

Einfluß der Feinststoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit

Von Jürgen Krell und Gerd Wischers, Düsseldorf*)

Übersicht

Das Mehlkorn des Betons hat für die Frisch- und Festbetoneigenschaften wesentliche Bedeutung, insbesondere im Hinblick auf das Zusammenhaltevermögen und das Erreichen eines dichten Gefüges. Bei den heute üblichen Gewinnungs- und Aufbereitungsverfahren werden die Zuschläge meist gewaschen; dabei wird der Feinstsand überwiegend mit ausgewaschen. Zur Einstellung des erforderlichen Mehlkorngehaltes werden daher dem Beton neben dem Zement häufig andere Feinststoffe, wie Steinkohlenflugasche oder Gesteinsmehl, zugegeben.

Zu diesem Fragenbereich wird im Forschungsinstitut der Zementindustrie ein größeres Forschungsvorhaben durchgeführt. Die nachfolgend erörterten, ersten Ergebnisse wurden an Betonen mit nur einem Zement (PZ 35 F) und einem Zuschlaggemisch (Rheinkiesand, Sieblinie A/B 16) gewonnen und können daher noch nicht verallgemeinert werden; sie geben jedoch zumindest die Tendenz an. Bei sonst gleicher Zusammensetzung hatte eine Mehlkornanreicherung durch Zugabe von Feinststoffen eine mehr oder weniger große, günstige Wirkung auf die Festigkeit und die Gasdichtigkeit des Betons. Dagegen wurden Dauerhaftigkeitskenngrößen, wie Frostwiderstand und Carbonatisierungsverhalten, durch eine solche Zugabe nicht verbessert. Bei teilweisem Austausch von Zement durch eine gleiche oder größere Menge an derartigen Feinststoffen wurde die Dauerhaftigkeit zum Teil deutlich vermindert. Auch konnte die häufig in der Literatur beschriebene konsistenzverbessernde Wirkung von Flugasche für festigkeitsgleiche Betone hier nicht bestätigt werden.

1. Einleitung

Praktisch alle Betoneigenschaften werden maßgeblich von der Zusammensetzung und dem Kornaufbau des Feinmörtels bestimmt, der aus Zement und Wasser sowie den Feinstbestandteilen des Zuschlags $\leq 0,125$ mm und gegebenenfalls zusätzlichen Feinststoffen besteht. Hierbei spielen neben Menge und Kornaufbau auch die Fä-

*) Erweiterte Fassung eines Vortrags auf der Technisch-wissenschaftlichen Zementtagung '88 des VDZ am 20./21. Januar 1988 in Düsseldorf

higkeit der einzelnen Mehlkornpartikel, mit dem Anmachwasser Reaktionsprodukte zu bilden, sowohl im Hinblick auf das rheologische Verhalten des Frischbetons als auch in bezug auf die Festbetoneigenschaften eine wesentliche Rolle.

Zur Abklärung der Frage, welche Betoneigenschaften vornehmlich durch die physikalische „Füllwirkung“ der Feinststoffe im Feinmörtel und welche darüber hinaus durch die Bildung von Reaktionsprodukten beeinflusst werden, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie mit finanzieller Unterstützung der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen umfangreiche Untersuchungen zur Bewertung von Flugaschen [1] hinsichtlich ihrer potentiellen Reaktivität sowie zugehörige vergleichende Betonversuche mit Flugaschen und inerten Gesteinsmehlen durchgeführt.

Der nachfolgende Bericht faßt die Ergebnisse der seit 1985 durchgeführten Versuche mit Beton aus einem Portlandzement Z 35 F sowie einem Zuschlaggemisch (Rheinkies sand mit konstanter Sieblinie) zusammen. Durch gezielte Variation von Art und Menge der verschiedenen Zusatzstoffe wurde der jeweilige Einfluß auf Frischbetonkonsistenz, Druckfestigkeit, Frostwiderstand, Gasdurchlässigkeit und Carbonatisierungsfortschritt untersucht. Da die Versuche sich auf einen Zement und ein Zuschlaggemisch beschränken, ferner der Einfluß von Zusatzmitteln nicht einbezogen wurde, und es sich ausschließlich um Laborversuche handelt, können die Ergebnisse nicht verallgemeinert werden. Sie geben jedoch nach Auffassung der Autoren zumindest die Tendenz zuverlässig wieder, was die inzwischen angefallenen weiteren Versuchsergebnisse bestätigen.

2. Stand der Erkenntnisse

Die Bedeutung des Mehlkorns im Hinblick auf eine Verbesserung des Zusammenhaltevermögens des Betons und der Dichtigkeit wird bereits in Arbeiten der 30er Jahre, z. B. [2 und 3], beschrieben. In neueren Arbeiten, z. B. [4], wird diese günstige Wirkung des Mehlkorns auf die Verminderung der Partikelabstände im Feinmörtel infolge der Verteilung des Wassers auf mehr Feinstkornoberfläche zurückgeführt.

Neben diesen grundsätzlichen Einflüssen von inertem Mehlkorn auf die Betoneigenschaften befaßt sich eine große Zahl von Arbeiten mit der Zugabe von Flugasche zu Beton und deren Auswirkung auf die verschiedensten Betoneigenschaften. Hier seien stellvertretend die zusammenfassenden Arbeiten [5 und 6] genannt. Die bei Zugabe zum sonst unveränderten Ausgangsbeton (Nullbeton) meist beobachtete Erhöhung der Druckfestigkeit und die häufig gleichzeitige Verbesserung der Gasdichtigkeit wird darin pauschal auf die zusätzliche Bildung von Hydratationsprodukten der Flugasche zurückgeführt. Der jeweils erzielte Festigkeitsbeitrag kann sehr unterschiedlich sein und wird offenbar von den jeweiligen Ausgangsstoffen und den verwendeten Betonzusammensetzungen bestimmt. Grundsätzlich wurde bei Zugabe von Flugasche (bis etwa 25% des Zementgewichts) bei konstantem Zement- und Wassergehalt eine Erhöhung der Festigkeit, beim teilweisen Austausch von Zement durch Flugasche jedoch stets eine Verminderung der 28-Tage-Fest-

stigkeit festgestellt. Je nach Flugasche trat eine mehr oder weniger ausgeprägte Nacherhärtung auf, wodurch in höherem Alter zwischen 90 Tagen und einem Jahr auch bei teilweise Austausch eine dem Nullbeton vergleichbare Festigkeit erreicht wurde.

Hinsichtlich Frost- und Carbonatisierungsverhalten von Beton mit Flugasche liegen unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse in der Literatur vor. Tendenziell zeichnet sich aber ab, daß sich bei kurzer Nachbehandlung und frühen Prüfterminen die Betone mit Flugasche deutlich ungünstiger verhalten als bei länger andauernder Nachbehandlung und späteren Prüfterminen [7].

Nach neueren Arbeiten, z. B. [4, 8 und 9], beeinflussen Feinheit und Kornverteilung des Mehlkorns neben dessen Reaktivität die Frisch- und Festbetoneigenschaften maßgeblich. Es ist daher anzunehmen, daß die für einige Flugaschen mit etwa gleicher Reaktivität und chemischer Zusammensetzung gefundenen widersprüchlichen Literaturangaben in [5 und 6] auf die zum Teil erheblichen physikalischen Unterschiede in der Kornverteilung zurückzuführen sind, die jedoch in [5 und 6] nicht erfaßt wurden.

3. Ziel und Umfang der Untersuchungen

Das Zusammenspiel der physikalischen Einflüsse der Kornverteilung und der chemisch-mineralogischen Einflüsse der Reaktivität bestimmter Anteile des Mehlkorns im Beton ist bislang nicht systematisch untersucht worden. Hierzu sollen die nachfolgenden Untersuchungen mit zunächst nur einem Portlandzement Z 35 F und einer Zuschlagzusammensetzung (Kiessand A/B 16) einen Beitrag liefern und qualitativ klären, ob und gegebenenfalls welche Beeinflussung der Frisch- und Festbetoneigenschaften mehr den physikalischen bzw. den chemisch-mineralogischen Eigenschaften der verschiedenartigen Feinststoffanteile im Mehlkorn zuzuschreiben sind. Dazu dienten vier unterschiedliche Zusammensetzungen der Ausgangsbetone (Nullbetone), denen jeweils 30 bis 90 kg/m³ Feinststoff zugegeben wurden, siehe Tafel 1. Die Abstufungen wurden bei stets konstantem Wassergehalt von 180 l/m³ und damit etwa gleicher Anfangskonsistenz im Bereich KP/KR so gewählt, daß der Bereich üblicher Praxisbetone abgedeckt ist und sich sowohl Aussagen für eine Zugabe als auch für einen teilweisen Austausch von Zement durch andere Feinststoffe ableiten lassen.

