

# Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons

Von Jürgen Dahms, Düsseldorf

## Übersicht

*Der Feuchtigkeitszustand von Proben kann bei der Prüfung auf Druckfestigkeit unterschiedlich sein. Man darf unterstellen, daß sonst gleicher, durchfeuchteter Beton eine geringere Druckfestigkeit aufweist als trockener Beton. Aus der Literatur ist bekannt, daß der Festigkeitsunterschied bis zu 30 % betragen kann.*

*Zur Untersuchung des Einflusses der Feuchtigkeit des Betons auf seine Druckfestigkeit wurden in den Jahren 1966 und 1967 im Forschungsinstitut der Zementindustrie an 15 verschiedenen zusammengesetzten Betonen der Güten B 160 bis B 600 nach unterschiedlich langer Luftlagerung die Druckfestigkeiten ermittelt. Dazu wurden die Betone nach mindestens 152 Tagen Wasserlagerung zwischen 4 und 90 Tagen vor der Prüfung trocken gelagert. Bei allen Betonen veränderte sich die Druckfestigkeit mit zunehmender Austrocknung. Eine 90tägige Luftlagerung (20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit) bis zur Gewichtskonstanz, der eine 180tägige Wasserlagerung vorausging, ergab je nach Betonzusammensetzung 8 bis 44 % höhere Druckfestigkeiten als nach Wasserlagerung.*

## 1. Allgemeines

Die Lagerung der Betonprobekörper, die zur Ermittlung der Betonfestigkeit bei der Eignungs- und Güteprüfung nach DIN 1045 und DIN 1048 vorgeschrieben ist, verlangt eine 7tägige Feucht- und anschließend eine 21tägige Luftlagerung. Bei Erhärtungsprüfungen oder wenn die Festigkeit des Betons an Probekörpern ermittelt werden soll, die aus dem Bauwerk, aus Bauteilen oder aus größeren Probekörpern herausgebohrt oder -gesägt worden sind, können diese Probekörper feucht sein. Auch bei Versuchsreihen wird oft die Druckfestigkeit durchfeuchteter Betone ermittelt, um sie zutreffender mit anderen Eigenschaften, z. B. der Biegezugfestigkeit, vergleichen zu können, die in der Regel an feuchten Balken geprüft wird. In all diesen Fällen stellt sich die Frage, ob und in welchem Maße die Druckfestigkeit eines feucht gelagerten Betons durch Trocknung erhöht wird oder welche Druckfestigkeit erhalten wird, wenn ein anfänglich bei Feuchtlagerung weitgehend hydratisierter Beton nach längerer Trockenlagerung kurz vor der Prüfung durchfeuchtet wird.

## 2. Auswertung des Schrifttums

Seit langem ist bekannt, daß die Druckfestigkeit von gleich altem, durchfeuchtetem Beton in der Regel etwas geringer ist als die von anfänglich feucht, später trocken gelagertem Beton. Bei Untersuchungen von H. F. Gonnerman und E. C. Shuman [1] über die Biegezug- und die Zugfestigkeit des Betons wurden für die Druckfestigkeit von 1 Jahr alten Betonen ( $w = 0,70$  bis  $0,75$ ) um 26 % (Grobzuschlag Flußkies) und um 19 % (Grobzuschlag Kalkstein) niedrigere Festigkeiten erhalten, wenn die luftgelagerten Proben vor der Prüfung wassergesättigt worden waren.

O. Graf und K. Walz [2] erhielten bei der Druckfestigkeitsprüfung an Balkenreststücken von Straßenbetonen (Kiessandbeton;  $Z = 325 \text{ kg/m}^3$ ,  $w = 0,50$ ) um bis zu 29 % höhere Festigkeiten, wenn nach einer Wasserlagerung von 182 Tagen die Probekörper an der Luft von rd.  $19^\circ \text{C}$  und 60 % rel. Luftfeuchtigkeit lagerten. In Bild 1 sind die nach Wasserlagerung im Alter von 182 Tagen erhaltenen Druckfestigkeiten und die nach weiterer 63tägiger Luftlagerung erhaltenen Ergebnisse für Betone aus 13 verschiedenen Zementen aufgetragen.

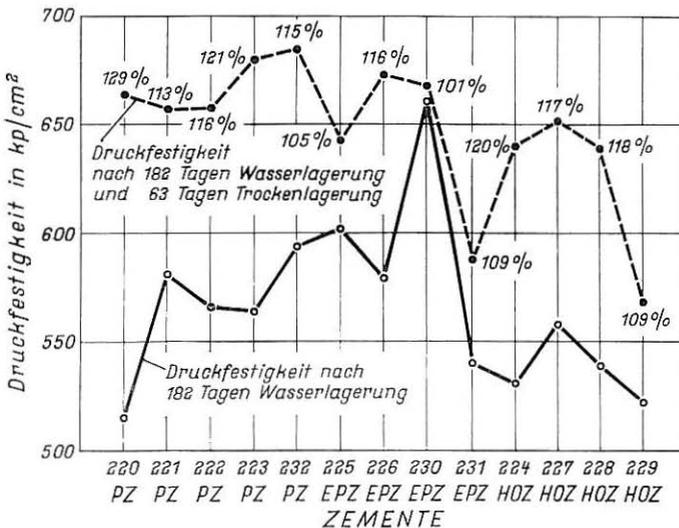


Bild 1 Zunahme der Druckfestigkeit von Straßenbetonen mit verschiedenen Zementen infolge Austrocknung, nach Versuchen von O. Graf und K. Walz [2]

