Bild B24: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.1

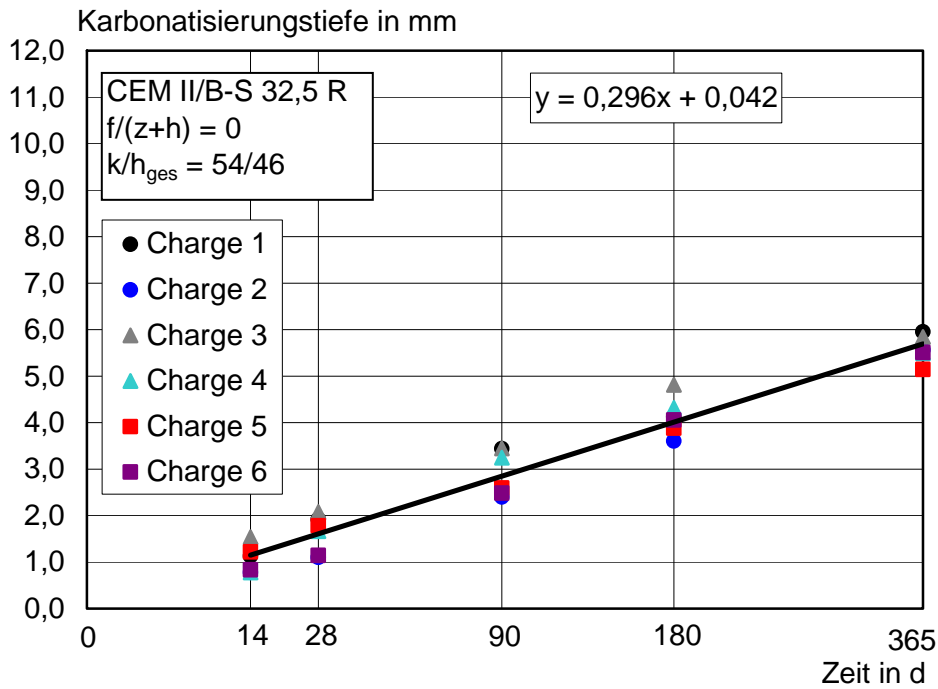


Bild B25: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.2

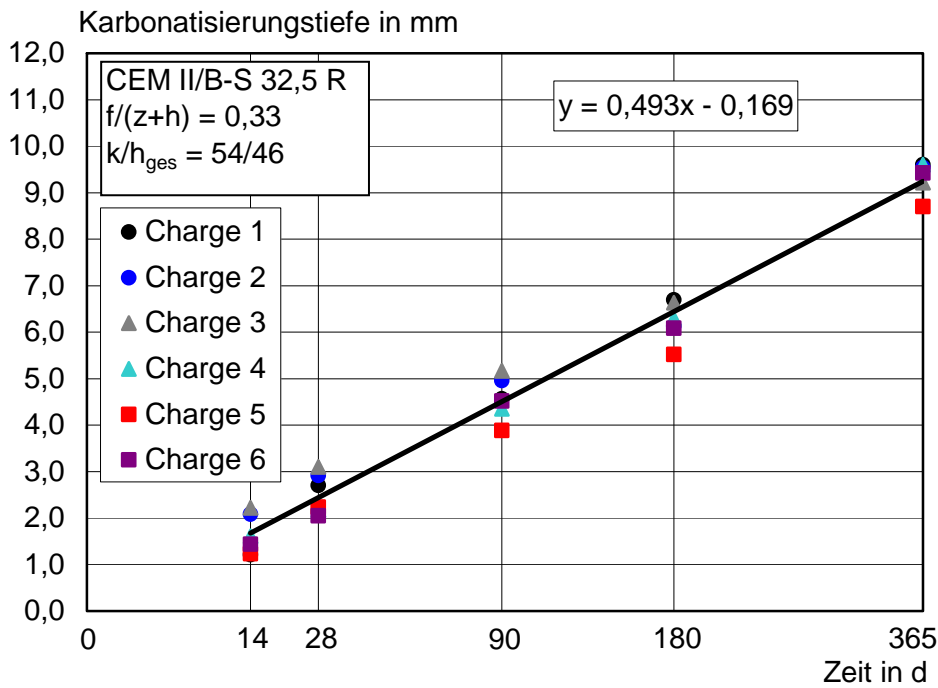


Bild B26: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.3

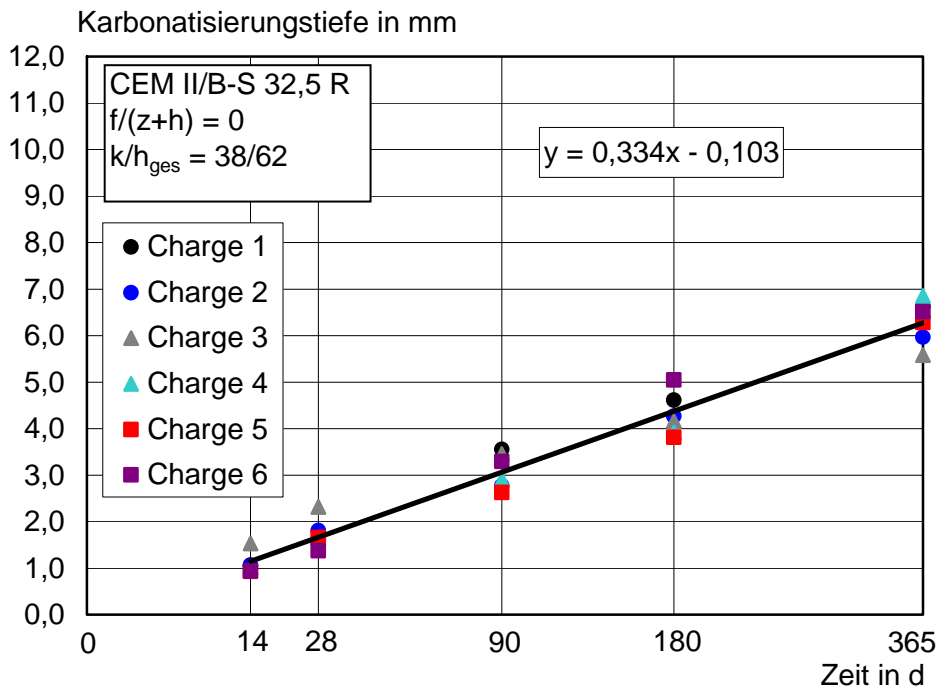


Bild B27: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.4

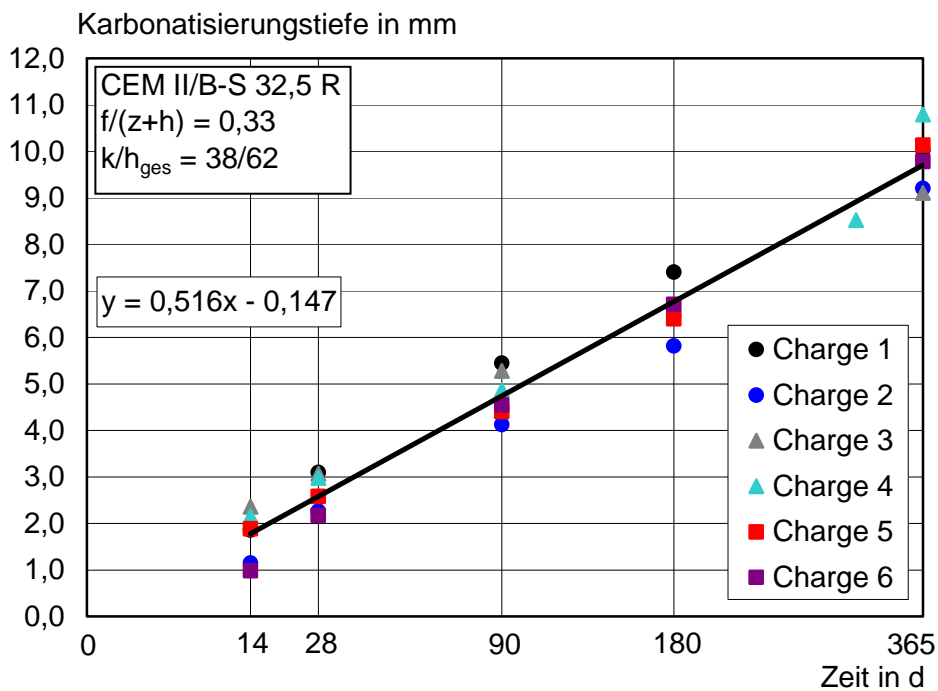


Bild B28: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.2.5