Tafel 1 Zusammensetzung der Betone mit PZ 35 F, w = 180 l und Rheinkießsandzuschlag A/B 16

Zementgehalt kg/m ³	w/z	Zusatzstoffgehalt kg/m ³			
240	0,75	0	30	60	90
270	0,67	—	0	30	60
300	0,60	—	—	0	30
330	0,55	—	—	—	0
Gesamtmehlkorngehalt kg/m ³ *)		245	275	305	335

*) einschließlich 5 kg/m³ aus dem Zuschlag

Es wurden fünf Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen des IfBt, Berlin, aber unterschiedlicher Kornverteilung, Dichte und Reaktivität, sowie zur Abschätzung des reinen Fülleffektes je zwei Gesteinsmehle aus Kalkstein und Quarz in die Untersuchungen einbezogen. An den Betonen wurden Konsistenz, Konsistenzentwicklung und Druckfestigkeit bestimmt, ferner als Kriterium für die Dauerhaftigkeit Frostwiderstand, Gasdurchlässigkeit und Carbonatisierungsverhalten (siehe Tafel 2). Ergänzende Untersuchungen — zunächst mit Portlandzement höherer Festigkeitsklasse und mit Hochofenzement — laufen derzeit, weitere sind in Vorbereitung.

Tafel 2 Art und Umfang der Prüfungen an Frisch- und Festbeton

zu prüfende Be oneigenschaft	Probekörper	Prüfzeitpunkte	Prüfkörperanzahl je Prüfzeitpunkt
Frischbetonkonsistenz	Ausbreitmaß	10 min und 45 min	1
Druckfestigkeit	15-cm-Würfel	28 d und 365 d*)	3
Gasdurchlässigkeit	∅ = 15 cm, h = 5 cm Scheibe	28 d und 365 d*)	2
Frostwiderstand	10-cm-Würfel	28 d (100 FTW)	2
Carbonatisierungstiefe	10 x 10 x 50 cm ³ Balken	365 d*)	2

*) Die Jahreswerte für die Betone mit Kalksteinmehlzugabe liegen für z = 240 kg/m³ noch nicht vor.

4. Durchführung und Ergebnisse der Untersuchungen

4.1 Ausgangsstoffe

Als Zement wurde ein Portlandzement Z 35 F verwendet, der hinsichtlich seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung sowie seiner Kornverteilung dem Durchschnitt der deutschen Portlandzemente der Klasse Z 35 F entsprach. Seine Normdruckfestigkeit gemäß DIN 1164 betrug nach 28 Tagen 48 N/mm². Die chemische Zusammensetzung der mehlfinen Ausgangsstoffe ist in Tafel 3 zusammengestellt. Tafel 4 enthält die physikalischen Kenngrößen.

Als Zusatzstoffe kamen fünf Steinkohlenflugaschen und vier Gesteinsmehle zur Anwendung. Drei Flugaschen stammten aus Schmelzkammerfeuerungen und zwei aus Trockenfeuerungen; sie wiesen eine unterschiedliche potentielle Reaktivität auf. Die Schmelzkammerasche 3 kam dabei hinsichtlich Kornverteilung und Dichte (siehe Tafel 4) den beiden Trockenfeuerungsaschen mit geringer potentieller Reaktivität sehr nahe. Die Reaktivität wurde anhand des aus Glasgehalt, chemischer Zusammensetzung und Feinheit gemäß [10] ermittelten Puzzolanitätsfaktors bewertet, der gut mit den Prüfwerten des Aktimet-Verfahrens übereinstimmt. Gemäß [10] kann man Flugaschen mit einem Puzzolanitätsfaktor über 80 als hochreaktiv, mit einem Puzzolanitätsfaktor von 30 bis 80 als mittelreaktiv und von unter 30 als wenig reaktiv einstufen (siehe Tafel 3).

Tafel 3 Chemische Zusammensetzung des Zements und der Flugaschen in Gew.-% sowie Reaktivität der Flugaschen

	Zement PZ 35 F	Flugasche				
		Schmelzkammerfeuerung			Trockenfeuerung	
	0	1	2	3	4	5
Glühverlust	2,8	3,9	1,9	1,5	3,4	2,2
SiO ₂	20,9	50,0	49,3	45,7	47,7	45,7
Al ₂ O ₃	5,9	27,8	28,7	29,0	27,8	29,0
TiO ₂	0,3	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
P ₂ O ₅	0,1	0,5	0,2	0,5	0,6	0,5
Fe ₂ O ₃	2,7	7,7	8,3	9,3	11,5	9,2
Mn ₂ O ₃	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
CaO	65,1	3,7	3,3	4,3	3,3	4,4
MgO	1,0	3,6	4,2	3,3	2,9	3,3
SO ₃	2,7	0,9	0,6	1,6	0,7	1,5
K ₂ O	1,0	3,9	3,6	3,9	3,0	4,0
Na ₂ O	0,2	0,5	0,4	1,2	1,2	1,2
Puzzolani- tätsfaktor	—	50	155	37	5	20
Reaktivität	—	mittel	hoch	mittel	gering	gering

Phasenzusammensetzung des Zements PZ 35 F nach Bogue
 $C_3S = 52,1$; $C_2S = 20,7$; $C_3A = 11,9$; $C_4AF = 8,2$ [Gew.-%]

Zur Abgrenzung des Füll- bzw. Reaktivitätseinflusses wurden zudem zwei weitgehend inerte Quarz- und zwei Kalksteinmehle mit jeweils unterschiedlicher Feinheit in die Untersuchung mit einbezogen. Die mit einem Lasergranulometer ermittelten Kornverteilungen aller Feinstoffe sind in Bild 1 als Summe des Kornanteils über der Wurzel der Korndurchmesser aufgetragen. Der nach DIN 1164 bestimmte Wasseranspruch der verschiedenen mehlfine Stoffe wurde neben der üblichen Angabe in Gew.-% auch in Vol.-% umge-

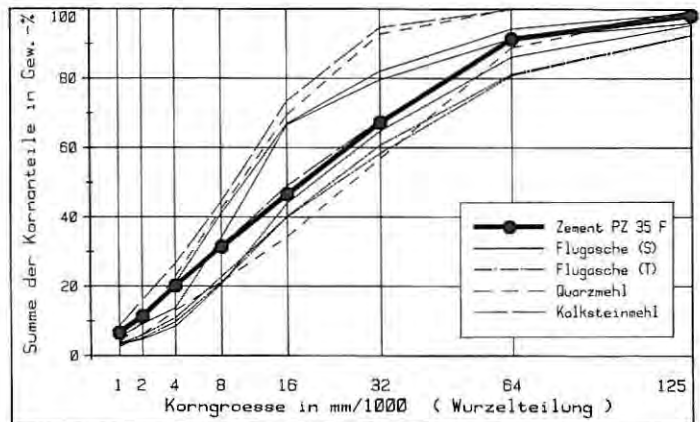


Bild 1 Kornverteilung der Feinstoffe

Tafel 4 Physikalische Eigenschaften der Feinststoffe

Nr.	Art des Feinststoffs		spez. Oberfläche	Rohdichte	Lageparameter ¹⁾	Steigungsmaß ¹⁾	Anteil $\leq 8 \mu\text{m}$	Anteil $\leq 4 \mu\text{m}$	Anteil $\leq 1 \mu\text{m}$	Wasseranspruch nach DIN 1164	
			cm ² /g	g/cm ³	x' μm	n —	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Vol.-%
0	PZ 35 F		3150	3,10	24,5	0,89	30	19	5,8	25,5 ²⁾	79 ²⁾
1	Flugasche	S 1	3700	2,43	21,0	0,98	34	14	5,4	22,0	53
2	Flugasche	S 2	3510	2,44	18,0	0,90	41	21	7,2	18,5	45
3	Flugasche	S 3	3090	2,23	32,0	1,05	21	9	3,2	31,0	69
4	Flugasche	T 1	3330	2,29	36,0	0,94	23	11	3,4	29,5	68
5	Flugasche	T 2	3060	2,22	36,0	0,99	21	10	3,2	31,0	69
6	Quarzmehl	1	2600	2,65	33,0	1,02	21	13	2,5	29,5	78
7	Quarzmehl	2	5280	2,65	13,0	1,26	42	22	3,8	31,0	82
8	Kalksteinmehl	1	3560	2,72	25,0	0,84	32	19	6,3	24,5	67
9	Kalksteinmehl	2	4810	2,72	11,0	1,04	44	27	8,5	28,5	78

¹⁾ Kornverteilungskennwerte der RRSB-Verteilung

²⁾ einschließlich rd. 6 Gew.-% Wasser, die infolge der Bildung der ersten Hydratationsprodukte rheologisch nicht mehr wirksam werden, d. h. der physikalische Wasseranspruch beträgt rd. 19,5 Gew.-% bzw. 60 Vol.-%

rechnet, um den Einfluß der unterschiedlichen Dichte beim Vergleich der Zusatzstoffe zu eliminieren.

