

# **Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons**

**Von Justus Bonzel und Jürgen Dahms, Düsseldorf**

## **Übersicht**

*In den Jahren 1961 bis 1965 wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung an 66 Kiessandbetonen der Güten B 225 bis B 600 untersucht. Die Versuche sollten Aufschluß geben über die heute bei üblicher Zusammensetzung, Herstellung, Verdichtung und Nachbehandlung in jungem und spätem Alter zu erwartende Druckfestigkeit. Die Betone wurden mit 11 verschiedenen Zementen (6 PZ, 1 EPZ, 3 HOZ, 1 TrZ) und mit W/Z-Werten zwischen 0,45 und 0,80 hergestellt und nach Wasserlagerung im Alter von 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen und nach Luftlagerung (DIN 1048) im Alter von 28 und 180 Tagen auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft.*

*Bei allen Betonen nahm die Druckfestigkeit erwartungsgemäß mit abnehmendem W/Z-Wert und mit wachsendem Alter zu, im Bereich kleiner W/Z-Werte (0,40 bis 0,60) mehr als im Bereich größerer W/Z-Werte (0,60 bis 0,80) und bei jungem Beton mehr als bei älterem. Die 3 Tage-Druckfestigkeit aller Betone betrug bei schnell erhärtenden Zementen rd. 70 %, bei normal erhärtenden Zementen rd. 50 bis 60 % und bei langsam erhärtenden Zementen rd. 20 bis 40 %, die 180 Tage-Druckfestigkeit bei schnell erhärtenden Zementen rd. 105 %, bei normal erhärtenden Zementen rd. 110 bis 125 % und bei langsam erhärtenden Zementen rd. 125 bis 150 % der 28 Tage-Festigkeit. Alle mit sehr unterschiedlichen Zementen hergestellten Betone besaßen in jedem Alter bei W/Z = 0,60 i. M. 75 % und bei W/Z = 0,80 i. M. 50 % der entsprechenden Druckfestigkeit bei W/Z = 0,45. Bis zum Alter von 180 Tagen war die Druckfestigkeit von 20 cm-Würfeln nach Wasserlagerung und nach Luftlagerung (DIN 1048) praktisch gleich.*

## **1. Allgemeines**

Die Festigkeitsentwicklung des Betons wird im allgemeinen an seiner Druckfestigkeit beurteilt, die trotz aller Sondereigenschaften auch heute noch die wichtigste Eigenschaft des Betons ist. Die Möglichkeiten ihrer Beeinflussung wurden in den vergangenen 50 Jahren durch zahlreiche Versuche geklärt, siehe u. a. [1, 2, 3]. Meist wurde dabei die Betongüte betrachtet, d. h. die im Alter von

28 Tagen an Würfeln von 20 cm Kantenlänge nach DIN 1048 ermittelte Druckfestigkeit.

Neben der Betongüte interessiert häufig z. B. für Entschalen, Vorspannen und frühzeitiges Belasten aus anderem Grund auch die Druckfestigkeit des jungen Betons und für zusätzliche Sicherheit, für nachträgliche Ermittlung der Betongüte und für Fälle, bei denen die geforderte Festigkeit erst später vorhanden zu sein braucht, auch die Nacherhärtung nach dem 28. Tag. Über die Frühestigkeit und die Nacherhärtung finden sich im Schrifttum einige ältere Feststellungen, deren Zahlenwerte aber wegen der Weiterentwicklung der Zemente und der Betone den heutigen Verhältnissen nicht mehr ganz entsprechen, siehe u. a. [1, 2]. Die Ergebnisse der wenigen und nicht sehr umfangreichen neueren Untersuchungen über die Festigkeitsentwicklung mit dem Alter [4 bis 8], die teilweise bei anderer Aufgabenstellung anfielen und teilweise erst ein bis zwei Jahre nach Aufnahme der hier besprochenen Versuche veröffentlicht wurden, werden — soweit angebracht — in die Erörterung dieser Versuche einbezogen.

## 2. Versuche

Im Forschungsinstitut wurden in den Jahren 1961 bis 1965 systematische Versuche über den Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons durchgeführt. Die Versuche sollten Aufschluß geben über die heute bei üblicher Zusammensetzung, Herstellung, Verdichtung und Nachbehandlung des Betons in jungem und spätem Alter zu erwartende Druckfestigkeit.

### 2.1 Zement

Einbezogen wurden 11 Zemente verschiedener Art, Zusammensetzung, Güte und Feinheit (6 PZ, 1 EPZ, 3 HOZ, 1 TrZ). In Tafel 1 sind die Klinkerphasen der Portlandzemente [9], der Gehalt an Hüttensand und Traß sowie die Mahlfeinheiten und die Erstarrungszeiten angegeben. In Tafel 2 sind die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen nach DIN 1164 und nach dem ISO-Verfahren [10] und die auf die 28 Tage-Werte bezogenen Anfangsfestigkeiten zusammengestellt.

### 2.2 Zuschlag

Als Zuschlag wurden Rheinkiessand der Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm, 7/15 mm und 15/30 mm aus dem Düsseldorfer Raum, Quarzsand der Korngruppe 1/2 mm und Normensand I nach DIN 1164 verwendet. Die Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe ist in Tafel 3 angegeben. Sie lag bei Beton mit den W/Z-Werten 0,45 bis 0,60 im besonders guten Bereich und bei Beton mit den W/Z-Werten 0,65 bis 0,80 im brauchbaren Bereich des Sieblinienbildes der DIN 1045.

### 2.3 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Mit jedem der 11 Zemente wurden Betone mit den W/Z-Werten 0,45, 0,55, 0,60, 0,65, 0,70 und 0,80 hergestellt. Der Zementgehalt

Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften der Zemente

1	2				3	4	5	6
Zement	Klinkerphasen nach Bogue in Gew.-%				Hüttensand bzw. TräB- anteil	Rück- stand Sieb 0,09 DIN 4188	Spez. Ober- fläche (Blaine)	Erstarren Beginn Ende
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> (A,F)				
A PZ 475	69	1	12	9	—	0,1	5320	1 h 40 m 3 h 10 m
B PZ 475	78	3	7	6	—	0,8	4430	1 h 45 m 3 h 45 m
C PZ 275	58	16	11	9	—	4,8	3090	2 h 25 m 4 h 40 m
D PZ 275	63	15	9	7	—	4,8	3020	3 h 00 m 5 h 00 m
E PZ 275	56	17	12	7	—	4,2	2430	2 h 35 m 4 h 30 m
F PZ 275	56	19	12	7	—	6,8	2610	2 h 50 m 4 h 20 m
G EPZ 275	—	—	—	—	30	1,0	3730	2 h 20 m 5 h 20 m
H HOZ 275	—	—	—	—	48	1,0	4030	3 h 05 m 5 h 20 m
K HOZ 275	—	—	—	—	72	0,2	4010	4 h 30 m 7 h 15 m
L HOZ 275	—	—	—	—	78	Sp.	3270	4 h 00 m 8 h 10 m
M TrZ 275	—	—	—	—	30	2,3	4490	2 h 55 m 4 h 15 m

sollte die in DIN 1045 festgelegte untere Grenze von 240 kg/m<sup>3</sup> nicht wesentlich unterschreiten, er lag etwa zwischen 230 und 360 kg/m<sup>3</sup>. Die Kornzusammensetzung des Zuschlags und der Mehlkorngehalt wurden so gewählt (vgl. Tafel 3), daß bei allen Betonzusammensetzungen ein steifer bis schwach plastischer Beton der Konsistenz K 1 bis K 2 entstand, der nur wenig Wasser absonderte, aber durch Rütteln vollständig verdichtet werden konnte. Betone mit höherem W/Z-Wert erforderten daher etwas sandreichere Zuschlagsgemische und einen erhöhten Mehlkorngehalt. Als Mehlkorn wurde Normensand I nach DIN 1164 (Rückstand auf dem Sieb 0,063 DIN 4188 rd. 75 Gew.-%) zugegeben. Nach Zugabe aller Ausgangsstoffe (Zement, trockener Zuschlag und Wasser) wurde der Beton 2 min im 250 l-Zwangsmischer gemischt. Die Frischbetontemperatur betrug 18 bis 23 °C, im Mittel 20 °C. Die

