

Eigenschaften von Betonen aus Portlandkalksteinzement

Von Jürgen Albeck, Ulm, und Branimir Sutej, Mergelstetten*)

Übersicht

Portlandzement enthält als Hauptbestandteil ausschließlich den aus den Rohstoffen gebrannten Klinker, der dadurch auch einen dominierenden Einfluß auf die Eigenschaften des Zements und des daraus hergestellten Betons ausübt. Bestimmte, zum Teil jedoch begrenzte Eigenschaftsänderungen kann man verfahrenstechnisch erreichen, z. B. durch Änderung der Mahlfineinheit, der Kornverteilung u. a. Größere Eigenschaftsänderungen sind möglich, wenn ein Teil des Klinkers durch andere Hauptbestandteile ersetzt wird. Dazu wird schon seit Jahrzehnten granuliertes Hochofenschlacke (Hütten sand) und natürliches Puzzolan (Traß) verwendet. Im letzten Jahrzehnt wird dazu auch Flugasche und seit einigen Jahren Kalkstein genutzt.

Wesentliche Zementeigenschaften, wie z. B. Erstarren, Raumbeständigkeit und 28-Tage-Festigkeit, müssen dabei denen von Portlandzement entsprechen. Dauerhaftigkeit gegenüber Witterungseinflüssen sowie der Korrosionsschutz der Bewehrung müssen nachweisbar gewährleistet sein. Andere Eigenschaften können ggf. mehr oder weniger deutlich verbessert werden. Dem vorliegenden Beitrag liegen umfangreiche Laboruntersuchungen sowie mehrjährige Praxiserfahrungen zugrunde, mit denen nachgewiesen wird, daß eine Zumahlung von 18 % hochprozentigem Kalkstein einen Zement liefert, der in seinen wesentlichen Eigenschaften dem aus dem gleichen Klinker hergestellten Portlandzement entspricht, jedoch hinsichtlich Verarbeitbarkeit Vorteile aufweist. Diese Vorteile sind besonders ausgeprägt, wenn für den Beton nur relativ feinstkornarme Zuschläge örtlich vorhanden sind.

1 Einleitung

Die Verarbeitungseigenschaften von Frischbeton werden in erster Linie durch die Kornzusammensetzung des Zuschlags und die Zementleimenge beeinflusst. Besonders stark ist dabei der Einfluß der mehlfinen Anteile des Sandes.

Bei Sanden mit hohem Mehlkorngehalt werden die Frischbetoneigenschaften wie Pumpbarkeit und Verdichtungswilligkeit günstig,

*) Überarbeitete Fassung eines Vortrags auf der Technisch-Wissenschaftlichen Zementtagung '90 des VDZ am 1. Februar 1990 in Düsseldorf

andere wie der Wasseranspruch ungünstig beeinflusst. Sande mit niedrigem Mehlkorngehalt beeinflussen die Verarbeitungseigenschaften des Betons in der Regel nachteilig, vor allem bei niedrigen und mittleren Zementgehalten. In diesen Fällen wird in der Praxis das fehlende Mehlkorn des Sandes häufig durch Zugabe von mehlfeinen Stoffen wie Steinkohlenflugasche oder Kalksteinmehlen ergänzt. Häufig läßt sich damit allerdings keine ideale Kornzusammensetzung des Gesamtfeinstkornes hinsichtlich optimaler Betonverarbeitungseigenschaften bei niedrigem Wasseranspruch erreichen, weil die Kornverteilung der Flugaschen und Steinmehle meist nicht auf die Kornverteilung des Zuschlags und die des Zements abgestimmt ist. Schlechte Verarbeitungseigenschaften werden dann häufig über eine erhöhte Wasserzugabe korrigiert, was negative Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Betons zur Folge hat.

Nach Auffassung der Autoren lassen sich insbesondere bei feinstsandarmen Zuschlagstoffen mit Portlandkalksteinzement PKZ günstige Frisch- und Festbetoneigenschaften wesentlich zuverlässiger erzielen. Dies geht aus umfangreichen Betonuntersuchungen mit PKZ hervor, die seit Anfang der 80er Jahre im Zementwerk Mergelstetten der E. Schwenk KG, Ulm, durchgeführt wurden und über die nachfolgend berichtet wird.

Die Laboruntersuchungen werden zudem durch Erfahrungen in der Praxis voll bestätigt, denn der PKZ 35 F des Zementwerks Mergelstetten ist bereits seit 1986 durch das Institut für Bautechnik, Berlin, bauaufsichtlich zugelassen und wird seit dieser Zeit in zunehmendem Maße in der Praxis verwendet.

2 Zement

Portlandkalksteinzement wurde im 1989er Entwurf der europäischen Zementnorm ENV 197 [1] in die Gruppe der Zemente mit Zuschlagstoffen unter der Bezeichnung CE II-F eingeordnet. Gemäß Normenentwurf muß der Portlandzementklinker-Anteil 80 bis 94 M.-%, der Anteil an Kalkstein 6 bis 20 M.-% betragen.

Die Zement-Verbrauchsstatistik des europäischen Zementverbandes CEMBUREAU für das Jahr 1989 (siehe Tafel 1) weist in den westeuropäischen Ländern einen beträchtlichen Anteil der Zemente

Tafel 1 Anteil der Zementarten der Festigkeitsklasse Z 32,5 (35) in Westeuropa im Jahre 1989

Zementart		Zement-Festigkeitsklasse Z 32,5 (35)			
		W.-Europa		BRD	
		1000 t	%	1000 t	%
CE I	Portlandzement	30494	24,4	10603	64,5
CE II	Portland-Composit- Zement	64236	51,5	2674	16,3
CE III	Hochofenzement	8431	6,8	3032	18,4
CE IV	Puzzolanzement	20735	16,6	134	0,8
	Andere	878	0,7	—	
Gesamt		124774	100	16443	100

mit Zumahlstoffen CE II, auch von PKZ 35 F, in der Festigkeitsklasse Z 32,5 auf. Allein in Frankreich werden jährlich über 6 Millionen Tonnen Zemente mit Kalksteinanteilen bis zu 35 M.-% hergestellt. In der Bundesrepublik Deutschland wird PKZ 35 F von mehreren Werken bis zur Einführung einer europäischen Zementnorm nach Zulassungsbescheid des Instituts für Bautechnik, Berlin [2], mit einem einheitlichen Kalksteingehalt von 10 bis 20 M.-% hergestellt. Die E. Schwenk KG produziert seit rund 4 Jahren im Werk Mergelstetten PKZ 35 F in einer Jahresmenge von derzeit rund 180000 t mit steigender Tendenz.

2.1 Klinker

Die Eigenschaften des dafür verwendeten Klinkers werden durch den Chemismus des Zementmergel-Vorkommens der geologischen Formation „Weißjura“ geprägt. In der Tafel 2 sind die durchschnittlichen chemischen Kennwerte des Klinkers Mergelstetten aufgeführt. Wird aus diesem Klinker Portlandzement 35 F hergestellt, so zeichnet er sich aufgrund des rechnerischen C₃A-Gehaltes von 11 M.-% und des niedrigen Alkaligehaltes bei Normaltemperatur durch eine mäßige Hydratationsgeschwindigkeit mit hohen 28-Tage-Druckfestigkeiten nach DIN 1164 aus.