Der im Vergleich zu Inertstoff etwa gleicher Kornverteilung etwas höhere Wasseranspruch des Zements dürfte auf die Bildung erster Hydratationsprodukte zurückzuführen sein, die bei der Bestimmung des Wasseranspruchs mit erfaßt werden [11]. Bei rechnerischer Berücksichtigung des durch erste Gefügebildung „verbrauchten“ Wassers ergibt sich der physikalische Wasseranspruch des Zements zu rd. 19,5 Gew.-% bzw. 60 Vol.-%.

Als Zuschlag wurde Rheinkiessand der Sieblinie A/B 16 aus fünf Korngruppen zusammengestellt. Der Anteil $\leq 0,125$ mm des Zuschlaggemisches entsprach mit 0,3 Gew.-%, bezogen auf die Gesamtsieblinie, dem am Niederrhein in der Praxis für gewaschenen Sand üblichen niedrigen Wert.

4.2 Betonherstellung und Lagerung der Probekörper

Der Beton wurde in Chargen von rd. 200 l in einem 250-l-Laborzwangsmischer eine Minute lang gemischt. Die Betonprüfkörper nach Tafel 2 wurden im Zeitraum 5 bis 20 Minuten nach dem Mischende hergestellt. Die Verdichtung erfolgte in Stahlformen auf einem Rütteltisch (3000 U/min, Schwingungsbreite ± 1 mm). Alle Betonprüfkörper verblieben 24 Stunden in der Form. Sie lagerten dann sechs Tage feucht in einer Nebelkammer bei 20 °C und rd. 100% r.F. und anschließend bis zur Prüfung im Klimaraum bei 20 °C und 65% r.F.

Die siebentägige Feuchtlagerung der Probekörper begünstigt mögliche puzzolanische Reaktionen der Flugasche. Wenngleich in der Praxis häufig ungünstigere Verhältnisse vorliegen, wurde diese Lagerung bewußt gewählt, um die bei sachgerechter Nachbehandlung erzielbaren Betoneigenschaften zu erfassen.

4.3 Prüfungen und Ergebnisse

Die *Frischbetonkonsistenz* wurde mit Hilfe des Ausbreitversuches nach DIN 1048 gemäß DIN 1045 (Juli 1988) für die Prüfzeitpunkte 10 und 45 min nach der Betonherstellung ermittelt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 2 und 3 dargestellt. Die Ausbreitmaße unter 40 cm waren überwiegend leicht zerfallen, d.h. das Ausbreitmaß war für diese Betone nur bedingt aussagekräftig.

Der *Luftgehalt* der Frischbetone wurde rd. 5 min nach der Betonherstellung mit dem Druckausgleichsverfahren (LP-Topf) bestimmt. Die Nullbetone wiesen dabei Frischluftgehalte von 1,5 bis 1,6 Vol.-% auf, die Betone mit den Flugaschen 1, 2 und 4 hatten tendenziell geringere Luftgehalte von 1,0 bis 1,6 Vol.-%, dagegen die mit den Flugaschen 3 und 5 sowie mit den Gesteinsmehlen tendenziell größere Luftgehalte zwischen 1,6 und 2,5 Vol.-%. Dabei waren die Werte über 2,0 Vol.-% im wesentlichen nur bei dem groben Quarzmehl 1 mit 2600 cm²/g Oberfläche beobachtet worden.

Die *Betondruckfestigkeit* wurde je Prüftermin an drei 15-cm-Würfeln gemäß DIN 1048 zu den Prüfzeitpunkten 28 und 365 Tage nach der Betonherstellung bestimmt. Die Bilder 4 und 5 zeigen jeweils die Mittelwerte der drei Prüfkörper.

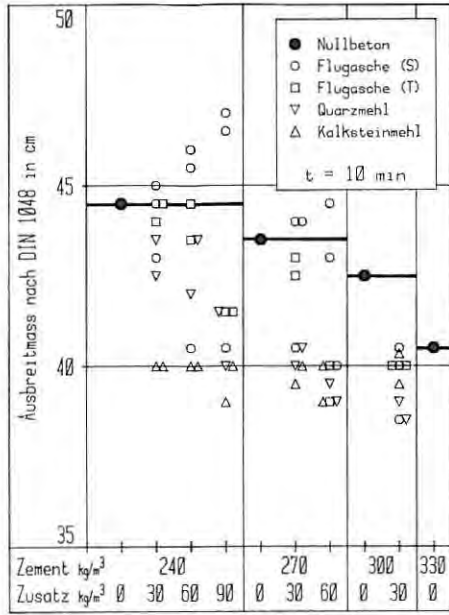


Bild 2
Konsistenz
10 min nach der
Betonherstellung

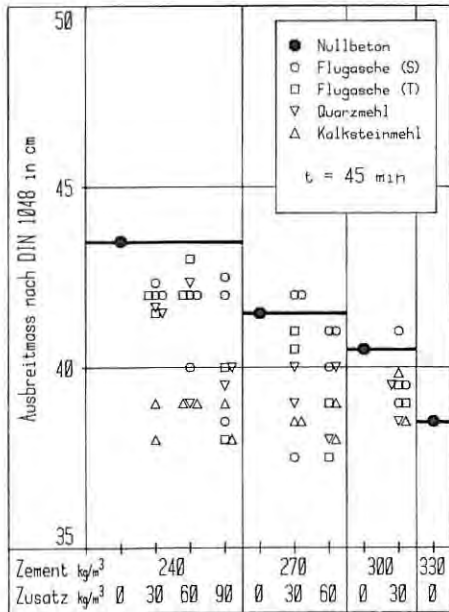


Bild 3
Konsistenz
45 min nach der
Betonherstellung

Bild 4
28-Tage-Druck-
festigkeit
(15-cm-Würfel)

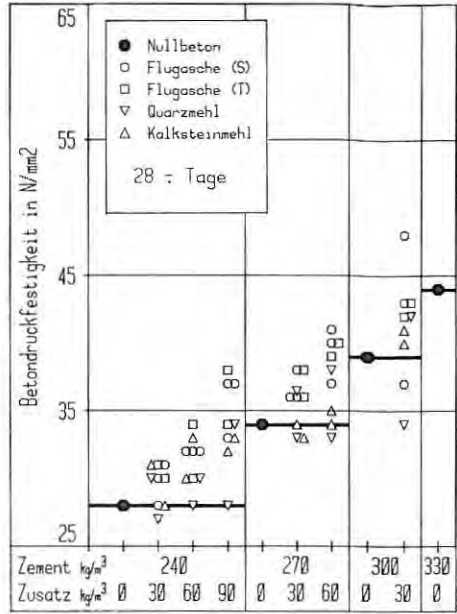
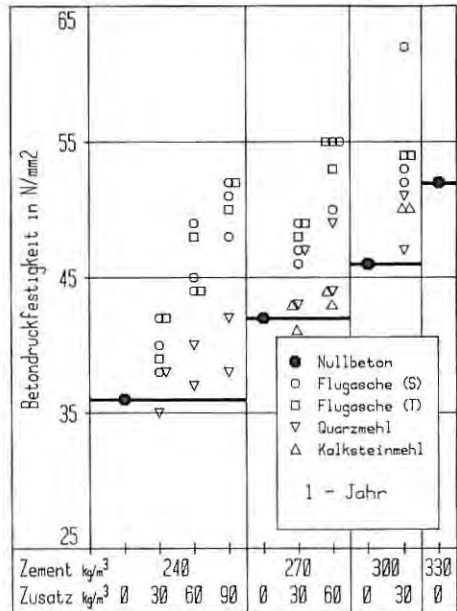