O. Graf [3] fand bei Betonen, die nach 7tägiger Feucht- und 21-tägiger Luftlagerung Druckfestigkeiten von 304, 269, 300 und 63  $\text{kp/cm}^2$  aufwiesen, nach anschließender 24stündiger Wasserlagerung Festigkeiten von 278, 249, 264 und 40  $\text{kp/cm}^2$ . Mit Ausnahme des wenig festen Betons wurde die Druckfestigkeit durch die 24stündige Wasserlagerung um 7 bis 12 % vermindert.

Bei Untersuchungen von W. Albrecht und R. Schönfelder [4] über den Einfluß der Dauer der Nachbehandlung auf die Druck- und die Biegezugfestigkeit von Straßenbeton war die Druckfestigkeit der 28 Tage feucht gelagerten und im feuchten Zustand geprüften Proben (Kiessandbeton;  $Z = 330 \text{ kg/m}^3$ ,  $w = 0,45$ ) bei Betonen mit vier verschiedenen Zementen (3 PZ 375, 1 EPZ 375) um 4 bis 7 %, im Mittel um 6 %, geringer als die Druckfestigkeit der nur 10 Tage feucht und 18 Tage trocken gelagerten Würfel. Albrecht und Schönfelder geben als Grund für die höheren Festigkeiten den geringeren Feuchtigkeitsgehalt der Würfel an.

E. L. Bloem [5] prüfte die Druckfestigkeit von Betonen mit Wasserzementwerten von 0,68, 0,70 und 0,77, die nach der Herstellung 14 Tage feucht abgedeckt worden waren und anschließend in Raumluft lagerten. Im Alter von 1 Jahr war die Druckfestigkeit von Zylindern (Durchmesser 15 cm,  $h = 30 \text{ cm}$ ) um 24 bis 26 % niedriger, wenn diese vor der Prüfung rd. 2 Tage lang im Wasser gelagert worden waren.

Um den Einfluß einer Durchfeuchtung auf die Druckfestigkeit möglichst auszuschalten, wurden bei früheren Versuchen des Forschungsinstituts der Zementindustrie [6] 180 Tage lang wasser-gelagerte Würfel vor der Prüfung rd. 7 Tage an der Luft bei  $20^\circ\text{C}$  und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert. Diese Würfel erreichten trotz der günstigeren Hydratationsbedingungen im Alter von 180 Tagen im Mittel eine um 2 % geringere Festigkeit als Würfel, die 7 Tage feucht und anschließend bis zur Prüfung an der Luft ( $20^\circ\text{C}$  und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) lagerten. Dabei wiesen Einzelwerte der mit Wasserzementwerten von 0,45 bis 0,80 und verschiedenen Zementen hergestellten dauernd feuchten Betone bis zu 20 % niedrigere Festigkeiten auf ( $w = 0,80$ ).

Bei anderen Versuchen [7] besaßen Probekörper aus B 450 ( $Z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w = 0,42$ ), die unmittelbar bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen unter Wasser bei  $20^\circ\text{C}$  gelagert wurden, rd. 10 % niedrigere Druckfestigkeiten als Probekörper, die 7 Tage feucht und 21 Tage an der Luft ( $20^\circ\text{C}$  und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) lagerten.

Aus diesen Untersuchungen geht hervor, daß die Druckfestigkeit des durchfeuchteten Betons bei gleichem Alter geringer ist als die des vor der Prüfung mehr oder weniger lange trocken gelagerten Betons. Die folgenden Versuche sollen einen Beitrag liefern zur Größenordnung der Festigkeitsunterschiede bei den heute üblichen Betonen sowie über die Abhängigkeit vom Austrocknungs- bzw. Durchfeuchtungsgrad und von der Betonzusammensetzung.

### 3. Versuche

Die Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden in den Jahren 1966 und 1967 mit Mörtel- und Betonwürfeln angestellt. Die Versuche sollten Aufschluß darüber geben, wie ein unterschiedlicher Feuchtigkeitszustand die Druckfestigkeit von sehr verschieden zusammengesetzten Betonen beeinflußt und ab wel-

chem Austrocknungsgrad bzw. nach wie langer Luftlagerung (bei rd. 20 °C und 65 % bzw. 40 % rel. Luftfeuchtigkeit) die Druckfestigkeit durch weiteres Austrocknen nicht verändert wird. Damit erfaßt werden konnte, welchen Einfluß eine „Trocknung“ allein hatte, wurden möglichst weitgehend erhärtete (hydratisierte) Betone geprüft, die zunächst rd. 5 Monate unter Wasser gelagert hatten und erst anschließend der Trocknung ausgesetzt wurden. Es sollte möglichst vermieden werden, daß während der Luftlagerung vor der Prüfung noch eine wesentliche Erhärtung stattfindet und so den Einfluß der reinen Trockenwirkung, die festzustellen war, überlagert.