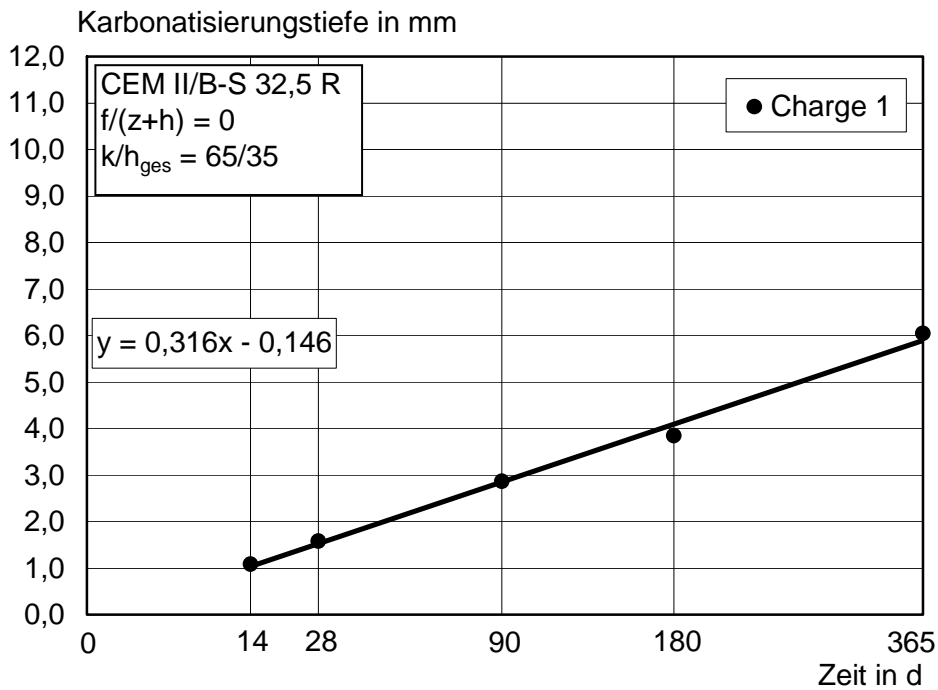


Bild B29: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M 1.2.6

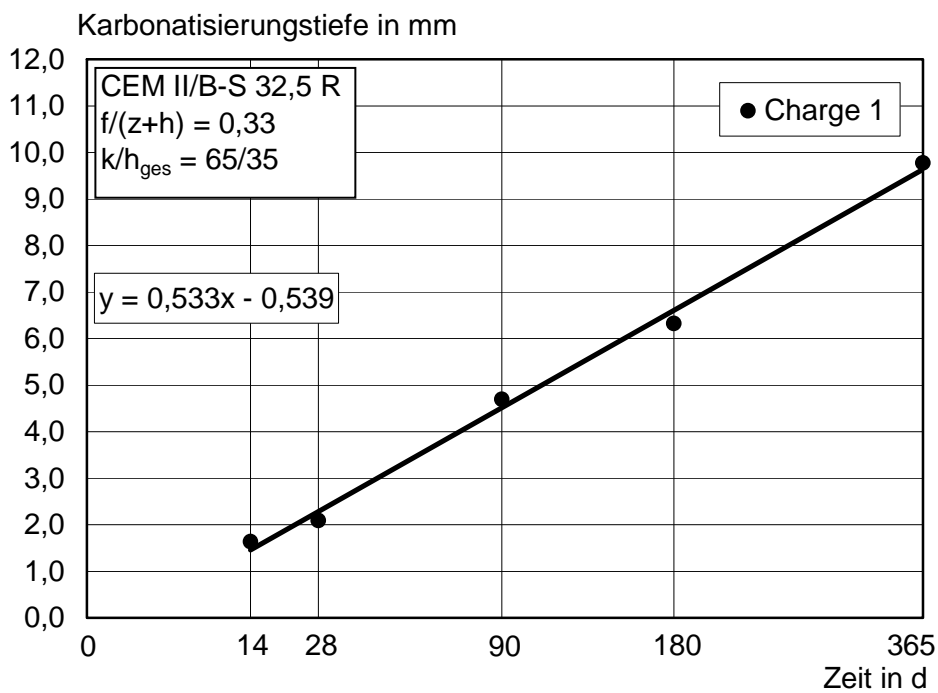


Bild B30: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M 1.2.7

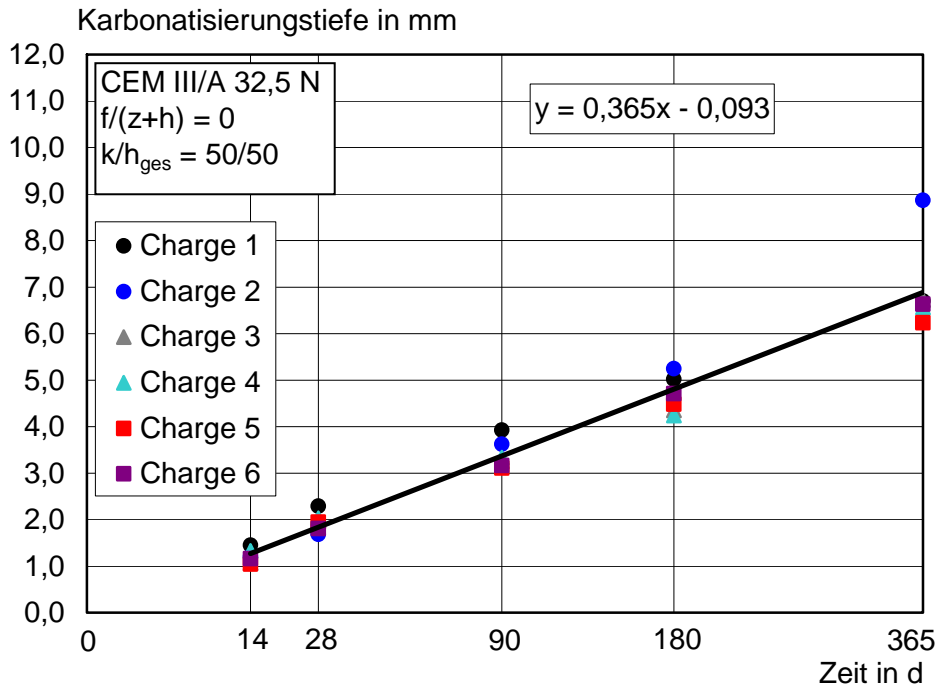


Bild B31: Karbonatisierungstiefen der Referenzmischung M X.3.0

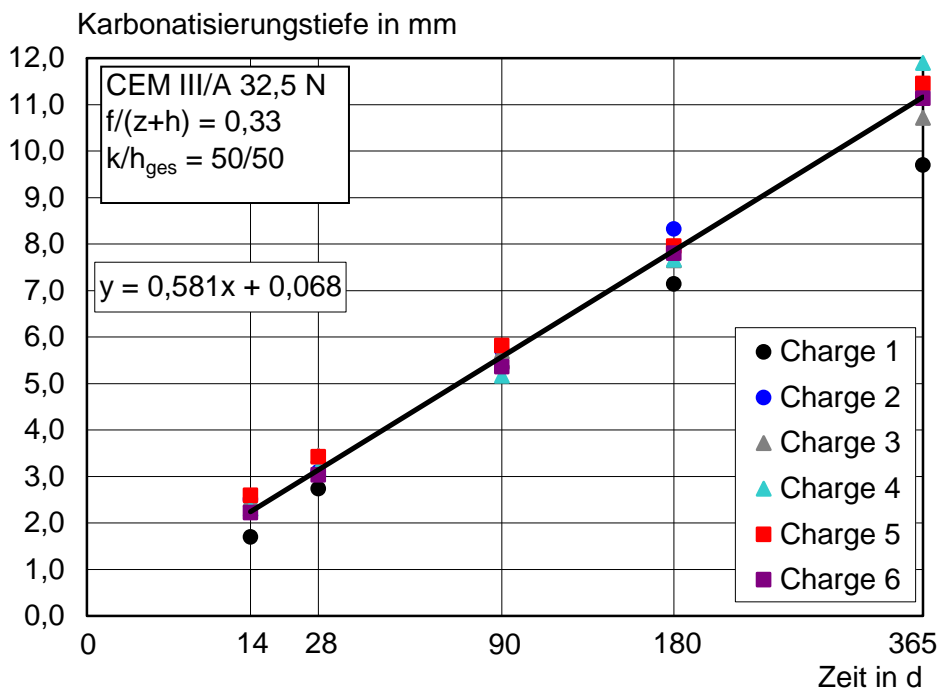


Bild B32: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M X.3.1

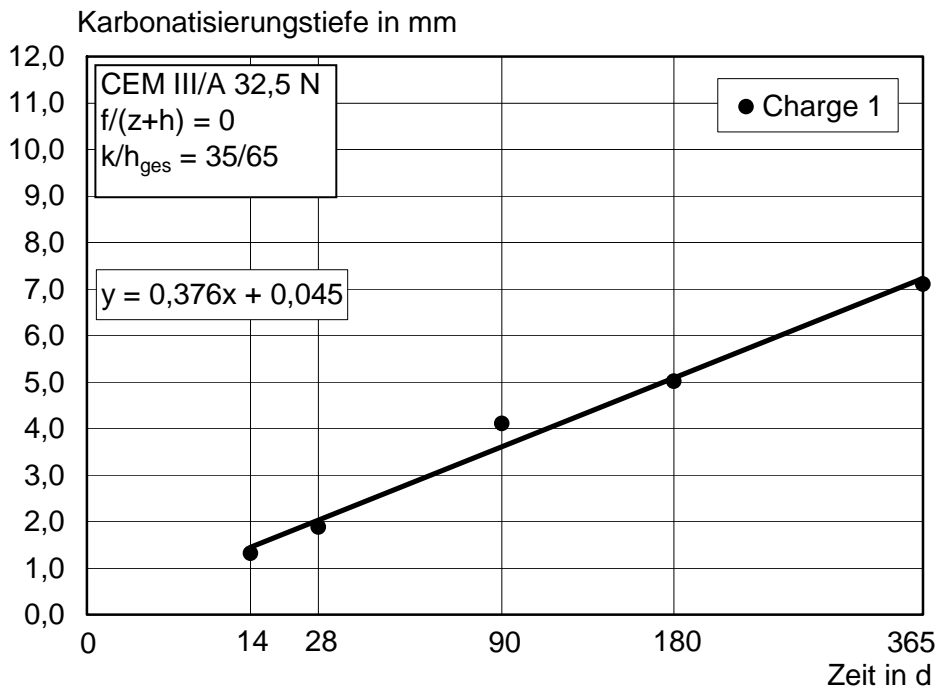