Bild 5
Einjahres-
druckfestigkeit
(15-cm-Würfel)



Der Frostwiderstand wurde nach dem VDZ-Würfelverfahren [12] bestimmt. Hierzu wurden je zwei 10-cm-Würfel nach der siebentägigen Feuchtlagerung bis zum 27. Tag bei 20 °C und 65 % r.F. gelagert, dann einen Tag unter Wasser belassen und danach, d.h. im Alter von 28 Tagen, 100 Frost-Tauwechselln unterworfen (Zyklusdauer 24 Stunden, Maximaltemperatur + 20 °C, Minimaltemperatur - 15 °C, Probekörper ständig unter Wasser bzw. unter Eis). Die dabei aufgetretene Abfroston — Mittelwert beider Prüfkörper — wurde als Gewichtsverlust der Ausgangsprobe im Bild 6 angegeben. Zur Beurteilung der Dichtigkeit, insbesondere im Hinblick auf die

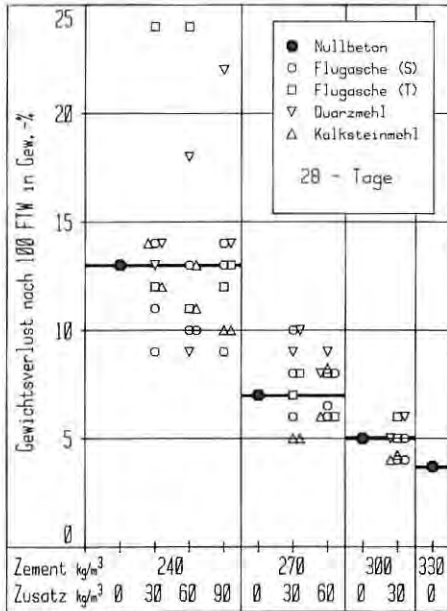


Bild 6
Frostwiderstand nach
100 Frost-Tau-Zyklen
(Prüfbeginn
nach 28 Tagen,
10-cm-Würfel)

Diffusion von korrosionsfördernden oder schädigenden Gasen, wurde die Sauerstoffpermeabilität bei Drücken von 0,5 bis 2 bar an je zwei Scheiben mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe gemäß [13] bestimmt. Die Mittelwerte der beiden je Beton hergestellten Probekörper sind für die Prüfzeitpunkte 28 Tage und 365 Tage in den Bildern 7 und 8 als Permeabilitätskoeffizient angegeben.

Die Carbonatisierungstiefe wurde je Beton an zwei gemäß DIN 1048 gelagerten 10 cm x 10 cm x 50 cm-Balken durch Abspalten einer ca. 5 cm dicken Scheibe und Ansprühen der frischen Bruchfläche mit Phenolphthalein anhand der Farbumschlagsgrenze gemäß [14] bestimmt. Je Probekörper wurden die mittleren Carbonatisierungstiefen der vier Seiten gemittelt. In Bild 9 sind die Mittelwerte der beiden Prüfkörper nach einem Jahr Lagerung auf volle mm gerundet angegeben.

Bild 7
 Gasdurchlässigkeit
 nach 28 Tagen
 (Scheiben $h = 5 \text{ cm}$,
 $\varnothing = 15 \text{ cm}$)

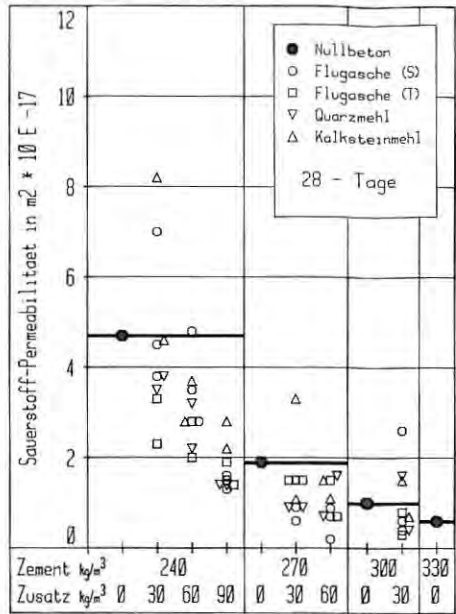
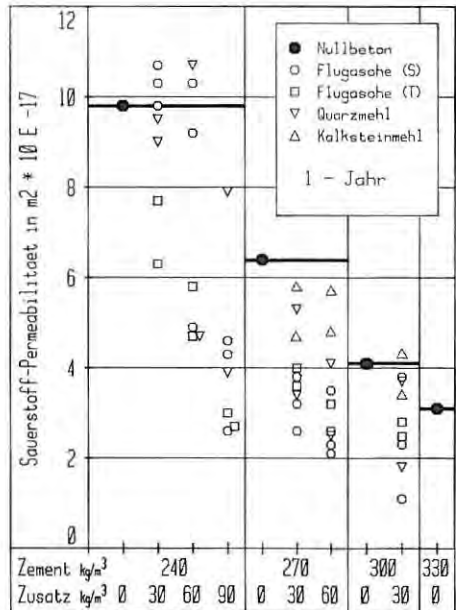


Bild 8
 Gasdurchlässigkeit
 nach einem Jahr
 (Scheiben $h = 5 \text{ cm}$,
 $\varnothing = 15 \text{ cm}$)



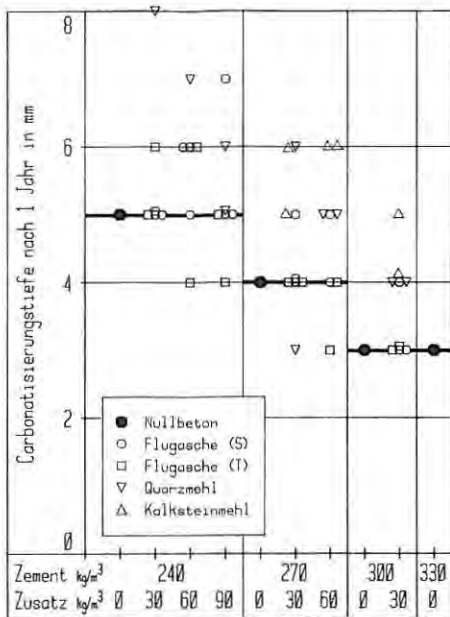


Bild 9
Carbonatisierungstiefe
nach einem Jahr
(Balken 10 cm x
10 cm x 50 cm)

5. Erörterung der Ergebnisse

5.1 Konsistenz

Bild 2 zeigt für die Nullbetone den erwarteten Zusammenhang einer mit sinkendem w/z-Wert geringfügig steifer werdenden Ausgangskonsistenz, die von 44,5 cm auf 40,5 cm im Ausbreitmaß zurückging. Durch die Zugabe von Feinststoffen wurde im Vergleich zum jeweiligen Nullbeton die Konsistenz mit steigender Zugabemenge der beiden feinstkornreichen Schmelzkammerflugaschen 1 und 2 weicher; demgegenüber führte die Zugabe aller anderen Feinststoffe zu einer mehr oder weniger steiferen Konsistenz. Bei den steiferen Konsistenzen mit Ausbreitmaßen ≤ 40 cm ist eine Differenzierung des Verarbeitungsverhaltens mit dem Ausbreitversuch nur bedingt möglich [15].

Die unterschiedliche Wirkung einer Feinststoffzugabe auf die Frischbetonkonsistenz korrelierte für die Betone mit einem w/z-Wert $\geq 0,65$ tendenziell mit dem Wasseranspruch des jeweiligen Feinststoffes. Mit steigendem Wasseranspruch, bezogen auf das Volumen, siehe Tafel 4, ergab sich eine steifere Betonkonsistenz bei der Zugabe. Dabei zeigte sich für diejenigen Feinststoffe, deren Wasseranspruch geringer war als der physikalische Wasseranspruch des verwendeten Zementes (60 Vol.-%), eine weichere, für die mit höherem Wasseranspruch eine steifere Konsistenz als beim zugehörigen Nullbeton.