Tafel 2 Festigkeiten der Zemente (Mittelwerte)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Zement	Biegezugfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup> (% der 28 Tage-Werte)								Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup> (% der 28 Tage-Werte)							
	DIN 1164				ISO-Verfahren				DIN 1164				ISO-Verfahren			
	Alter in Tagen															
	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28	1	3	7	28
A PZ 475	43 (52)	68 (82)	82 (99)	83 (100)	54 (61)	79 (90)	83 (94)	88 (100)	194 (33)	381 (66)	512 (88)	581 (100)	264 (41)	456 (71)	552 (86)	640 (100)
B PZ 475	46 (50)	69 (75)	84 (91)	92 (100)	50 (54)	73 (78)	85 (91)	93 (100)	189 (32)	377 (64)	478 (82)	586 (100)	232 (37)	414 (66)	511 (81)	631 (100)
C PZ 275	30 (36)	46 (55)	64 (76)	84 (100)	27 (32)	49 (58)	68 (80)	85 (100)	106 (23)	201 (43)	315 (67)	470 (100)	96 (21)	211 (47)	311 (69)	451 (100)
D PZ 275	22 (27)	50 (61)	67 (82)	82 (100)	23 (28)	47 (58)	60 (74)	81 (100)	85 (18)	241 (52)	363 (78)	466 (100)	97 (22)	235 (52)	334 (75)	448 (100)
E PZ 275	22 (26)	42 (49)	66 (78)	85 (100)	30 (37)	50 (61)	69 (84)	82 (100)	90 (20)	214 (47)	321 (71)	454 (100)	127 (25)	257 (51)	374 (75)	502 (100)
F PZ 275	25 (31)	44 (55)	60 (75)	80 (100)	28 (34)	48 (59)	67 (82)	82 (100)	94 (22)	200 (46)	298 (69)	432 (100)	104 (24)	222 (50)	319 (72)	440 (100)
G EPZ 275	25 (31)	46 (58)	61 (76)	80 (100)	32 (37)	54 (62)	74 (85)	87 (100)	75 (16)	213 (45)	312 (66)	471 (100)	95 (18)	250 (47)	371 (69)	535 (100)
H HOZ 275	17 (18)	41 (43)	67 (70)	96 (100)	18 (18)	42 (42)	75 (75)	100 (100)	59 (11)	173 (31)	325 (58)	559 (100)	67 (12)	188 (32)	348 (60)	580 (100)
K HOZ 275	9 (10)	29 (33)	52 (58)	89 (100)	11 (12)	34 (36)	58 (61)	95 (100)	32 (8)	107 (25)	221 (52)	424 (100)	35 (7)	137 (28)	259 (52)	495 (100)
L HOZ 275	14 (22)	21 (32)	39 (60)	65 (100)	6 (9)	20 (29)	42 (60)	70 (100)	45 (11)	76 (18)	210 (50)	421 (100)	20 (5)	81 (19)	214 (49)	434 (100)
M TrZ 275	16 (21)	35 (46)	49 (64)	76 (100)	22 (27)	42 (51)	60 (72)	83 (100)	52 (13)	153 (38)	226 (55)	408 (100)	71 (15)	188 (40)	286 (60)	475 (100)

Tafel 3 Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe

Lfd. Nr.	W/Z-Wert des Betons	Normensand- anteil in Gew.-% des Gesamt- zuschlags	Durchgang in Gew.-% durch das								Sieblinienbereich nach DIN 1045
			Maschensieb 0,2 mm	Rundlochsieb							
				1 mm	3 mm	7 mm	15 mm	30 mm			
1	0,45 u. 0,55	2	3	20	40	55	80	100			besonders gut
2	0,60	6,5	7,5	20	40	55	80	100			besonders gut
3	0,65	14,5	15,5	30	55	70	90	100			brauchbar
4	0,70 u. 0,80	17,5	18	45	70	80	90	100			brauchbar

Konsistenz lag, mit dem Powersgerät gemessen [11], im Mittel bei 11 und das Verdichtungsmaß [12] im Mittel bei 1,31. (Das Ausbreitmaß nach DIN 1048 konnte nicht ermittelt werden, da der Kegelstumpf stets nach den ersten Hubstößen zerfiel.)

Die Betonzusammensetzung und die Frischbetoneigenschaften (Konsistenz und Rohdichte) sind in Tafel 4 angegeben.

Tafel 4 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Wasser- zement- wert	Korn- zusam- men- setzung des Zuschlags nach Tafel 3 (Spalte 1)	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz (Mittelwerte)	
				Aufschläge nach Powers	Verdich- tungsmaß nach Walz
0,45	1	2,39 bis 2,44	315 bis 360	11	1,31
0,55		2,38 bis 2,44	255 bis 300	11	1,27
0,60	2	2,39 bis 2,44	240 bis 270	10	1,29
0,65		2,29 bis 2,40	230 bis 270	11	1,33
0,70	4	2,30 bis 2,36	235 bis 270	11	1,33
0,80		2,29 bis 2,35	230 bis 245	10	1,32

#### 2.4 Herstellung, Lagerung und Prüfung von Probekörpern

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit wurden Würfel von 20 cm Kantenlänge hergestellt. Sie wurden mit halbvollem Aufsatzkasten (Füllhöhe etwa 10 cm) und einer Auflast von 0,020 kp/cm<sup>2</sup> auf einem Rütteltisch (Schwingungszahl 2800/min, Schwingungsbreite rd. 1 mm) rd. 20 sec verdichtet. Unmittelbar nach dem Verdichten wurde bei allen Würfeln der noch etwa 5 cm überstehende Beton abgestrichen.

Je Zement und W/Z-Wert wurden drei Würfel im Alter von 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen nach DIN 1048 auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft, die bis kurz vor der Prüfung in Wasser von rd. 20 °C lagerten. Da durchfeuchtete Betonwürfel eine geringere Druckfestigkeit als lufttrockene ergeben und um die Ergebnisse der in Wasser gelagerten Würfel mit den Ergebnissen bei Lagerung nach DIN 1048 vergleichen zu können, wurden die Würfel der 3- und 7 Tage-Prüfung einen Tag vor der Prüfung und die der übrigen Prüftermine 7 Tage vor der Prüfung aus dem Wasser genommen und bis zur Prüfung an Luft bei rd. 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Neben den wassergelagerten Würfeln wurden auch drei Würfel je Beton im Alter von 28 und 180 Tagen auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft, deren Lagerung DIN 1048 entsprach (7 Tage unter feuchten Tüchern, anschließend an Luft bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte).

Die Druckfestigkeit aller untersuchten Betone ist in Tafel 5 angegeben.

### 3. Erörterung der Ergebnisse

Die Druckfestigkeit der mit sehr verschiedenen Zementen und mit Wasserzementwerten zwischen 0,45 und 0,80 hergestellten Betone schwankte bei Lagerung nach DIN 1048 im Alter von 28 Tagen zwischen 226 und 632 kp/cm<sup>2</sup>. Demnach erstreckten sich die untersuchten Betone über die Betongüten B 225 bis B 600. Die insgesamt ermittelten Druckfestigkeiten aller Altersstufen (3 bis 180 Tage) lagen zwischen 46 und 730 kp/cm<sup>2</sup>.

Die Rohdichte der wassergelagerten Betonwürfel schwankte insgesamt zwischen 2,25 und 2,45 kg/dm<sup>3</sup>, die der nach DIN 1048 gelagerten Würfel zwischen 2,21 und 2,43 kg/dm<sup>3</sup>.

#### 3.1 Einfluß des W/Z-Wertes auf die Festigkeitsentwicklung

Zur Beurteilung des Einflusses des Alters und des W/Z-Wertes ist die Druckfestigkeit des Betons in Bild 1 in Abhängigkeit vom Alter und in Bild 2 in Abhängigkeit vom W/Z-Wert aufgetragen. Wie zu erwarten, nahm die Druckfestigkeit aller Betone mit wachsendem Alter und mit abnehmendem W/Z-Wert zu. Die sich dabei für die verschiedenen Zemente ergebenden Festigkeitsbereiche waren bei jungem Beton und im Bereich kleinerer W/Z-Werte größer als bei älterem Beton und im Bereich größerer W/Z-Werte. Je nach Zement lag die 3 Tage-Druckfestigkeit bei W/Z = 0,45 zwischen 131 und 461 kp/cm<sup>2</sup> und bei W/Z = 0,80 zwischen 46 und 235 kp/cm<sup>2</sup>. Die entsprechenden 180 Tage-Werte lagen bei W/Z = 0,45 zwischen 570 und 730 kp/cm<sup>2</sup> und bei W/Z = 0,80 zwischen 266 und 390 kp/cm<sup>2</sup>.