### 3.1 Zement

Die Eigenschaften der verwendeten drei Zemente (je ein PZ 275, ein PZ 475 und ein HOZ 275) sind in Tafel 1 wiedergegeben. Die 180-Tage-Druckfestigkeit, die praktisch der Endfestigkeit entspricht, war bei den drei Zementen nahezu gleich groß. Erwar-

Tafel 1 Eigenschaften der Zemente

		Zemente			
		A PZ 275	B PZ 475	C HOZ 275	
Klinkerphasen nach Bogue in Gew.-%	C <sub>3</sub> S	71,9	73,0		
	C <sub>2</sub> S	11,4	0,4	–	
	C <sub>3</sub> A	6,5	11,9	–	
	C <sub>2</sub> (A,F)	5,5	6,4	–	
Hüttensandgehalt in Gew.-%		–	–	78	
Rückstand Sieb 0,09 DIN 4188 in Gew.-%		7,7	Spuren	0,6	
Spez. Oberfläche (Blaine) in cm <sup>2</sup> /g		3570	5420	3890	
Erstarren	Beginn	4 h 00 min	1 h 25 min	4 h 30 min	
	Ende	5 h 50 min	2 h 40 min	6 h 50 min	
Druck- festigkeit im Alter von ... Tagen in kp/cm <sup>2</sup>	DIN 1164	7	264	491	239
		28	382	538	378
		180	539	576	559
	ISO	7	–	557	239
		28	–	599	407
		180	–	648	592
Biegezug- festigkeit im Alter von ... Tagen in kp/cm <sup>2</sup>	DIN 1164	7	55	79	55
		28	71	82	82
		180	83	77	93
	ISO	7	–	83	54
		28	–	82	86
		180	–	80	96

tungsgemäß hatte Zement B (PZ 475) jedoch eine vergleichsweise wesentlich höhere Festigkeit in früherem Alter.

### 3.2 Betonzusammensetzung

Als Zuschlag wurde Rheinkiesand der Gruppen 0/3 mm, 3/7 mm, 7/15 mm und 15/30 mm aus der Gegend von Düsseldorf, Quarzsand der Korngruppe 1/2 mm und Quarzsand rd. 0,06/0,2 mm (Normensand I nach DIN 1164) verwendet. Die Kornzusammensetzung der Zuschlaggemische ist für die drei Betone I, II und III und die beiden Mörtel IV und V in Tafel 2 zusammengestellt. Sie entsprach für Beton I mit Wasserzementwert 0,85 der Sieblinie F und für Beton II mit Wasserzementwert 0,60 der Sieblinie E des Bildes 2 der DIN 1045; für Beton III mit Wasserzementwert 0,42 verlief sie etwa in der Mitte zwischen den Grenzsieblinien D und E. Die Sieblinie des Sandgemisches für Mörtel IV mit dem Wasserzementwert 0,85 lag etwa in der Mitte zwischen den Sieblinien B und C („brauchbarer Bereich“) des Bildes 1 der DIN 1045 und für

Tafel 2 Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe

Beton	Durchgang in Gew.-% durch das						Sieblinie nach DIN 1045
	Maschensieb	Rundlochsieb					
		0,2 mm	1 mm	3 mm	7 mm	15 mm	
I	17	56	70	80	92	100	F
II	9	24	43	60	82	100	E
III	3	20	39	55	78	100	D/E
IV	17	50	78	100	–	–	B/C
V	9	33	66	100	–	–	A/B

Mörtel V mit Wasserzementwert 0,60 in der Mitte zwischen den Sieblinien A und B („besonders guter Bereich“).

Die Zementgehalte der Betone betragen rd. 240, 300 und 400 kg/m<sup>3</sup> und die der Mörtel rd. 300 und 380 kg/m<sup>3</sup>.

Die Betone und Mörtel wurden nach der Zugabe aller Stoffe rd. 2 min im 250-Liter-Zwangsmischer gemischt. Die Frischbetontemperatur betrug im Mittel 20 °C. Je nach Zusammensetzung war die Konsistenz weich bis schwach plastisch. Aus Tafel 3 gehen die Betonzusammensetzungen und die Frischbetoneigenschaften hervor.

### 3.3 Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper

Die Würfel mit 20 cm Kantenlänge für Beton und Mörtel wurden bei gefülltem 20 cm hohem Aufsatzrahmen durch Eintauchen einer Rüttelflasche (Durchmesser 36 mm, Schwingungszahl 12 000 pro min) jeweils rd. 5 sec lang nahe den Ecken und in der Mitte verdich-