Für die Bestimmung der Kornverteilung im Lasergranulometer wurden die Feinststoffe in Alkohol dispergiert. Die so ermittelte Korngrö-

ßenverteilung wird im Beton durch Flockenbildung oder Agglomeration, wie in [16] beschrieben, vor allem im Feinstbereich wieder überdeckt, so daß nicht die vorher bestimmten Korngrößen, sondern eine „größere“ Kornstruktur im Beton wirksam werden. Für die Erklärung der beobachteten Unterschiede wurden daher nicht die Kornverteilungskennwerte der Feinststoffe herangezogen. Bei der Probenvorbereitung für die Kornverteilungsbestimmung zeigte sich, daß der Dispergieraufwand für die Kalksteinmehle deutlich größer war als für die anderen untersuchten Feinststoffe. Dies könnte eine mögliche Erklärung für die relativ steife Betonkonsistenz bei Einsatz der Kalksteinmehle sowie den bei etwa gleicher Kornverteilung im Vergleich zur Flugasche größeren Wasseranspruch des Kalksteinmehls darstellen. Darüber hinaus wird in [16] beschrieben, daß Flugaschen in einem Zement/Flugasche-Gemisch dispergierend auf die Zementpartikel wirken können. Es ist zu vermuten, daß durch eine weitere Dispergierung der Feinststoffe, z.B. durch Verwendung von verflüssigendem Zusatzmittel, die „Füllwirkung“ verbessert werden kann.

Neben den beschriebenen unterschiedlichen Wirkungen der Feinststoffe ist dem Bild 2 auch der Einfluß eines mengenmäßigen Teilaustausches von Zement durch Feinststoffe zu entnehmen. Hier wird im Vergleich zur Mischung mit 330 kg/m^3 Zement bei Mischungen mit Zement- + Feinststoff-Anteilen in kg/m^3 von $240 + 90$ ein um rd. 7 cm größeres, bei $270 + 60$ ein rd. 4 cm größeres und bei $300 + 30$ ein etwa gleiches Ausbreitmaß (10 min nach Herstellung) für die feinkörnige Schmelzkammerflugasche gefunden. Bei den anderen Feinststoffen ergab sich trotz der insgesamt geringeren Mengen an anfänglich gebildeten Reaktionsprodukten etwa gleiche Konsistenz wie beim Beton mit 330 kg/m^3 Zement. Hier wird die „Verdünnung“ der Gefügebildung durch die inerten Feinststoffe offenbar durch den größeren Wasseranspruch der Feinststoffe mehr als aufgezehrt.

Aus dem Vergleich der Bilder 2 und 3 läßt sich das Ansteifen ablesen. In Bild 3 ist augenfällig, daß eine Zugabe von Feinststoffen praktisch in allen Fällen 45 min nach der Herstellung eine gleiche oder steifere Konsistenz erbrachte als der zugehörige Nullbeton. Dies kann auf die dichtere Packung der Feinstkornpartikel zurückgeführt werden, wodurch die Reaktionsprodukte früher die schmierende Wasserschichtdicke zwischen den Partikeln überbrücken können.

In Bild 10 ist der ermittelte Ansteifverlauf für die vier Nullbetone und exemplarisch die beiden Mischungen $240 + 90$ und $270 + 60$ aufgetragen. Für die feinen Schmelzkammeraschen ist mit größer werdender Menge an Flugasche anfänglich eine verflüssigende Wirkung zu erkennen. Sie ging jedoch mit fortschreitender Zeit deutlich zurück und erreichte nach 45 min etwa die Werte des Nullbetons mit 270 kg/m^3 Zement.

Bei allen anderen Flugaschen und sämtlichen Gesteinsmehlen wiesen beide Mischungen hinsichtlich des Ansteifens ein dem Nullbeton mit 330 kg/m^3 Zement ähnliches Verhalten auf. Hierbei ist einschränkend zu berücksichtigen, daß die Konsistenz dieser Betone zum Zeitpunkt 45 min nach Herstellung im unteren Grenzbereich der Aussagefähigkeit des Ausbreitmaßes lagen, so daß möglicher-

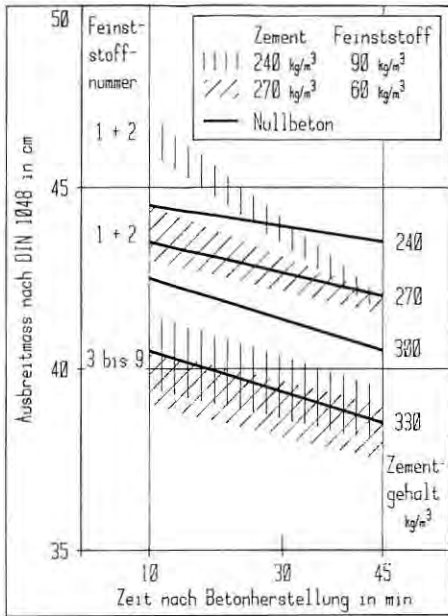


Bild 10
Ansteifverlauf des Betons
mit und ohne Feinststoff-
zugabe

weise die Konsistenz dieser Betone, insbesondere des Nullbetons, zu günstig beurteilt wurde.

5.2 Betondruckfestigkeit

In Bild 4 ist der bei Zugabe von Feinststoff gegenüber dem jeweiligen Nullbeton erzielbare Festigkeitszuwachs abzulesen. Für die Mischung 240 + 90 lag er für das grobe Quarzmehl 1 bei Null und reichte bei einigen Flugaschen bis rd. 10 N/mm².

Grundsätzlich erbrachte die Zugabe des Quarzmehls 1 mit rd. 2600 cm²/g Oberfläche, d. h. dem größten verwendeten Feinststoff, keine Festigkeitssteigerung bei der Zugabe. Bei dem Beton mit 300 kg/m³ Zement war sogar durch die Zugabe von 30 kg/m³ dieses Quarzmehls eine signifikante Festigkeitsminderung festzustellen. Wie bereits bei den Luftgehaltsbestimmungen beschrieben, wiesen die Betone mit Quarzmehl 1 deutlich höhere Frischluftgehalte von im Mittel 2,3 Vol.-% auf. Dies läßt darauf schließen, daß aufgrund der relativ groben Feinstkornpartikel kein dichtes Feinstkorngefüge entstanden ist.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit von puzzolanischen Zusatzstoffen in bezug auf die Druckfestigkeit wird in der Literatur des öfteren ein modifizierter w/z-Ansatz gemäß Gleichung 1 gewählt [17], wobei k die Wirksamkeit des Zusatzstoffes im Verhältnis zu Zement darstellt.

$$B = f [w/(z + k \cdot b)] \quad (1)$$

Darin bedeuten:

B = Betondruckfestigkeit

f [] = Funktion von [. . .]

w = Wassergehalt; z = Zementgehalt; b = Betonzusatzstoffgehalt
 k = Festigkeitsbildungswert des Betonzusatzstoffes

Unter sonst gleichen Verhältnissen sinkt die Druckfestigkeit des Betons mit zunehmendem Porenraum, z.B. durch künstlich eingeführte Luftporen oder durch Luftporen infolge mangelnder Verdichtung. Das bekannte, empirisch gewonnene „Wasser-Zementwert-Gesetz“ basiert auf einem durchschnittlichen Luftporengehalt von 1,5 Vol.-%, entsprechend 15 l/m³. Um den Einfluß der unterschiedlichen Luftporengehalte im Frischbeton auf die Druckfestigkeit zu berücksichtigen, wurde von dem bei den Versuchen festgestellten Luftporengehalt 15 l/m³ abgezogen und der Differenzbetrag dem Wassergehalt w hinzugefügt, siehe Gleichung 2. Bei einer solchen Berechnung wird unterstellt, daß sich ein über 15 l/m³ hinausgehender Luftporengehalt wie ein entsprechend erhöhter Wassergehalt auf die Druckfestigkeit auswirkt.

$$B = f [(w + (l - 15)) / (z + k \cdot b)] \quad (2)$$

Darin bedeuten:

l = Luftgehalt in l/m³ als „Wasser“ gerechnet (weitere Bezeichnungen siehe Gleichung (1))

Trägt man die 28-Tage-Druckfestigkeit über diesen modifizierten w/z -Wert auf, so ergibt sich für $k = 0,3$ ein recht guter Zusammenhang, siehe Bild 11. Das bedeutet, daß bei diesen Untersuchungen für inerte und für puzzolanische Feinstoffe in erster Näherung der gleiche Festigkeitsbildungswert $k = 0,3$ gefunden wurde. Rund zwei Drittel aller Flugaschen lagen über der eingezeichneten Verbindungs-

