

# Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons \*)

Von Justus Bonzel, Düsseldorf

## Übersicht

*In den Jahren 1961 bis 1965 wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 an 66 Kiessandbetonen der Güten B 225 bis B 600 untersucht. Einbezogen wurden 11 nach Art, Zusammensetzung, Güte und Feinheit sehr verschiedene Zemente. Der W/Z-Wert lag zwischen 0,45 und 0,80, das Prüfalalter der wassergelagerten Platten 20 cm · 20 cm · 12 cm zwischen 3 und 180 Tagen. Luftgelagerte Platten wurden im Alter von 28, 90 und 180 Tagen auf Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 geprüft.*

*Die Wassereindringtiefe nahm bei Beton aus allen Zementen mit abnehmendem W/Z-Wert und mit wachsendem Alter bis zu einem Kleinstwert ab, der bei kleineren und mittleren W/Z-Werten schon erreicht war, als die Druckfestigkeit noch deutlich zunahm. Die größte Wassereindringtiefe verringerte sich bei  $W/Z = 0,45$  nach 7tägiger und bei  $W/Z = 0,60$  nach 28tägiger Wasserlagerung nicht mehr wesentlich. Beton mit größeren W/Z-Werten erreichte den Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe, der aber etwas größer als bei Beton mit kleinerem W/Z-Wert war, erst nach 90 bis 180 Tagen. Die größte Wassereindringtiefe in jungem Beton war bei schnell erhärtenden Zementen geringer als bei Zement mit mittlerer Erhärtungsgeschwindigkeit und deutlich geringer als bei langsam erhärtenden Zementen.*

*Luftlagerung vor der Prüfung hatte eine deutlich größere Wassereindringtiefe sowie eine deutlich größere Streuung der Ergebnisse zur Folge als ständige Wasserlagerung.*

## 1. Allgemeines

Von Bauteilen, die längere Zeit einseitig Wasser ausgesetzt werden, wird Wasserundurchlässigkeit gefordert. Vorwiegend handelt es sich dabei um Wasserbecken und -behälter und um Bauteile und Bauwerke des Wasserbaues. Die Forderung nach Wasserundurchlässigkeit von Betonbauteilen bedeutet, daß der Baustoff Beton

\*) Nach einem Vortrag auf der technisch-wissenschaftlichen Zementtagung 1965 in Berlin.

sowie die Arbeits- und Dehnungsfugen der Bauteile undurchlässig sein und unter den während der Nutzung möglichen Einwirkungen bleiben müssen und daß in den Bauteilen auch später keine Risse, z. B. aus Belastung, Setzungen, Schwinden und Temperatur, entstehen dürfen.

## 2. Bedeutung und Prüfung der Wasserundurchlässigkeit des Baustoffes Beton

Da Zement mit Wasser seine Erhärtungsprodukte bildet und da die stets im Beton vorhandenen feinsten Porengänge Wasser aufsaugen, wird auch sehr dichter, nicht wassergesättigter Beton immer Wasser aufnehmen, wenn er damit in Berührung kommt. Die auf diese Weise aufgenommene Wassermenge – die Wasseraufnahme – ist abhängig von Anzahl und Art der feinsten Porengänge. Im Gegensatz dazu wird die Wasserdurchlässigkeit des Betons – d. h. das Eindringen bzw. der Durchfluß des Druckwassers – von den meist weniger zahlreichen, etwas weiteren Porengängen, dem Anteil zusammenhängender Kapillarporen, bestimmt. Zwischen Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit gibt es nach K. Walz [1] keine eindeutige Beziehung. Unter Wasserundurchlässigkeit des Betons kann daher nur eine Begrenzung der Eindringtiefe von Druckwasser verstanden werden.