In Bild 3 ist die mittlere Druckfestigkeit der Betone verschiedenen W/Z-Wertes in % ihrer 28 Tage-Werte in Abhängigkeit vom Alter aufgetragen. Betone mit schnell erhärtenden Zementen wiesen nach 3 Tagen rd. 70 % und nach 180 Tagen rd. 105 % ihrer 28 Tage-Festigkeit auf. Die Betondruckfestigkeit betrug bei Verwendung normal erhärtender Zemente nach 3 Tagen rd. 50 bis 60 % und nach 180 Tagen rd. 110 bis 125 %, bei Verwendung langsam

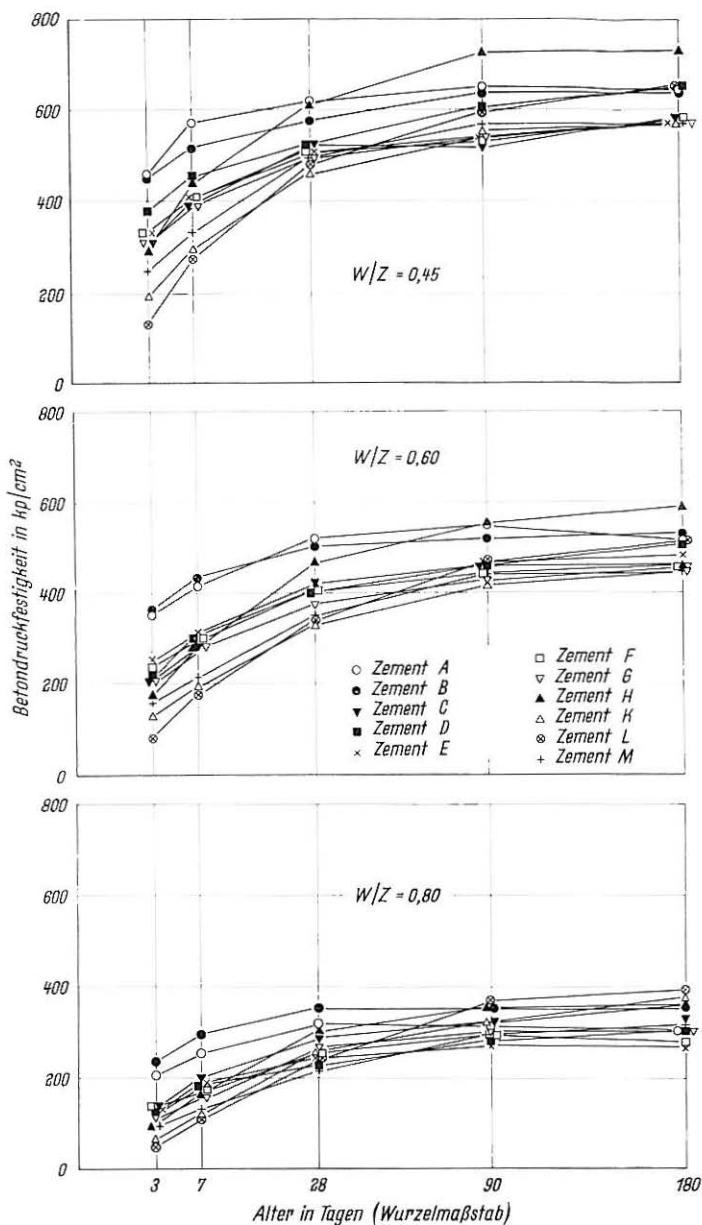


Bild 1 Betondruckfestigkeit bei W/Z = 0,45, 0,60 und 0,80 in Abhängigkeit vom Alter

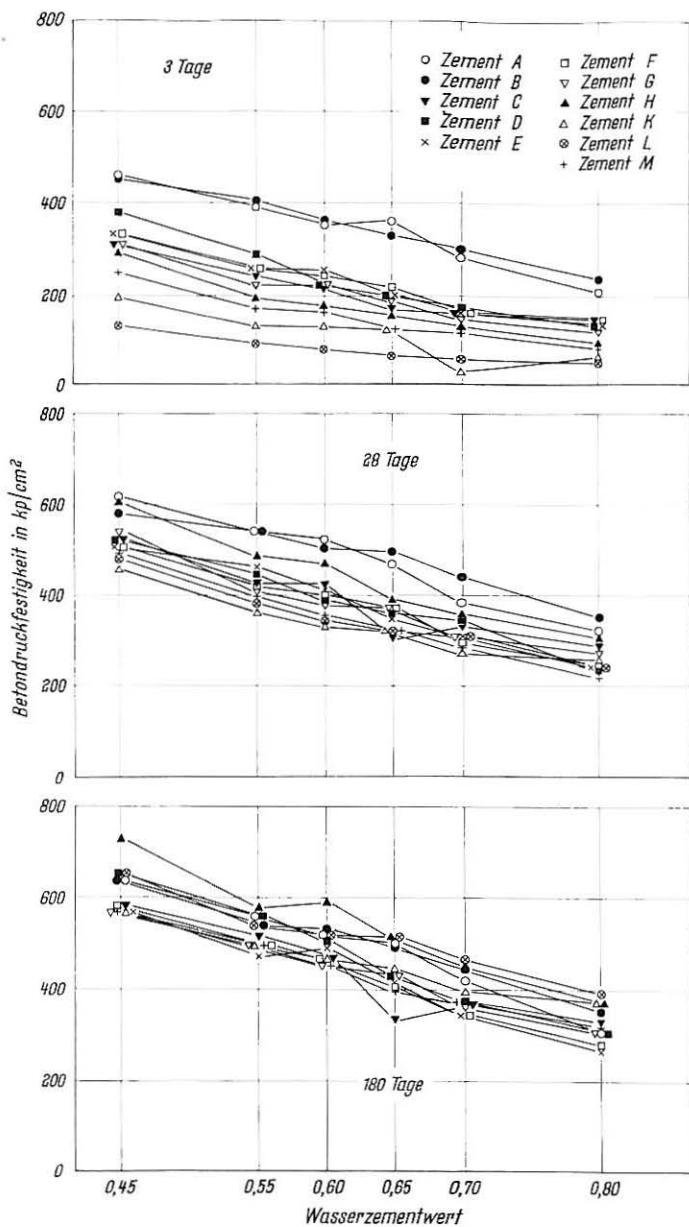


Bild 2 3-, 28- und 180 Tage-Druckfestigkeit verschiedener Betone in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

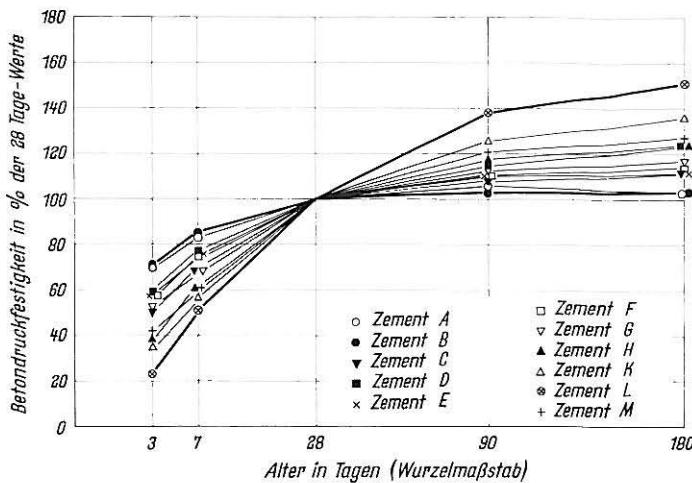


Bild 3 Betondruckfestigkeit in % der 28 Tage-Werte in Abhängigkeit vom Alter (gemittelt über alle W/Z-Werte)

erhärtender Zemente nach 3 Tagen rd. 20 bis 40 % und nach 180 Tagen rd. 125 bis 150 % des dazugehörigen 28 Tage-Wertes (vgl. Abschnitt 3.2).

Durchweg erreichten Betone mit kleinerem W/Z-Wert in jungem Alter einen größeren Anteil ihrer 28 Tage-Druckfestigkeit als Betone mit größerem W/Z-Wert, ihre prozentuale Nacherhärtung war im allgemeinen etwas geringer. Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem W/Z-Wert und der mittleren Druckfestigkeit von

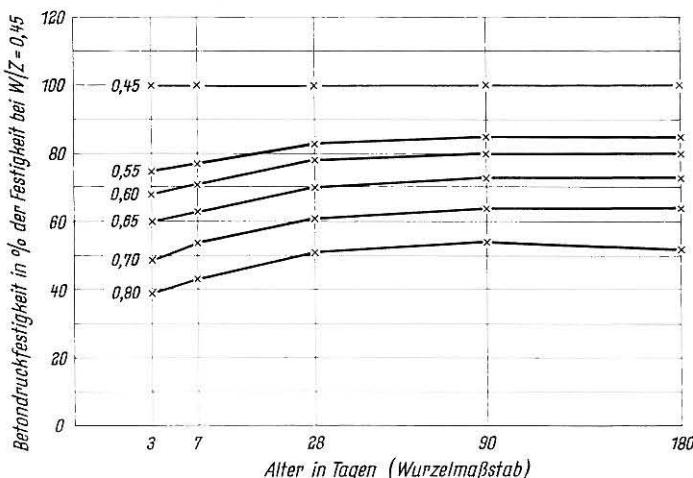


Bild 4 Betondruckfestigkeit in % der Werte bei  $W/Z = 0,45$  in Abhängigkeit vom Alter (gemittelt über alle Zemente)