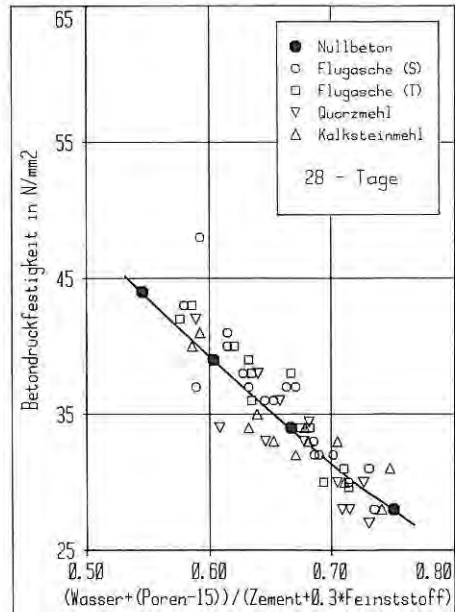


Bild 11
 Abhängigkeit
 von 28-Tage-
 Druckfestigkeit und
 modifiziertem w/z -Wert

dungslinie der Nullbetone, während bei den Gesteinsmehlen etwas mehr als die Hälfte unterhalb dieser Linie lagen. Mit Ausnahme der auffallend hohen Festigkeit für die besonders reaktive Flugasche 2 (bei dem Beton 300 + 30) lagen alle Werte in einem Streubereich von nur $\pm 3 \text{ N/mm}^2$ um die Nulllinie. Die gefundenen Ergebnisse bestätigen die in [18] von Kautz et al. aufgestellte These, daß für die Wirkung im Alter von 28 Tagen „der Hauptanteil der ‚Flugasche-reaktivität‘ ein verdichtender Matrixeffekt ist“, d. h. Flugasche verhält sich in den für die Betonfestigkeitsklasse maßgebenden, ersten 28 Tagen nahezu wie inerte Feinststoff. Die das Gefüge verdichtende Wirkung eines Feinststoffzusatzes läßt sich durch die infolge größerer Feinkornoberfläche geringere Wasserfilmdicke um die einzelnen Partikel im Frischbeton erklären, weil dadurch der durch die Hydratationsprodukte zu überbrückende Abstand zwischen den einzelnen Partikeln kleiner wird. Der Anteil an Stoffen, die sich praktisch inert gegenüber Zement verhalten, muß dabei so gering bleiben, daß die Hydratationsprodukte noch ein zusammenhängendes Gefüge bilden und den ursprünglich mit Anmachwacher gefüllten Raum weitgehend ausfüllen können [19].

Bei den Einjahreswerten der Druckfestigkeit (Bild 5) zeigte sich für die Flugaschen eine deutliche zusätzliche Festigkeitssteigerung (Nacherhärtung) gegenüber den Gesteinsmehlen. Auch die Darstellung über dem modifizierten Wasserzementwert (Bild 12) bestätigt die bekannte größere Nacherhärtung der Betone mit Flugasche gegenüber den Betonen ohne puzzolanische Zusatzstoffe.

5.3 Frostwiderstand

Die Ergebnisse der Frostversuche (Bild 6) zeigen, daß insbesondere bei der zementarmen Mischung das grobe Quarzmehl 1 mit steigender Zugabemenge den Frostwiderstand verschlechterte. Offenbar wurde durch die grobe Struktur des Quarzmehls das für den Frost maßgebende Porengefüge ungünstiger. Für die relativ grobe Trockenfeuerungsflugasche 5 ergab sich bei den weniger dichten Betonen (240 kg/m^3 Zement plus 30 bzw. 60 kg/m^3 Flugasche) ein sehr hoher Gewichtsverlust durch Frost-Tauwechsel-Beanspruchung, der sich auch bei Wiederholungsversuchen bestätigte. Ein Grund für dieses sehr ungünstige Verhalten kann derzeit nicht angegeben werden.

Generell führte eine Zugabe der untersuchten Feinststoffe nicht zu einer signifikanten Verbesserung des Frostwiderstands im Vergleich zum Nullbeton. Alle Abweichungen der Einzelergebnisse lagen dabei im Streubereich des Prüfverfahrens, der mit $\pm 3 \text{ Gew.-%}$ anzunehmen ist. Daraus ergibt sich, daß die Zugabe von Feinststoff zwar die Festigkeit mehr oder weniger deutlich steigert, daß jedoch der Frostwiderstand dadurch wenig verändert oder sogar vermindert wird. Wird daher eine bestimmte Festigkeit durch Austausch von Zement durch eine gleiche oder eine zum Teil höhere Menge an Zusatzstoff erzielt, so muß mit einem gegenüber dem Nullbeton deutlich verminderten Frostwiderstand gerechnet werden.

Das geht auch aus Bild 13 hervor, in dem der Frostwiderstand der verschiedenen Betone der jeweils zugehörigen 28-Tage-Druckfestigkeit gegenübergestellt ist. Das Bild verdeutlicht, daß der Frostwi-

Bild 12
 Abhängigkeit von Ein-
 jahresdruckfestigkeit
 und modifiziertem
 w/z-Wert

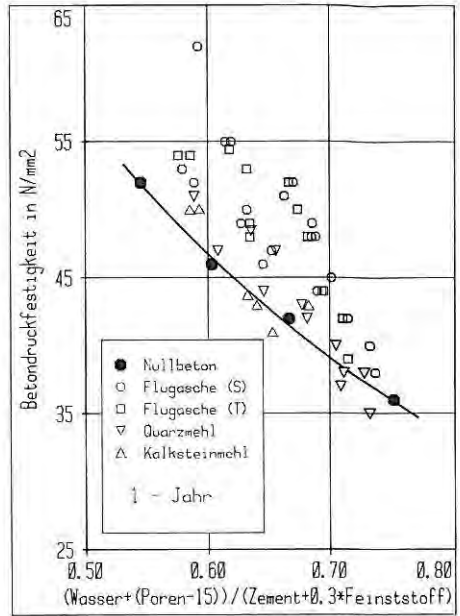
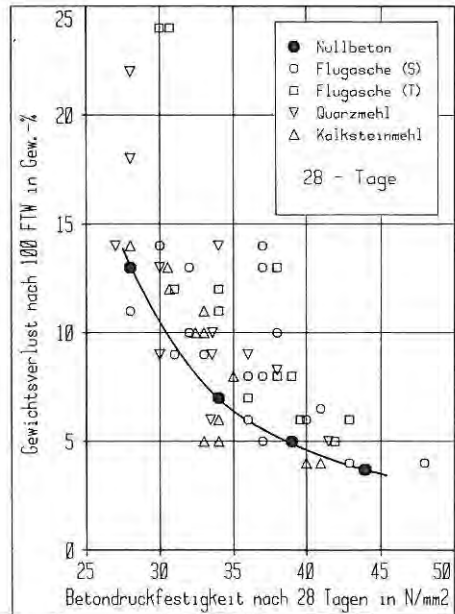


Bild 13
 Gegenüberstellung
 von Frostwiderstand
 und 28-Tage-
 Druckfestigkeit



derstand, bezogen auf die jeweilige Druckfestigkeit nach 28 Tagen, durch Zusatzstoffe praktisch in keinem Fall verbessert, in der Mehrzahl der Fälle sogar deutlich verschlechtert wurde. Offenbar wird der Frostwiderstand bei Prüfbeginn nach 28 Tagen primär vom w/z-Wert bestimmt, d.h. ohne Berücksichtigung der reaktiven oder inerten Zusatzstoffe.

Aus dem Bild geht zudem hervor, daß der dem Nullbeton mit 300 kg/m^3 Zement und Wasserzementwert 0,60, d.h. Beton für Außenbauteile gemäß der neuen DIN 1045 (Juli 1988), vergleichbare Frostwiderstand stets erreicht wurde, wenn die 28-Tage-Druckfestigkeit 40 N/mm^2 nicht unterschritt, d.h. wenn der Beton mindestens der Festigkeitsklasse B 35 entsprach.

