

Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf seine Frühfestigkeit*)

Von Gerd Wischers, Düsseldorf

Übersicht

Neben einer bestimmten Betongüte (Druckfestigkeit nach rd. 1 Monat) ist in vielen Fällen eine hohe Frühfestigkeit von Vorteil, so z. B. in Betonwerken, um möglichst früh die Formen und Spannbetten wiederzugewinnen, oder bei vielen Bauvorhaben, um einen zügigen Baufortschritt zu ermöglichen.

Da eine Wärmebehandlung des Betons nur in Werken und auch dort nur mit erheblichem Kostenaufwand möglich ist, sollte mit den nachfolgenden Versuchen geklärt werden, ob die Frühfestigkeit auch durch eine geeignete Betonzusammensetzung günstig beeinflußt werden kann. Die Güte der untersuchten Betone lag zwischen B 225 und B 600. Untersucht wurden vor allem der Einfluß des Wasserzementwertes im Bereich von 0,40 bis 0,80 und mit einigen Zementen der Einfluß der Zementgüteklasse. Die Festigkeitsentwicklung wurde an leicht gelagerten Würfeln im Alter von 1 Tag bis 3 Monaten ermittelt.

Mit abnehmendem Wasserzementwert stieg die Frühfestigkeit wesentlich stärker an als die Betongüte; ein Senken des Wasserzementwertes von 0,80 auf 0,40 bewirkte ungefähr eine Verdoppelung der Betongüte, jedoch eine Verdreifachung der 1 Tage-Festigkeit. Naturgemäß beeinflußte vor allem die Zementgüte die Anfangsfestigkeit. Die 7 Tage-Druckfestigkeit eines Betons aus PZ 275 wurde mit PZ 375 bereits nach 3 Tagen und mit PZ 475 schon nach 1 Tag erzielt. Mit PZ 475 HcB sich nach 1 Tag eine Druckfestigkeit von über 450 kp/cm² erreichen.

1. Allgemeines

Die Festigkeit des Betons wird im allgemeinen nach der „Betongüte“ beurteilt, das ist die 28 Tage-Druckfestigkeit bei einer Prüfung gemäß DIN 1048. Die wesentlichen Einflüsse auf die Betongüte sind weitgehend bekannt [1, 2, 3]. Die beiden wichtigsten Einflußgrößen sind die Normenfestigkeit des Zementes und der Wasserzementwert.

Die Bedeutung der höherwertigen Zemente, Z 375 und besonders Z 475, ergibt sich daraus, daß neben der höheren Betongüte eine hohe Frühfestigkeit erhalten wird. Über den Einfluß des Wasserzementwertes auf die Anfangsdruckfestigkeit (nach 1-

*) Ausführlicher Bericht einer Kurzfassung aus dem Tätigkeitsbericht 1962 des Forschungsinstitutes der Zementindustrie, S. 30/32.

und 3tägiger Normallagerung) ist wenig bekannt.¹⁾ Vereinzelt Feststellungen findet man in Untersuchungen über den Einfluß einer Wärmebehandlung, wie z. B. [4], bei denen vergleichsweise auch die Festigkeit nach 1- oder 3tägiger Normallagerung mit untersucht worden ist. Einige Angaben enthält [2], S. 174 ff.; hierbei stieg das Verhältnis der Anfangsfestigkeit zur 28 Tage-Festigkeit mit abnehmendem Wasserzementwert an. So betrug z. B. die 3 Tage-Druckfestigkeit bei einem Wasserzementwert von 0,80 rd. 44%, bei $w = 0,60$ rd. 55% und bei $w = 0,50$ rd. 65% der zugehörigen 28 Tage-Festigkeit.

Eine hohe Frühfestigkeit ist vor allem für die Betonsteinindustrie von Bedeutung, da ein frühes Entformen oder Vorspannen sowie eine frühe Transport- und Stapelfestigkeit die Wirtschaftlichkeit sehr fördern. Da man Straßen frühzeitig dem Verkehr übergeben will, ist eine schnelle Anfangserhärtung auch im Betonstraßenbau wichtig. Im Winterbau muß der Beton möglichst schnell er härten und vor seinem ersten Gefrieren eine Druckfestigkeit von etwa 50 kp/cm^2 erreicht haben, damit er beim Einfrieren nicht geschädigt wird. Schließlich hängt bei vielen Spannbetonbauwerken, wie z. B. im Freivorbau, der gesamte Baufortschritt von der Frühdruckfestigkeit ab, da man erst vorspannen soll, wenn der Beton 80% seiner vorgesehenen 28 Tage-Druckfestigkeit erreicht hat.

Die nachfolgend berichteten Untersuchungen sollen ein Beitrag zu der Frage sein, in welchem Maße die Frühfestigkeit des Betons von seiner Zusammensetzung (Wasserzementwert) und von der Zementgüteklasse beeinflußt wird.

2. Versuchsplan und Baustoffe

Der Wasserzementwert wurde zu 0,40, 0,60 und 0,80 gewählt und deckte damit den in der Praxis überwiegend vorkommenden Bereich. Alle Betone wiesen eine knapp weiche Konsistenz (Eindringmaß nach DIN 1048 rd. 6 cm), gleiche Kornzusammensetzung und gleichen Wassergehalt auf. Der Zementgehalt ergab sich dadurch mit den verschiedenen Wasserzementwerten zu 400, 270 und 200 kg je m^3 Beton. Um die Dicke der Feinmörtelschicht und den Zuschlagstoffgehalt je m^3 Beton möglichst gleichzuhalten, wurde den zementärmeren Mischungen feines Quarzmehl zugesetzt. Die Festigkeitsentwicklung des Betons wurde nach 1, 3, 7, 28 und 91 Tagen an Probewürfeln mit 20 cm Kantenlänge bestimmt, die ständig unter feuchten Tüchern bei $+20^\circ\text{C}$ lagerten; dazu wurde auch die Betongüte nach DIN 1048 ermittelt.