Belon aus verschiedenen Zementen in % der Werte bei  $W/Z = 0,45$ . Bei allen Betonen und auch bei den früheren Versuchen [5 bis 8] nahm die durch die Vergrößerung des  $W/Z$ -Wertes bedingte Verminderung der Druckfestigkeit mit wachsendem Alter ab. Sie war im Alter von 3 Tagen rd. 8 bis 12 % größer als nach 28 Tagen und rd. 10 bis 15 % größer als nach 90 und 180 Tagen. Die durch die Vergrößerung des  $W/Z$ -Wertes bedingte Verminderung der Betondruckfestigkeit war bei jungem Beton im Bereich kleiner  $W/Z$ -Werte (0,40 bis 0,60) durchweg auch vom Zement abhängig, d. h. bei schnell erhärtenden Zementen im allgemeinen deutlich geringer, siehe auch [6]. Bei den anderen Untersuchungen [7, 8] ergab sich der zementbedingte Unterschied vermutlich nicht so deutlich, weil die dabei verwendeten Zemente wohl nicht so verschieden waren wie in der vorliegenden Arbeit. Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, betrug die mittlere Druckfestigkeit der verschiedenen alten und mit sehr unterschiedlichen Zementen hergestellten Betone bei  $W/Z = 0,60$  rd. 75 % und bei  $W/Z = 0,80$  rd. 50 % der entsprechenden Druckfestigkeit bei  $W/Z = 0,45$ .

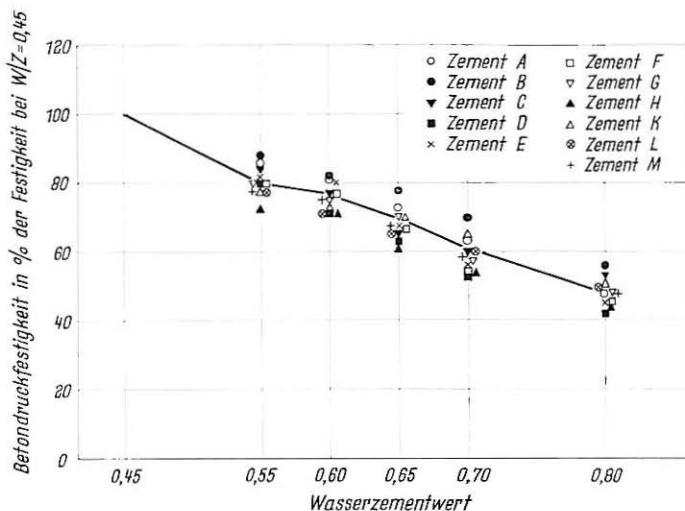


Bild 5 Belondruckfestigkeit in % der Werte bei  $W/Z = 0,45$  in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (gemittelt über das Betonalter)

Im Zusammenhang mit dem Einfluß des  $W/Z$ -Wertes ist verschiedentlich auch der Einfluß des Zementgehaltes auf die Druckfestigkeit betrachtet worden. Bei konstantem Wassergehalt, Zuschlag gleicher Art und Zusammensetzung und vollständiger Verdichtung hat eine Erhöhung des Zementgehaltes eine Verringerung des  $W/Z$ -Wertes und damit eine Erhöhung der Druckfestigkeit zur Folge. Da diese Festigkeitszunahme mit zunehmendem Alter geringer wird, ergab sich bei den Versuchen von G. Wisschers [8] für Beton mit konstanter Wassermenge und mit Zuschlag gleicher Art und Zusammensetzung eine geradlinige Abhängigkeit zwischen dem Zementgehalt (200 bis 400 kg/m<sup>3</sup>) und

der 90 Tage-Druckfestigkeit. Erhöht man jedoch mit dem Zementgehalt auch den Wassergehalt, d. h. hält man den W/Z-Wert konstant, so verringert sich vermutlich wegen der dickeren Zementsteinschichten mit zunehmendem Zementgehalt etwas die Druckfestigkeit, siehe u. a. [6]. Bei den vorliegenden Versuchen ergab sich keine Beziehung zwischen Betondruckfestigkeit und Zementgehalt, da Beton mit höherem W/Z-Wert zur weitgehenden Vermeidung des Wasserabsonderns sandreicherem Zuschlag enthielt.

### 3.2 Einfluß des Zements auf die Festigkeitsentwicklung

Die Eigenschaften und die Zusammensetzung der verwendeten Zemente gehen aus Tafel 1 hervor. Die Zemente A und B waren sehr fein gemahlene Portlandzemente der Güte Z 475 mit etwa gleicher Festigkeit. Zement A hatte den höheren  $C_3A$ -Gehalt (12 Gew.-%), Zement B den höchsten  $C_3S$ -Gehalt (78 Gew.-%). Der Güte Z 375 entsprachen die wenig fein gemahlenen 4 übrigen Portlandzemente (Zemente C bis F), der sehr fein gemahlene Traßzement (Zement M) und der Zement G, der ein Eisen-Portlandzement mittlerer Feinheit war. Bei den drei restlichen Zementen handelte es sich um fein gemahlene Hochfenzemente, von denen der Zement H mit rd. 48 Gew.-% Hüttensand und einer sehr hohen 28 Tage-Festigkeit ebenfalls der Güte Z 375 und die Zemente K und L mit rd. 72 bzw. 78 Gew.-% Hüttensand der Güte

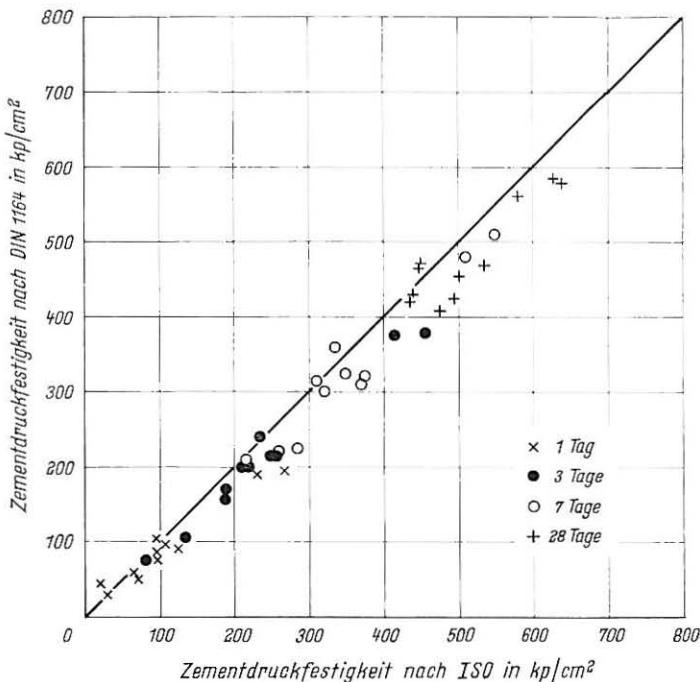


Bild 6 Zusammenhang zwischen den Zementdruckfestigkeiten nach DIN 1164 und dem ISO-Verfahren

Z 275 entsprachen. Der Zusammenhang zwischen den Zementdruckfestigkeiten nach DIN 1164 und dem ISO-Verfahren [10] ist in Bild 6 dargestellt. Das ISO-Verfahren ergab im Prüfalter von 1, 3, 7 und 28 Tagen eine im Mittel um 10 % größere Druckfestigkeit als das Prüfverfahren nach DIN 1164.