Tafel 3 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Zement	Beton	Mischungszusammensetzung Gew.-Teile Z : G : W	Frischbeton- rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	Zement- gehalt kg/m <sup>3</sup>	Ausbreit- maß DIN 1048	Konsistenz		nach Augen- schein
						Aufschläge nach Powers	Verdichtungs- maß nach Walz	
A	I	1: 7,75 : 0,85	2,34	244	40/40	8	1,29	schwach plastisch
	II	1: 6,25 : 0,60	2,42	308	35/37	7	1,17	plastisch
	III	1: 4,55 : 0,42	2,41	404	37/39	10	1,27	schwach plastisch
	IV	1: 5,62 : 0,85	2,31	309	58/58	3	1,05	weich
	V	1: 4,62 : 0,60	2,37	381	47/46	4	1,08	plastisch
B	I	1: 7,75 : 0,85	2,33	243	33/33	9	1,31	schwach plastisch
	II	1: 6,25 : 0,60	2,39	304	36/38	7	1,21	schwach plastisch
	III	1: 4,55 : 0,42	2,39	400	zerf.	10	1,43	schollig bis schwach plastisch
	IV	1: 5,62 : 0,85	2,29	307	57/58	1	1,03	weich
	V	1: 4,62 : 0,60	2,32	373	46/46	4	1,07	plastisch
C	I	1: 7,75 : 0,85	2,34	244	37/39	7	1,29	schwach plastisch
	II	1: 6,25 : 0,60	2,41	307	37/37	7	1,19	plastisch
	III	1: 4,55 : 0,42	2,40	402	35/37	8	1,37	plastisch
	IV	1: 5,62 : 0,85	2,30	308	62/64	1	1,03	weich
	V	1: 4,62 : 0,60	2,34	376	52/54	4	1,06	weich

tet. Von jeder Betonzusammensetzung wurden im Alter von 28 Tagen drei nach DIN 1048 gelagerte Würfel geprüft (7 Tage unter Wasser und 21 Tage an der Luft). Im Alter von 180 Tagen wurden 25 Würfel auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft. Je fünf Würfel hiervon wurden 4 Tage, 7 Tage, 14 Tage oder 28 Tage vor der Prüfung einer Luftlagerung bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit ausgesetzt. Fünf Würfel wurden feucht geprüft, indem sie erst zwei Stunden vor der Prüfung aus dem Wasser genommen wurden. Drei Würfel je Beton- und Mörtelzusammensetzung lagerten zunächst 180 Tage unter Wasser, dann bis zur Gewichtskonstanz (Gewichtsabnahme der Mörtel- bzw. Betonproben weniger als 1 ‰ je Woche) bei 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit; anschließend wurden sie auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tafel 4, die der Rohdichten in Tafel 5 zusammengestellt. Da die Rohdichten nur einen Anhalt über die Gewichtsverminderung infolge Austrocknung ergeben, wurden zusätzlich noch die je Betonzusammensetzung bei Luftlagerung abgegebenen Wassermengen ermittelt und — in Prozent auf das Feuchtgewicht des Mörtels oder Betons bezogen — in Bild 2 dargestellt.

#### 4. Versuchsergebnisse

Die Druckfestigkeit der verschieden zusammengesetzten Mörtel und Betone lag bei Lagerung nach DIN 1048 im Alter von 28 Tagen zwischen 182 und 647 kp/cm<sup>2</sup>. Demnach erstreckten sich die untersuchten Betone und Mörtel über die Betongüten B 160 bis B 600.

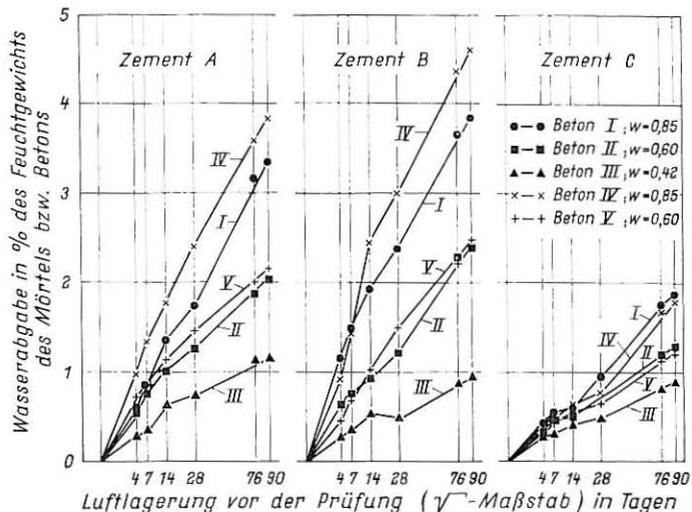


Bild 2 Wasserabgabe in % des Gewichts von wassergelagerten Würfeln mit 20 cm Kantenlänge während der anschließenden Luftlagerung