Bild B33: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M 1.3.2

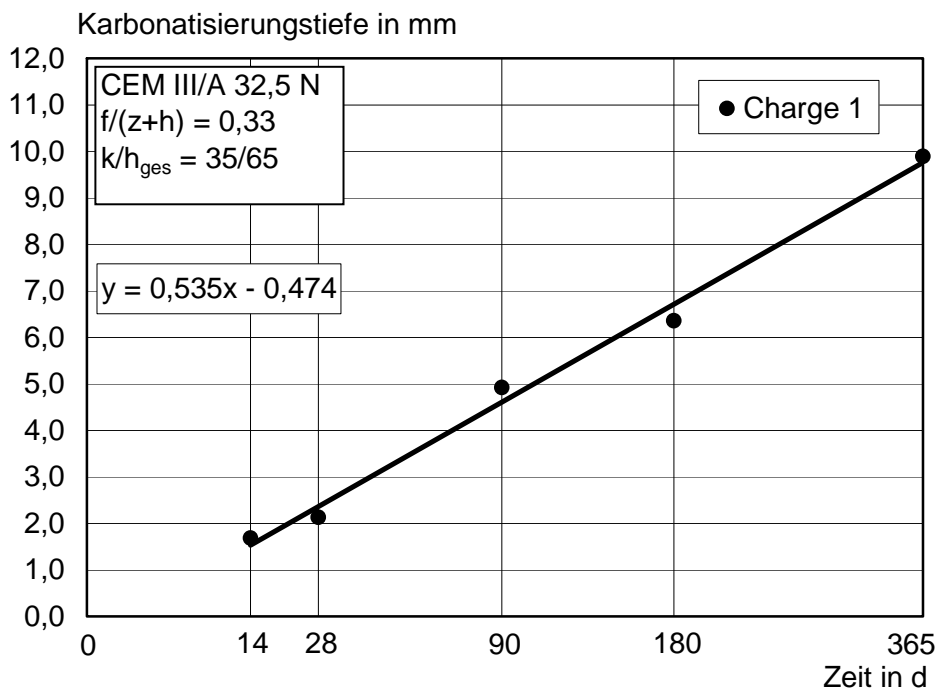


Bild B34: Karbonatisierungstiefen der Mischungen M 1.3.3

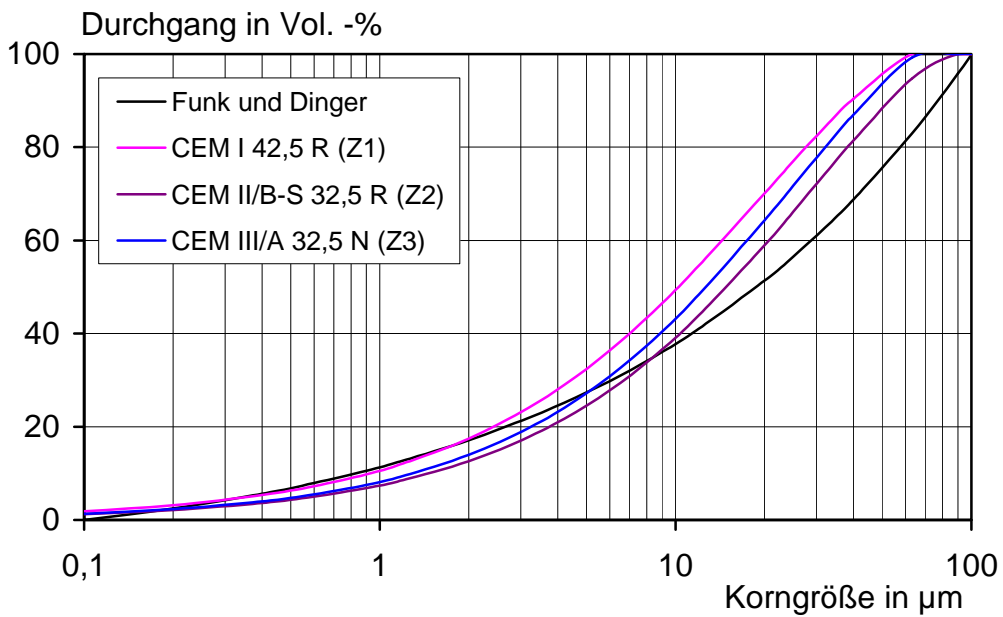


Bild B35: Sieblinien der Zemente (Projektphase 1)

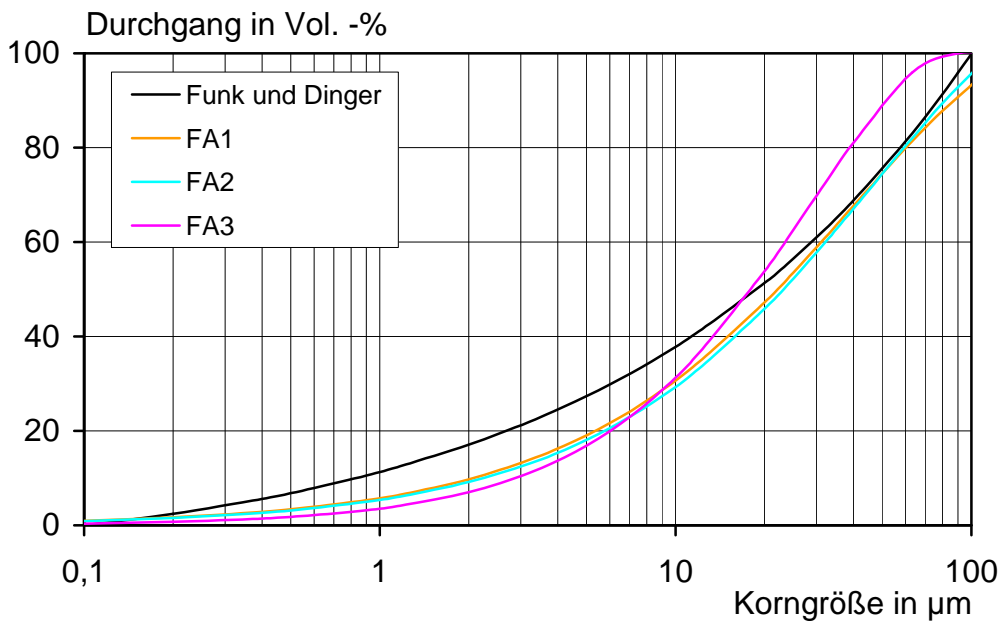
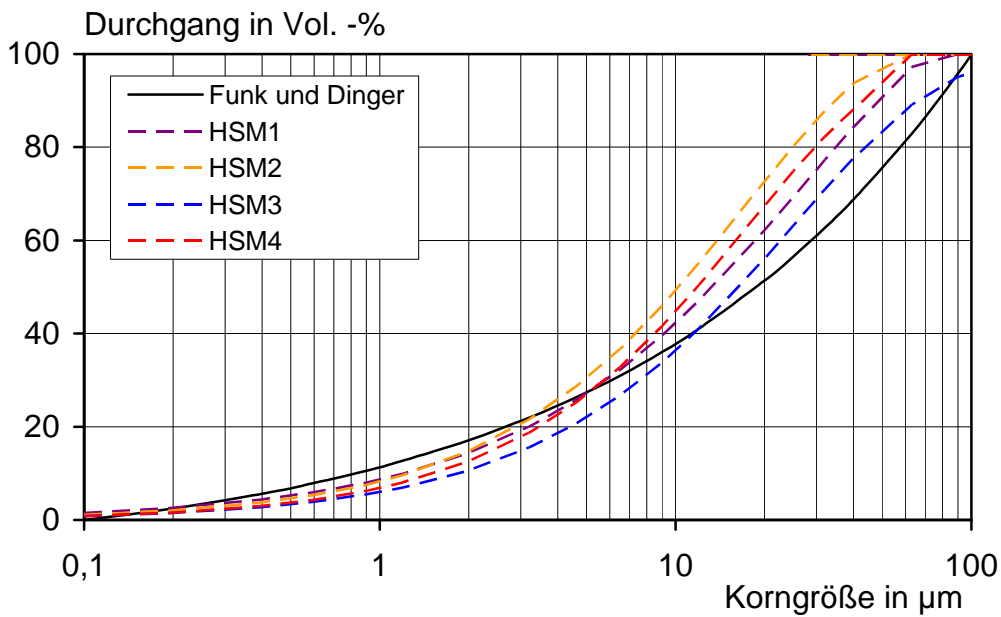
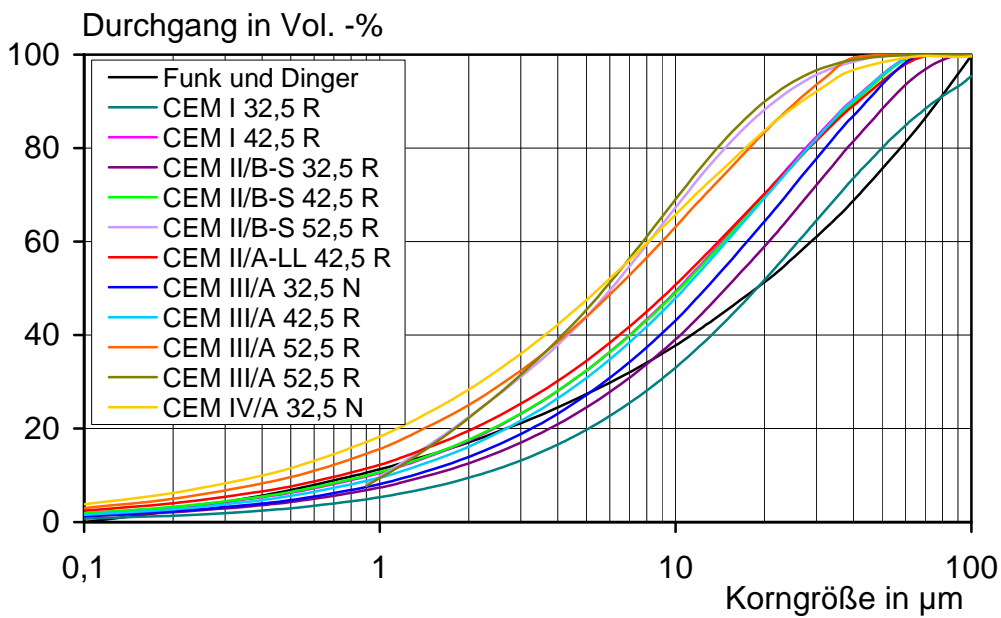


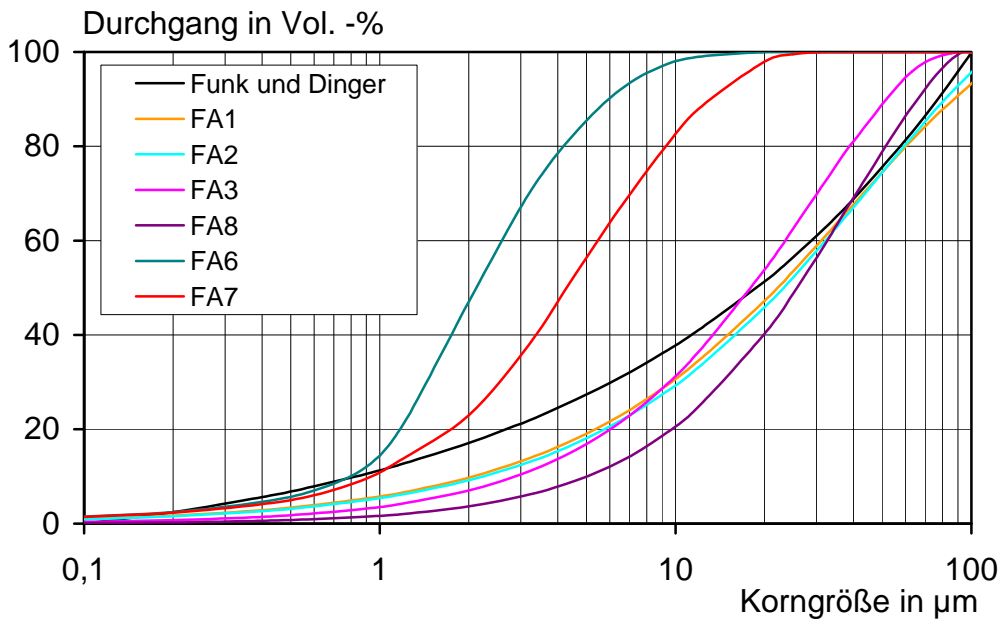
Bild B36: Sieblinien verschiedener Flugaschen (Projektphase 1)