Bauteile aus Beton gelten in der Praxis als wasserundurchlässig, wenn die dem Wasser abgewandte Seite der Bauteile keinen Wasseraustritt und keine feuchten Flecken zeigt, d. h. wenn kein flüssiges Wasser die Bauteile durchfließt. Für Eignungs- und Güteprüfungen wurde vorwiegend aufgrund der Stuttgarter Versuche [2] bereits vor langer Zeit ein Verfahren zur Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton aufgestellt, das in DIN 1048 „Bestimmungen für Betonprüfungen bei Ausführung von Bauwerken aus Beton und Stahlbeton“ genormt ist. Das Prinzip der Prüfung ist in Bild 1, eine auch bei anderen Stellen bewährte Prüfanlage in Bild 2 dargestellt.

Auf einer Prüffläche von 10 cm Durchmesser, auf der die Feinmörtelschicht nach dem Entschalen abgebürstet worden ist, wirkt nacheinander 48 Stunden ein Wasserdruck von 1 atü und je 24 Stunden ein Wasserdruck von 3 und 7 atü. Das Druckwasser kann sowohl von

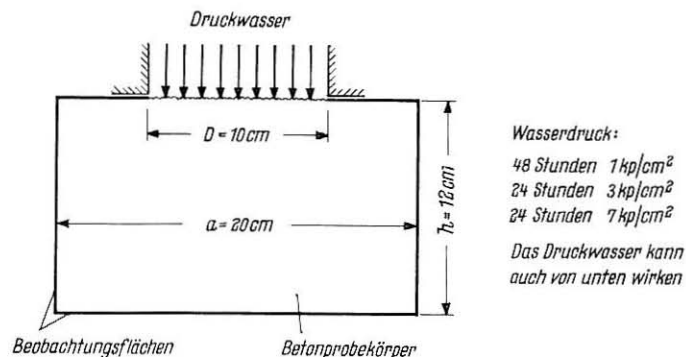


Bild 1 Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton nach DIN 1048

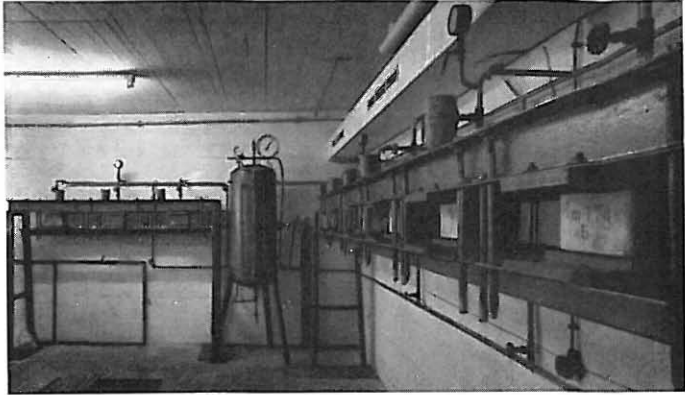


Bild 2 Anlage für die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton

oben als auch von unten auf die Probekörper einwirken, deren Abmessungen für üblichen Beton  $20\text{ cm} \cdot 20\text{ cm} \cdot 12\text{ cm}$  betragen. Während des Versuches wird festgestellt, ob die Beobachtungsflächen feuchte Flecken oder Wasseraustritt zeigen. Nach Beendigung des Versuchs werden die Platten gespalten und die größte und die mittlere Wassereindringtiefe ermittelt. DIN 1048 sieht die Lagerung in Wasser oder nassem Sand vor. Es empfiehlt sich, die Probekörper für Eignungs- und Güteprüfungen bis zur Prüfung unter Wasser zu lagern. Selbst eine kurzzeitige Luftlagerung unmitttelbar vor der Prüfung dürfte die Ergebnisse beeinflussen. Die Wassereindringtiefe kann an wassergelagerten Proben ein paar Minuten nach dem Spalten einwandfrei festgestellt werden, da die nicht als Druckwasser in den Beton eingebrachte Feuchtigkeit sehr rasch oberflächlich abtrocknet.