2.1 Zement

Die wichtigsten Eigenschaften bei Prüfung nach DIN 1164 der 3 Portlandzemente Z 275, Z 375 und Z 475 sind in Tafel 1 zu-

¹⁾ Anmerkung: Nach Abfassung dieses Berichts wurden von A. Meyer Ergebnisse von Untersuchungen zum gleichen Thema veröffentlicht [5]. An weichen Mörteln und Betonen aus drei Portlandzementen Z 275 stellte er fest, daß mit einem niedrigen Wasserzementwert ein bestimmter Anteil der 28 Tage-Druckfestigkeit früher erreicht wird als mit einem höheren Wasserzementwert. So betrug z. B. die 3 Tage-Festigkeit bei einem Wasserzementwert von 0,80 rd. 39%, bei $w = 0,60$ rd. 43% und bei $w = 0,40$ rd. 57% der zugehörigen 28 Tage-Festigkeit.

sammengestellt. Der PZ 475 wies mit rd. 5000 cm²/g (nach Blaine) eine hohe Mahlfineinheit auf; der PZ 375 hatte eine mittlere Mahlfineinheit von rd. 3500 cm²/g. Der PZ 275 war mit einer spezifischen Oberfläche von rd. 2800 cm²/g und einem Rückstand auf dem Sieb 0,09 DIN 4188 von 9,2 Gew.-% verhältnismäßig grob gemahlen. Das Erstarren des PZ 475 trat rd. 1 Stunde früher als das der beiden anderen PZ ein.

Die Festigkeit des PZ 475 und deren Anstieg sowie die des PZ 275 entsprachen annähernd dem Mittel aller deutschen Zemente der betreffenden Art und Güteklasse. Die 3- und 7 Tage-Festigkeit des PZ 375 lag etwas über dem Mittel. Die Zemente der Güteklassen Z 375 und Z 475 lieferten hohe Anfangsfestigkeiten nach 1 und 3 Tagen. So betrug die 3 Tage-Festigkeit (bezogen auf die zugehörige 28 Tage-Festigkeit) bei PZ 475 rd. 63 %, bei PZ 375 rd. 55 %, bei PZ 275 rd. 41 %.

2.2 Zuschlagstoffe und Kornzusammensetzung

Als Zuschlagstoff wurde trockener Rheinkiessand aus insgesamt sechs verschiedenen Korngruppen so zusammengesetzt, daß sich die folgende Kornzusammensetzung (ohne Quarzmehl) ergab:

Siebweite	Maschen-						Rundloch-Sieb	
	0,2	1	3	7	15	30	mm	
Durchgang	7	19	37	54	76	100	Gew.-%	

Die Kornzusammensetzung lag damit im oberen Teil des „besonders guten“ Bereichs der Sieblinien nach DIN 1045, Bild 2.

2.3 Quarzmehl-Zusatzstoff

Der Zementgehalt bei den Betonen mit einem Wasserzementwert $w = 0,40$ lag bei 400 kg/m³, mit $w = 0,60$ bei 267 kg/m³ und mit $w = 0,80$ bei 200 kg/m³. Bei den zementärmeren Mischungen wurde der zu 400 kg/m³ fehlende Anteil Zement durch einen gleichen Stoffraumanteil zementfeinen Quarzmehls ergänzt (Rückstand auf dem Sieb 0,09 DIN 4188 rd. 4 Gew.-% und auf dem Sieb mit 0,02 mm Maschenweite rd. 60 Gew.-%).

2.4 Befonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Die Bezeichnung der Betone, ihr Mischungsverhältnis und die wichtigsten Frischbetoneigenschaften enthält Tafel 2. Der Zuschlagstoffgehalt betrug bei allen Betonen 1845 kg/m³, der Wassergehalt 160 l/m³; veränderlich waren der Zementgehalt mit 400, 267 und 200 kg/m³ und der Quarzmehlgehalt mit 0, 112 und 169 kg/m³.

Die Rohdichte des Frischbetons lag zwischen 2,38 und 2,43 kg/dm³. Der an den drei zuerst hergestellten Mischungen aus verschiedenen Zementen nach dem Druckausgleichsverfahren [6] überprüfte Gehalt an natürlichen Luftporen lag zwischen 1,2 und 1,3 Raum-% (praktisch vollständig verdichteter Beton).