Tafel 2 Durchschnittliche Zusammensetzung des Klinkers Mergelstetten

		M.-%
Klinkerphasen nach Bogue	C ₃ S	65
	C ₂ S	11
	C ₃ A	11
Moduli	Kalkstandard	97
	Silikatmodul	2,4
	Tonerdemodul	2,1
Alkalien	K ₂ O	0,9
	Na ₂ O	< 0,1

Die Begrenzung der 28-Tage-Druckfestigkeit auf derzeit 55 N/mm² für Zemente der Festigkeitsklasse 35 F nach DIN 1164 und auf 52,5 N/mm² für Zemente der zukünftigen Festigkeitsklasse 32,5 nach ENV 197 erschwert die Herstellung gut verarbeitbarer Portlandzemente mit Portlandzementklinkern vom Typ Mergelstetten. Die Zemente müssen dafür relativ grob gemahlen werden, was sich auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften nachteilig auswirken kann. Durch die Zumahlung von geeignetem Kalkstein zum Klinker ist eine spürbare Verbesserung der Frischbetoneigenschaften zu erreichen, wie nachfolgend dargelegt wird.

2.2 Kalkstein

Für die Eigenschaften des Portlandkalksteinzementes und des daraus hergestellten Betons ist, neben den Eigenschaften des Klinkers, auch die Qualität des zugemahlten Kalksteins von Bedeutung. In

Tafel 3 Kennwerte des Kalksteins Mergelstetten für das Jahr 1990

Kennwert des Kalksteins	Produktionswert	Anforderung nach	
		Zulassung	ENV 197
Calciumcarbonat (M.-%)	90,8	$\geq 82,5$	$\geq 75,0$
Magnesiumoxid (M.-%)	0,9	$\leq 5,0$	—
Methylenblau-Adsorption (g/100g)	0,47	$\leq 1,20$	$\leq 1,20$
Gesamt-Organischer Kohlenstoff (M.-%)	0,07	$\leq 0,20$	$\leq 0,20$

der Tafel 3 sind die durch Zulassung [2] bzw. ENV 197 [1] geforderten Grenzwerte sowie die Kennwerte des verwendeten Kalksteins im Jahre 1990 aufgeführt.

Neben dem hohen Gehalt an Calcit CaCO_3 enthält der Kalkstein Mergelstetten nur geringe Mengen an anderen Nebenbestandteilen. Sein Gehalt an quellfähigen Tonen ist sehr niedrig, ersichtlich an der niedrigen Menge des adsorbierten Farbstoffes Methylenblau, der sich nur an quellfähige Tonminerale anlagert [3]. Die Konzentration des gesamtorganischen Kohlenstoffs als Maß für die Menge der organischen Bestandteile im Kalkstein liegt weit unterhalb der geforderten Grenze von max. 0,20 M.-%. Die Untersuchungen des Arbeitskreises „Zusatzstoffe“ beim Verein Deutscher Zementwerke zeigten, daß der Frostwiderstand von Betonen mit Portlandkalksteinzement denen mit Portlandzement entsprach, wenn der Anteil an organischen Stoffen im Kalkstein unterhalb des Grenzwertes von 0,20 M.-% lag [4].

2.3 Zementeigenschaften

Die wichtigsten Eigenschaften der Zemente PZ 35 F und PKZ 35 F Mergelstetten sind in der Tafel 4 als Durchschnittswerte für das Jahr 1990 angegeben. Der PKZ 35 F muß im Vergleich zum PZ 35 F

Tafel 4 Durchschnittswerte für PZ 35 F und PKZ 35 F Mergelstetten für das Jahr 1990

Eigenschaften nach DIN 1164		PZ 35 F	PKZ 35 F
Mahlfeinheit (Blaine)	cm ² /g	3200	4090
Kalksteingehalt	M.-%	< 5	18
Siebrückstand 0,2 mm	M.-%	1,3	0
Siebrückstand 0,09 mm	M.-%	8,1	1,5
Lageparameter x'	µm	25,4	17,4
Steigungsmaß n	—	0,85	0,87
Hydratationswärme DIN 1164	J/g	290	280
Erstarren			
Wasserzusatz für Normsteife	M.-%	24,8	26,5
Anfang	min	150	145
Ende	min	200	195
Druckfestigkeit			
nach 2 Tagen	N/mm ²	23,3	23,3
nach 28 Tagen	N/mm ²	51,5	49,9

deutlich feiner gemahlen werden, um den Festigkeitsverlust durch die „Verdünnung“ bei einer Kalksteinzumahlung von 18 M.-% auszugleichen und das Festigkeitsniveau des PZ 35 F zu erreichen. Dabei reicht sich der leichter mahlbare Kalkstein in den feinsten Fraktionen des Zementes an und erhöht die massenbezogene Oberfläche nach Blaine auf Werte um 4000 cm²/g. Trotz der höheren Mahlfeinheit und des nach DIN 1164 höheren Wasserbedarfs bei Normsteife bringt der PKZ 35 F gegenüber PZ 35 F im Beton keine Erhöhung des Wasseranspruchs, sondern eine Verringerung, wie in Abschnitt 3.1 dargelegt ist.

2.3.1 Kornzusammensetzung

Die Kornzusammensetzung, in Tafel 4 durch den Lageparameter x' und die Steigung n angegeben, ist in Bild 1 im RRSB-Kornverteilungsnetz [5] dargestellt. Bei einer solchen Darstellung ergeben sich für die Kornverteilung in erster Näherung Geraden, die durch einen festen Punkt (Lageparameter x') und den Anstieg der Geraden n festgelegt sind. Eine höhere Mahlfeinheit bewirkt einen höheren Anteil der feinsten Fraktionen, d. h. eine Verschiebung nach links, gegebenenfalls in Kombination mit einem veränderten Anstieg. Das wird auch aus der Kornverteilungsgeraden für den PKZ 35 F (höhere Mahlfeinheit) gegenüber der für PZ 35 F deutlich.

Beide Zemente weisen mit $n = 0,85$ und $0,87$ eine vergleichbare flache Kornverteilungsgerade auf. Der PZ 35 F wird hierfür in Mergelstetten in einer Durchlaufmühle hergestellt, die zwar leistungsmäßig begrenzt ist, jedoch eine Kornverteilung mit relativ geringem Anstieg liefert; die dadurch relativ breite Kornverteilung bewirkt eine günstige Verarbeitbarkeit. Effektivere Sichter-mühlen, wie sie für Zemente mit höherer Mahlfeinheit erforderlich sind, liefern eine Korn-

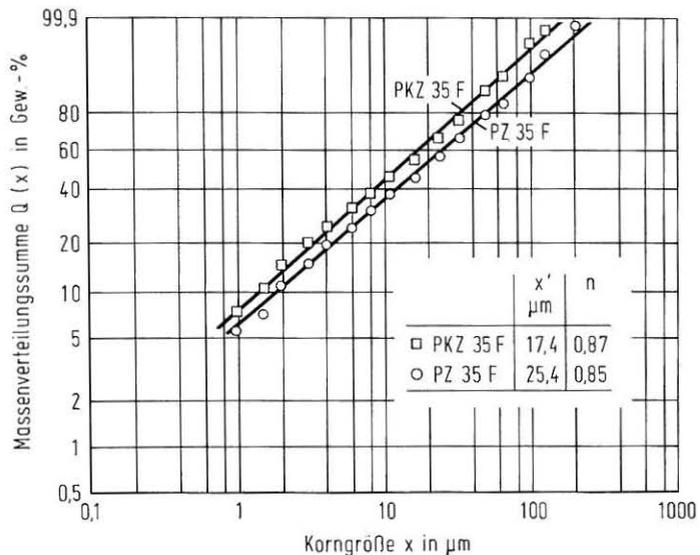


Bild 1: Kornzusammensetzung von PZ 35 F und PKZ 35 F Mergelstetten

verteilung mit steilerem Anstieg [6]. Bei PKZ 35 F reichert sich der im Vergleich zum Klinker leichter mahlbare Kalkstein in den feinsten Fraktionen an und flacht damit die sonst ohne Kalksteinzumahlung steilere Kornverteilung deutlich ab.