Tafel 4 Druckfestigkeiten

Zement	Beton	Druckfestigkeit [kp/cm <sup>2</sup> ] im Alter von (in Klammern Werte in % der ständig wassergelagerten Proben)						
		28 Tagen	180 Tagen					247 b. 296 i.M. 270 Tg.
		Luftlagerung vor der Prüfung						
		20°C und 65% rel. Luftfeuchte						
		21 Tage	-*)	4 Tage	7 Tage	14 Tage	28 Tage	67 b. 116, i.M. 90 Tg.
A PZ 275	I (w=0,85)	182	245 (100)	253 (103)	259 (106)	273 (112)	286 (117)	332 (136)
	II (w=0,60)	347	437 (100)	472 (108)	484 (111)	506 (116)	519 (119)	558 (128)
	III (w=0,42)	481	578 (100)	614 (106)	629 (108)	647 (112)	654 (113)	701 (121)
	IV (w=0,85)	178	252 (100)	277 (110)	280 (111)	298 (118)	305 (121)	362 (144)
	V (w=0,60)	350	439 (100)	449 (102)	465 (106)	476 (108)	500 (114)	567 (129)
B PZ 475	I (w=0,85)	302	257 (100)	281 (109)	305 (119)	314 (122)	322 (125)	339 (132)
	II (w=0,60)	465	471 (100)	490 (104)	517 (110)	532 (113)	535 (114)	591 (125)
	III (w=0,42)	647	672 (100)	702 (104)	660 (98)	696 (104)	744 (111)	724 (108)
	IV (w=0,85)	303	271 (100)	290 (107)	300 (111)	324 (120)	338 (125)	375 (138)
	V (w=0,60)	448	504 (100)	533 (106)	521 (103)	525 (104)	552 (110)	571 (113)
C HOZ 275	I (w=0,85)	218	292 (100)	298 (102)	303 (104)	304 (104)	303 (104)	350 (120)
	II (w=0,60)	330	417 (100)	438 (105)	449 (108)	456 (109)	446 (107)	499 (120)
	III (w=0,42)	453	546 (100)	551 (101)	551 (101)	549 (101)	570 (104)	594 (109)
	IV (w=0,85)	247	343 (100)	-	347 (101)	336 (98)	358 (104)	419 (122)
	V (w=0,60)	331	448 (100)	448 (100)	475 (106)	477 (106)	466 (104)	483 (108)

\*) 180 Tage Wasserlagerung, Probekörper vor der Prüfung 2 h lang luftgelagert

#### 4.1 Austrocknung bei Luftlagerung

Die Veränderungen infolge Austrocknung wurden durch Wiegen festgestellt; dabei wurde vernachlässigt, daß die Probekörper während des Austrocknens in den Randzonen etwas carbonatisierten, was mit einer Gewichtszunahme verbunden ist.

Tafel 5 Rohdichten

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zement	Beton	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ] im Alter von								Tage
		28 Tg.	180 Tg.				208 Tg.	247/296 Tagen		Luftlagerung**) bei 20°C und 40% rel. Luftfeuchte bis Gewichtskonstanz
		Luftlagerung vor der Prüfung								
		20°C und 65% rel. Luftfeuchte						20°C u. 40% rel. L.		
		21 Tg.	-*)	4 Tg.	7 Tg.	14 Tg.	28 Tg.	28 Tg.	67/116 Tg. (Gewichtskonstanz)	
A PZ 275	I (w=0,85)	2,26	2,31	2,30	2,29	2,28	2,27	2,28	2,25	95
	II (w=0,60)	2,37	2,40	2,40	2,39	2,38	2,38	2,37	2,35	90
	III (w=0,42)	2,39	2,41	2,41	2,41	2,40	2,40	2,39	2,39	83
	IV (w=0,85)	2,21	2,28	2,26	2,24	2,23	2,22	2,22	2,19	75
	V (w=0,60)	2,30	2,34	2,32	2,32	2,31	2,31	2,30	2,29	67
B PZ 475	I (w=0,85)	2,27	2,32	2,29	2,28	2,28	2,27	2,26	2,24	100
	II (w=0,60)	2,37	2,38	2,37	2,36	2,36	2,35	2,35	2,33	116
	III (w=0,42)	2,37	2,40	2,40	2,38	2,39	2,37	2,38	2,38	85
	IV (w=0,85)	2,22	2,28	2,25	2,24	2,22	2,21	2,21	2,17	103
	V (w=0,60)	2,29	2,33	2,32	2,31	2,30	2,29	2,29	2,27	96
C HOZ275	I (w=0,85)	2,30	2,33	2,32	2,31	2,30	2,29	2,30	2,29	101
	II (w=0,60)	2,36	2,38	2,38	2,39	2,38	2,37	2,37	2,37	96
	III (w=0,42)	2,38	2,40	2,39	2,40	2,39	2,38	2,39	2,37	75
	IV (w=0,85)	2,27	2,29	-	2,28	2,28	2,28	2,26	2,25	89
	V (w=0,60)	2,31	2,33	2,33	2,33	2,32	2,31	2,30	2,29	103

\*) 180 Tage Wasserlagerung, Probekörper vor der Prüfung 2 h lang luftgelagert

\*\*) anschließend an 180 Tage Wasserlagerung

Wie zu erwarten war, gaben die nach 152 bis 180 Tagen Wasserlagerung wassergesättigten Mörtel und Betone während der anschließenden Luftlagerung nichtgebundenes Wasser ab. Die Gewichtskonstanz (Gewichtsabnahme der Mörtel- bzw. Betonproben geringer als 1‰ pro Woche) wurde je nach Mörtel- bzw. Beton-

zusammensetzung während 67- bis 116tägiger, im Mittel während 90tägiger Luftlagerung bei 20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit erreicht. Die weniger dichten Mörtel und Betone mit dem höheren Wasserzementwert hatten mehr Wasser abzugeben, und die Gewichtskonstanz wurde später erreicht als bei dichteren Mörteln und Betonen (siehe Tafel 5).