Die DIN 1048 enthält keinen eindeutigen Beurteilungsmaßstab für wasserundurchlässigen Beton. Schon früher wurde daher eine weitergehende Unterteilung für die Beurteilung der Dichtigkeit nach DIN 1048 vorgeschlagen [3]. In die Neufassung von DIN 1045 wird aufgrund der bisherigen Erfahrungen voraussichtlich aufgenommen werden, daß Beton für dünnwandige Bauteile mit einer Dicke etwa zwischen 10 und 25 cm bei sachgemäßer Verarbeitung und Nachbehandlung im allgemeinen eine ausreichende Wasserundurchlässigkeit aufweist, wenn die größte Eindringtiefe des Wassers (Mittel aus drei Werten) bei Eignungs- und Güteprüfungen nach DIN 1048 5 cm nicht überschreitet. Wird ein größerer Dichtigkeitsgrad gefordert, wie z. B. bei starken chemischen Angriffen nach DIN 4030, so sollte die größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) 3 cm nicht überschreiten [4]. Diese Forderungen werden jedoch nur bei Prüfung gesondert hergestellter, vollständig verdichteter und wassergelagerter Probekörper nach DIN 1048 gelten, d. h. nur für die von der Betonzusammensetzung abhängige Undurchlässigkeit, nicht aber für den erhärteten Beton des Bauwerks. Die Wasserundurchlässigkeitsprüfung von Proben, die dem Bauwerk entnommen werden, wird in der Regel zu anderen Ergebnissen führen als die Prüfung von Platten nach DIN 1048.

### 3. Bisherige Erkenntnisse über wasserundurchlässigen Beton

Wasserundurchlässiger Beton setzt dichten Zementstein voraus, über dessen Struktur und Eigenschaften vor allem die amerikanischen Versuche Auskunft geben, siehe u. a. [5,6]. Danach benötigt Zement zur vollständigen Hydratation im großen Durchschnitt etwa 40 Gew.-% Wasser ( $W/Z = 0,40$ ). Von diesem Wasser wird bei Verhindern frühzeitigen Austrocknens im Verlaufe längerer Zeit etwas mehr als die Hälfte (etwa  $W/Z = 0,25$ ) chemisch gebunden. Der Rest verbleibt in den Gelporen des Zementsteins, die sehr klein sind, das Wasser unter normalen Verhältnissen nicht abgeben und die Durchlässigkeit des Betons praktisch nicht beeinflussen. Bei  $W/Z$ -Werten etwa über 0,40 entstehen Kapillarporen, deren Gehalt mit wachsendem  $W/Z$ -Wert zunimmt und die bei größeren  $W/Z$ -Werten als etwa 0,60 auch nach längerer Nachbehandlung und Erhärtung miteinander verbunden sind. Bild 3 zeigt, wie die Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins mit wachsendem  $W/Z$ -Wert zunimmt und daß diese Zunahme bei größeren  $W/Z$ -Werten als etwa 0,60 sehr ausgeprägt ist. Bild 4 zeigt den Einfluß des Hydratationsgrades.

Umfangreiche Versuche über wasserundurchlässigen Beton wurden am Otto-Graf-Institut Stuttgart durchgeführt [1, 2, 7, 8]. Für einen unter üblichen Verhältnissen wasserundurchlässigen Beton soll danach u. a. der  $W/Z$ -Wert etwa 0,60 nicht überschreiten, der Zuschlag im besonders guten Sieblinienbereich liegen und der