2.3.2 Festigkeitsentwicklung

Die Festigkeitsentwicklung beider Zementarten ist in Tafel 5 als 2- und 28-Tage-Druckfestigkeit, geprüft nach DIN 1164, für den Zeitraum Januar 1989 bis Mai 1990 angegeben. Beide Zemente zeigen ein vergleichbares Festigkeitsniveau mit geringer Schwankungsbreite.

Tafel 5 Druckfestigkeiten nach DIN 1164 in N/mm² für PZ 35 F und PKZ 35 F Mergelsetten für den Zeitraum Januar 1989 bis Mai 1990 (n = 134)

		\bar{x}	s	F 5%	F 95%
PZ 35 F	N 2 d	24,1	1,59	21,1	27,1
	N 28 d	52,0	1,87	48,5	55,5
PKZ 35 F	N 2 d	24,4	1,59	21,3	27,4
	N 28 d	50,2	1,61	47,2	53,2

2.3.3 Hydratationswärme

Die Hydratationswärmen von PKZ 35 F und PZ 35 F liegen mit 280 bzw. 290 J/g nahe beieinander. Der verminderte Klinkeranteil im PKZ 35 F wird durch die feinere Aufmahlung des Klinkers mit entsprechend größerer Reaktivität weitgehend kompensiert.

3 Frischbetoneigenschaften

Bei der Entwicklung des PKZ 35 F wurde besonderes Augenmerk auf die Betoneigenschaften gelegt. Entwicklungsziel war die Herstellung eines Zementes, der die guten Festbetoneigenschaften des PZ 35 F erreicht und nach Möglichkeit die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons noch verbessert.

Der Begriff „Verarbeitbarkeit“ von Beton beschreibt eine Reihe wichtiger Betoneigenschaften wie z.B. Fließverhalten, Zusammenhaltvermögen, Verdichtungswilligkeit und Wasserabsondern (Bluten). Um diese Eigenschaften zu beschreiben und den Einfluß der mehlfinen Fraktionen des Sandes im Liefergebiet des Werkes Mergelsetten festzustellen, wurden im Labor Standardbetone B 25 des Konsistenzbereiches KP mit unterschiedlichen Sanden aus Baden-Württemberg und Bayern sowie PZ 35 F und PKZ 35 F hergestellt und untersucht. Als Zuschlagkörnung 4/8, 8/16 und 16/32 mm wurde Donaukies verwendet. Die Gesamtsieblinie lag im Bereich AB. Der Zementgehalt betrug in allen Mischungen 280 bis 290 kg/m³. Die Konsistenz des Frischbetons wurde auf ein Ausbreitmaß a_{5^*} = 39 cm bei einer Frischbetontemperatur von 20 °C eingestellt. Die

*) Der Index gibt den Zeitpunkt der Messung nach dem Mischen an; a_5 bedeutet also das Ausbreitmaß 5 Minuten nach der Wasserzugabe.

Tafel 6 Einfluß verschiedener Sande auf die Eigenschaften von Betonen mit PZ 35 F und PKZ 35 F

		Oberrhein 0/2		Pleinfeld 0/2		München B 0/4		Donau 0/2		München R 0/4		Standard 0/2		Allgäu 0/4	
Sand															
Abschlambbares	M.-%	1,8		1,1		n.b.		1,5		1,8		0,6		5,4	
Siebdurchgang 0,125 mm	M.-%	1,8		1,8		3,0		3,6		6,0		6,8		7,7	
Zuschlag 0/32															
Körnungsziffer		4,82		4,52		4,98		4,85		5,11		4,82		4,95	
Siebdurchgang 0,125 mm	M.-%	0,5		0,6		0,9		0,9		1,8		1,9		2,3	
Mehlkorn, aus Zuschlag	kg/m ³	10		12		17		18		36		36		45	
Frischbeton (T = 20 °C)		PZ	PKZ	PZ	PKZ	PZ	PKZ	PZ	PKZ	PZ	PKZ	PZ	PKZ	PZ	PKZ
Zementgehalt, z	kg/m ³	285	285	284	285	283	288	284	285	285	285	283	284	288	287
Wassergehalt, w	kg/m ³	170	170	177	171	170	160	170	165	165	165	161	162	181	180
w/z-Wert		0,60	0,60	0,62	0,60	0,60	0,55	0,60	0,58	0,58	0,58	0,57	0,57	0,63	0,63
LP-Gehalt	Vol.-%	1,1	1,2	1,2	1,3	1,1	1,0	1,0	0,9	1,2	1,1	1,8	1,8	1,0	1,2
a ₅	cm	40	39	39	39	40	39	39	39	40	40	39	39	38	38
a ₁₀	cm	39	39	38	38	40	38	38	38	39	39	38	39	38	37
a ₃₀	cm	36	36	37	36	38	38	37	35	37	38	37	37	36	36
a ₄₅	cm	35	35	37	36	38	37	34	35	36	36	36	36	34	33
a ₆₀	cm	35	35	36	36	37	36	32	35	35	35	34	35	33	32
Festbeton															
β _w 1 d	N/mm ²	6,4	7,0	7,2	8,7	10	13	8,2	9,1	9,7	10,4	8,6	11	9,0	7,9
β _w 7 d	N/mm ²	30	29	29	30	29	33	31	32	32	34	30	32	28	29
β _w 28 d	N/mm ²	44	41	44	42	43	47	46	44	43	44	42	42	37	39

Frischbeton-Untersuchungen erstreckten sich neben den üblichen Prüfungen nach DIN 1048 vor allem auf das Ansteifen des Betons bei einer Liegezeit bis 60 Minuten, siehe Tafel 6.

Die Sande sind in Tafel 6 nach steigendem Mehlkorngelalt des Sandes bzw. des Zuschlaggemisches im Beton eingereiht. Ihre chemisch-mineralogische Beurteilung ist wie folgt:

Oberrhein: Quarzitischer Sand mit etwas Calcit und Feldspat, wenig Ton, Kornform gedrunge bis kubisch mit abgerundeten Kanten.

Pleinfeld: Gewaschener quarzitischer Sand, gedrungene Kornform.

Donau: Quarzitisches-calcitisches Sand, grob einkörnig, mit scharfkantigen, länglichen bis gedrunge Kernen.

München, B und R: Calcitisches-dolomitische Sand mit wenig Quarzanteilen und sehr wenig Ton, inhomogene Korngröße von sehr fein bis grob, scharfkantig (teilweise Brechsand), länglich bis gedrunge.

Allgäu: Calcitisches-dolomitische Sand mit deutlichen Quarzbeimengungen, stark tonhaltig, inhomogene Korngröße, Feinstfraktion (Siebdurchgang 0,125 mm) gedrunge bis kubisch, sonst eckig, scharfkantig und länglich-splittig.

Standard: Klassierter Sand aus Quarzmehl 0,06/0,3 mm und Quarzsanden mit Korngruppen 0,1/0,6, 0,6/1,2 und 1,0/1,8 mm.

Die Untersuchungsergebnisse in Tafel 6 lassen sich wie folgt zusammenfassen.