Die Konsistenz wurde mit dem Eindringmaß nach DIN 1048 und mit dem Powersgerät (Anzahl der Aufschläge) bestimmt. Im Mittel lag das Eindringmaß bei 6 cm und die Anzahl der Auf-

Tafel 1 Eigenschaften der Zemente (Prüfung nach DIN 1164)

1	2	3	4		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Zement Art, Güte, Bezeichnung	Mahlfeinheit		Erstarren		Biegezugfestigkeit nach Tagen	Biegezugfestigkeit nach Tagen					Druckfestigkeit nach Tagen				
	Rückstand Sieb 0,09 DIN 4188	Spezifische Oberfläche (Blaine)	Beginn	Ende		1	3	7	28	91	1	3	7	28	91
—	Gew.-%	cm ² /g	Std.;min	Std.;min	kp/cm ²					kp/cm ²					
PZ 475, wdcl	0,1	5030	1;50	4;00	47	65	83	87	84	216	367	507	579	608	
PZ 375, ssb	3,7	3430	3;05	5;15	27	56	74	84	89	112	276	418	499	562	
PZ 275, nbe	9,2	2840	2;35	5;05	17	37	57	79	84	66	180	290	440	515	

Tafel 2 Frischbetoneigenschaften

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Beton Bezeichnung	Zement Art, Güte	Mischungsverhältnis				Zement- gehalt	Luftgehalt	Frischbeton- rohdichte	Eindringmaß DIN 1048	Aufschläge Powers- gerät
		Zement	Feinstsand	Zuschlag	Wasser					
—	—	—	—	—	—	kg/m ³	Raum-%	kg/dm ³	cm	—
P 4/4	PZ 475, wdcl	1	—	4,61	0,40	403	—	2,42	5	17
P 4/6		1	0,42	6,92	0,60	266	1,2	2,38	6	16
P 4/8		1	0,85	9,23	0,80	202	—	2,40	6	15
P 3/4	PZ 375, ssb	1	—	4,61	0,40	401	1,3	2,41	9	9
P 3/6		1	0,42	6,92	0,60	272	—	2,43	8	13
P 3/8		1	0,85	9,23	0,80	203	—	2,41	7	10
P 2/4	PZ 275, nbe	1	—	4,61	0,40	403	—	2,42	4	22
P 2/6		1	0,42	6,92	0,60	269	—	2,40	5	16
P 2/8		1	0,85	9,23	0,80	202	1,3	2,40	4	14

schläge bei 15. Mit den verschiedenen Zementen ergaben sich etwas unterschiedliche Konsistenzen; so war Beton aus PZ 375 etwas weicher (Eindringmaß 9 cm, Anzahl der Aufschläge 9) und der aus PZ 275 etwas steifer ausgefallen (Eindringmaß 4 cm und Anzahl der Aufschläge bis 22). Insgesamt unterschieden sich die Betone in ihrer Konsistenz praktisch nicht bedeutungsvoll. Beim Schütten war der Beton noch schollig, der Feinmörtel im Beton war schmierig-weich; beim Verdichten mit Innenrüttler kam der Beton schnell ins Fließen und zeigte nach kurzer Zeit eine geschlossene Oberfläche. Alle Betone waren etwas weicher als die Konsistenz K 1 (steif) und eigneten sich gut als Rüttelbeton [7].

2.5 Herstellung, Lagerung und Prüfung

Von jeder Mischung wurden 18 Probewürfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt. Der Beton wurde in einer Lage bis annähernd Oberkante des Aufsatzkastens eingefüllt und anschließend durch einen leichten Innenrüttler (Flaschendurchmesser 32 mm; $n = 8000$ U/min) an 5 Eintauchstellen jeweils 6 sec verdichtet; nach insgesamt 20 sec Rüttelzeit war die Oberfläche bereits geschlossen; es traten nur noch vereinzelte Luftblasen oben aus. 15 der insgesamt 18 Würfel wurden ständig unter feuchten Tüchern bei $+ 20$ °C, die restlichen 3 Würfel wurden 7 Tage feucht, dann 21 Tage bei 65 % rel. Luftfeuchtigkeit und $+ 20$ °C gelagert (Betongüte gemäß DIN 1048). Im Alter von 1, 3, 7, 28 und 91 Tagen wurden jeweils 3 feucht gelagerte Würfel auf Rohdichte und Festigkeit geprüft und im Alter von 28 Tagen die nach DIN 1048 gelagerten 3 Würfel.

3. Betondruckfestigkeit

In Tafel 3 sind die Betonrohddichte und die Druckfestigkeit zu den verschiedenen Prüfeterminen zusammengestellt (Mittelwert aus 3 Einzelprüfungen).

Die Rohddichte der ständig feucht gelagerten Würfel schwankte zwischen 2,38 und 2,42 kg/dm³ (ein Wert mit 2,44 kg/dm³); sie blieb über den Zeitraum von 3 Monaten nahezu konstant oder nahm geringfügig zu. Die Rohddichte der nach DIN 1048 gelagerten Würfel (7 Tage feucht, dann 21 Tage an Luft) war wegen des teilweisen Austrocknens niedriger und lag zwischen 2,33 und 2,41 kg/dm³. Die Betone mit höherem Zementgehalt und gleichzeitig niederem Wasserzementwert banden mehr Wasser und waren zudem wesentlich dichter, so daß sie auch weniger austrockneten und daher eine höhere Rohddichte behielten; sie betrug im Mittel bei $w = 0,40$ rd. 2,40 kg/dm³, bei $w = 0,60$ rd. 2,38 kg/dm³ und bei $w = 0,80$ rd. 2,35 kg/dm³.

Die Betongüte (28 Tage-Druckfestigkeit nach DIN 1048) lag zwischen etwa B 225 und B 600. Dieser Unterschied wurde vor allem durch den verschieden großen Wasserzementwert und erst in zweiter Linie durch die Zementgüte hervorgerufen. Die „Endfestigkeit“ (3 Monate) war bei den Zementen Z 275 und Z 375 bei gleichem Wasserzementwert praktisch gleich groß, lediglich bei Z 475 war sie stets größer.