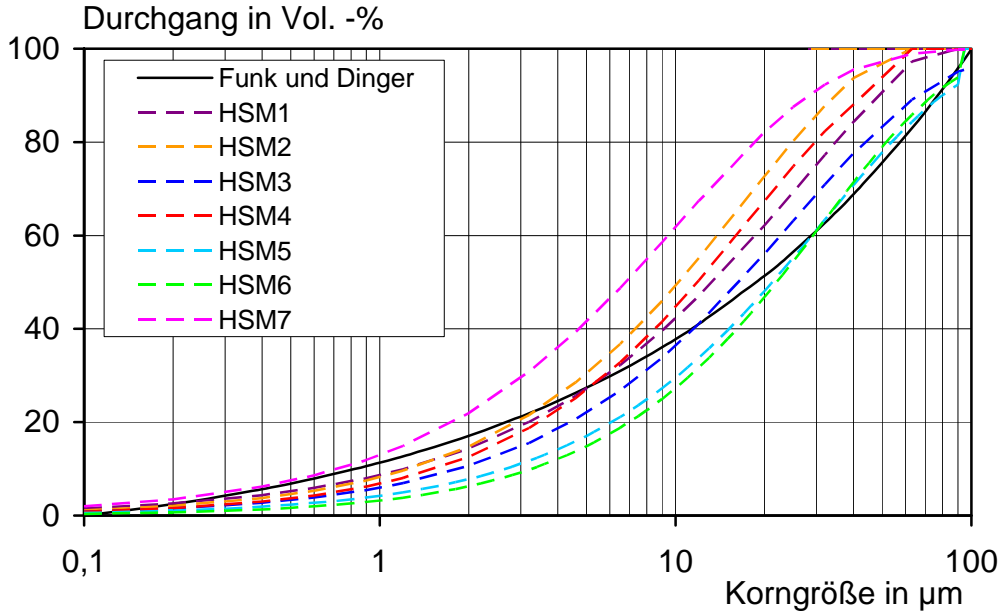
**Bild B37:** Sieblinien verschiedener Hüttensandmehle (Projektphase 1)



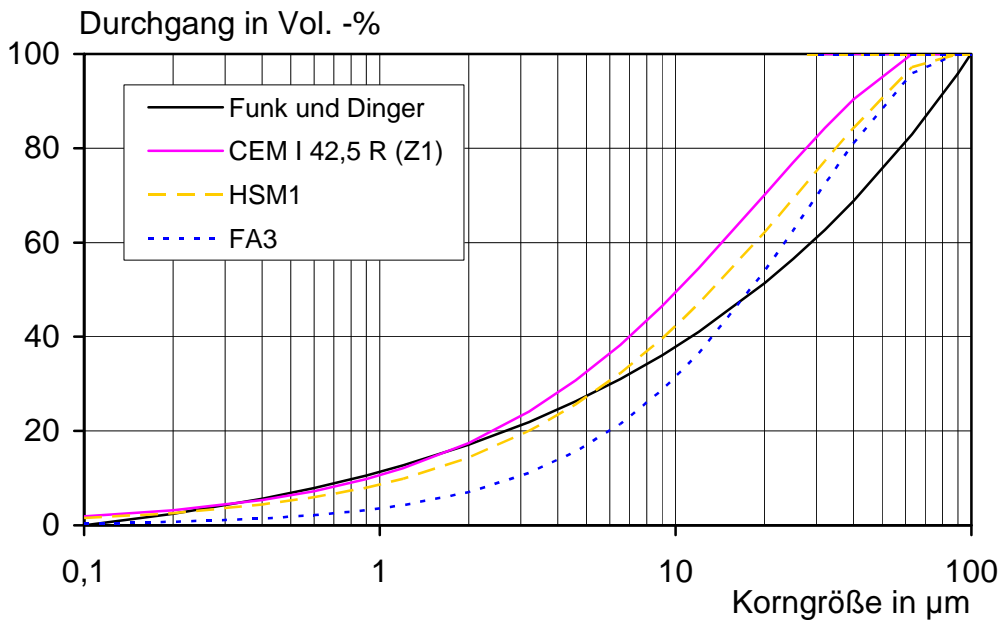
**Bild B38:** Sieblinien weiterer Zemente (Projektphase 3)



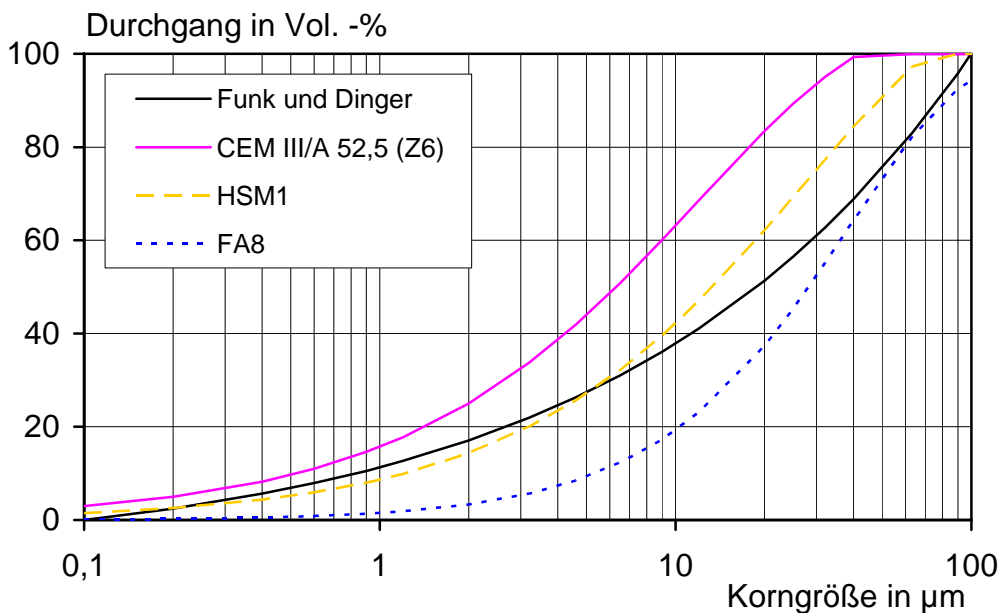
**Bild B39:** Sieblinien weiterer Flugaschen (Projektphase 3)



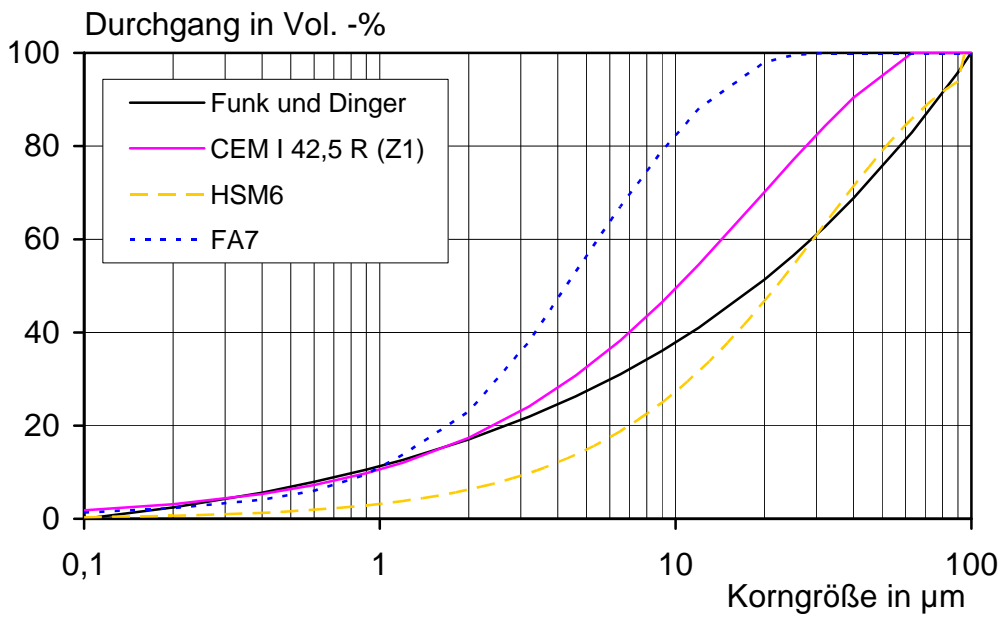
**Bild B40:** Sieblinien weiterer Hüttensandmehle (Projektphase 3)