Zur Beurteilung des Zementeinflusses auf die Festigkeitsentwicklung des Betons wurden in Bild 7 die Absolutwerte und in Bild 8 die auf die 28 Tage-Werte bezogenen Druckfestigkeiten einiger Betone in Abhängigkeit vom Zement aufgetragen. Die Reihenfolge der Zemente auf der Abszisse entsprach dabei der der 3 Tage-Druckfestigkeit des Betons mit  $W/Z = 0,45$ . Aus Bild 7 geht hervor, daß der Einfluß des Zements auf die Druckfestigkeit bei jungem Beton sehr ausgeprägt ist, mit zunehmendem Alter

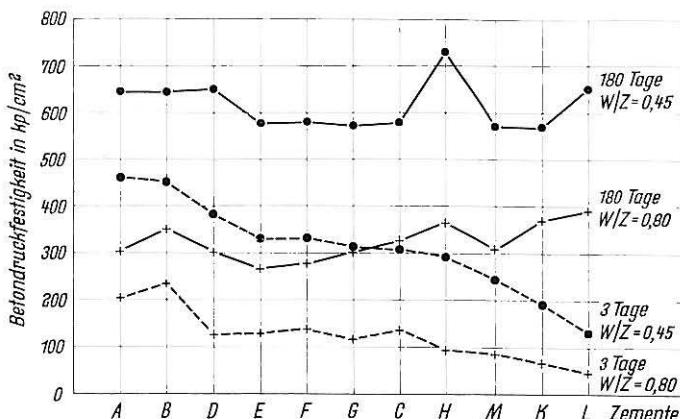


Bild 7 Druckfestigkeit verschiedener Betone in Abhängigkeit vom Zement

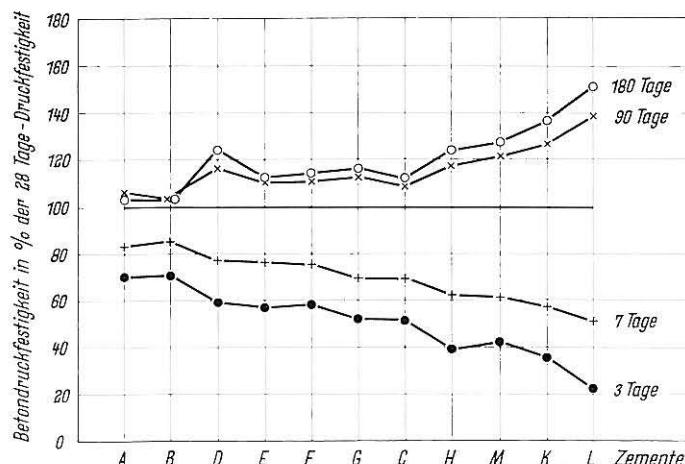


Bild 8 Belondruckfestigkeit in % der 28 Tage-Werte in Abhängigkeit vom Zement (gemittelt über alle W/Z-Werte)

aber kleiner wird. Im Alter von 28 Tagen besaß Beton, der mit Zement höherer Güte hergestellt worden war, unter sonst gleichen Bedingungen durchweg noch eine höhere Druckfestigkeit als Beton mit langsam erhärtenden Zementen. Nach 180 Tagen war die ursprünglich vorhandene Zementabhängigkeit nicht mehr zu erkennen. Die Druckfestigkeitsunterschiede waren gering geworden, und einige Betone mit langsam erhärtenden Zementen hatten eine größere oder gleich große Druckfestigkeit wie der Beton mit schnell erhärtenden Zementen. Bild 8 gibt einen Aufschluß über den prozentualen Anteil der Frühfestigkeit und der Nacherhärtung nach dem 28. Tag für Beton aus verschiedenen Zementen. Dabei ergaben sich für die verschiedenen schnell erhärtenden Zemente etwa folgende auf die 28 Tage-Werte bezogenen Druckfestigkeiten:

Zement	Betondruckfestigkeit in % der 28 Tage-Werte			
	3 Tage	7 Tage	90 Tage	180 Tage
schnell erhärtend	~ 70	~ 85	~ 105	~ 105
normal erhärtend	50 bis 60	65 bis 80	105 bis 115	110 bis 125
langsam erhärtend	20 bis 40	50 bis 65	120 bis 140	125 bis 150

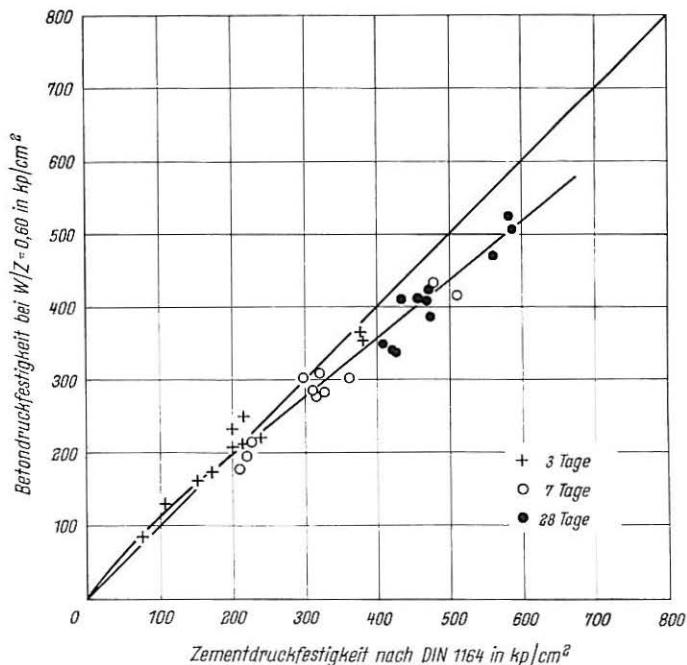


Bild 9 Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit bei  $W/Z = 0,60$  und Zementdruckfestigkeit nach DIN 1164

In Bild 9 sind die 3-, 7- und 28 Tage-Druckfestigkeiten aller Betone mit  $W/Z = 0,60$  in Abhängigkeit von den zugehörigen Zementdruckfestigkeiten nach DIN 1164 und in Bild 10 die entsprechenden Druckfestigkeiten aller Betone mit  $W/Z = 0,50$  in Abhängigkeit von den zugehörigen Zementdruckfestigkeiten nach dem ISO-Verfahren aufgetragen. Im Festigkeitsbereich von 200 bis 600  $\text{kp}/\text{cm}^2$  war die Zementdruckfestigkeit nach DIN 1164 etwa um 0 bis 15 % größer als die Druckfestigkeit des Betons gleichen  $W/Z$ -Wertes ( $W/Z = 0,60$ ). Ein Vergleich der Bilder 9 und 10 zeigt, daß die Zementdruckfestigkeit nach dem ISO-Verfahren im Festigkeitsbereich 300 bis 600  $\text{kp}/\text{cm}^2$  – d. h. vorwiegend im Bereich der 7- und 28 Tage-Ergebnisse – mit der Druckfestigkeit des Betons gleichen  $W/Z$ -Wertes ( $W/Z = 0,50$ ) besser übereinstimmt als die Zementdruckfestigkeit nach DIN 1164. Die auf die 28 Tage-Werte bezogene 3 Tage-Druckfestigkeit war jedoch beim Beton mit  $W/Z = 0,60$  rd. 6 % größer als beim Zementmörtel nach DIN 1164.

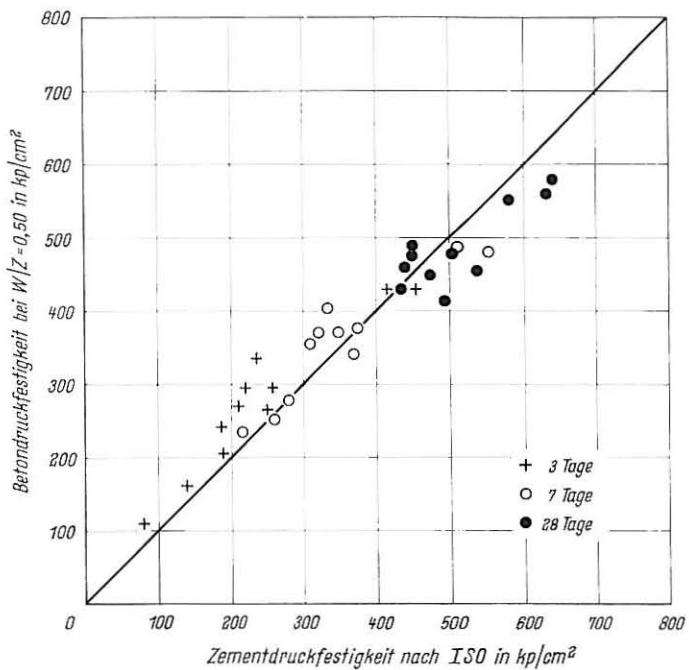


Bild 10 Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit bei  $W/Z = 0,50$  und Zementdruckfestigkeit nach dem ISO-Verfahren

### 3.3 Einfluß der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung

Der Einfluß der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung geht aus Tafel 5 hervor, einige kennzeichnende Ergebnisse sind in Bild 11 dargestellt. Zur weiteren Klärung der Frage, ob Luft- und Wasser-

Tafel 5 Druckfestigkeit der untersuchten Betone

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Beton	Wasser-zementwert	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup>						
		Wasserlagerung					Lagerung nach DIN 1048	
		Alter in Tagen						
		3	7	28	90	180	28	180
A	0,45	461	537	617	653	646	554	624
	0,55	394	429	544	589	563	532	572
	0,60	356	446	522	550	515	489	555
	0,65	314	386	467	502	501	479	505
	0,70	285	337	384	425	416	399	475
	0,80	205	253	319	313	303	344	381
B	0,45	453	518	578	639	644	597	669
	0,55	405	455	546	549	543	533	593
	0,60	360	434	505	522	529	535	559
	0,65	330	403	486	497	493	486	524
	0,70	300	367	442	449	447	469	492
	0,80	235	296	353	353	352	361	403
C	0,45	310	394	527	519	581	556	608
	0,55	235	319	427	498	518	467	525
	0,60	211	279	422	463	466	436	510
	0,65	180	240	365	400	400	360	420
	0,70	158	222	339	361	367	341	378
	0,80	137	195	289	319	326	294	348