5.4 Gasdurchlässigkeit

Die Ergebnisse der Gasdurchlässigkeitsmessung nach 28 Tagen, siehe Bild 7, zeigen — abgesehen von dem groben Kalksteinmehl und zwei weiteren Ausreißern —, daß eine Zugabe von Feinstoff tendenziell zu einem dichteren Gefüge führt. Dies war aufgrund der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Verminderung der Feinstkornabstände auch zu erwarten. Dementsprechend besteht zwischen der Gasdurchlässigkeit, sofern man die Prüfstreuung von etwa $\pm 2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ berücksichtigt, und der Druckfestigkeit ein tendenzieller Zusammenhang, siehe Bild 14. Auch hierbei wurden Werte, wie sie für Beton für Außenbauteile gemäß der neuen DIN 1045 (Juli 1988) charakteristisch sind, nur dann von Betonen mit Zusatz-

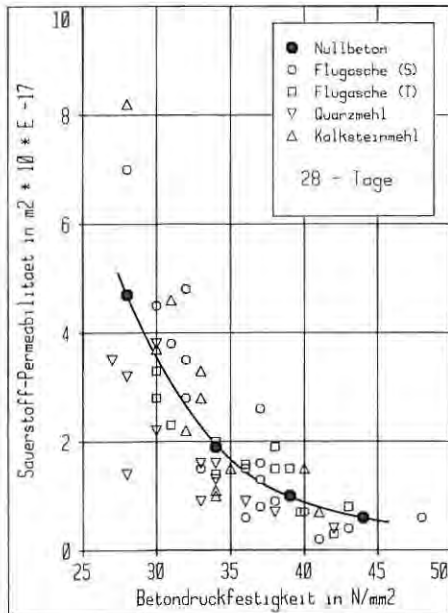


Bild 14
Gegenüberstellung
von Gasdurchlässigkeit
und Druckfestigkeit
im Alter von 28 Tagen

stoffen erreicht, wenn der Beton mindestens der Festigkeitsklasse B 35 entsprach.

Auch bei Gasdurchlässigkeitsmessungen an ein Jahr alten Prüfkörpern, siehe Bild 8, zeigte sich die „verdichtende“ Wirkung einer Zusatzstoffzugabe gegenüber dem jeweiligen Nullbeton. Insgesamt wurde für höhere Betonalter (Bild 3) entgegen der Festigkeitsentwicklung, die ein dichteres Gefüge erwarten ließ, eine größere Gasdurchlässigkeit der Probekörper im Vergleich zum Prüfalter von 28 Tagen gefunden. Dies dürfte auf ein weiteres Austrocknen der Probekörper zurückzuführen sein, da wassergefüllte Kapillarporen bei dem Gasdurchlässigkeitsversuch nicht durchströmt werden und daher abdichtend wirken. Im Vergleich zum Prüfalter von 28 Tagen dürfte trotz weiter fortgeschrittener Hydratation das in den Kapillarporen verfügbare Wasser durch chemisches Einbinden und Austrocknung deutlich vermindert worden sein, so daß sich insgesamt eine höhere Gasdurchlässigkeit ergab.

5.5 Carbonatisierungstiefe

Die Carbonatisierungstiefen der sieben Tage feucht nachbehandelten Probekörper sind für ein Jahr Luftlagerung in Bild 9 dargestellt. Die insgesamt relativ geringen Werte sind auf die günstige Nachbehandlung zurückzuführen. Berücksichtigt man die bei der visuellen Bestimmung der Farbumschlaggrenze auftretende Prüfstreuung von etwa ± 1 mm, so wurden mit Ausnahme des groben Quarzmehls 1, das den Carbonatisierungsfortschritt erhöhte, bei Zugabe

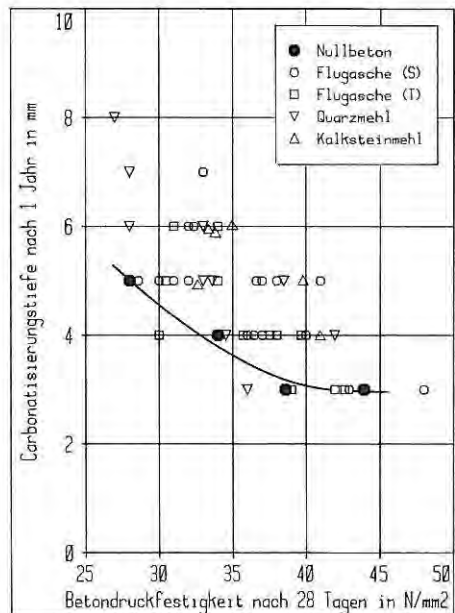


Bild 15
Gegenüberstellung
von Carbonatisierungstiefe
nach einem Jahr
und 28-Tage-
Druckfestigkeit

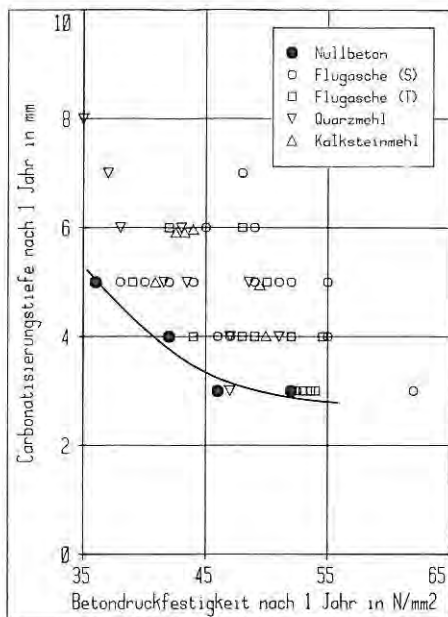


Bild 16
Gegenüberstellung
von Carbonatisierungs-
tiefe und Druck-
festigkeit im Alter von
einem Jahr

von Feinstoffen in der Regel die gleichen Carbonatisierungstiefen gefunden wie beim zugehörigen Nullbeton.

Die als Grund für die abdichtende Wirkung der Zusatzstoffzugabe vermutete Verminderung der Partikelabstände im Feinstmörtel beeinflusst offenbar die für die Carbonatisierung maßgebenden Diffusionsvorgänge praktisch nicht. Daraus ergibt sich, daß bei Austausch von Zement durch gleiche oder größere Mengen an Feinststoff der Carbonatisierungsfortschritt bei konstantem Wassergehalt in der Regel größer wird.

Dies bestätigt auch Bild 15, in dem die Carbonatisierungstiefe gegen die Druckfestigkeit nach 28 Tagen aufgetragen ist. Praktisch alle Betone mit Zusatzstoff wiesen höhere Carbonatisierungstiefen auf als der festigkeitsgleiche, Zusatzstofffreie Vergleichsbeton, wobei die größten Einzelwerte der Carbonatisierungstiefe für die Betone mit hochreaktiven Flugaschen gefunden wurden. Inwieweit dies auf den für die puzzolanische Reaktion erforderlichen Verbrauch an Calciumhydroxid und damit auf die Verminderung der chemisch aufnehmbaren Menge an CO_2 aus der Luft zurückgeführt werden kann, bedarf weiterer Klärung. Noch ausgeprägter zeigt sich dieses Verhalten beim Vergleich der Carbonatisierungstiefen mit der zugehörigen Einjahresfestigkeit, siehe Bild 16.

6. Zusammenfassung und Folgerungen

Einbezogen in die Untersuchungen wurden zusatzmittelfreie Betone mit vier praxisüblichen Zementgehalten aus einem PZ 35 F so wie stets gleichem Zuschlaggemisch (Rheinkiesand A/B 16) und

konstantem Wassergehalt von 180 l/m^3 . Diesen vier Ausgangsbetonen (Nullbetonen) wurden insgesamt neun nach puzzolanischer Reaktivität und Kornverteilung verschiedene Feinststoffe in Mengen von 0, 30, 60 und 90 kg/m^3 zugegeben. In Anbetracht des zwar umfangreichen, gegenüber den praktischen Möglichkeiten jedoch eingeschränkten Umfangs dieser Laborversuche gelten die nachfolgenden Folgerungen streng nur für den untersuchten Bereich. Wenngleich sie nicht ohne weiteres verallgemeinert werden dürfen, liefern sie doch zumindest einen gesicherten Anhalt für die Praxis.