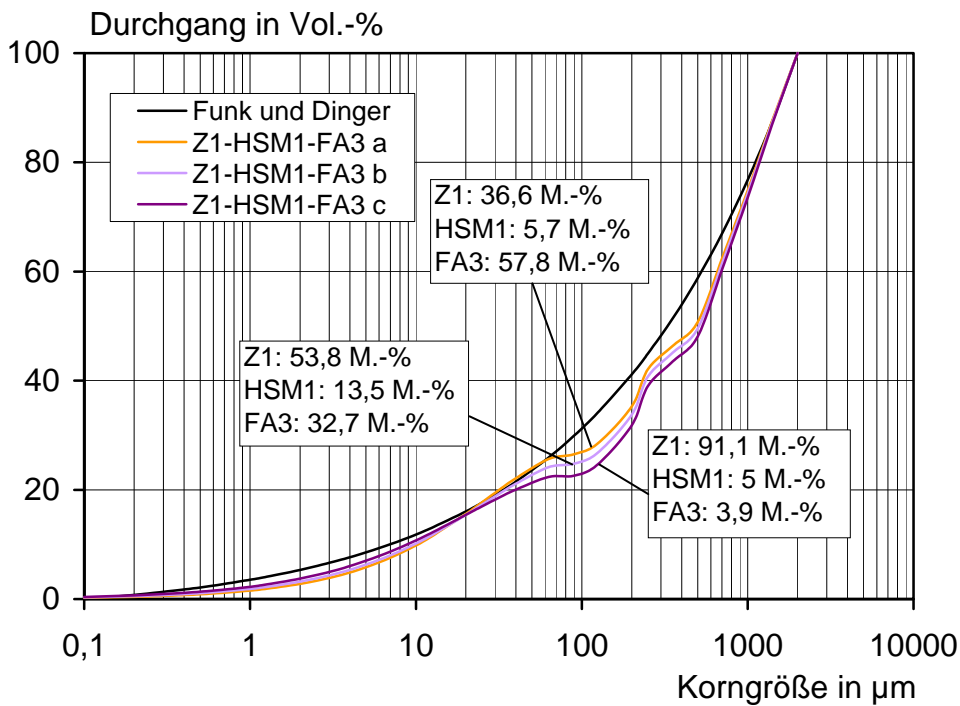
**Bild B41:** Sieblinien des Zementes (Z1), der Flugasche (FA3) sowie des Hüttensandmehls (HSM1) aus Projektphase 1



**Bild B42:** Sieblinien des Zementes (Z6), der Flugasche (FA8) sowie des Hüttensandmehls (HSM1) aus der Projektphase 3

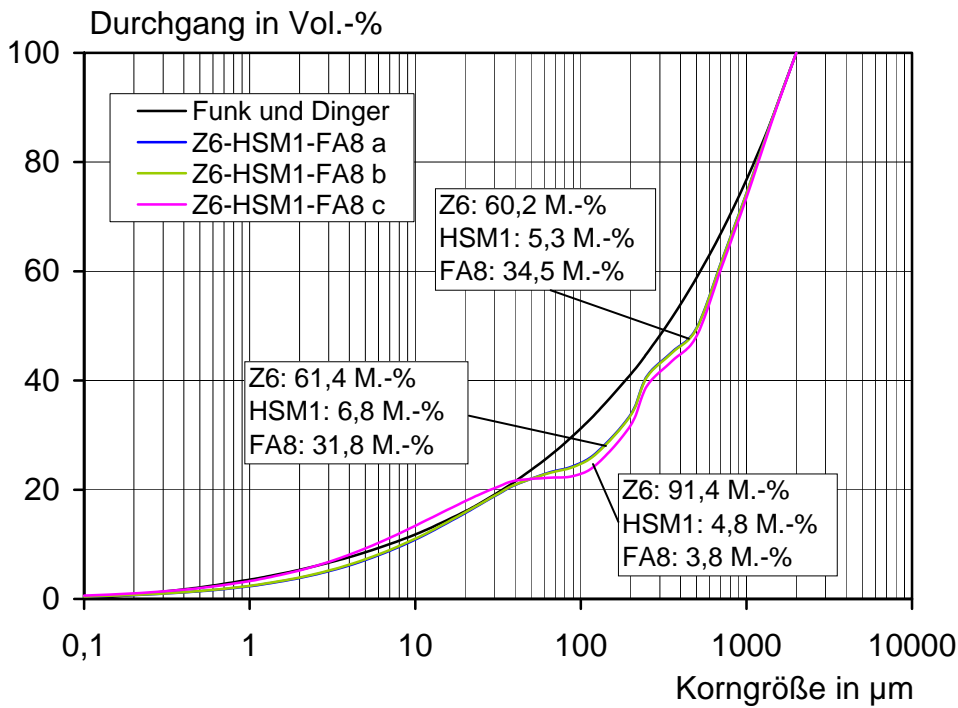


**Bild B43:** Sieblinien des Zementes (Z1), der Flugasche (FA7) sowie des Hüttensandmehls (HSM6) aus der Projektphase 3

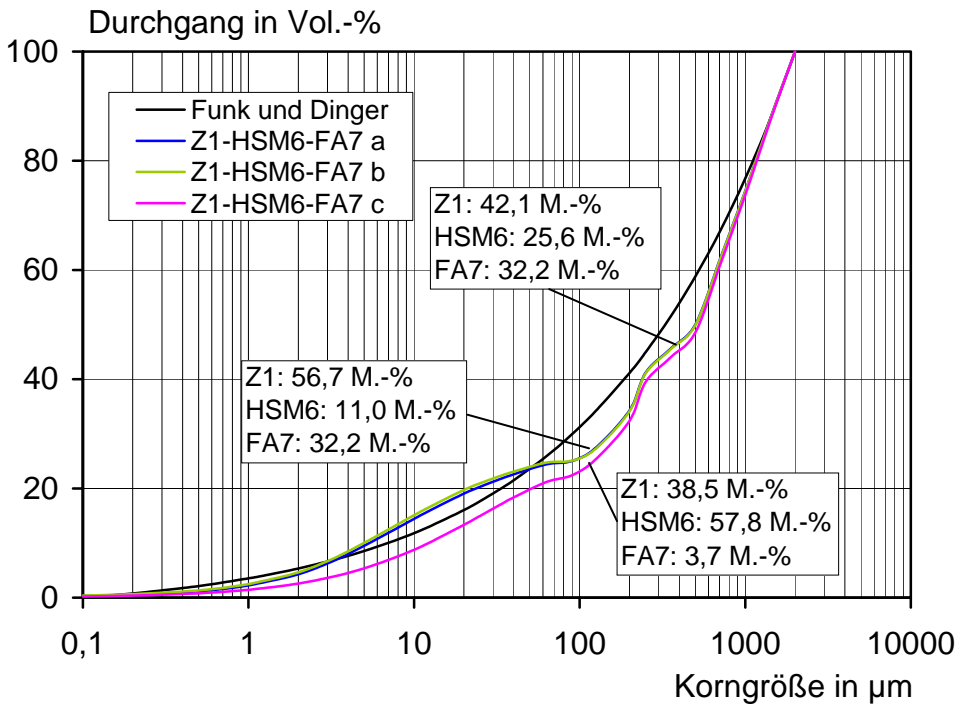


**Bild B44:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit dem CEN-Normsand (Z1-HSM1-FA3)

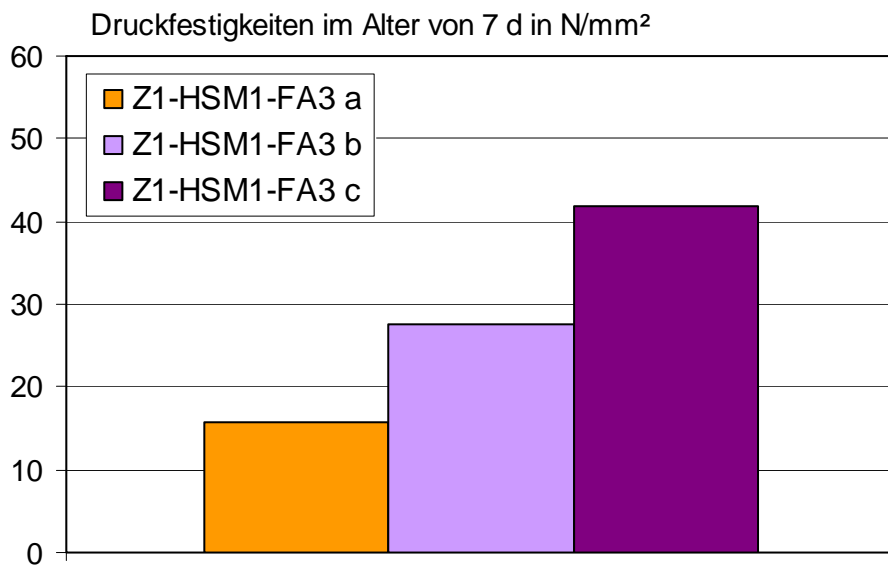




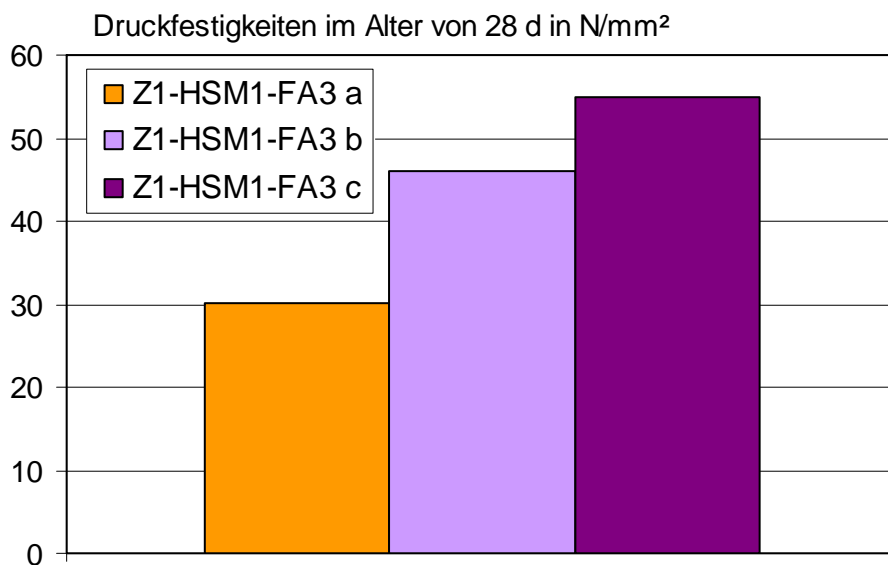
**Bild B45:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit dem CEN-Normsand (Z6-HSM1-FA8)