Der Trocknungsvorgang drückt sich in den kleiner werdenden Beton- und Mörtelrohdsichten aus sowie in den auf das Feuchtgewicht der Betone bezogenen Wasserabgabemengen (siehe Bild 2). Die Ergebnisse der beiden Luftlagerungen (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchtigkeit und 20 °C, 40 % rel. Luftfeuchtigkeit) wurden für die Darstellung in Bild 2 zusammengefaßt, da die Rohdichte nach 28tägiger Austrocknung bei beiden Luftlagerungen nahezu gleich war (siehe Tafel 5, Spalten 8 und 9).

Aus Bild 2 geht hervor, daß die wassergelagerten Würfel während der Austrocknung bis zur Gewichtskonstanz rd. 0,9 bis 4,6 Gew.-% Wasser abgaben. Diese Menge entspricht rd. 20 bis 110 Litern Wasser je m<sup>3</sup> und einem Porenraum im Beton von rd. 2 bis 11 %. Die untere Grenze von 2 % wurde bei einem dichten Beton mit Wasserzementwert 0,42, die obere Grenze von 11 % bei einem weniger dichten Beton mit Wasserzementwert 0,85 festgestellt.

Während 28tägiger Luftlagerung wurden bereits 0,5 bis 3,0 Gew.-% und während 7tägiger Luftlagerung 0,3 bis 1,5 Gew.-% Wasser abgegeben.

Für die Dauer der Luftlagerung wurde für die Abszisse in Bild 2 der besseren Übersicht wegen der Wurzelmaßstab gewählt. Hierdurch wird nicht ganz deutlich, daß mit zunehmender Luftlagerung die Wasserabgabemengen immer geringer werden und nach rd. 90tägiger Luftlagerung kleiner als 1 % pro Woche sind (bezogen auf das Gewicht des wassergesättigten Betons). Die während der Luftlagerung vom 76. bis zum 90. Tag abgegebenen Wassermengen betragen je nach Betonzusammensetzung nur 0,2 bis 1,8 % und damit nur noch rd.  $\frac{1}{10}$  der Wassermenge, die innerhalb der ersten 14 Tage bei Luftlagerung abgegeben wurde.

Vergleicht man in Bild 2 den Austrocknungsvorgang der verschiedenen Mörtel und Betone, so stellt man fest, daß Beton mit großem Wasserzementwert mehr Wasser abgab als Beton mit kleinerem Wasserzementwert.

Bei gleichem Wasserzementwert gab Mörtel während der Luftlagerung naturgemäß mehr Wasser ab als Beton, weil letzterer weniger Mörtel und mehr dichtes Zuschlaggestein enthält. Die Zementleimmenge der Mörtel IV und V beträgt mit rd. 350 Litern je m<sup>3</sup> rd. 50 Liter je m<sup>3</sup> mehr als die des Betons.

Die Betone und Mörtel mit Zement C gaben während der Luftlagerung insgesamt deutlich weniger Wasser ab. Dadurch treten die Unterschiede nicht so hervor, sondern liegen praktisch bereits im Bereich der Versuchsgenauigkeit. Nur der Beton mit dem Wasserzementwert von 0,42 (Beton III) und damit auch der größten Dichte zeigte bei allen drei Zementen etwa gleiches Austrocknungsverhalten. Da der Einfluß des Zements nur orientierend untersucht wurde, erlauben die Versuche keine Aussage

darüber, ob Wasseraufnahme und -abgabe von Beton mit größerem Wasserzementwert auch von der Zementart beeinflusst werden.

#### 4.2 Einfluß des Feuchtigkeitszustandes auf die Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit aller Betone und Mörtel fiel mit zunehmendem Austrocknungsgrad größer aus. In Bild 3 finden sich für die verschiedenen Mörtel und Betone die Druckfestigkeiten nach mindestens 152tägiger Wasserlagerung und anschließender Luftlagerung in % der Druckfestigkeit, die nach 180 Tagen Wasserlagerung erhalten wurde. Nach rd. 90 Tagen Luftlagerung ergaben sich je nach Betonzusammensetzung um 8 bis 44 % größere Druckfestigkeiten als nach 180 Tagen Wasserlagerung. Nach 4 Tagen Luftlagerung war die Druckfestigkeit 1 bis 10 %, nach 7 Tagen 1 bis 19 %, nach 14 Tagen 0 bis 22 % und nach 28 Tagen 4 bis 25 % größer als nach Wasserlagerung (siehe auch Tafel 4).

Die Festigkeitszunahme betrug bei den Betonen und Mörteln mit den Zementen A und B während der ersten 28 Tage Luftlagerung i. M. 4,2 % je Woche gegenüber 0,8 % je Woche zwischen dem 28. und 90. Tag. Für die Betone und Mörtel mit Zement C wurde festgestellt, daß die Festigkeitszunahme während der ersten Wochen mit i. M. 1,6 % je Woche kleiner war, später jedoch den übrigen Betonen der Zemente A und B entsprach.

Wie aus Bild 3 zu entnehmen ist, weisen Mörtel und Betone mit hohem Wasserzementwert bei Luftlagerung die größten Veränderungen (höhere Festigkeiten) der Druckfestigkeit auf. Betone und Mörtel mit den Zementen A und B und mit einem Wasserzementwert von 0,85 ergaben nach einer Luftlagerung von 90 Tagen rd.