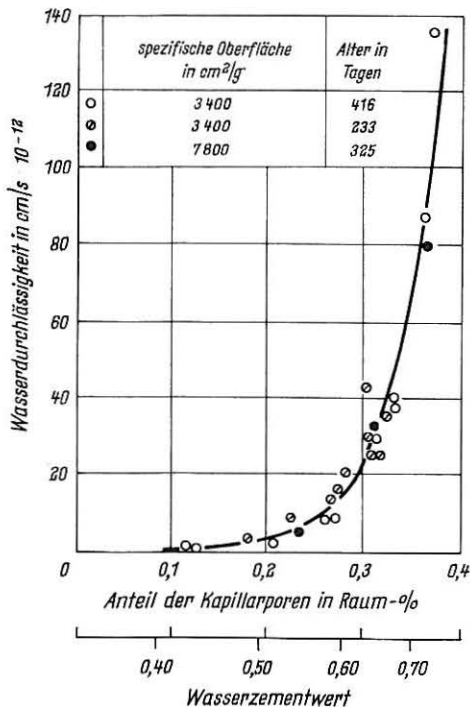


Bild 3  
Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins in Abhängigkeit vom  $W/Z$ -Wert nach T. C. Powers

<i>Alter Tage</i>	<i>Porosität Vol.-%</i>	<i>Durchlässigkeitskoeffizient 10<sup>-12</sup> cm/sec</i>
<i>frische Paste</i>	67	1 150 000 000
1	63 *)	36 300 000 *)
2	60 *)	2 050 000 *)
3	57 *)	191 000 *)
4	55 *)	23 000
5	53	5 900
7	52	1 380
12	51	195
24	48	46

\*) *Interpolierter Wert*

Bild 4 Wasserdurchlässigkeit des Zementsteins in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad nach T. C. Powers

Mehlkorngehalt bei 30 mm Zuschlaggrößtkorn mindestens 350 kg/m<sup>3</sup> betragen, siehe u. a. [1, 4, 9]. Der Beton ist vollständig zu verdichten und sorgfältig nachzubehandeln.

#### 4. Untersuchungen über den Einfluß von Zement, W/Z-Wert, Alter und Nachbehandlung

##### 4.1 Umfang der Versuche

Zur weiteren Klärung der Zusammenhänge wurden in den Jahren 1961 bis 1965 im Forschungsinstitut der Zementindustrie systematische Versuche über den Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Betonalters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons durchgeführt\*). Einbezogen wurden Zemente aller Güteklassen, grob- und feingemahlene, schnell und langsamer erhärtende Zemente, Portlandzemente, Hochofenzemente mit rd. 50, 70 und 80 Gew.-% Hüttensand sowie ein Eisenportlandzement und ein Traßzement mit rd. 30 Gew.-% Hüttensand bzw. Traß.

Der Zementgehalt des Betons sollte 240 kg/m<sup>3</sup> nicht wesentlich unterschreiten, der W/Z-Wert im meist vorkommenden Anwendungsbereich (0,45 bis 0,80) liegen. Um den Einfluß des W/Z-Wertes auf die Wasserundurchlässigkeit beurteilen zu können, wurde bei allen Betonzusammensetzungen ein steifer bis schwach plastischer Beton angestrebt, der möglichst wenig durch Entmischen und Wasserabstoßen verändert, aber durch Rütteln vollständig verdichtet werden kann.

Zur Klärung der Frage, wann Betone aus verschiedenen Zementen und mit verschiedenen W/Z-Werten einen für Wasserundurchlässigkeit ausreichenden Hydratationsgrad erreicht haben, wurden die Betone im Alter von 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen geprüft. Dem Lage-

\*) Die Versuche wurden von Herrn Dipl.-Ing. J. Dahms durchgeführt.

Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften der Zemente (Mittelwerte)

1	2				3	4	5	6	7	8	9	10
Zement	Klinkerphasen nach Bogue				Hütten- sand bzw. Traß- anteil	Rückstand Sieb 0,09 DIN 4188	Spez. Ober- fläche (Blaine)	Erstarren Beginn Ende	Druckfestigkeit nach DIN 1164			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>2</sub> (A, F)					1 Tag	3 Tage	7 Tage	28 Tage
	Gew.-%				Gew.-%	Gew.-%	cm <sup>2</sup> /g		kp/cm <sup>2</sup> (% der 28 Tage-Werte)			
A PZ 475	69	1	12	9	—	0,1	5320	$\frac{1 \text{ h } 40 \text{ m}}{3 \text{ h } 10 \text{ m}}$	194 (33)	381 (66)	512 (88)	581 (100)
B PZ 475	78	3	7	6	—	0,8	4430	$\frac{1 \text{ h } 45 \text{ m}}{3 \text{ h } 45 \text{ m}}$	189 (32)	377 (64)	478 (82)	586 (100)
C PZ 275	58	16	11	9	—	4,8	3090	$\frac{2 \text{ h } 25 \text{ m}}{4 \text{ h } 40 \text{ m}}$	106 (23)	201 (43)	315 (67)	470 (100)
D PZ 275	63	15	9	7	—	4,8	3020	$\frac{3 \text{ h } 00 \text{ m}}{5 \text{ h } 00 \text{ m}}$	85 (18)	241 (52)	363 (78)	466 (100)
E PZ 275	56	17	12	7	—	4,2	2430	$\frac{2 \text{ h } 35 \text{ m}}{4 \text{ h } 30 \text{ m}}$	90 (20)	214 (47)	321 (71)	454 (100)
F PZ 275	56	19	12	7	—	6,8	2610	$\frac{2 \text{ h } 50 \text{ m}}{4 \text{ h } 20 \text{ m}}$	94 (22)	200 (46)	298 (69)	432 (100)
G EPZ 275	—	—	—	—	30	1,0	3730	$\frac{2 \text{ h } 20 \text{ m}}{5 \text{ h } 20 \text{ m}}$	75 (16)	213 (45)	312 (66)	471 (100)
H HOZ 275	—	—	—	—	48	1,0	4030	$\frac{3 \text{ h } 05 \text{ m}}{5 \text{ h } 20 \text{ m}}$	59 (11)	173 (31)	325 (58)	559 (100)
K HOZ 275	—	—	—	—	72	0,2	4010	$\frac{4 \text{ h } 30 \text{ m}}{7 \text{ h } 15 \text{ m}}$	32 (8)	107 (25)	221 (52)	424 (100)
L HOZ 275	—	—	—	—	78	Sp.	3270	$\frac{4 \text{ h } 00 \text{ m}}{8 \text{ h } 10 \text{ m}}$	45 (11)	76 (18)	210 (50)	421 (100)
M TrZ 275	—	—	—	—	30	2,3	4490	$\frac{2 \text{ h } 55 \text{ m}}{4 \text{ h } 15 \text{ m}}$	52 (13)	153 (38)	226 (55)	408 (100)

Tafel 2 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

zungseinfluß [8, 10] gingen Versuche nach, bei denen außer den ständig wassergelagerten Platten auch solche geprüft wurden, die 7 Tage unter feuchten Tüchern und anschließend bis zur Prüfung an Luft von 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte lagerten. Um festzustellen, ob die Wasserundurchlässigkeit in ähnlicher Weise vom Hydrationsgrad abhängig ist wie die Druckfestigkeit, wurde parallel zu den Wasserundurchlässigkeitsprüfungen auch die Druckfestigkeit ermittelt.

## 4.2 Zement und Zuschlagstoffe

Die Eigenschaften der 11 verwendeten Zemente (6 PZ, 1 EPZ, 3 HOZ, 1 TrZ) nach DIN 1164, ihre auf die 28 Tage-Werte bezogenen Anfangsfestigkeiten sowie die Klinkerphasen der Portlandzemente und der Gehalt an Hüttsand und Traß sind in Tafel 1 angegeben.