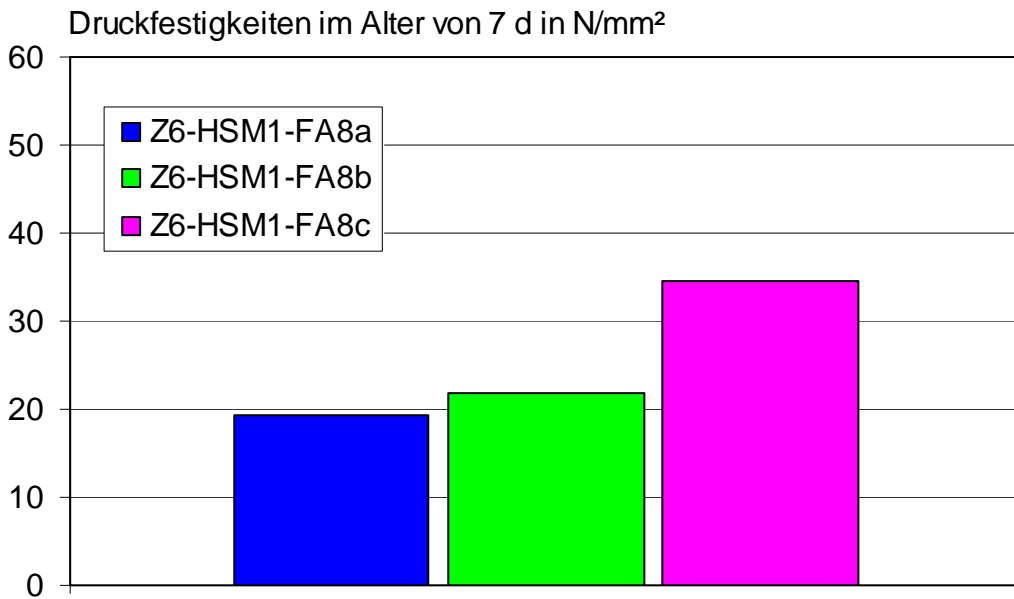
**Bild B46:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit dem CEN-Normsand (Z1-HSM6-FA7)



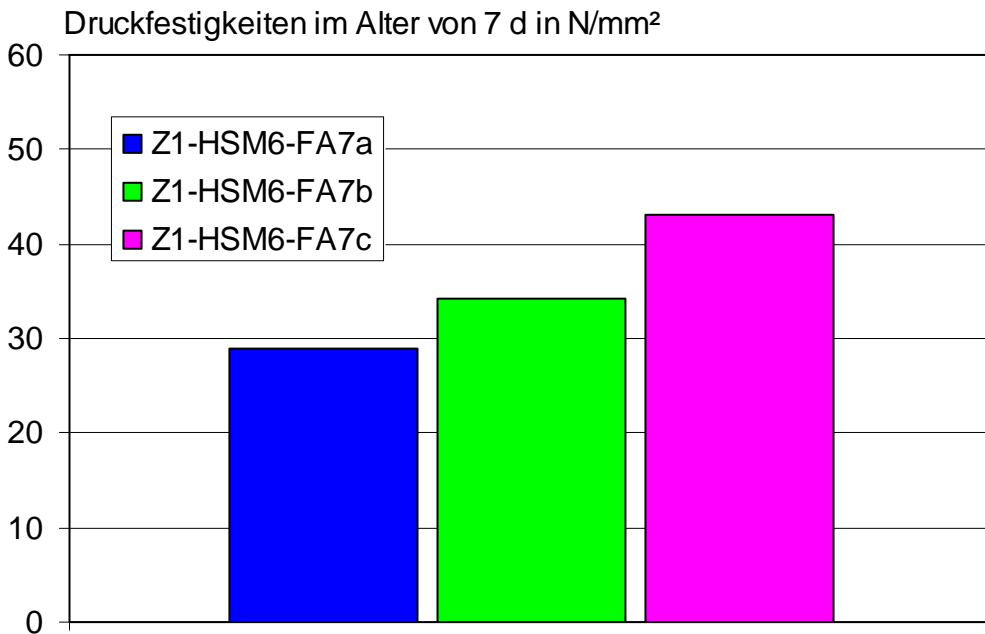
**Bild B47:** 7-d-Druckfestigkeit der Mischung Z1-HSM1-FA3 (mit CEN-Normsand)



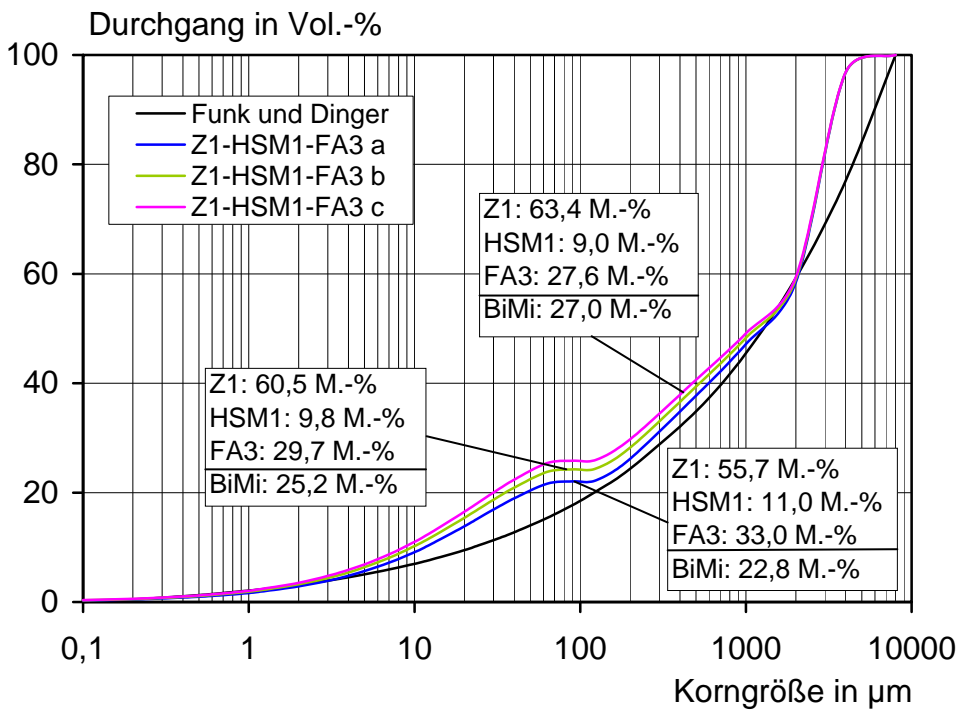
**Bild B48:** 28-d-Druckfestigkeit der Mischung Z1-HSM1-FA3 (mit CEN-Normsand)



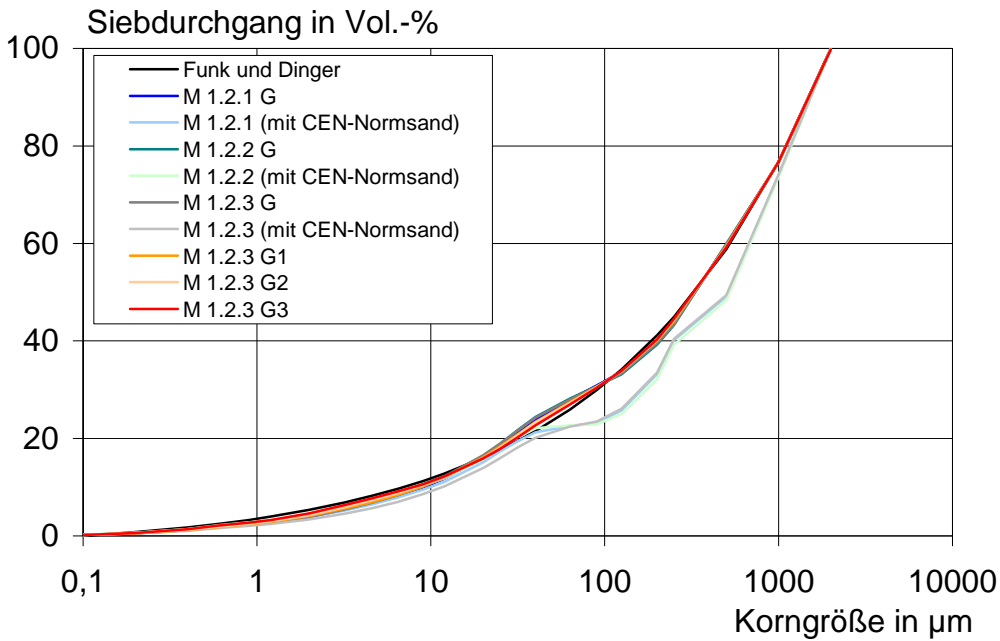
**Bild B49:** 7-d-Druckfestigkeit der Mischung Z6-HSM1-FA8 (mit CEN-Normsand)