6.1 Eine Zugabe oder ein teilweiser Austausch von Zement durch Flugasche verbesserte bei konstantem Wassergehalt nur bei Schmelzkammerflugasche mit mehr als 30 Gew.-% Partikeln unter $8 \mu\text{m}$ die Frischbetonausgangskonsistenz. Flugaschen mit geringerem Feinanteil sowie die untersuchten Gesteinsmehle — auch die mit hohem Feinanteil — führten zu steiferen Ausgangskonsistenzen. Die günstige Wirkung feiner Schmelzkammerflugaschen zeigte sich bei späteren Prüfzeitpunkten ($t = 45 \text{ min}$) der Konsistenz allerdings nicht mehr.

Beim Vergleich festigkeitgleicher Mischungen, d. h. Teilaustausch des Zementes durch mindestens die doppelte Menge an Zusatzstoff, wurde sowohl bei der Ausgangskonsistenz als auch bei der Konsistenz 45 min nach Herstellung für die feinen Schmelzkammerflugaschen gleiche bis geringfügig steifere und bei den anderen Zusatzstoffen z. T. deutlich steifere Konsistenz gefunden. Die in der Literatur des öfteren zitierte deutliche „konsistenzverbessernde Wirkung von Flugasche“, die zu einer Reduzierung des Wassergehaltes führen soll, wurde bei diesen umfangreichen Untersuchungen mit fünf verschiedenen Flugaschen nicht festgestellt.

6.2 Sofern die Zugabe von Feinststoffen den Luftgehalt des Frischbetons nicht erhöhte, steigerte sie die 28-Tage-Druckfestigkeit mehr oder weniger deutlich. Für diese Steigerung ist bei siebentägiger Nachbehandlung überwiegend der mit steigender Feinheit des Zusatzstoffes zunehmende Fülleffekt maßgebend. Für die untersuchten Gesteinsmehle und Flugaschen im Feinheitsbereich 2600 bis $5000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ergab sich in dem untersuchten Bereich für die 28-Tage-Festigkeit ein etwa gleicher Festigkeitsbildungsfaktor von $k = 0,3$.

6.3 Die Nacherhärtung der Betone mit Zusatzstoffen überstieg stets die der Betone ohne Zusatzstoffe. Im Vergleich zu Gesteinsmehl ergab eine Zugabe von Flugasche je nach deren Reaktivität einen mehr oder weniger deutlich ausgeprägten zusätzlichen Festigkeitszuwachs nach einjähriger Klimaraumlagerung.

6.4 Die Gasdichtigkeit, die neben Frost- und Carbonatisierungsverhalten zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit herangezogen wurde, korrelierte relativ gut mit der Druckfestigkeit, d. h. bei gleicher Festigkeit ist für Betone mit und ohne Zusatzstoffe hinsichtlich der Gasdurchlässigkeit kein ausgeprägt unterschiedliches Verhalten zu erwarten.

6.5 Der Frostwiderstand der Betone mit Zusatzstoffen war trotz der günstigen siebentägigen Nachbehandlung und Beginn der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung im Alter von 28 Tagen in der Regel signifikant schlechter als beim festigkeitgleichen Beton ohne Zusatzstoff. Betone mit Zusatzstoffen wiesen unabhängig von deren Art

erst ab mittleren Festigkeiten $\geq 40 \text{ N/mm}^2$, also erst ab B 35, einen Frostwiderstand auf, der dem von Betonen für Außenbauteile nach der neuen DIN 1045 (Juli 1988) entspricht.

6.6 Im untersuchten Bereich wiesen die Betone mit Zusatzstoffen größere Carbonatisierungstiefen auf als festigkeitsgleiche Betone ohne Zusatzstoffe. Trotz der guten Nachbehandlung wurde ein Carbonatisierungswiderstand, wie er für Außenbauteile anzustreben ist, von Betonen mit Zusatzstoffen der Festigkeitsklasse B 35 nicht ganz erreicht. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse reichen allerdings als Grundlage für eine allgemein gültige Regelung nicht aus.

6.7 Für eine Bewertung der Gebrauchsfähigkeit von Zusatzstoffen ist die Kenntnis von deren Einfluß auf die Verarbeitbarkeit und die Festigkeit von Beton notwendig, aber für viele bautechnische Aufgaben nicht ausreichend. Solche Zusatzstoffe sind in der Lage, die Festigkeit zum Teil deutlich zu verbessern, ohne daß damit eine entsprechende Steigerung von Frost- und Carbonatisierungswiderstand verbunden ist, — oder anders ausgedrückt —, festigkeitsgleiche Betone mit Zusatzstoffen können weniger dauerhaft sein als solche ohne Zusatzstoffe. Soll die Festigkeit hilfsweise als Kriterium für die Dauerhaftigkeit herangezogen werden, so bedürfen Betone mit Zusatzstoffen dann erhöhter Vorhaltemaße.

SCHRIFTTUM

- [1] Richartz, W.: Zusammensetzung und Eigenschaften von Flugaschen. Zement — Kalk — Gips 37 (1984) H. 2, S. 62/71
- [2] Graf, O.: Versuche mit Kiessanden. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton (heute: Stahlbeton), H. 63, Berlin 1930
- [3] Walz, K.: Einflüsse auf die Verarbeitbarkeit des Betons. Zement 22 (1933) H. 6, S. 78/81 und H. 7, S. 93/95
- [4] Die Rolle des Mehlkorns in der Betonmischung. TFB der Schweizer Zementindustrie, Wildegg. Cementbulletin 54 (1986) Nr. 6
- [5] Malhotra, V. M. et al: Proceedings of second international conference on use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in Concrete. Madrid April 1986, CANMET, Canada
- [6] Helmuth, R.: Fly Ash in Cement and Concrete. Portland Cement Association, Skokie, Illinois 1987
- [7] Wierig, H.-J.: Untersuchungen über die Frostbeständigkeit von Zementmörtel mit Flugaschezusätzen. beton 20 (1970) H. 6, S. 233/246
- [8] Lisięcki, K.-H.: Wirksamkeitsfaktor und Zementäquivalentmasse — neue Kenngröße zur Bewertung von Betonzusatz- und Zementzumahlstoffen. betontechnik 8 (1987) H. 2, S. 58/62
- [9] Krell, J.: Einfluß der Feinststoffe im Beton auf die Frischbetonkonsistenz — Fachkolloquium: „Zementleim, Frischmörtel und Frischbeton“, Okt. 1987. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover (1987), H. 55, S. 160/176
- [10] Richartz, W.: The Influence of fly ashes on the properties of fly-ash cement. CSIR-Conference „Ash — A valuable Resource“, 2.–6. Febr. 1987, Pretoria, Conference Papers Vol. 2, Section 8

- [11] Krell, J.: Die Konsistenz von Zementleim, Mörtel und Beton und ihre zeitliche Veränderung. Schriftenreihe der Zementindustrie, Beton-Verlag Düsseldorf, H. 46, 1985
- [12] Siebel, E.: Laboratory Investigations of the frostresistance of concrete and there correlation with field performance. RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under normal outdoor exposure. März 1984, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Universität Hannover (1984), S. 151/159
- [13] Gräf, H., und H. Grube: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit. beton 36 (1986) H. 11, S. 426/429 und H. 12, S. 473/476
- [14] Grube, H., und J. Krell: Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton. beton 36 (1986) H. 3, S. 104/109
- [15] Bonzel, J., und J. Krell: Konsistenzprüfung von Frischbeton. beton 34 (1984) H. 2, S. 61/65 und H. 3, S. 101/104; ebenso Betontechnische Berichte 1984/85, Beton-Verlag, Düsseldorf 1986, S. 17/40
- [16] Uchikawa, H., S. Uchida, und S. Hanehara: Flocculation structure of fresh cement paste determined by sample freezing — back scattered electron image method. Il cemento 4 (1987) H. 1, S. 3/22
- [17] Wesche, K., P. Schubert, und W. Weber: Zur Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton bei Zusatz von Steinkohlenflugasche. Betonwerk + Fertigteile-Technik 49 (1984) H. 6, S. 367/374
- [18] Kautz, K., A. Korstick, B. Prause, und W. Zobel: Untersuchungen zur Reaktivität von Steinkohlenflugasche im Zementmörtel. VGB Kraftwerkstechnik 66 (1986) H. 8, S. 772/776
- [19] Wischers, G., und W. Richartz: Einfluß der Bestandteile und der Granulometrie des Zements auf das Gefüge des Zementsteins; beton 32 (1982) H. 9, S. 337/341 und H. 10, S. 379/386; ebenso Betontechnische Berichte 1982/83, Beton-Verlag, Düsseldorf 1984, S. 61/83