(Fortsetzung der Tafel auf Seite 130)

Tafel 5 Druckfestigkeit der untersuchten Betone (Fortsetzung)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Beton	Wasser-zementwert	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup>						
		Wasserlagerung					Lagerung nach DIN 1048	
		Alter in Tagen						
		3	7	28	90	180	28	180
D	0,45	382	455	528	607	650	535	629
	0,55	287	351	454	513	560	494	555
	0,60	222	302	408	463	506	408	519
	0,65	199	262	362	427	433	377	452
	0,70	166	220	294	347	367	299	384
	0,80	128	180	238	283	303	238	330
E	0,45	331	409	508	545	577	511	611
	0,55	257	344	461	464	470	441	503
	0,60	250	310	411	472	486	430	523
	0,65	193	280	349	409	407	379	442
	0,70	161	224	309	324	341	288	354
	0,80	130	181	244	274	266	265	308
F	0,45	333	411	510	537	580	521	609
	0,55	256	325	416	462	491	441	516
	0,60	235	306	410	444	464	432	496
	0,65	206	262	369	407	403	378	442
	0,70	160	217	292	320	343	297	343
	0,80	139	174	249	293	278	264	295
G	0,45	313	393	497	541	572	549	654
	0,55	217	290	414	477	489	427	520
	0,60	214	283	384	434	452	397	488
	0,65	188	243	377	410	433	391	456
	0,70	141	200	310	353	365	320	396
	0,80	118	166	273	300	304	267	350

Tafel 5 Druckfestigkeit der untersuchten Betone (Fortsetzung)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Beton	Wasser-zementwert	Druckfestigkeit in kp/cm <sup>2</sup>						
		Wasserlagerung					Lagerung nach DIN 1048	
		Aller in Tagen						
		3	7	28	90	180	28	180
H	0,45	292	442	615	726	730	632	713
	0,55	194	301	487	528	576	492	589
	0,60	176	285	469	555	589	482	619
	0,65	158	251	390	460	514	433	533
	0,70	133	205	355	434	452	361	440
	0,80	96	169	303	354	367	322	381
K	0,45	192	295	462	554	570	440	601
	0,55	134	207	364	463	496	358	482
	0,60	130	199	337	421	464	329	467
	0,65	121	193	324	405	441	327	449
	0,70	88	155	279	370	392	264	370
	0,80	66	123	258	321	371	235	332
L	0,45	131	274	483	593	652	471	585
	0,55	91	198	379	500	541	371	520
	0,60	84	178	340	456	517	340	471
	0,65	66	163	315	461	513	306	475
	0,70	57	139	304	423	463	289	379
	0,80	46	110	244	368	390	233	320
M	0,45	246	333	498	561	572	496	579
	0,55	169	242	400	465	499	394	474
	0,60	161	215	351	441	454	366	424
	0,65	122	185	323	383	395	316	389
	0,70	113	175	287	344	371	280	347
	0,80	88	125	217	294	311	226	294

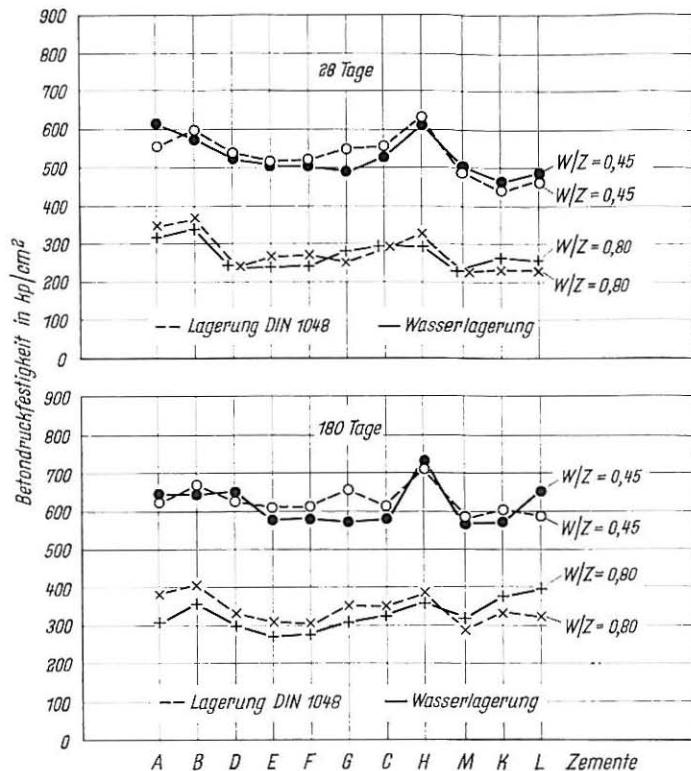


Bild 11 Druckfestigkeit verschiedener Betone in Abhängigkeit von der Lagerung

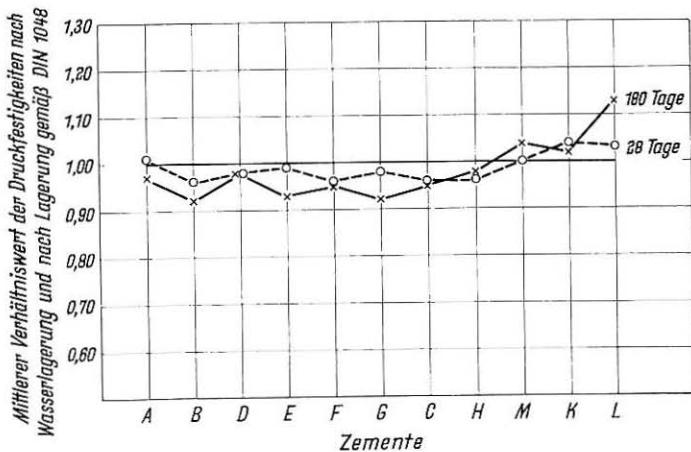


Bild 12 Mittlerer Verhältniswert der Druckfestigkeiten nach Wasser- und Luflagerung in Abhängigkeit vom Zement

lagerung die Druckfestigkeit des Betons systematisch beeinflussen, wurde aus den Ergebnissen aller Betone je Zement der mittlere Verhältniswert zwischen den Druckfestigkeiten nach Wasser- und Luflagerung errechnet und in Abhängigkeit vom Zement für das Betonalter von 28 und 180 Tagen in Bild 12 aufgetragen. Die mittleren Verhältniswerte lagen für die verschiedenen Zemente im Alter von 28 Tagen zwischen 0,96 und 1,04, im Mittel bei 0,99, und im Alter von 180 Tagen zwischen 0,92 und 1,13, im Mittel bei 0,98.

Aus den Bildern 11 und 12 ist ersichtlich, daß die durch die Wasser- und Luflagerung bedingten Unterschiede im Alter von 28 Tagen sehr gering und im Alter von 180 Tagen im allgemeinen nur wenig größer waren. Die Darstellung in Bild 12 deutet jedoch an, daß die Luflagerung nach DIN 1048 bei Beton aus Traßzement und hüttensandreichen Hochfenzementen etwas kleinere und bei Beton aus allen übrigen Zementen geringfügig größere Druckfestigkeiten ergibt als die Wasserlagerung mit 7tägiger Luflagerung vor der Prüfung. Die unterschiedliche Beeinflussung der Druckfestigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen könnte auf ein unterschiedliches Austrocknen des Betons während der 7tägigen Luflagerung vor der Prüfung und auf die dadurch bedingten unterschiedlichen Schwindspannungen und Feuchtigkeitszustände der Betone zurückzuführen sein. Beim Beton aus den Zementen M und L dürfte sich aber auch ausgewirkt haben, daß Betone aus Traßzement und hüttensandreichen Hochfenzementen wegen des noch geringeren Hydratationsgrades in jungem Alter für die etwas größere Nacherhärtung zwischen dem 7. und 180. Tag etwas mehr Wasser benötigen als Betone aus schneller erhärtenden Zementen.

Insgesamt waren die Druckfestigkeitsunterschiede zwischen wassergelagerten und nach DIN 1048 luftgelagerten Betonen aber so gering, daß man für die praktische Anwendung gleiche Druckfestigkeiten annehmen kann. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, daß der luftgelagerte Beton mindestens 7 Tage nach Herstellung feucht gehalten wird und wenigstens bei normalen Temperaturen erhärtet und daß es sich nicht um sehr feingliedrige Bauteile handelt, die zu rasch austrocknen.