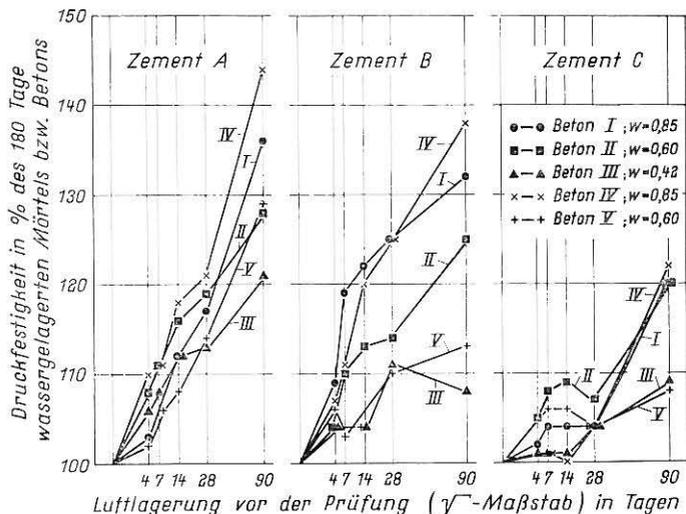


Bild 3 Druckfestigkeit in % der Festigkeit von 180 Tage lang wassergelagerten Würfeln nach unterschiedlich langer Luftlagerung

32 bis 44 % höhere Druckfestigkeiten. Für den Wasserzementwert 0,60 lagen die Werte zwischen 13 und 29 % und für den Wasserzementwert 0,42 zwischen 8 und 21 %. Wesentlich geringer stieg bei Austrocknung die Druckfestigkeit der Betone mit Zement C an. Der Druckfestigkeitsunterschied gegenüber den wassergelagerten Proben betrug während der 90tägigen Luftlagerung je nach Betonzusammensetzung nur 8 bis 22 %.

Vergleicht man Mörtel und Betone gleichen Wasserzementwerts, so stellt man fest, daß die Mörtel, die den größeren Gesamtkapillarporenraum besitzen, auch prozentual die größeren Festigkeiten infolge Austrocknung gegenüber wassergelagerten Proben aufweisen.

Da die Hydratation des Zements im Mörtel und Beton nach 180-tägiger Wasserlagerung nur noch wenig fortschreitet, können die Festigkeitsunterschiede überwiegend auf die Austrocknung zurückgeführt werden. Ein Vergleich der Druckfestigkeiten während der Austrocknung mit der Wasserabgabe (siehe Bilder 2 und 3) zeigt, daß die Festigkeitsänderung im großen und ganzen parallel zur Wasserabgabe verläuft, d. h. Betone, die mehr Wasser abgeben, weisen auch eine größere Festigkeitszunahme auf. Bei Betonen und Mörteln, die nach der Wasserlagerung während einer anschließenden Luftlagerung wenig Wasser abgeben, wird auch die Druckfestigkeit durch die Austrocknung nur wenig verändert. Dies wird auch aus Bild 4 deutlich, in dem die abgegebene Wassermenge und die Festigkeitsänderungen während 90tägiger Luftlagerung für die verschiedenen Betone aufgetragen sind.

Da nur drei verschiedene Zemente untersucht wurden, kann eine gesicherte Aussage über einen eventuellen Einfluß des Zements

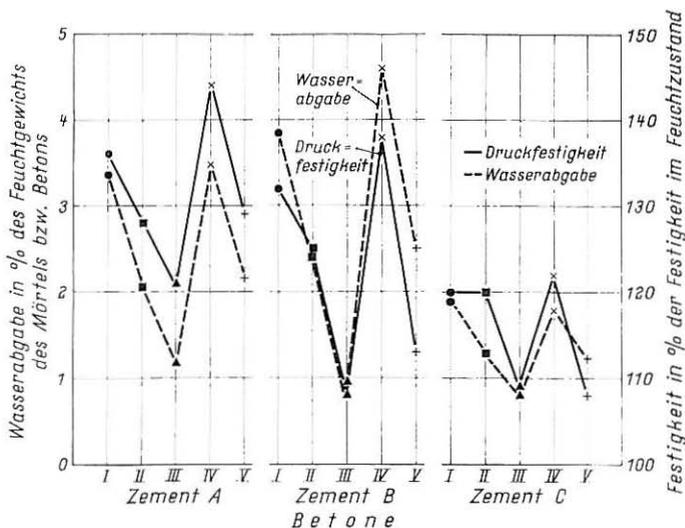


Bild 4 Wasserabgabe und Druckfestigkeitszunahme nach 180 Tagen Wasserlagerung und rd. 90tägiger Luftlagerung gegenüber 180 Tage lang wassergelagerten Würfeln

auf die Wasserabgabe und die damit verbundene Änderung der Druckfestigkeit nicht gemacht werden. Auch frühere Untersuchungen von Graf und Walz (siehe Bild 1) mit zahlreichen verschiedenen Zementen ergaben keine Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Zementart während der Austrocknung. Allerdings wurde dort auch nur ein Straßenbeton mit Wasserzementwert 0,50 untersucht, d. h. ein verhältnismäßig dichter Beton, dessen Druckfestigkeit auch bei den vorliegenden Untersuchungen infolge geringerer Austrocknung etwas weniger beeinflusst wurde. Es ist jedoch bekannt (siehe u. a. [8]), daß Betone mit Hochofenzement in jungem Alter wegen des geringen Hydratationsgrades weniger dicht, bei vollständiger Hydratation aber sehr dicht sein können. Zur Klärung der Frage des Zementeinflusses sind jedoch weitere Versuche erforderlich.