Als Zuschlag wurden Rheinkies sand der Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm, 7/15 mm und 15/30 mm aus dem Düsseldorfer Raum, gebrochener Quarzsand der Korngruppe 1/2 mm aus dem Kölner Raum und Normensand I nach DIN 1164 verwendet. Die Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches entsprach Tafel 2. Sie lag bei Beton mit W/Z-Werten von 0,45 bis 0,60 im besonders guten Bereich, bei Beton mit W/Z-Werten von 0,65 bis 0,80 im brauchbaren Bereich des Bildes 2 der DIN 1045.

## 4.3 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 lag je nach dem W/Z-Wert im Mittel etwa zwischen 230 und 360 kg/m<sup>3</sup>. Die Kornzusammensetzung des Zuschlags und der Gehalt an Feinstsand bis 0,2 mm (vgl. Tafel 2) wurden so gewählt, daß bei jeder Betonzusammensetzung ein steifer bis schwach plastischer, durch Rütteln vollständig verdichtbarer Beton der Konsistenz K 1 bis K 2 [11] entstand. Soweit Verarbeitbarkeit und Konsistenz es erforderten, wurde als mineralischer Zusatz Normensand I nach DIN 1164 zugegeben (vgl. Abschnitt 4.2), der im Gegensatz zu den

Tafel 3 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften

Wasserzementwert	Kornzusammensetzung des Zuschlags nach Tafel 2 (Spalte 1)	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	Konsistenz (Mittelwerte)	
				Aufschläge nach Powers	Verdichtungsmaß 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	3	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



zementfeinen Gesteinsmehlen die Wasserdurchlässigkeit des Betons praktisch nicht verändert [1].

Zement, trockener Zuschlag und Wasser wurden nach Zugabe aller Ausgangsstoffe 2 min im 250 l-Zwangsmischer gemischt. Die Frischbetontemperatur betrug im Mittel 20 °C. Die Konsistenz lag, mit dem Powersgerät [12] gemessen, im Mittel bei 11 und als Verdichtungsmaß [13] im Mittel bei 1,31.

Die Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften sind in Tafel 3 angegeben.

#### 4.4 Herstellung, Lagerung und Prüfung der Probekörper

Für die Wasserundurchlässigkeitsprüfung wurden je Betonzusammensetzung, Lagerung und Prüfalter drei Betonplatten von 20 cm • 20 cm • 12 cm Kantenlänge stehend nach DIN 1048 hergestellt. Die Platten wurden mit halbvollem Aufsatzkasten (Gesamthöhe des lose eingefüllten Betons etwa 30 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 lang verdichtet. Bei allen Platten wurde unmittelbar nach dem Verdichten der noch etwa 5 cm überstehende Beton abgestrichen.

Im Alter von 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen wurden drei bis zur Prüfung in Wasser von rd. 20 °C gelagerte Platten je Betonzusammensetzung nach DIN 1048 auf Rohdichte und Wasserundurchlässigkeit geprüft. Von 20 Betonen wurden auch drei Platten im Alter von 28, 90 und 180 Tagen auf Wasserundurchlässigkeit geprüft, die 7 Tage unter feuchten Tüchern und anschließend bis zur Prüfung an Luft bei rd. 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte lagerten.

Die größte und die mittlere Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Einzelwerten) der wassergelagerten Betonplatten sind in Tafel 4



Bild 5 Bruchquerschnitt einer nach DIN 1048 auf Wasserundurchlässigkeit geprüften Betonplatte kurze Zeit nach dem Spalten

Tafel 4 Größe ( $e_{\max}$ ) und mittlere ( $e_m$ ) Wassereindringtiefe in wassergelagerte Betonplatten bei Prüfung nach DIN 1048