#### 4. Folgerungen

Die Festigkeitsentwicklung des Betons war erwartungsgemäß in starkem Maße vom Zement und vom W/Z-Wert abhängig. Beton mit schnell erhärtendem Zement erreichte eine hohe Frühfestigkeit, seine Endfestigkeit aber praktisch schon im Alter von 28 Tagen. Im Mittel betrug seine 3 Tage-Druckfestigkeit rd. 70 % und seine 7 Tage-Druckfestigkeit rd. 85 % des 28 Tage-Wertes. Beton mit langsam erhärtendem Zement wies nach 3 Tagen rd. 20 bis 40 % und nach 7 Tagen rd. 50 bis 65 % seiner 28 Tage-Druckfestigkeit auf. Er zeichnete sich aber durch eine gute Nacherhärtung aus und erreichte bis zum Alter von 180 Tagen rd. 125 bis 150 % seiner 28 Tage-Druckfestigkeit. Die Festigkeitsentwicklung der Betone mit normal erhärtendem Zement lag dazwischen. Die zementbedingten Festigkeitsunterschiede in jungem Alter waren bei allen Betonen im Alter von 180 Tagen nicht mehr zu erkennen.

Die prozentuale Veränderung der Druckfestigkeit mit dem W/Z-Wert nahm mit wachsendem Alter ab. Sie war im Bereich kleiner W/Z-Werte (0,40 bis 0,60) in jungem Alter wesentlich größer als im Alter von 28 Tagen. Im Bereich größerer W/Z-Werte (0,60 bis 0,80) waren die Unterschiede nicht ganz so ausgeprägt. In der Regel war die prozentuale Veränderung der Druckfestigkeit mit dem W/Z-Wert in jungem Alter bei schnell erhärtenden Zementen etwas geringer als bei langsam erhärtenden. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, daß Beton mit schnell erhärtenden Ze-

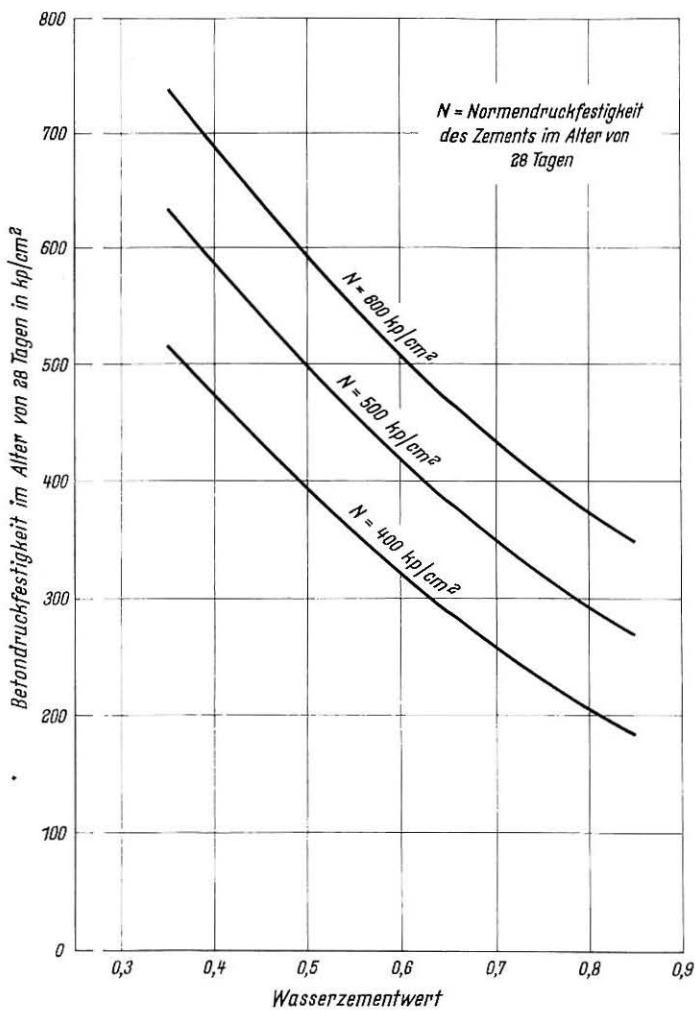


Bild 13 Druckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und von der Zementdruckfestigkeit  $N$  nach DIN 1164 im Alter von 28 Tagen

menten in jungem Alter bereits einen hohen Anteil seiner 28 Tage-Druckfestigkeit erreicht hatte. Im Mittel betrug die Druckfestigkeit der mit sehr unterschiedlichen Zementen hergestellten Betone in jedem Alter bei  $W/Z = 0,60$  rd. 75 % und bei  $W/Z = 0,80$  rd. 50 % der entsprechenden Druckfestigkeit bei  $W/Z = 0,45$ .

Bei Würfeln von 20 cm Kantenlänge trat ein Druckfestigkeitsunterschied zwischen wassergelagerten und nach DIN 1048 luftgelagerten Betonen bis zum Alter von 180 Tagen praktisch nicht in Erscheinung.

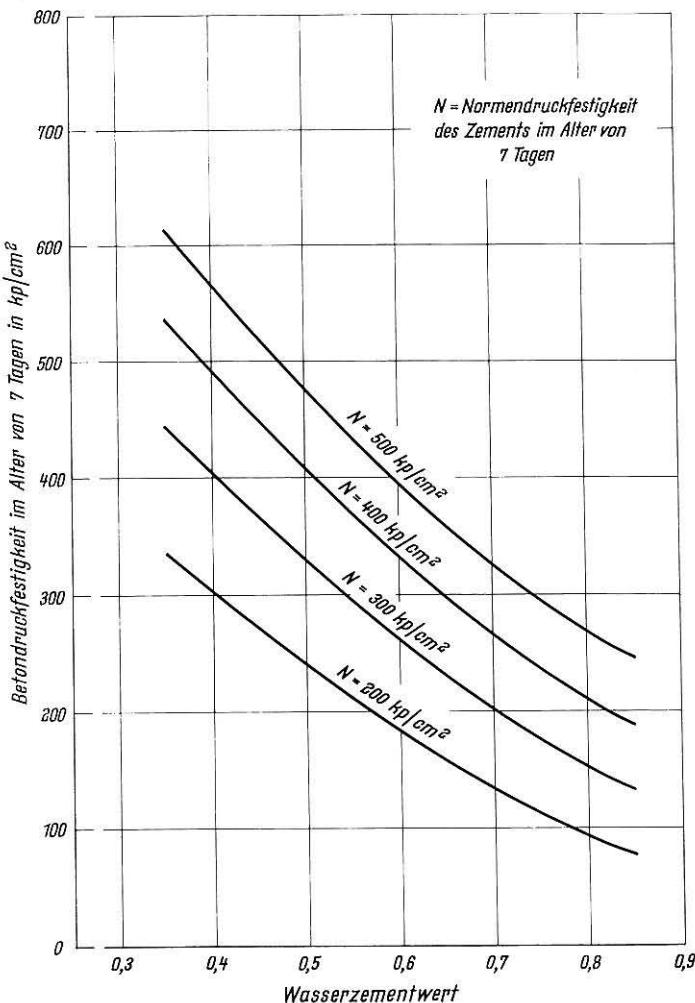


Bild 14 Druckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und von der Zementdruckfestigkeit  $N$  nach DIN 1164 im Alter von 7 Tagen

Für die praktische Anwendung wurde der Zusammenhang zwischen der Betondruckfestigkeit, dem Wasserzementwert und der Zement-Normendruckfestigkeit nach DIN 1164 für 3, 7 und 28 Tage, der Darstellung von K. Walz entsprechend, aufgetragen. Einbezogen wurden auch Ergebnisse der früheren Untersuchungen [7, 8], allerdings nur an 20 cm-Würfeln ermittelte Betondruckfestigkeiten der Luft- und Wasserlagerung.