3.1 Wasseranspruch der Betone

Der Wasseranspruch der Betone mit PKZ 35 F ist im Vergleich zu den Betonen mit PZ 35 F bei gleichem Ausbreitmaß bei allen Sanden niedriger oder maximal gleich groß. Bei den mehlkornarmen Sanden Pleinfeld, München B und Donau liegt der Wasseranspruch der Betone mit PKZ um 5 bis 10 kg/m³ unter dem der Betone mit PZ.

3.2 Ansteifverhalten

Das Ansteifverhalten der Betone, gemessen als Ausbreitmaß bis 60 Minuten Liegezeit, ist bei allen Sanden und bei beiden Zementarten gleich günstig. Lediglich die beiden Betone mit dem mehlkornreichen Allgäuer Sand weisen ein geringfügig höheres Ansteifverhalten auf.

3.3 Wasserabsondern der Betone

Das Wasserabsondern („Bluten“) oder umgekehrt das Wasserrückhaltevermögen des Frischbetons ist für die Qualität der Betonoberflächen sowie für den Arbeitsablauf bei der Herstellung der Betonteile von sehr großem Einfluß. Für die Prüfung dieser Eigenschaft gibt es kein genormtes deutsches Meßverfahren. Im Ausland gibt es vereinzelt derartige Meßverfahren wie die in [7] beschriebene australische Bestimmungsmethode. Bei diesem Verfahren werden 15 l Frischbeton in einem Topf mit 250 mm Durchmesser und

300 mm Höhe gelagert und das aufsteigende Wasser in bestimmten Zeitabständen abpipettiert.

Bei unseren Untersuchungen haben wir das nachfolgende Meßverfahren angewendet. Eine Würfelform mit 15 cm Kantenlänge wurde sofort nach dem Mischen mit Frischbeton gefüllt, eingerüttelt sowie eingeebnet und die Menge des Frischbetons festgestellt. Das austretende Wasser wurde von der Oberfläche des Frischbetons in 30-Minuten-Abständen mit einer Lage eines saugfähigen Papiers abgezogen. Das Papier wurde gewogen und anschließend bei 105 °C getrocknet. Der Gewichtsverlust des (für jede Messung frischen) Papiers wurde in kg/m³ Frischbeton umgerechnet. Die Messung wurde bis zu einer Liegezeit von 3 Stunden durchgeführt.

Die Übertragbarkeit der nach dieser Prüfmethode erhaltenen Laborergebnisse in die Praxis kann nur qualitativer Art sein. Die Unterschiede der verschiedenen Betone sind jedoch, bei allen unvermeidlichen Prüfschwankungen, gut erkennbar und stimmen mit den Beobachtungen in der Praxis überein. In Tafel 7 sind die Ergebnisse der Messung des Wasserabsonderns an Frischbetonen aufgeführt, deren sonstige Eigenschaften in Tafel 6 enthalten sind.

Tafel 7 Wasserabsondern der Frischbetone

Sand	Zement	Wassermenge (kg/m ³) nach Liegezeit von					
		0,5 h	1,0 h	1,5 h	2,0 h	2,5 h	3,0 h
Oberrhein 0/2	PZ 35 F	6,2	9,7	11,3	12,3	13,2	13,8
	PKZ 35 F	3,0	5,9	8,3	9,8	11,0	11,8
Pleinfeld 0/2	PZ 35 F	5,8	11,5	13,7	14,4	15,1	15,8
	PKZ 35 F	2,9	5,5	7,4	8,3	8,8	—
München „B“ 0/4	PZ 35 F	4,8	7,4	9,0	9,9	8,6	10,1
	PKZ 35 F	4,0	5,5	6,4	6,8	6,9	—
Donau 0/2	PZ 35 F	6,0	8,3	9,1	9,9	10,2	11,0
	PKZ 35 F	2,6	4,3	5,3	5,5	—	—
München „R“ 0/4	PZ 35 F	3,2	5,3	6,6	7,7	8,2	8,4
	PKZ 35 F	3,4	4,2	5,4	6,1	6,4	6,6
Standard 0/2	PZ 35 F	3,9	6,4	7,5	8,2	8,4	8,9
	PKZ 35 F	2,6	4,2	5,3	5,8	6,4	7,0
Allgäu „H“ 0/4	PZ 35 F	2,3	4,5	6,5	8,0	9,2	10,0
	PKZ 35 F	2,1	3,7	5,2	6,2	6,9	—

Die Betone mit PKZ 35 F sonderten immer weniger Wasser ab als die Betone mit PZ 35 F. Ihre Wasserabgabe endete zeitlich früher, meist bereits nach 2,0 oder 2,5 Stunden Liegezeit. Je gröber der verwendete Sand im Feinstbereich war, desto größer ergab sich die Differenz zwischen PKZ 35 F und PZ 35 F. Dies wird in Bild 2 besonders deutlich, in dem die Ergebnisse aus der Tafel 7, gemessen nach 30 min Liegezeit, graphisch in Abhängigkeit vom Mehlkorngelalt des Zuschlaggemisches im Frischbeton dargestellt sind.

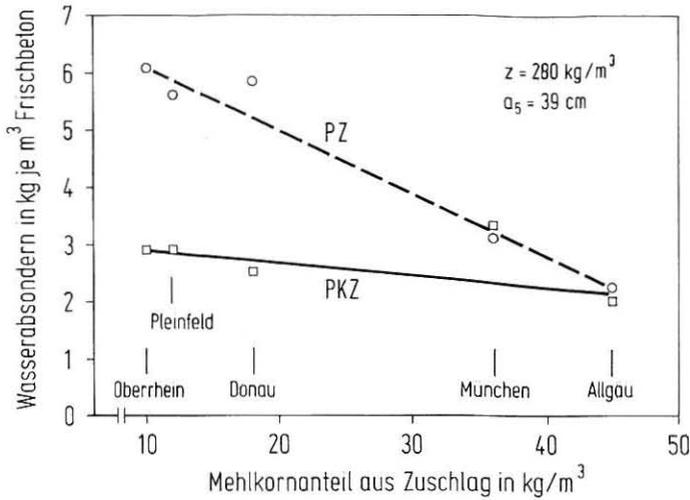


Bild 2 Wasserabsondern nach 30 min Liegezeit

3.4 Verarbeitbarkeit der Betone

Für die Verarbeitbarkeit des Frischbetons kommt dem sogenannten „Leim“ die entscheidende Bedeutung zu. Als Leim bezeichnet man das Gemisch aus Feinstkorn und Wasser im Frischbeton. Feinstkorn ist wiederum die Menge des Zementes und des Mehlkorns aus dem Zuschlag. Der Leim hat mehrere Wirkungen im Frischbetongefüge; er füllt die Zwischenräume zwischen den Körnern aus, er legt sich um die Körner, so daß sie aneinander vorbeigleiten können, und er hält sie auch durch die Oberflächenkräfte zusammen. Je größer die Menge des Leims, um so weicher ist der Frischbeton und ein um so höheres Ausbreitmaß weist er auf. Bei vorgegebener Zuschlag- bzw. Mehlkornmenge wird die Verarbeitbarkeit des Betons entscheidend vom Zement beeinflusst.

Untersuchungen von Krell [8] zeigten, daß bei gleicher Betonrezeptur ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$) und unverändertem Zuschlag die Verwendung verschiedener Portlandzemente 35 F mit unterschiedlicher Kornzusammensetzung das Ausbreitmaß des Betons deutlich beeinflusst. Eine „flache“ Kornverteilung des Zementes war dabei von Vorteil. Ein derartiger Zement enthält gröbere und feinere Partikel. Die feinen Körner lagern sich zwischen die größeren Körner im Leim und füllen die Zwickel, so daß bei gleicher Wassermenge die Wasserfilmdicke und damit das Ausbreitmaß erhöht oder bei gleichem Ausbreitmaß der Wasseranspruch des Betons verringert wird.