Tafel 3 Rohdichte und Druckfestigkeit des Betons (ständige Feuchtlagerung bei + 20 °C)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Beton Bezeichnung	Zement Art, Güte	Wasserelement- wert	Betonrohichte nach Tagen					Beton- roh- ichte ρ_{28}^{**})	Druckfestigkeit in kp/cm^2 (in Klammern in % der jeweiligen 28 Tage- Festigkei) nach Tagen					Beton- güte W_{28}^{**})	
			1	3	7	28	91		1	3	7	28	91		
—	—	—	kg/dm^3					kg/dm^3	kp/cm^2 (%)					kp/cm^2	
P 4/4	PZ 475, wdcl	0,40	2,42**)	2,44	2,42	2,42	2,42	2,40	466**)	551	601	629	680	669	
P 4/6		0,60	2,38	2,39	2,38	2,38	2,39	2,37	(74)	(88)	(96)	(100)	(108)		493
P 4/8		0,80	2,38	2,39	2,40	2,40	2,40	2,36	(56)	(75)	(89)	(100)	(101)		361
P 3/4	PZ 375, ssb	0,40	2,41	2,41	2,41	2,41	2,42	2,40	300	437	457	515	584	566	
P 3/6		0,60	2,39	2,40	2,40	2,40	2,41	2,37	(58)	(85)	(89)	(100)	(113)		397
P 3/8		0,80	2,39	2,39	2,39	2,40	2,40	2,36	(45)	(73)	(85)	(100)	(108)		312
P 2/4	PZ 275, nbe	0,40	2,40	2,42	2,41	2,42	2,42	2,41	202	362	448	526	593	525	
P 2/6		0,60	2,39	2,39	2,39	2,40	2,40	2,38	(38)	(69)	(85)	(100)	(113)		383
P 2/8		0,80	2,38	2,38	2,38	2,38	2,38	2,33	(35)	(64)	(83)	(100)	(120)		278
									(71)	(132)	(185)	(251)	(288)		
									(28)	(53)	(74)	(100)	(115)		

*) Lagerung nach DIN 1048: 7 Tage feucht, dann 21 Tage bei 65 % rel. Luftfeuchtigkeit und + 20 °C

**) nach 26 Stunden

Die Frühfestigkeit war nach Wasserzementwert und Zementgüteklasse sehr unterschiedlich; so wurden nach einem Tag Druckfestigkeiten zwischen 71 und 466 kp/cm^2 festgestellt. Die Festigkeitsentwicklung geht aus Tafel 3, Spalten 10 bis 14, hervor; in Klammern ist unter der absoluten Festigkeit auch deren prozentualer Anteil — bezogen auf die jeweilige 28 Tage-Druckfestigkeit bei Feuchtlagerung — angegeben. Zur Veranschaulichung ist in Bild 1 die Druckfestigkeit der drei Betone mit $w = 0,40, 0,60$ und $0,80$ und den Zementen PZ 475 (ausgezogene Linien) und PZ 275 (gestrichelte Linien) dargestellt.

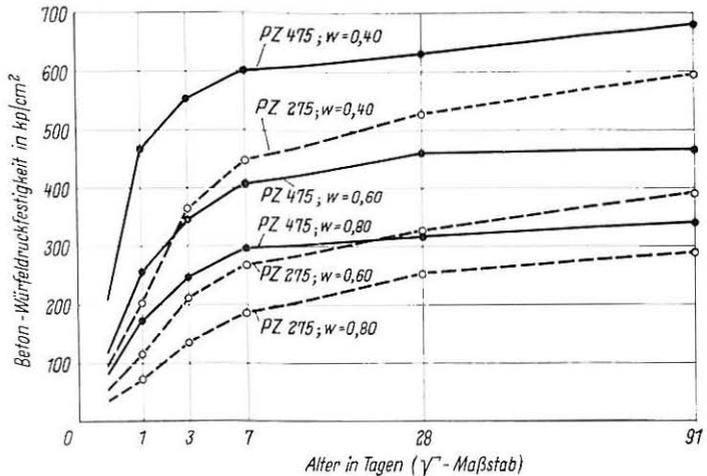


Bild 1 Festigkeitsentwicklung von Betonen mit Wasserzementwerten von 0,40, 0,60 und 0,80 aus PZ 275 und PZ 475

3.1 Einfluß des Wasserzementwertes auf die Festigkeitsentwicklung

Der große Einfluß des Wasserzementwertes und der Zementgüteklasse auf die Höhe und den Verlauf der Festigkeitsentwicklung wird aus Bild 1 und Tafel 3 offensichtlich. Bei allen drei untersuchten Zementen stieg — wie zu erwarten war — die absolute Festigkeit nach 1 oder 3 Tagen mit abnehmendem Wasserzementwert an. Darüber hinaus nahm jedoch auch die auf die jeweilige 28 Tage-Festigkeit bezogene Frühfestigkeit mit abnehmendem Wasserzementwert w zu, allerdings je nach Zementgüteklasse unterschiedlich, wie aus der folgenden Übersicht hervorgeht.