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Beton mit Zement	Prüf- alter  Tage	Wassereindringtiefe (Mittel aus 3 Einzelwerten) in cm bei											
		W/Z = 0,45		W/Z = 0,55		W/Z = 0,60		W/Z = 0,65		W/Z = 0,70		W/Z = 0,80	
		$e_{\max}$	$e_m$	$e_{\max}$	$e_m$	$e_{\max}$	$e_m$	$e_{\max}$	$e_m$	$e_{\max}$	$e_m$	$e_{\max}$	$e_m$
A	3	2,0	1,6	2,7	1,9	3,8	2,6	3,8	2,9	4,6	3,2	6,1	3,6
	7	2,2	1,5	2,0	1,3	3,0	2,1	2,7	1,7	2,6	1,5	4,5	2,3
	28	1,6	0,8	1,6	1,1	2,7	2,1	2,8	1,6	3,6	1,5	4,4	2,6
	90	1,1	0,7	1,4	0,7	1,6	1,4	1,3	0,6	5,0	2,5	5,0	2,6
	180	1,4	0,7	1,4	0,5	1,7	0,6	2,1	0,6	1,9	0,6	1,9	1,4
B	3	4,9	2,5	3,6	1,9	4,0	2,8	5,7	3,6	5,1	3,4	7,7	5,3
	7	1,7	0,9	2,7	1,3	2,4	1,5	3,9	2,4	2,9	1,6	3,2	1,6
	28	1,5	0,8	2,2	1,7	1,4	1,0	2,7	1,8	2,4	1,4	3,1	1,7
	90	1,1	0,6	3,2	1,5	1,6	1,0	1,5	0,8	1,5	0,9	2,3	1,0
	180	0,9	0,5	1,8	1,0	2,6	1,9	1,5	0,8	2,0	1,0	2,3	1,0
C	3	3,9	1,7	5,1	2,7	7,6	4,8	11,2	9,7	12,0	10,1	10,9	8,4
	7	2,2	1,4	3,1	1,4	5,6	2,9	7,0	4,5	6,7	4,0	8,0	5,0
	28	0,6	0,4	2,8	1,2	3,5	2,5	5,3	2,5	4,3	2,5	5,0	2,6
	90	0,5	0,3	2,1	1,4	2,8	2,1	3,0	1,3	2,4	1,5	4,3	2,0
	180	0,5	0,3	1,3	0,6	2,1	1,3	1,0	0,7	2,8	1,5	2,1	1,0
D	33	4,6	2,6	5,5	2,7	7,7	4,3	9,3	6,3	10,7	9,5	12,0	11,8
	7	2,2	1,0	4,3	2,9	6,1	3,5	6,6	3,8	8,4	5,2	10,2	8,0
	28	2,0	0,8	3,4	2,2	3,0	1,1	3,8	1,8	5,8	2,6	4,4	2,5
	90	1,6	0,9	3,2	1,8	1,8	0,8	3,1	2,1	3,2	2,1	3,7	1,2
	180	0,8	0,4	3,0	1,9	2,2	0,8	3,0	1,5	3,3	2,1	2,1	0,9
E	3	3,0	2,1	4,4	2,4	5,8	4,0	8,2	5,3	8,1	6,1	12,0	11,9
	7	1,8	1,2	3,0	1,4	2,6	1,2	2,9	1,7	4,4	2,9	6,1	4,1
	28	2,0	1,2	1,8	1,1	2,1	0,8	2,2	1,0	3,0	2,0	3,4	2,1
	90	1,8	0,9	2,2	1,4	2,3	1,3	2,0	1,0	2,7	1,8	3,5	2,3
	180	1,4	0,8	1,8	1,1	1,6	0,9	2,2	1,3	2,2	1,4	1,3	0,7