Für die Festigkeitsänderungen in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt kommen verschiedene Ursachen in Betracht. Infolge Austrocknung wird die innere Reibung innerhalb des Zementsteingerüsts vergrößert, wodurch bei Belastung der Last ein größerer Widerstand entgegengebracht wird. Nach K. Walz in Kleinlogel [9] erscheint es auch möglich, daß infolge der mit der Austrocknung verbundenen Schwindspannung und der umschließenden Wirkung der Randzone die Druckfestigkeit erhöht wird. Da beide Vorgänge unmittelbar mit der Austrocknung zusammenhängen, verhalten sich die Festigkeitsänderungen entsprechend der Austrocknung.

## **5. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen**

Die vorliegenden Untersuchungen sollten einen Aufschluß darüber geben, wie ein unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalt die Druckfestigkeit unterschiedlich zusammengesetzter Betone beeinflusst. Aus Untersuchungen von insgesamt 15 verschiedenen Betonen kann gefolgert werden:

5.1 Betonwürfel verschiedener Zusammensetzung mit 20 cm Kantenlänge können während einer etwa 90tägigen Luftlagerung (20 °C und 40 % rel. Luftfeuchtigkeit) bis zur Gewichtskonstanz (Gewichtsabnahme geringer als 1 ‰ pro Woche) ausgetrocknet werden.

5.2 Die bei Austrocknung bis zur Gewichtskonstanz abgegebene Wassermenge betrug bei wassergelagerten, rd. 270 Tage alten Betonen mit Wasserzementwerten von 0,42 bis 0,85 je nach Betonzusammensetzung rd. 1 bis 5 %. Diese Wassermenge entspricht einem Porenraum von etwa 2 bis 11 %.

5.3 Die Wasserabgabe während einer Luftlagerung (20 °C und 40 oder 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) ist bei wassergesättigten und vollständig hydratisierten Betonen um so größer, je größer der Wasserzementwert oder die Zementleimmenge ist.

5.4 Mit zunehmender Austrocknung des Betons ergibt sich eine höhere Druckfestigkeit. Diese liegt bei dichtem Beton weniger, bei weniger dichtem Beton mehr über der Druckfestigkeit des

wassergelagerten Betons. Bei Beton, der bis zur Gewichtskonstanz trocken lagerte, wurde gegenüber Wasserlagerung je nach Betonzusammensetzung ein Anstieg der Druckfestigkeit zwischen 8 und 44 % erhalten. Gemittelt über alle Betone wurde für eine abgegebene Wassermenge von 1 Gew.-% eine Festigkeitsänderung von 10 % erhalten. Da die Einzelwerte erheblich streuten, kann der gemittelte Wert nur als grobe Näherung angesehen werden. Aus der Literatur sind infolge Austrocknung nach Wasserlagerung Festigkeitserhöhungen von bis zu rd. 30 % bekannt geworden.

5.5 Von der Druckfestigkeit eines feuchten Betons kann nur in Grenzen auf die Trockenfestigkeit geschlossen werden.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Gonnerman, H. F., und E. C. Shuman: Flexure and tension tests of plain concrete. Report of the Director of Research. Portland Cement Association, Chicago 1928.
- [2] Graf, O., und K. Walz: Vergleichende Prüfungen von Straßenbauementen in der Versuchsanstalt und in der Straße. Zement 28 (1939) H. 29 bis H. 33.
- [3] Graf, O.: Die Eigenschaften des Betons. 2. Auflage, neu bearbeitet von W. Albrecht und H. Schäffler; Springer-Verlag, Berlin/Görlingen/Heidelberg 1960.
- [4] Albrecht, W., und R. Schönfelder: Einfluß der Dauer der Nachbehandlung auf die Druck- und Biegezugfestigkeit von Straßenbeton. Straße und Autobahn 17 (1966) H. 3, S. 80/85.
- [5] Bloem, E. L.: Concrete strength in structures. Proc. Amer. Concr. Inst. 65 (1968) Nr. 3, S. 176/187.
- [6] Bonzel, J., und J. Dahms: Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwerts und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons. beton 16 (1966) H. 7, S. 299/305, und H. 8, S. 341/342; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 115/138.
- [7] Dahms, J.: Über die Schlagfestigkeit des Betons für Rammfähle. beton 18 (1968) H. 4, S. 131/136, und H. 5, S. 177/182.
- [8] Bonzel, J.: Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. beton 16 (1966) H. 9, S. 379/383, und H. 10, S. 417/421; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 145/168.
- [9] Kleinogel, A.: Einflüsse auf Beton und Stahlbeton. 5. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1950, S. 146.