Im Vergleich zum PZ 35 F enthält der PKZ 35 F in den feinsten Fraktionen mehr Kalkstein-, aber weniger Zementteilchen. Die feinen Klinkerkörner reagieren beim PZ 35 F mit Wasser sehr schnell und bilden eine „rauhe“ Hydratationsschicht auf der Klinkeroberfläche mit einem höheren Wasserbedarf im Vergleich zu den nicht reaktiven Kalksteinpartikeln im PKZ 35 F. Dieser „Hydratationseffekt“ und der weiter oben beschriebene „Zwickelwassereffekt“ sind die Er-

klärungen für den geringeren Wasseranspruch von Betonen mit PKZ 35 F gegenüber vergleichbaren Betonen mit PZ 35 F.

Die beschriebenen rheologischen Eigenschaften lassen sich in der Praxis sehr gut nachvollziehen. Betone mit PKZ 35 F und mehlkornarmen Zuschlägen zeigen ein besseres Zusammenhaltevermögen als vergleichbare Betone mit PZ 35 F (Bilder 3 und 4).

Das bessere Zusammenhaltevermögen und das geringere Wasserabsondern von Betonen mit PKZ 35 F wirken sich besonders bei der Herstellung von Betonbauteilen in glatter Schalung aus. Betone mit PKZ zeigen eine gleichmäßigere Oberfläche als vergleichbare Betone mit PZ (Bild 5).

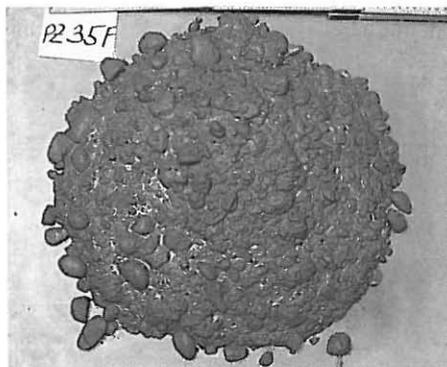
4 Einfluß von Zusatzmitteln auf die Frischbetoneigenschaften

Der Einsatz von Betonzusatzmitteln zur Verbesserung der Frischbetoneigenschaften ist in der heutigen Betontechnologie üblich. Daher wurden auch deren Wirkungen in Abhängigkeit vom Zement in Vergleichsversuchen untersucht.

Bild 3
B 25 mit $z = 280$
 kg/m^3 PKZ 35 F,
 $w/z = 0,70$,
Sieblinie A/B 32,
Pleinfelder Sand



Bild 4
B 25 mit $z = 280$
 kg/m^3 PZ 35 F,
 $w/z = 0,70$,
Sieblinie A/B 32,
Pleinfelder Sand



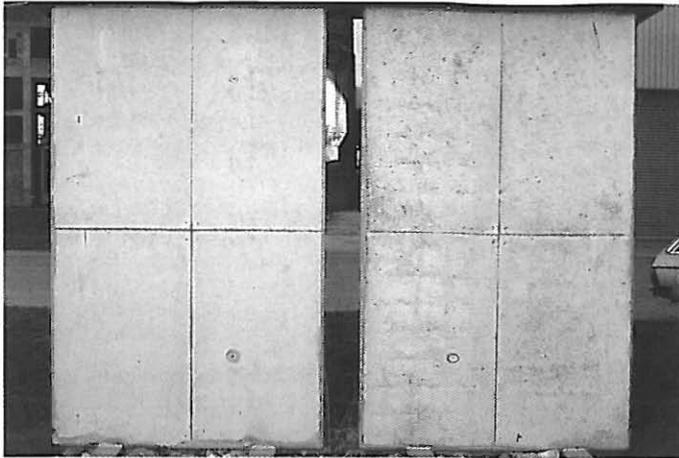


Bild 5 Betonbauteil mit PKZ (links) und PZ (rechts) in glatter Schalung, Betonzusammensetzung siehe Bilder 4 und 5

4.1 Verflüssiger und Fließmittel

Grundsätzlich reagiert PKZ 35 F auf Betonzusatzmittel in gleicher Weise wie PZ 35 F. In den Bildern 6 und 7 sind die Veränderungen der Ausbreitmaße von Betonen mit 2 Sanden vom Oberrhein und der Donau mit einem Zementgehalt von 280 kg/m^3 für die vier gebräuchlichsten Wirkungsgruppen bei Betonverflüssigern und Fließmitteln dargestellt. Bei den Untersuchungen wurde die Ausgangskonsistenz a_5 auf 35 bis 40 cm eingestellt. Durch Zugabe der Verflüssiger (BV) oder Fließmittel (FM) der Firma Woermann wurde nach 10 Minuten (a_{10}) der Regelkonsistenzbereich erreicht. Die Wirkstoffgruppen der eingesetzten Zusatzmittel waren:

- BV 11 — Ligninsulfonat
- BV 14 — Naphthalinsulfonat mit Acrylat
- FM 21 — Naphthalinsulfonat mit Melaminharz
- FM 25 — Acrylat

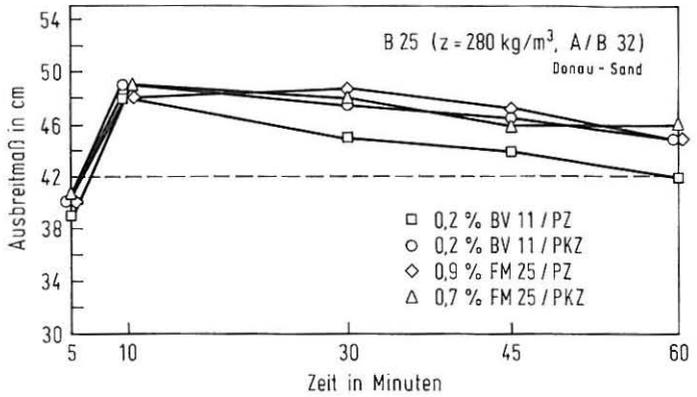
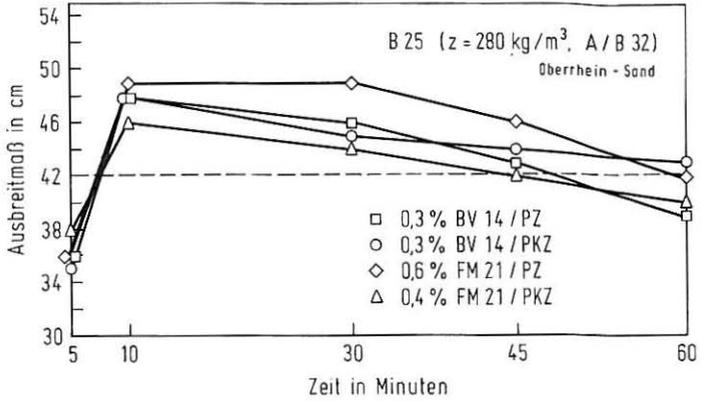
Aus den Bildern 6 und 7 ist ersichtlich, daß mit PKZ 35 F gegenüber PZ 35 F meist höhere Verflüssigungseffekte erreicht werden bzw. niedrigere Zusatzmittel-Dosierungen bei gleichem Ausbreitmaß notwendig sind.