**Bild B50:** 7-d-Druckfestigkeit der Mischung Z1-HSM6-FA7 (mit CEN-Normsand)



**Bild B51:** Granulometrisch optimierte Sieblinien mit verschiedenen Sandkornfraktionen (Z1-HSM1-FA3)



**Bild B52:** Sieblinie mit dem CEM II

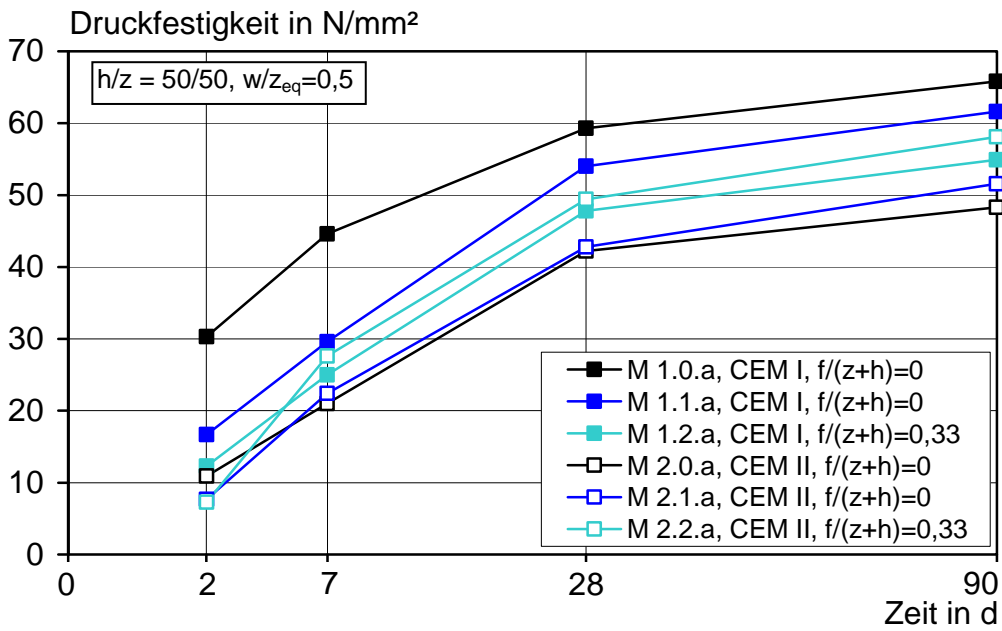


Bild B53: Druckfestigkeit der Betone für  $w/z = 0,5$

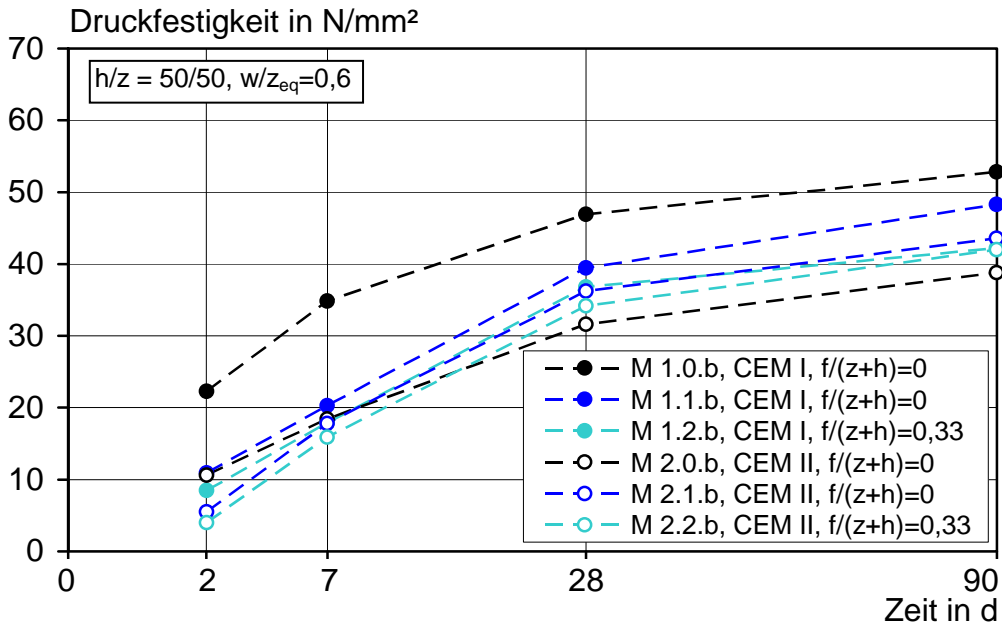
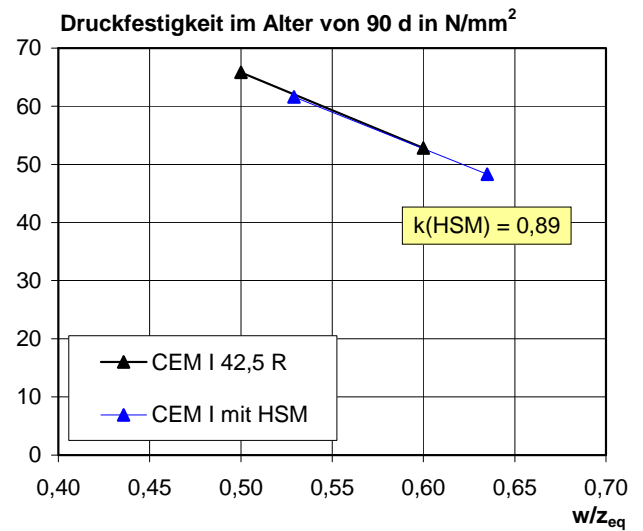
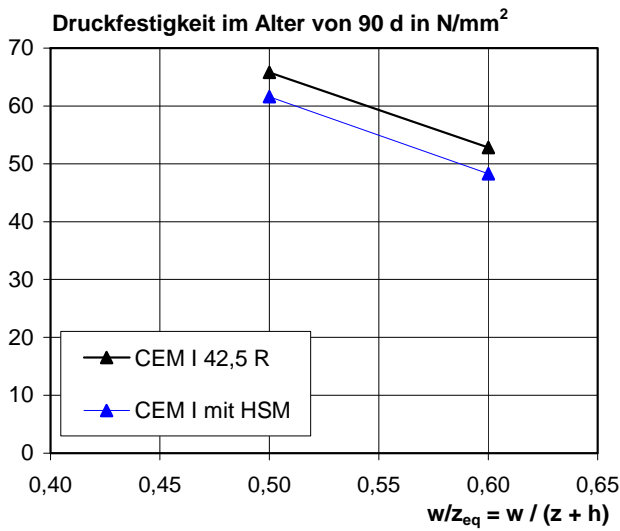
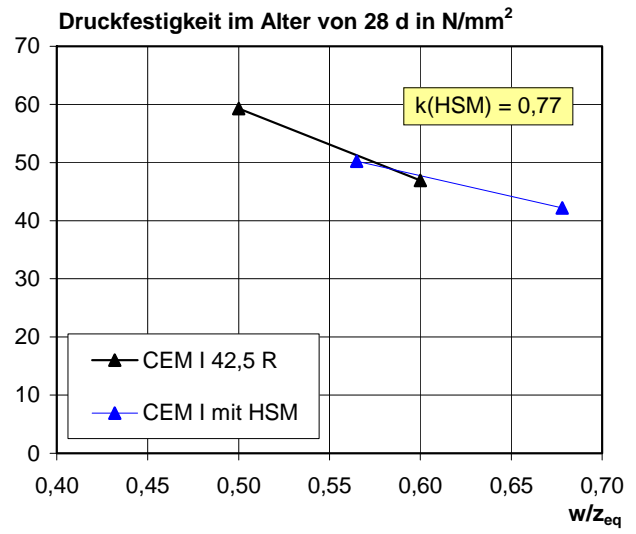
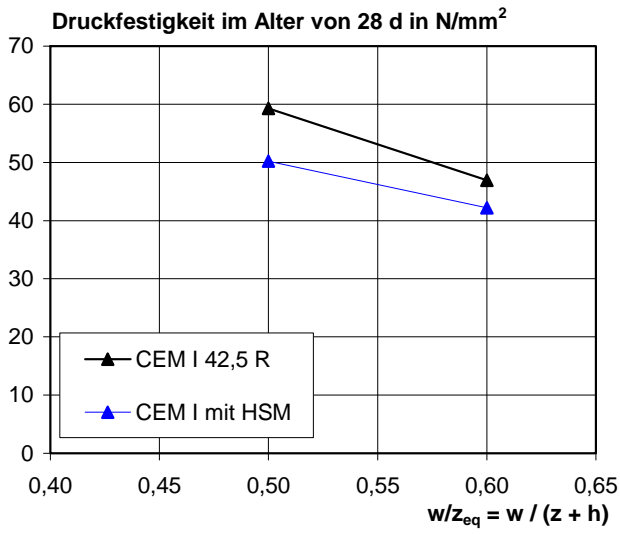
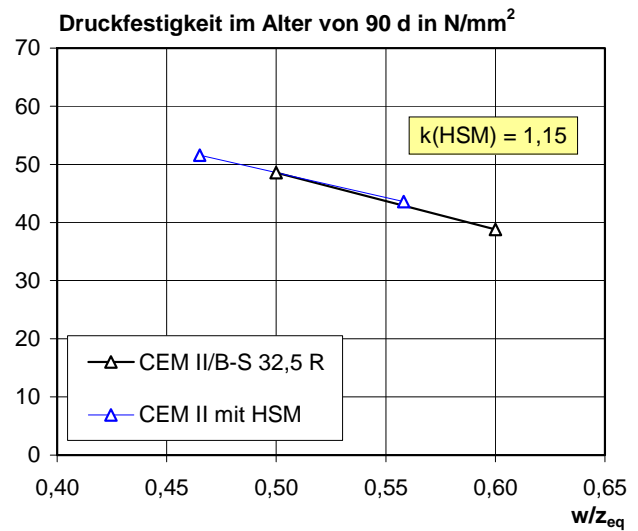
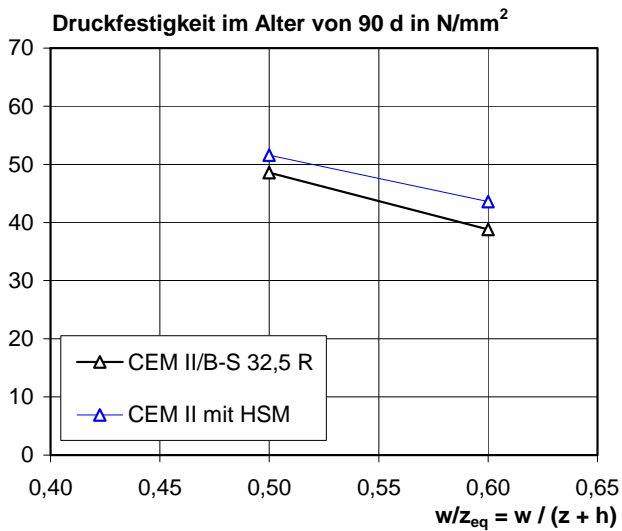
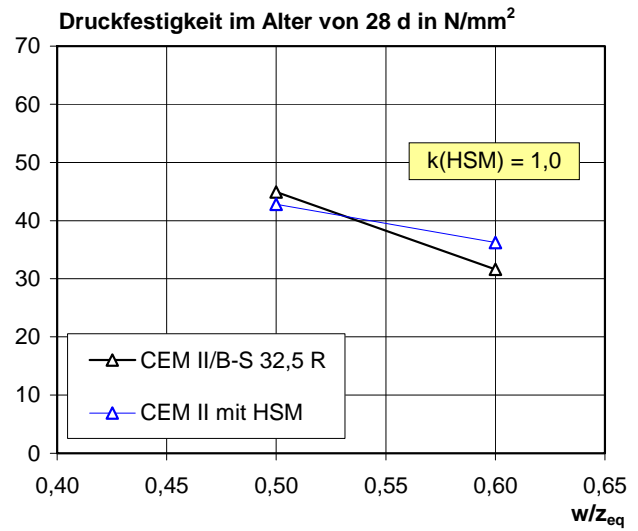
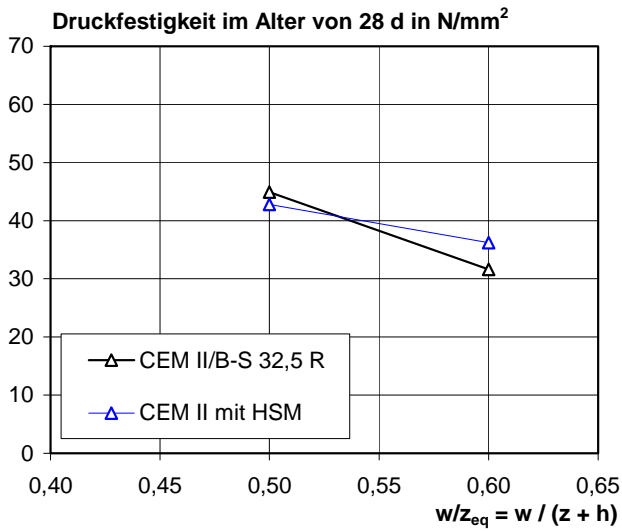