Die 28 Tage-Ergebnisse (vgl. Bild 13) stimmten im Bereich kleiner Wasserzementwerte gut mit den Ergebnissen von K. Walz [3] überein. Die Darstellung in Bild 13 ergab bei mittlerem Wasser-

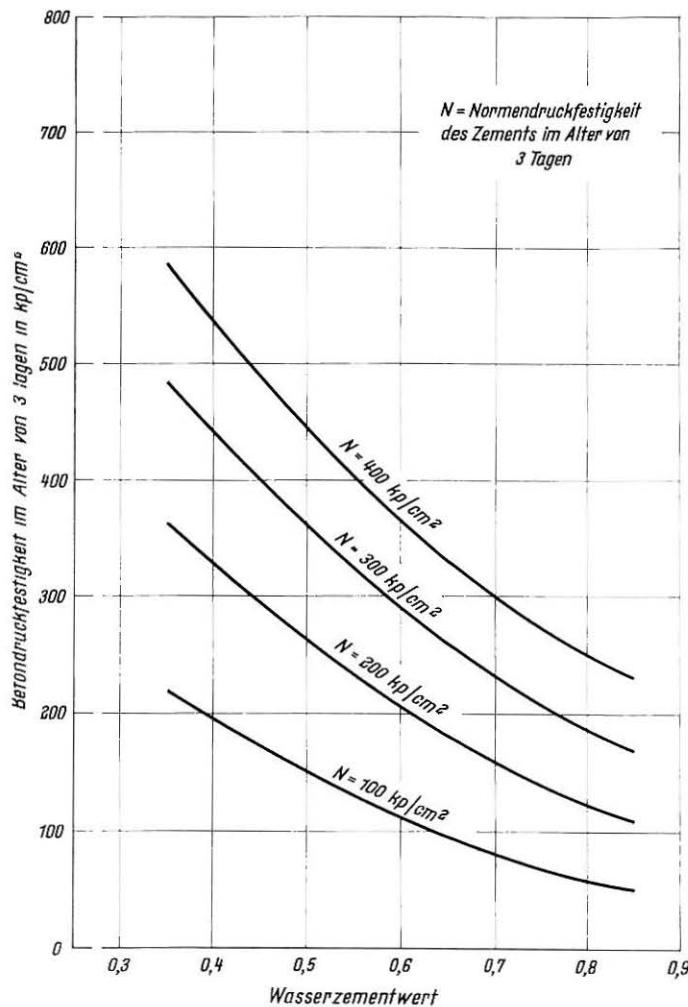


Bild 15 Druckfestigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und von der Zementdruckfestigkeit N nach DIN 1164 im Alter von 3 Tagen

zementwert (0,60) rd. 10 % und bei größerem Wasserzementwert (0,80) rd. 20 % größere Betondruckfestigkeiten. Die 7 Tage-Betondruckfestigkeit (vgl. Bild 14) war bei mittlerem Wasserzementwert (0,60) rd. 10 % und bei größerem Wasserzementwert (0,80) rd. 20 % größer als nach der Darstellung von A. Meyer [7]. Im Alter von 3 Tagen war die Betondruckfestigkeit (vgl. Bild 15) bei größerem Wasserzementwert (0,80) rd. 30 % und bei mittlerem Wasserzementwert (0,60) rd. 20 % größer als nach der Darstellung von A. Meyer [7].

Die gegenüber den bisherigen Erfahrungen im Bereich größerer W/Z-Werte etwas höheren Druckfestigkeiten könnten u. a. darauf zurückzuführen sein, daß bei den vorliegenden Versuchen Betone mit größeren W/Z-Werten ein homogeneres Gefüge aufwiesen. Durch die stets erdfreudige bis schwach plastische Konsistenz und den höheren Mehlkorngehalt wurde nicht nur das Bluten, sondern auch ein Entmischen des Betons und die Bildung von Wassersäcken unter größeren Zuschlägen weitgehend vermieden und der Zementstein in dünnere Schichten aufgeteilt.

## 5. Zusammenfassung

Die Untersuchung der Festigkeitsentwicklung von 66 sehr unterschiedlich zusammengesetzten und gelagerten Kiessandbetonen der Güten B 225 bis B 600 hatte folgendes Ergebnis:

5.1 Die Druckfestigkeit aller Betone nahm mit abnehmendem W/Z-Wert und mit wachsendem Alter zu, im Bereich kleiner W/Z-Werte (0,40 bis 0,60) mehr als im Bereich größerer W/Z-Werte (0,60 bis 0,80) und bei jungem Beton mehr als bei älterem.

5.2 Beton mit schnell erhärtendem Zement erreichte bis zum Alter von 3 Tagen rd. 70 % und bis zum Alter von 7 Tagen rd. 85 % seiner 28 Tage-Druckfestigkeit. Die 3 Tage-Druckfestigkeit betrug bei Beton mit normal erhärtendem Zement rd. 50 bis 60 % und bei Beton mit langsam erhärtendem Zement rd. 20 bis 40 %, die 7 Tage-Druckfestigkeit bei Beton mit normal erhärtendem Zement rd. 65 bis 80 % und bei Beton mit langsam erhärtendem Zement rd. 50 bis 65 % der 28 Tage-Werte.

5.3 Im allgemeinen zeigten Betone mit langsam erhärtenden Zementen eine bessere Nacherhärtung nach dem 28. Tag als Betone mit schneller erhärtenden Zementen. Die 180 Tage-Druckfestigkeit betrug bei Beton mit schnell erhärtendem Zement rd. 105 %, bei Beton mit langsam erhärtendem Zement rd. 125 bis 150 % der entsprechenden 28 Tage-Druckfestigkeit.

5.4 Im Mittel besaßen die mit sehr unterschiedlichen Zementen hergestellten Betone in jedem Alter bei  $W/Z = 0,60$  rd. 75 % und bei  $W/Z = 0,80$  rd. 50 % der entsprechenden Druckfestigkeit bei  $W/Z = 0,45$ .

5.5 Nach DIN 1048 luftgelagerte und vorwiegend wassergelagerte Betonwürfel von 20 cm Kantenlänge zeigten bis zum Alter von 180 Tagen so geringe Druckfestigkeitsunterschiede, daß die Druckfestigkeit beider Lagerungen für praktische Anwendungen als gleich angenommen werden kann, wenn die Voraussetzungen der Abschnitte 2.4 und 3.3 erfüllt sind.

5.6 Zementmörtel nach DIN 1164 (Prüfkörper 4 cm × 4 cm × 16 cm; W/Z = 0,60) wies im Festigungsbereich von 200 bis 600 kp/cm<sup>2</sup> im Mittel eine um 0 bis 15 % größere Druckfestigkeit auf als Beton mit gleichem Wasserzementwert (Prüfkörper 20 cm-Würfel). Die Druckfestigkeit von Zementmörtel nach dem ISO-Verfahren (W/Z = 0,50) stimmte im Festigungsbereich 300 bis 600 kp/cm<sup>2</sup> in etwa mit der Druckfestigkeit des Betons gleichen Wasserzementwerts überein.

5.7 Für die praktische Anwendung wurde der Zusammenhang zwischen der 3, 7 und 28 Tage-Druckfestigkeit des Betons, dem Wasserzementwert und der entsprechenden Zementnormenfestigkeit nach DIN 1164 in den Bildern 13 bis 15 aufgetragen. Gegenüber früheren Feststellungen war dabei die 7 und 28 Tage-Beton-Druckfestigkeit im Bereich mittlerer Wasserzementwerte (etwa 0,60) rd. 10 % und im Bereich größerer Wasserzementwerte (etwa 0,80) rd. 20 % größer.

#### S C H R I F T T U M :

- [1] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Aufl., Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- [2] Graf, O.: Die Eigenschaften des Betons. 2. Aufl., neubearbeitet von W. Albrecht und H. Schäffler, Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960
- [3] Anleitung für die Zusammensetzung und die Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften mit Erläuterungen von K. Walz. Beton- und Stahlbetonbau 53 (1958) H. 6, S. 163/169 (Sonderdruck 2. Aufl., Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1963).
- [4] Walz, K., und J. Bonzel: Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente bei niedriger Temperatur. beton 11 (1961) H. 1, S. 35/48; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 9/46.
- [5] Walz, K.: Der Einfluß einer Wärmebehandlung auf die Festigkeit von Beton aus verschiedenen Zementen. beton 10 (1960) H. 4, S. 222/232; ebenso Betontechnische Berichte 1960, Beton-Verlag, Düsseldorf 1961, S. 29/57.
- [6] Onderzoek betreffende het stomen van beton. C.U.R. Rapport Nr. 25, Den Haag 1962.
- [7] Meyer, A.: Über den Einfluß des Wasserzementwertes auf die Frühfestigkeit von Beton. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 8, S. 391/394.
- [8] Wischers, G.: Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf seine Frühfestigkeit. beton 13 (1963) H. 9, S. 427/432; ebenso Betontechnische Berichte 1963, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 137/151.
- [9] Analysengang für Zemente. Herausgegeben vom Verein Deutscher Zementwerke e. V., Düsseldorf 1961.
- [10] Prüfverfahren zur Ermittlung der Festigkeiten von Zement. RILEM-CEMBUREAU-Verfahren. Zement-Kalk-Gips 13 (1960) H. 2, S. 74/78.
- [11] Albrecht, W., und H. Schäffler: Konsistenzmessung von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 158, Berlin 1964, S. 38/60.
- [12] Walz, K.: Kennzeichnung der Betonkonsistenz durch das Verdichtungsmaß v. beton 14 (1964) H. 11, S. 505/509; ebenso Betontechnische Berichte 1964, Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 207/218.