1 Tage-Druckfestigkeit in % der zugehörigen 28 Tage-Festigkeit

Beton aus Zement	mit $w = 0,80$	mit $w = 0,40$
PZ 475, wdcl	54 %	74 %
PZ 375, ssb	37 %	58 %
PZ 275, nbe	28 %	38 %

Wie die Festigkeitsentwicklung von Betonen mit unterschiedlichem Wasserzementwert nach 1 Tag verläuft, ist als Beispiel in Bild 2 an den Betonen aus PZ 375 dargestellt. Die prozentuale Zunahme der Festigkeit (bezogen auf die 28 Tage-Festigkeit) durch einen herabgesetzten Wasserzementwert war nach 1 und auch nach 3 Tagen beträchtlich, nach 7 Tagen dagegen schon wesentlich kleiner (Zunahme nur von 83 auf 89 %). – Die Festigkeitsentwicklung der Betone aus den anderen 2 Zementen ver-

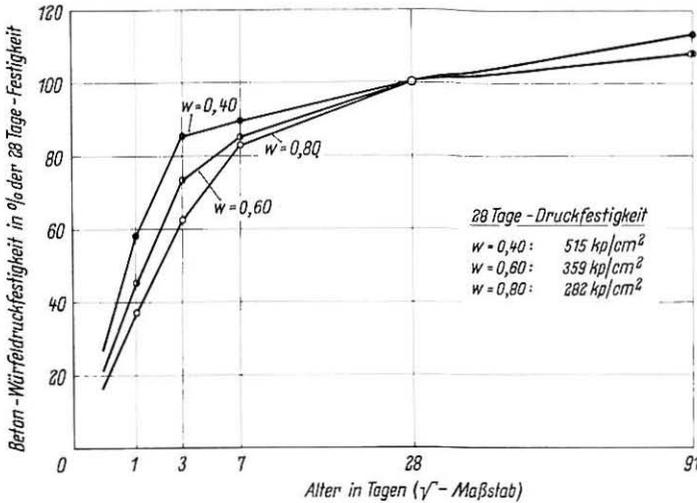


Bild 2 Festigkeitsentwicklung von Beton mit verschiedenem Wasserzementwert (PZ 375; Zementgehalt 200, 270 und 400 kg/m³)

lief ähnlich. Bei dem langsamer erhärtenden Zement Z 275 wurde jedoch auch noch im Alter von 7 Tagen eine merkbare Steigerung durch einen erniedrigten Wasserzementwert festgestellt (um 11 %).

Bezieht man die Festigkeit nicht auf die zugehörige 28 Tage-Festigkeit, sondern auf die Festigkeit, die mit dem Wasserzementwert $w = 0,80$ zu den jeweiligen Prüfterminen entsteht (100%), so ist der Einfluß eines erniedrigten Wasserzementwertes in jeder Altersstufe zu erkennen. Diese Darstellung enthält Tafel 4. (Die erste Zeile in Tafel 4 betrifft die Frühfestigkeit nach 1 Tag, die letzte Zeile die „Endfestigkeit“ nach 3 Monaten.)

Durch Herabsetzen des Wasserzementwertes von 0,80 auf 0,60 stieg die Frühfestigkeit (1 Tag) bei allen Zementen auf das rd. 1,5fache an, die „Endfestigkeit“ auf das rd. 1,4fache, also nahezu um den gleichen Prozentsatz.

Durch Herabsetzen des Wasserzementwertes von 0,80 auf 0,40 stieg die Frühfestigkeit auf das 2,8fache, die „Endfestigkeit“ (91 Tage) dagegen nur auf das 2,0fache an. Auch diese Darstellung zeigt, daß ein Herabsetzen des Wasserzementwertes die Frühfestigkeit fördert, vor allem wenn der Wasserzementwert unter 0,60 gesenkt wird.

Tafel 4 Einfluß des Wasserzementwertes auf die Festigkeitsentwicklung
(In Klammern % der Festigkeit bezogen auf $w = 0,80$ bei gleichem Zement und gleichem Prüfalter)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zement	PZ 475, wdcl			PZ 375, ssb			PZ 275, nbe		
Wasserzementwert	0,80	0,60	0,40	0,80	0,60	0,40	0,80	0,60	0,40
	kp/cm ² (‰)			kp/cm ² (‰)			kp/cm ² (‰)		
1 Tage-Druckfestigkeit	172 (100)	255 (148)	466*) (271)	105 (100)	161 (153)	300 (286)	71 (100)	114 (160)	202 (284)
3 Tage-Druckfestigkeit	245 (100)	343 (140)	551 (225)	176 (100)	262 (149)	437 (248)	132 (100)	210 (159)	362 (274)
7 Tage-Druckfestigkeit	295 (100)	406 (138)	601 (204)	234 (100)	305 (130)	457 (195)	185 (100)	269 (145)	448 (242)
28 Tage-Druckfestigkeit	316 (100)	459 (145)	629 (199)	282 (100)	359 (127)	515 (183)	251 (100)	326 (130)	526 (210)
91 Tage-Druckfestigkeit	340 (100)	465 (137)	680 (200)	305 (100)	386 (127)	584 (191)	288 (100)	392 (136)	593 (206)

*) nach 26 Stunden

3.2 Einfluß der Zementgüteklasse auf die Festigkeitsentwicklung

In Bild 3 ist der Festigkeitsverlauf von Betonen mit $w = 0,40$ und jeweils 400 kg/m^3 der drei untersuchten Zemente aufgetragen. Die „Endfestigkeit“ (3 Monate) des Betons mit PZ 475 war rd. 20% größer als die der anderen beiden Betone, die eng zusammenlagen. Die Frühfestigkeit nahm in der Reihenfolge PZ 275, PZ 375 und PZ 475 stark zu; nach 1 Tag war die Festigkeit des Betons aus PZ 475 rd. 2,3mal so groß wie die mit PZ 275. Eine bestimmte Druckfestigkeit, z. B. 400 kp/cm^2 , wie sie nach dem im Entwurf vorliegenden Richtlinien für Betonfahrbahnen [8] gefordert wird, wurde – allerdings mit 400 kg/m^3 Zement – mit PZ 475 in rd. 1 Tag, mit PZ 375 in rd. 3 Tagen und mit PZ 275 in rd. 5 Tagen erreicht. In Annäherung wurden die Festigkeiten, die mit PZ 275 in 7 Tagen erreicht wurden, mit PZ 375 schon in 3 Tagen und mit PZ 475 in 1 Tag erhalten.