Bild B54: Druckfestigkeit der Betone für  $w/z = 0,6$



**Bild B55:** Relation zwischen Druckfestigkeit und w/z<sub>eq</sub>-Wert der Mischungen mit CEM I und HSM nach 28 und 90 Tagen



**Bild B56:** Relation zwischen Druckfestigkeit und w/z<sub>eq</sub>-Wert der Mischungen mit CEM II/B-S und HSM nach 28 und 90 Tagen

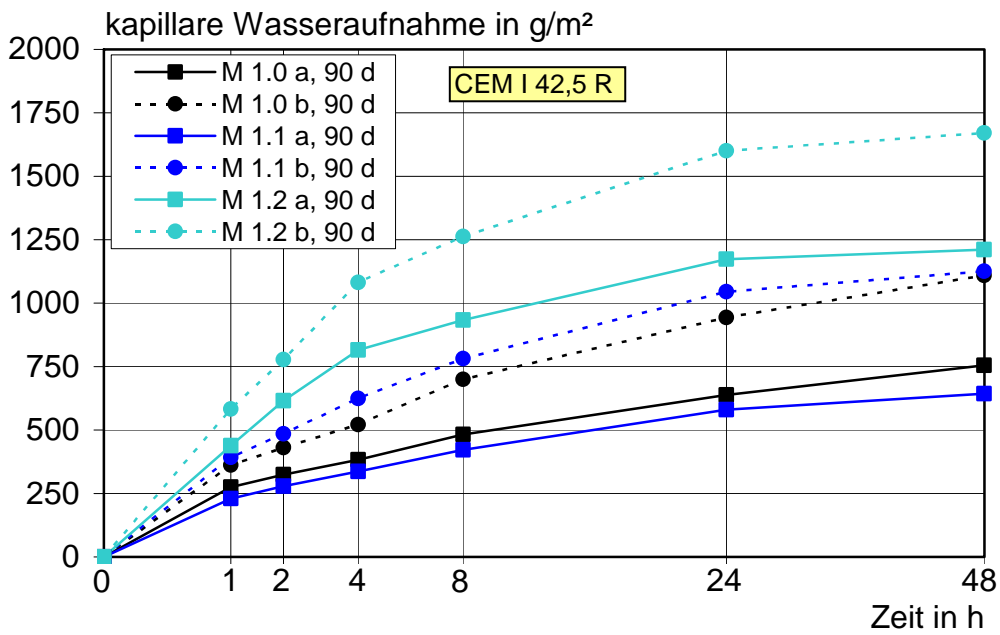


Bild B57: kapillare Wasseraufnahme nach 90 Tagen für die Mischungen mit CEM I

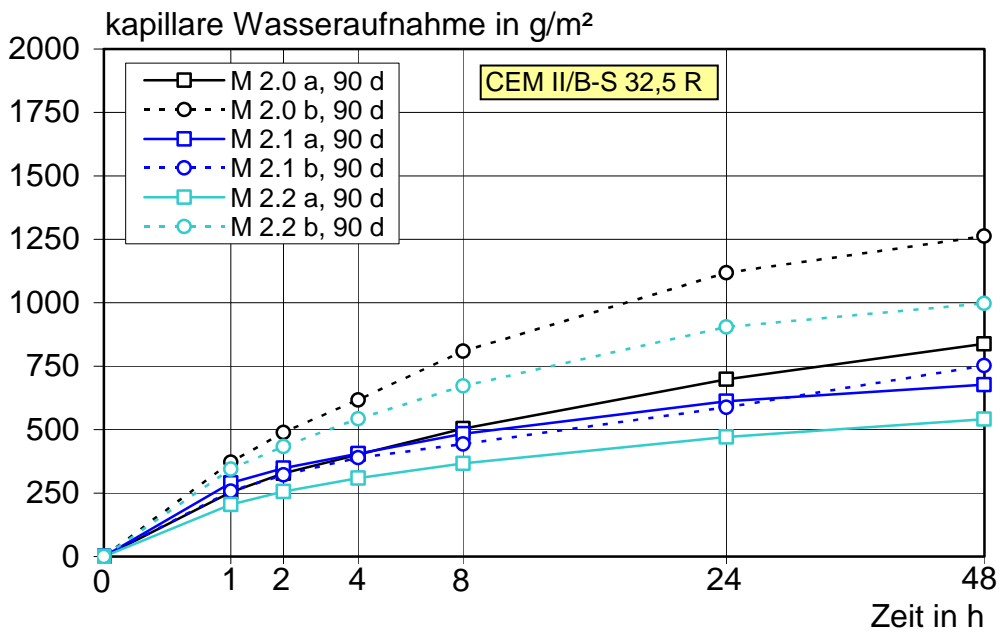


Bild B58: kapillare Wasseraufnahme nach 90 Tagen für die Mischungen mit CEM II/B-S



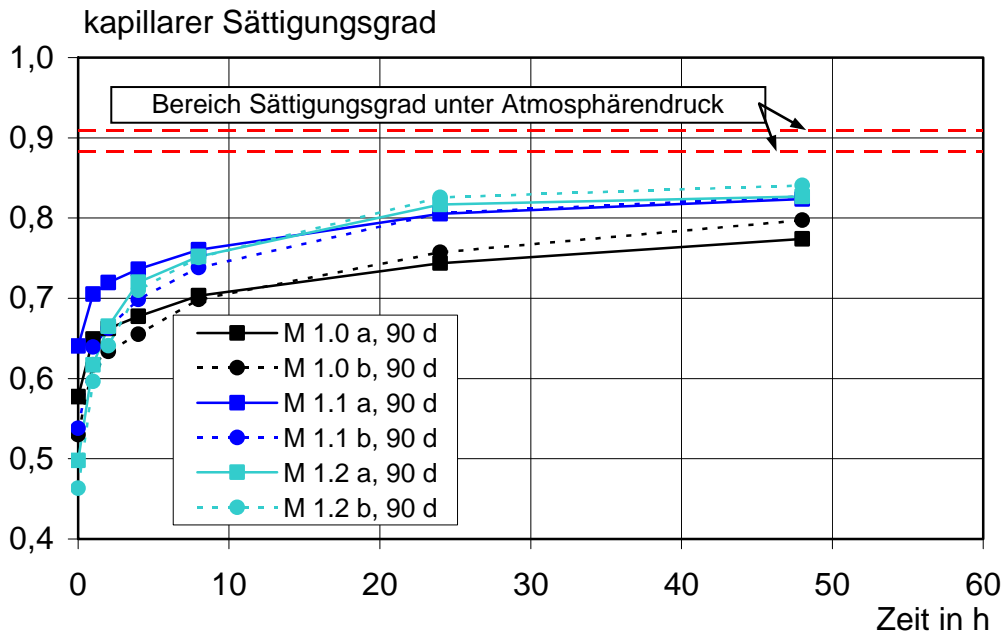


Bild B59: kapillarer Sättigungsgrad nach 90 Tagen für die Mischungen mit CEM I

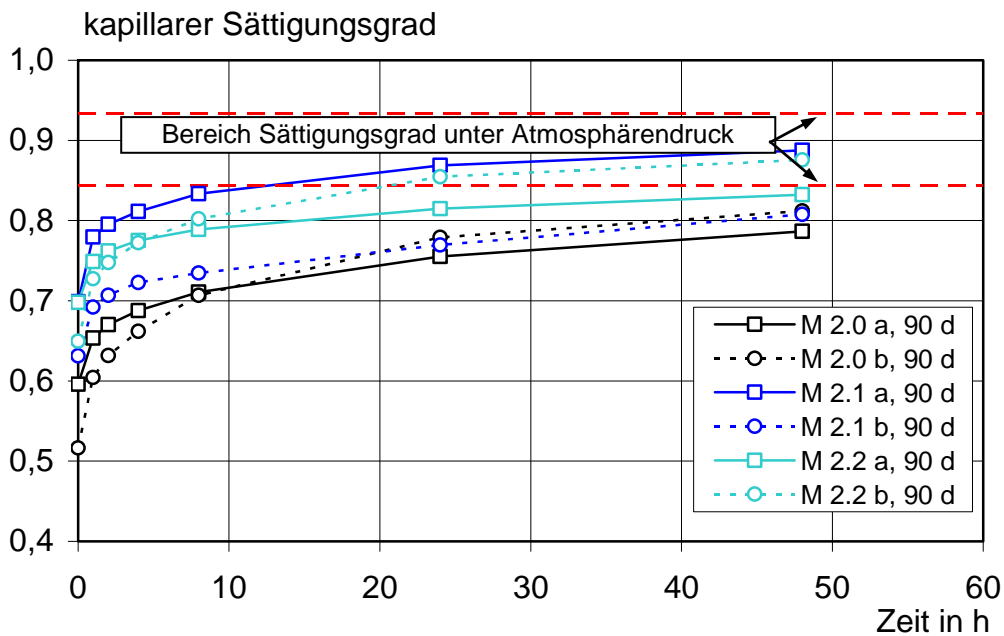


Bild B60: kapillarer Sättigungsgrad nach 90 Tagen für die Mischungen mit CEM II/B-S