4.2 Verzögerer

PKZ 35 F und PZ 35 F zeigen bei der Zugabe von Verzögerern ein gleichartiges Verhalten. Bild 8 zeigt den Verlauf des Erstarrungsendes von Zementpasten bei Zugabe unterschiedlicher Mengen eines Phosphat-Verzögerers VZ 32 der Firma Woermann.

4.3 Luftporenbildner

Luftporenbildner mit PKZ 35 F und PZ 35 F können ebenfalls mit vergleichbaren LP-Mitteln und LP-Dosierungen hergestellt werden. Hierüber wird gesondert im Abschnitt 5.3 berichtet.



Bilder 6 und 7 Ausbreitmaß bei Zugabe unterschiedlicher Wirkstoffgruppen von Betonverflüssigern und Fließmitteln

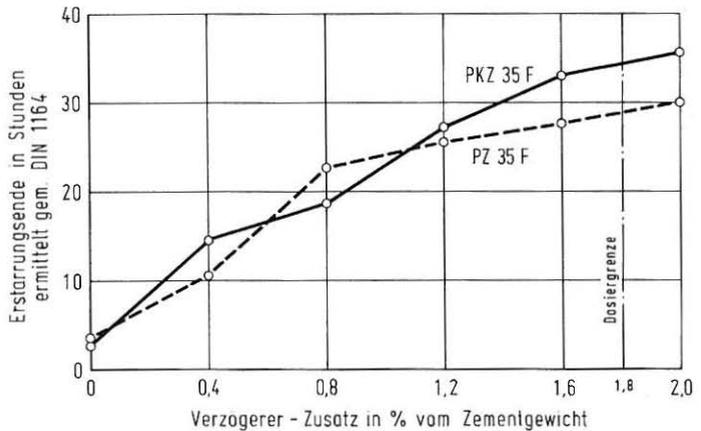


Bild 8 Erstarrungsverhalten von PKZ 35 F und PZ 35 F mit Phosphat-Verzögerer VZ 32

5 Festbetoneigenschaften

5.1 Druckfestigkeit

In den Zement- und Betonlaboratorien der E. Schwenk KG werden neben den zur Produktionssteuerung und zur Güteüberwachung notwendigen Mörtelprüfungen nach DIN 1164 laufend Betonprüfungen nach DIN 1045 durchgeführt.

Der Standardbeton zur Überprüfung von PZ 35 F und PKZ 35 F ist ein Beton B 25 mit konstantem Zuschlag der Sieblinie A/B 32, einem Zementgehalt von 280 kg/m^3 und einem Ausbreitmaß $a_s = 39 \text{ cm}$ entsprechend einem w/z -Wert von 0,55 bis 0,59.

In Tafel 8 sind die ermittelten Betondruckfestigkeiten für B 25 mit PZ 35 F und PKZ 35 F für den Zementproduktionszeitraum Januar 1989 bis Mai 1990 dargestellt. Die Festigkeitswerte zeigen absolut vergleichbare 1-, 7- und 28-Tage-Druckfestigkeiten. Die Festigkeitsanforderungen für B 25 werden mit großer Sicherheit erfüllt.

Tafel 8 Betondruckfestigkeiten von B 25 mit $z = 280 \text{ kg/m}^3$, Sieblinie A/B 32 und $a_s = 39 \text{ cm}$; Anzahl der Prüfungen $n = 32$

	PZ 35 F			PKZ 35 F		
	Druckfestigkeit in N/mm^2 nach					
	1 d	7 d	28 d	1 d	7 d	28 d
\bar{x}	9,1	28,9	40,8	10,1	29,7	39,8
s	1,3	1,4	2,0	1,3	1,7	2,5

5.2 Wassereindringtiefe

Die Prüfung der Wassereindringtiefe nach DIN 1048 an den in Tafel 8 angegebenen Standardbetonen B 25 beträgt für PZ 35 F und PKZ 35 F übereinstimmend 30 bis 40 mm. Für Betone mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 , $w/z = 0,50$ und einem Ausbreitmaß a_s von rund 40 cm liegt die Wassereindringtiefe bei beiden Zementen bei 20 bis 30 mm.

5.3 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand von Betonen mit PKZ 35 F wurde im Vergleich zu Betonen mit PZ 35 F und zudem mit HOZ 35 L geprüft. Alle drei Zemente stammen aus dem Zementwerk Mergelstetten. Die Prüfungen auf Frostwiderstand wurden nach dem VDZ-Würfelfverfahren [9] an Betonen mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$, Sieblinie A/B 32 bei 100 Frost-Tau-Wechseln durchgeführt. Die gewählte Betonzusammensetzung entsprach damit den Anforderungen an Betone für Außenbauteile.

Die Frisch- und Festbetonwerte der untersuchten Betone sind in Tafel 9 angegeben. Die Druckfestigkeit der mit HOZ 35 L hergestellten Betone lag deutlich unter den mit PZ und PKZ hergestellten Betonen, so daß ein unmittelbarer Vergleich nur eingeschränkt mög-

Tafel 9 Frisch- und Festbetonwerte der auf Frostwiderstand untersuchten Betone

		PZ 35 F	PKZ 35 F	HOZ 35 L
z	kg/m ³	303	303	302
w/z		0,60	0,60	0,60
LP	Vol.-%	1,6	1,5	1,3
a _s	cm	43	43	47
β _w	1 d N/mm ²	10	9,8	3,3
β _w	7 d N/mm ²	30,3	26,9	18,4
β _w	28 d N/mm ²	40,0	36,0	30,0
β _w	56 d N/mm ²	42,0	39,0	36,0

lich ist. Die Ergebnisse der bei der Frostprüfung aufgetretenen Betonabwitterung, gemessen als Gewichtsverlust in Prozent, sind in Bild 9 graphisch dargestellt.

Es besteht derzeit bei der Prüfung auf Frostwiderstand weder in der Betonnorm DIN 1045 noch in ENV 206 ein Beurteilungskriterium für einen maximal zulässigen Gewichtsverlust. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf hat über Jahre umfangreiche Untersuchungen zum Frostwiderstand von Betonen durchgeführt und nennt für dieses scharfe Zeitrafferverfahren einen Grenzwert von 10% Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln. Die Erfahrung zeigt, daß Betone, die im Labor diese Anforderungen erfüllen, auch in der Praxis einen genügend hohen Frostwiderstand aufweisen.

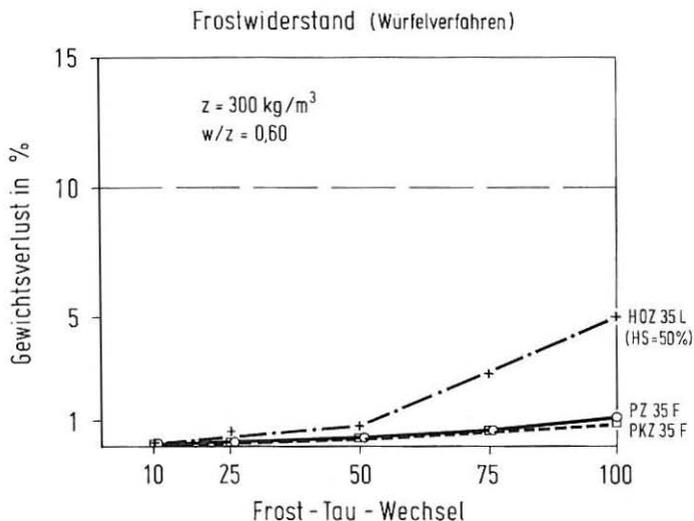


Bild 9 Gewichtsverlust in Prozent bei 100 Frost-Tau-Wechseln

Die Prüfergebnisse in Bild 9 zeigen, daß die Betone mit den drei verwendeten Zementen deutlich unterhalb der Grenze von 10 Gew.-% lagen. Bei Betonen mit PKZ 35 F und mit PZ 35 F lagen sie nach 100 Frost-Tau-Wechseln sogar nur bei 1 Gew.-%.