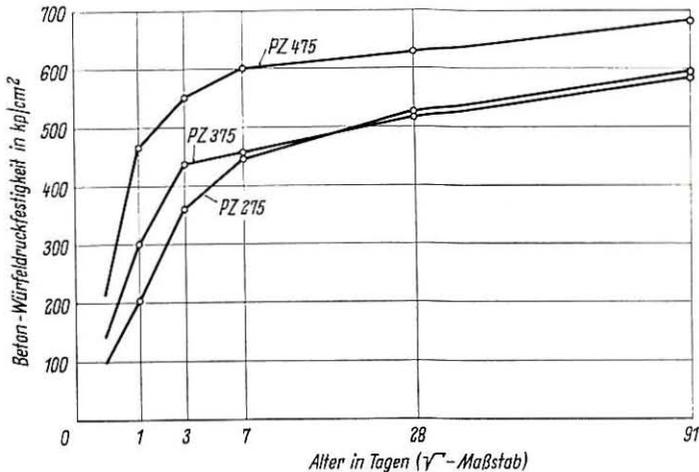


Bild 3 Festigkeitsentwicklung von Beton mit verschiedenen Zementen (Wasserzementwert 0,40; Zementgehalt 400 kg/m^3)

3.3 Einfluß des Zementgehaltes auf die Festigkeitsentwicklung

Der Wasserzementwert ist eine sehr zweckmäßige Kenngröße in der Betontechnologie, durch die der Wassergehalt und der Zementgehalt des Betons miteinander verknüpft werden. Betontechnische Zusammenhänge lassen sich damit einfacher darstellen. Häufig liegt der Wasseranspruch des Betons durch die vorgegebene Kornzusammensetzung und Verdichtungsart in relativ engen Grenzen fest, so daß der Wasserzementwert lediglich durch den Zementgehalt verändert werden kann. Bei den vorliegenden Versuchen wurde der Wassergehalt mit 160 l/m^3 konstant gehalten, während der Zementgehalt mit abnehmendem Wasserzementwert von 200 über 270 auf 400 kg/m^3 anstieg. Aus den Versuchsergebnissen läßt sich daher hier auch unmittelbar vom Zementgehalt auf die Festigkeitsentwicklung schließen.

In Bild 4 ist die Frühfestigkeit nach 1 Tag (oberer Teil des Bildes) und die „Endfestigkeit“ nach 3 Monaten (unterer Teil) über dem Zementgehalt aufgetragen. Mit zunehmendem Zementgehalt nahm der Wasserzementwert ab, da der Wassergehalt konstant war. (Der Wasserzementwert ist auf einer zweiten Abszisse angegeben.) Diese Darstellung zeigt ebenso wie Bild 3 recht anschaulich, wie groß der Einfluß der Zementgütekategorie auf die Frühfestigkeit und wie gering er auf die „Endfestigkeit“ war. Bemerkenswert war beim Einfluß des Zementgehaltes auf die Frühfestigkeit, daß die Kurven für alle Zemente mit zunehmendem Zementgehalt nicht linear, sondern progressiv zunahm, d. h. bei gleichem Wassergehalt eines Betons bewirkte z. B. eine 10 %ige Zementgehaltserhöhung eine rd. 15 %ige Steigerung der Frühfestigkeit. Dieses Verhältnis war bei der „Endfestigkeit“ linear, d. h. dort erhöhte ein Mehr von 10 % Zement auch die Festigkeit um 10 %. Ein höherer Zementgehalt fördert also bei