5.4 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Prüfungen auf Frost-Tausalz-Widerstand wurden an Betonen mit $z = 330 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$, Sieblinie A/B 32 und Zugabe von Luftporenmitteln durchgeführt. Die gewählte Betonzusammensetzung entspricht der in der Praxis üblichen Zusammensetzung von Betonen mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand. Die Frisch- und Festbetonwerte der untersuchten Betone mit PKZ 35 F, PZ 35 F und HOZ 35 L sind in Tafel 10 aufgeführt; auch hierbei wurde für den HOZ-Beton eine niedrigere Druckfestigkeit ermittelt.

Tafel 10 Frisch- und Festbetonwerte der auf Frost-Tausalz-Widerstand untersuchten Betone

		PZ 35 F	PKZ 35 F	HOZ 35 L
z	kg/m ³	332	330	330
w/z		0,50	0,50	0,50
LP	Vol.-%	4,5	4,5	4,6
Abstandsfaktor	mm	0,18	0,18	0,17
a _s	cm	40	36	39
β _w 1 d	N/mm ²	13,7	9,8	4,4
β _w 2 d	N/mm ²	28,0	32,0	21,0
β _w 28 d	N/mm ²	35,0	38,0	30,0
β _w 90 d	N/mm ²	41,0	47,0	36,0

Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes entspricht dem in 5.3 beschriebenen Verfahren zur Prüfung des Frostwiderstandes, mit dem Unterschied, daß die Betonwürfel in 3%iger NaCl-Lösung gelagert werden.

Wie beim Frostwiderstand enthalten weder DIN 1045 noch ENV 206 Grenzwerte für den Gewichtsverlust als Maß für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Das Forschungsinstitut der Zementindustrie gibt als Grenzwert für den Gewichtsverlust 5 Gew.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln in der tausalzhaltigen Lösung an. Die ENV 206 schreibt für Konstruktionsbeton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand einen LP-Beton mit einem Wasserzementwert von 0,50 vor.

Die Prüfergebnisse in Bild 10 zeigen, daß die Betone mit allen drei verwendeten Zementen den Grenzwert von 5 Gew.-% unterschritten. Die Abwitterung des Betons mit PKZ 35 F lag wie beim Frostwiderstand sehr niedrig bei nur 1 Gew.-%.

Vergleichbare Untersuchungen zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes und des Frostwiderstandes an Betonen mit PKZ 35 F, PZ 35 F und HOZ 35 L wurden im Rahmen des Zulassungsverfah-

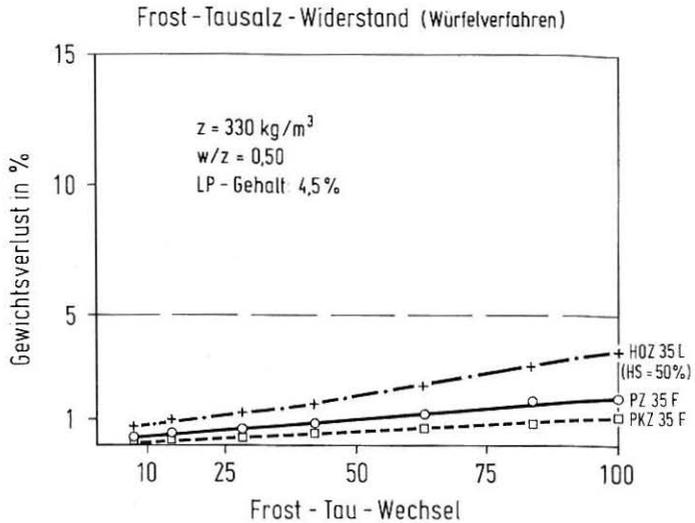


Bild 10 Gewichtsverlust in Prozent bei 100 Frost-Tau-Wechseln

rens von der FMPA Stuttgart durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse [10, 11] bestätigen die hier beschriebenen Ergebnisse.

5.5 Carbonatisierungsgeschwindigkeit

Die Carbonatisierungsgeschwindigkeit wurde an Betonen ermittelt, die in ihrer Zusammensetzung die Anforderungen für Außenbauteile erfüllen (siehe Abschnitt 5.3). Die Prüfkörper waren Betonbalken der Abmessung $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$. Die Balken wurden nach Herstellung einen Tag in der Form unter feuchten Tüchern und danach bis 28 Tage in den folgenden drei Varianten gelagert.

Nachbehandlung A

6 Tage unter Wasser bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und 21 Tage im Klima 20/65.

Nachbehandlung B

2 Tage im Nebelraum 20/99 und 25 Tage im Klima 20/65.

Nachbehandlung C

27 Tage im Klima 20/65.

Die drei Lagerungsvarianten wurden gewählt, um im Labor die Verhältnisse in der Praxis mit guter, weniger guter und fehlender Nachbehandlung zu simulieren und die entsprechenden Einflüsse auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit für die Betone mit PKZ 35 F, PZ 35 F und HOZ 35 L zu untersuchen.

Die Balken mit den drei unterschiedlichen „Nachbehandlungen“ wurden im Alter von 28 Tagen in einer Versuchsreihe im Laborklima 20/65 und in einer zweiten Versuchsreihe an einer Südfassade mit natürlicher Bewitterung gelagert. Die Carbonatisierungstiefe wurde durch Aufsprühen von Phenolphthalein ermittelt. In Bild 11 ist die

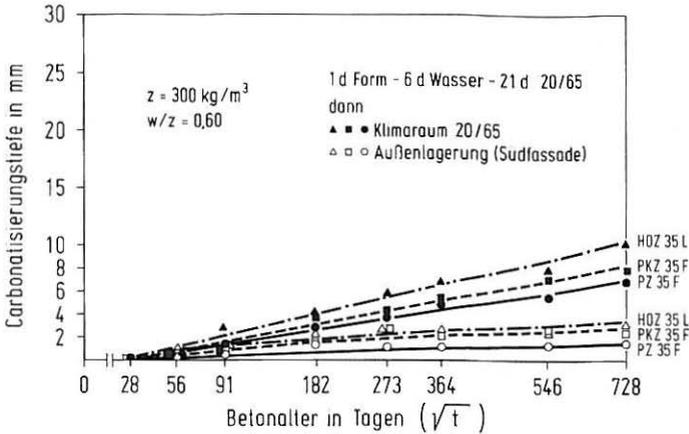


Bild 11 Carbonatisierungstiefe bei Nachbehandlung A

Carbonatisierungstiefe für die Nachbehandlung A mit den beiden Lagerungsbedingungen Klimaraum 20/65 und Außenlagerung/Südfassade, in Bild 12 die Nachbehandlung B und in Bild 13 die Nachbehandlung C mit den beiden Lagerungsbedingungen angegeben.

Der Vergleich der Carbonatisierungstiefen in den Bildern 11, 12 und 13 zeigt den großen Einfluß einer wirkungsvollen Nachbehandlung von Beton. Die Carbonatisierungstiefe nach zwei Jahren stieg bei gleicher Betonzusammensetzung um rund 30%, wenn die Prüfkörper anstatt 6 Tage unter Wasser (Nachbehandlung A) nur zwei Tage in feuchtigkeitsgesättigter Luft (Nachbehandlung B) gelagert wurden, und sogar um rund 60%, wenn praktisch keine Nachbehandlung stattfand (Nachbehandlung C).