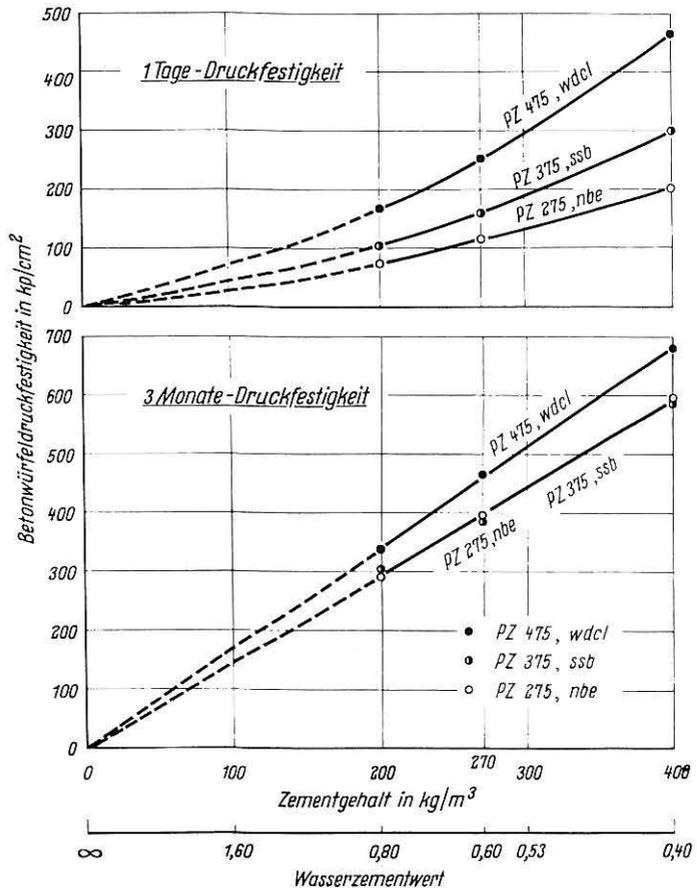


Bild 4 Einfluß des Zementgehaltes auf die Frühfestigkeit des Betons (1 Tag) und die „Endfestigkeit“ (3 Monate) bei einem Wassergehalt von 160 l/m³

gleichbleibendem Wassergehalt vor allem die Frühfestigkeit, wie dies durch den abnehmenden Wasserzementwert bedingt ist (siehe unter 3.1). (Die immer wieder anzutreffende Feststellung, daß mit zunehmendem Zementgehalt die Druckfestigkeit ansteigt, gilt lediglich dann, wenn der Wassergehalt konstant bleibt; die oben hierzu gebrachte Verallgemeinerung gilt zudem nur für den untersuchten Bereich von 200 bis 400 kg Zement je m³, der jedoch dem der Praxis entspricht.)

3.4 Vergleich der Festigkeitsentwicklung von Normenmörtel und Beton

Häufig wird zum Abschätzen der Festigkeitsentwicklung des Betons der Erhärtungsverlauf des Zementes bei Prüfung nach DIN 1164 herangezogen, d. h. man nimmt an, daß der mit einem bestimmten Zement hergestellte Beton einen entsprechenden Erhärtungsverlauf wie der Normenmörtel aufweist. Ist z. B. die 3- und 28 Tage-Normendruckfestigkeit eines Z 375 mit 276 und 499 kp/cm² (55 und 100 %) bekannt und hat die Eignungsprüfung nach 28 Tagen mit $w = 0,40$ eine Betondruckfestigkeit von 515 kp/cm² ergeben, so wäre hiernach eine 3 Tage-Betondruckfestigkeit von $0,55 \cdot 515 = 283$ kp/cm² zu erwarten. Bei den vorliegenden Versuchen wurden aber hierfür 437 kp/cm² gefunden, also mehr als das 1,5fache. Diese gegenüber der Normenfestigkeit über Erwarten hohe 3 Tage-Festigkeit des Betons ist zum Teil auf den niedrigen Wasserzementwert – im Beton $w = 0,40$, im Normenmörtel $w = 0,60$ – zurückzuführen, doch zeigt auch die Festigkeitsentwicklung von Normenmörtel mit $w = 0,60$ und Beton mit $w = 0,60$ in Tafel 5 ähnliche Unterschiede. Dies wird vor allem ersichtlich, wenn man die prozentuale Festigkeitsentwicklung vergleicht (Spalten 8 bis 12); mit allen Zementen hatte der Beton eine beträchtlich größere Anfangsfestigkeit als der Mörtel (im Alter von 1 Tag rd. 20 % und mehr). Beachtet man, daß bei hochwertigen Betonen in der Praxis der Wasserzementwert niedriger liegt (in Betonwerken und im Straßenbau oft bei 0,40), so geben Rückschlüsse aus dem Erhärtungsverlauf eines Normenmörtels auf den Erhärtungsverlauf eines Betons ein unrichtiges Bild; der Beton erhärtet wesentlich schneller, als dies nach dem Erhärtungsverlauf des Normenmörtels zu erwarten ist.

Die Ursache für den unterschiedlichen Erhärtungsverlauf des Mörtels und des Betons ist vermutlich im Gefüge und in der dadurch bedingten verschiedenartigen Beanspruchung des verkitenden Zementsteins zu suchen. Auch hat die Verwendung eines getrockneten Zuschlagstoffes bei diesen Untersuchungen und die gegenüber dem Normenmörtel wesentlich steifere Konsistenz die hohe Frühfestigkeit des Betons begünstigt, wie orientierende Versuche bestätigten.

4. Hohe Frühfestigkeit ohne Wärmebehandlung

Ein Beton mit der hohen 1 Tage-Druckfestigkeit von 450 kp/cm² wird nach den vorliegenden Versuchen unter folgenden Bedingungen erreicht:

Tafel 5 Festigkeitsentwicklung von DIN-Normenmörtel ($w = 0,60$) und Beton ($w = 0,60$)
 (Mörtel: Prismenhälften $6,25 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$, Wasserlagerung. Beton: 20 cm -Würfel, Feuchtlagerung)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Zement Art, Güte Bezeichnung	Mörtel oder Beton	Druckfestigkeit in kp/cm^2 nach Tagen					Druckfestigkeit in % der 28 Tage-Festigkeit nach Tagen				
		1	3	7	28	91	1	3	7	28	91
–	–	kp/cm^2					%				
PZ 475, wdcl	DIN-Mörtel Beton P 4/6	216	367	507	579	608	37	63	88	100	105
		255	343	406	459	465	56	75	89	100	101
PZ 375, ssb	DIN-Mörtel Beton P 3/6	112	276	418	499	562	22	55	84	100	113
		161	262	305	359	386	45	73	85	100	108
PZ 275, nbe	DIN-Mörtel Beton P 2/6	66	180	290	440	515	15	41	66	100	117
		114	210	269	326	392	35	64	83	100	120

Verwendung von Portlandzement der Güteklasse Z 475,
 Wassermenge nicht über 0,40,
 Zementgehalt 400 kg/m^3 ,
 günstige Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches 0/30 mm,
 Konsistenz nicht weicher als K 1 (steifer Beton),
 vollständige Verdichtung des Betons durch Rütteln,
 Beton- und Lagerungstemperatur um $+ 20^\circ\text{C}$.