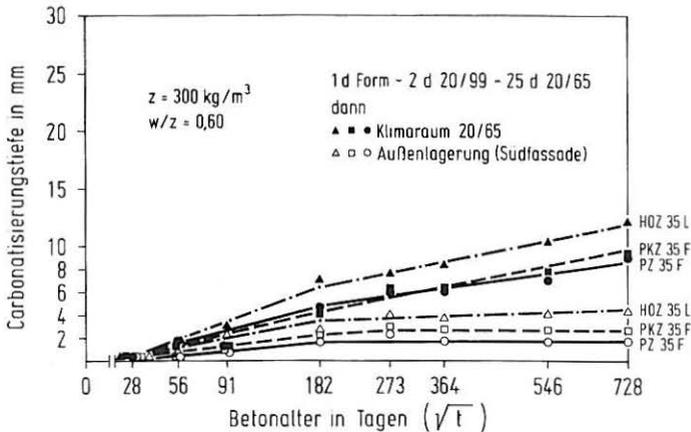


Bild 12 Carbonatisierungstiefe bei Nachbehandlung B

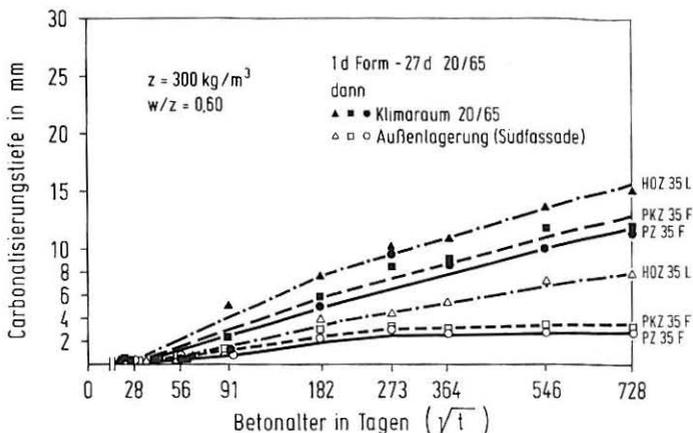


Bild 13 Carbonatisierungstiefe bei Nachbehandlung C

Der Vergleich der Betone mit den Zementen PZ 35 F, PKZ 35 F und HOZ 35 L zeigt, daß die Carbonatisierungsgeschwindigkeit zwar stets in dieser Reihenfolge zunahm, daß jedoch der Umwelteinfluß (Lagerung im Klimaraum oder im Freien) einen größeren Einfluß aufwies als die Zementart. Wie zu erwarten war und wie auch aus Bild 13 hervorgeht, war die Nachbehandlungsbedürftigkeit des mit HOZ 35 L hergestellten Betons deutlich größer als die der mit PZ 35 F und PKZ 35 F hergestellten Betone.

6 Zusammenfassung

Im Zementwerk Mergelstetten der E. Schwenk KG, Ulm, wurden seit Anfang der 80er Jahre umfangreiche Betonuntersuchungen mit Portlandkalksteinzement PKZ durchgeführt. Die Zulassung für PKZ 35 F erfolgte im Jahre 1986 durch das Institut für Bautechnik. Derzeit werden in Mergelstetten jährlich rund 180000 t PKZ 35 F mit steigender Tendenz hergestellt. Die umfangreichen Untersuchungen, bei denen im wesentlichen in Vergleichsversuchen Betone aus PZ 35 F und PKZ 35 F des Zementwerkes Mergelstetten gegenübergestellt wurden, und die bisherigen Erfahrungen in der Praxis lassen sich wie folgt zusammenfassen.

6.1 Im Vergleich zum Portlandzement 35 F muß der Portlandkalksteinzement 35 F zum Ausgleich des durch die Kalksteinzumahlung von 18% eintretenden Festigkeitsverlustes deutlich feiner gemahlen werden. Da sich der leichter mahlbare Kalkstein in den feinsten Fraktionen anreichert, ergibt sich eine relativ flache Kornverteilung, die die Frischbetoneigenschaften begünstigt und dadurch auch gute Festbetoneigenschaften bewirkt.

6.2 Die günstige Kornverteilung des PKZ verbessert besonders bei Betonen, die mit mehlkornärmeren Sanden hergestellt werden müssen, die Verarbeitbarkeit infolge Zwickelfüllung.

6.3 Während sich das Ansteifverhalten der Betone mit PZ 35 F und PKZ 35 F kaum unterschied, bewirkte der PKZ ein besseres Zusammenhaltevermögen und ein stärkeres Wasserrückhaltevermögen (geringeres „Bluten“).

6.4 Der Einsatz von Betonzusatzmitteln, d.h. Verflüssiger und Fließmittel, Verzögerer, Luftporenbildner, bedarf beim PKZ-Beton im Vergleich zum PZ-Beton keiner besonderen Vorkehrungen. Die verflüssigend wirkenden Mittel zeigten in Verbindung mit PKZ eine stärkere Wirkung, so daß die Dosierung reduziert werden konnte.

6.5 Die Festbetoneigenschaften erreichten bei vergleichbar zusammengesetzten Betonen aus PZ 35 F und PKZ 35 F praktisch gleiches Niveau. Für die Druckfestigkeit wurde dies über einen längeren Produktionszeitraum nachgewiesen.

6.6 Hinsichtlich der Dauerhaftigkeitseigenschaften, wie Wassereindringtiefe, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand sowie Carbonatisierung, wiesen die PZ- und die PKZ-Betone keine signifikanten Unterschiede auf. Bei den Frostversuchen (Würfel-Frost-Verfahren) wurden bestehende Grenzwerte deutlich unterschritten. Bei der Carbonatisierungsgeschwindigkeit wurden Unterschiede mehr durch die Lagerungsbedingungen als durch die Zemente beeinflußt.

S C H R I F T T U M

- [1] pr ENV 197 „Zement/Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien“ Entwurf April 1989
- [2] Zulassungsbescheid Z-3.1.3-72 Portlandkalksteinzement PKZ 35 F, Schwenk, Mergelstetten, Institut für Bautechnik, Berlin
- [3] Französische Vornorm P 18-592 „Zuschläge; Methylenblauerfahren“, Juli 1980
- [4] Siebel, E., und S. Sprung: Einfluß des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Beton 41 (1991) H. 3, S. 113/117 und H. 4, S. 185/188
- [5] DIN 66145: Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen; RRSB-Netz, April 1976
- [6] Ellerbrock, H.-G., S. Sprung und K. Kuhlmann: Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement. Teil III: Einfluß des Mahlprozesses. Zement-Kalk-Gips 43 (1990) H. 1, S. 13/19
- [7] Australian Standard: Method für the Determination of the Bleeding of Concrete, AS 1012, Part 6, 1971
- [8] Krell, J.: Einfluß der Feinstoffe im Beton auf die Frischbetonkonsistenz, Fachkolloquium „Zementleim, Frischmörtel und Frischbeton“, Oktober 1987. Mitteilungen aus dem Institut für Baustoffkunde und Mörtelprüfung, Universität Hannover (1987) H. 55, S. 160/176
- [9] Bonzel, J., und E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977) H. 4, S. 153/157, H. 5, S. 205/211, und H. 6, S 237/244; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 55/104
- [10] FMPA Stuttgart, Bericht I, 1-2741/EI/Re, 1986
- [11] FMPA Stuttgart, Bericht I, 1-25558/La/S, 1988