Wiederholt konnte in anderem Zusammenhang ebenfalls festgestellt werden, daß mit diesen Bedingungen eine Betondruckfestigkeit von wenigstens 450 kp/cm^2 nach 24 h auch ohne Wärmebehandlung erreicht wird.

5. Zusammenfassung

Um den Einfluß der Betonzusammensetzung – vor allem des Wassermenge und der Zementgüteklasse – auf die Anfangsdruckfestigkeit des Betons zu ermitteln, wurden Untersuchungen an Betonen mit Wassermengen von 0,40, 0,60 und 0,80 mit PZ 275, 375 und 475 durchgeführt. Die Druckfestigkeit wurde an 20 cm-Würfeln, die bei $+ 20^\circ\text{C}$ ständig feucht lagerten, nach 1, 3, 7, 28 und 91 Tagen geprüft. Die Betongüte (28 Tage-Druckfestigkeit) lag im Bereich von B 225 bis B 600. Für den untersuchten Bereich und unter den gewählten Bedingungen ergab sich folgendes:

5.1 Mit abnehmendem Wassermenge stieg die 28 Tage-Druckfestigkeit des Betons erwartungsgemäß und entsprechend dem Wassermengengesetz an. Die Frühfestigkeit nach 1 und 3 Tagen erfuhr eine prozentual wesentlich größere Steigerung. Im Mittel ergab sich eine Zunahme der Betondruckfestigkeit durch Senkung des Wassermengewertes

von $w = 0,80$	auf $w = 0,60$	auf $w = 0,40$
nach 1 Tag	um 54 %	um 180 %
nach 28 Tagen (Betongüte)	um 34 %	um 85 %

5.2 Die Versuche bestätigten die Erfahrung, daß die Zementgüteklasse vor allem die Anfangsdruckfestigkeit beeinflusst. Bezogen auf die jeweilige 28 Tage-Festigkeit (Betongüte) fand sich bei den drei Zementen in Abhängigkeit vom Wassermengewert folgende Frühfestigkeit nach 1 Tag:

Zement	$w = 0,80$	$w = 0,60$	$w = 0,40$
PZ 475, wdcl	48 %	52 %	70 %
PZ 375, ssb	34 %	41 %	53 %
PZ 275, nbe	26 %	30 %	38 %

5.3 Bei bestimmter Kornzusammensetzung des Zuschlags und gleicher Konsistenz des Betons hängt der Wassermengewert vom Zementgehalt ab, so daß dann die Festigkeitsentwicklung auch in Abhängigkeit vom Zementgehalt ausgedrückt werden kann. Bei dieser Darstellung, die jedoch nur für einen konstanten Wassergehalt und nur im untersuchten Bereich von 200 bis 400 kg/m^3 Zement gilt, bewirkte eine Verdoppelung des

Zementgehaltes auch eine Verdoppelung der Endfestigkeit (nach 3 Monaten), jedoch ungefähr eine Verdreifachung der 1 Tage-Druckfestigkeit.

5.4 Der Erhärtungsverlauf des *Normenmörtels* nach DIN 1164 blieb auch bei gleichem Wasserzementwert hinter dem des Betons erheblich zurück. Man kann daher die Festigkeitsentwicklung des Normenmörtels nicht zum Abschätzen der Festigkeit im Beton, sondern lediglich zum Vergleich der Festigkeitsentwicklung der Zemente untereinander benutzen. Die Anfangsfestigkeiten des steifen Betons waren stets wesentlich höher als die des Normenmörtels.

5.5 Ohne Wärmebehandlung (Lagerungstemperatur + 20 °C) ließen sich in 24 Stunden *Betondruckfestigkeiten von über 450 kp/cm²* erzielen, wenn PZ 475 verwendet wurde, der Wasserzementwert nicht größer als 0,40 war, der Beton steif angemacht und praktisch vollständig verdichtet wurde.

SCHRIFTTUM :

- [1] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Aufl. Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- [2] Graf, O., W. Albrecht und H. Schäffler: Die Eigenschaften des Betons. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.
- [3] Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Mit Erläuterungen von K. Walz. 2. Aufl. Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin / München 1963.
- [4] Walz, K.: Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen. *beton* 10 (1960) H. 5, S. 222/232; ebenso *Betontechnische Berichte* 1960. Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 29/57.
- [5] Meyer, A.: Über den Einfluß des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton. *Betonstein-Zeitung* 29 (1963) H. 8, S. 391/394.
- [6] Schäfer, A.: Die Bestimmung des Luftporengehalts im Beton. *beton* 13 (1963) H. 8, S. 383/386. – Siehe auch Vorläufiges Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zusatzstoffen zu Straßenbeton. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln 1953.
- [7] Wischers, G.: Erläuterungen zu den Vorläufigen Richtlinien für die Herstellung und Lieferung von Transportbeton. *Bau und Bauindustrie* 14 (1961) H. 23, S. 857/860.
- [8] Richtlinien für den Bau von Betonfahrbahnen. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln, Entwurf 1963.