F	3	3.0	1,9	4,9	3,2	5,8	3,5	8,9	5,4	11,9	9,9	12,0	12,0
	7	3,5	1,8	4,2	2,4	4,0	2,0	5,6	3,8	6,7	4,3	9,3	7,1
	28	1,6	0,8	2,6	1,2	1,6	1,0	3,6	2,1	4,6	2,9	5,6	3,2
	90	1,4	0,7	1,6	0,8	1,1	0,8	3,5	2,3	4,2	2,8	4,2	2,4
	180	1,0	0,4	1,6	0,8	1,5	1,1	2,7	1,3	3,2	2,3	2,9	1,9
G	3	2,5	1,4	3,7	2,1	4,2	2,9	4,6	2,6	5,4	2,5	7,0	5,0
	7	2,1	1,2	2,7	1,8	3,2	2,2	3,8	2,4	4,1	-	4,6	3,1
	28	1,8	1,1	1,4	0,7	2,8	1,6	2,6	1,4	2,5	1,3	2,9	1,7
	90	1,5	0,8	0,8	0,4	2,0	1,0	1,7	0,9	1,6	1,1	1,8	1,4
	180	2,3	1,3	1,4	0,5	2,2	1,1	1,8	1,0	1,8	1,0	2,6	1,3
H	3	2,9	1,1	3,9	2,3	5,3	4,0	6,9	5,4	11,0	8,6	12,0	12,0
	7	1,6	0,5	2,3	1,0	3,0	1,5	3,6	1,8	4,8	2,7	6,2	3,2
	28	1,5	0,6	1,8	1,0	2,4	1,2	2,2	1,1	3,5	2,0	3,6	1,8
	90	1,6	0,9	1,8	1,1	2,1	1,3	1,5	1,0	1,9	1,2	1,7	0,9
	180	1,0	0,7	1,5	0,7	2,7	1,6	1,4	0,7	1,7	1,1	2,4	1,5
K	3	5,6	2,7	7,9	6,2	10,2	6,6	12,0	9,7	12,0	12,0	12,0	12,0
	7	2,3	0,8	4,6	2,8	6,0	3,9	8,2	5,3	8,2	5,7	10,2	8,2
	28	1,7	1,0	1,8	1,0	2,4	0,9	3,4	1,6	4,9	2,7	4,0	2,0
	90	1,1	0,5	2,9	1,9	1,8	1,0	3,2	1,6	2,3	1,2	2,7	1,5
	180	1,6	0,5	2,0	0,7	2,4	1,6	2,7	1,2	2,2	0,9	2,8	1,4
L	3	6,3	3,7	9,7	6,6	12,0	8,5	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
	7	3,0	2,1	4,3	3,0	6,8	4,5	6,4	3,8	9,7	7,3	12,0	12,0
	28	2,5	1,3	2,8	2,0	2,5	1,7	3,0	-	3,3	2,2	3,4	2,4
	90	1,9	1,0	2,0	1,2	2,1	1,1	2,1	1,0	2,0	1,0	2,0	1,3
	180	1,6	0,9	1,9	1,1	2,0	1,0	1,6	1,0	1,6	1,0	1,5	0,8
M	3	4,7	2,8	6,4	4,5	7,1	5,6	7,2	5,2	12,0	8,5	12,0	12,0
	7	2,5	1,6	3,1	1,5	4,4	2,5	5,5	3,6	5,7	3,6	9,9	7,2
	28	1,8	1,1	1,8	1,2	2,4	1,4	2,8	1,6	3,2	1,8	3,0	1,6
	90	0,9	0,6	1,7	1,1	2,4	1,3	2,1	1,0	2,7	1,3	2,3	1,5
	180	1,0	0,5	1,4	0,8	2,3	1,1	1,8	1,0	2,1	1,2	1,7	1,3

Tafel 5 GröÙte Wassereindringtiefe in luftgelagerte Betonplatten bei Prüfung nach DIN 1048

1	2	3	4	5
Beton mit Zement	W/Z	GröÙte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Einzelwerten) in cm nach		
		28 Tagen	90 Tagen	180 Tagen
A	0,45	3,8	3,8	5,2
	0,55	3,8	5,1	8,1
	0,60	4,2	6,3	7,9
	0,65	4,6	7,2	7,9
	0,70	5,5	7,8	8,5
	0,80	6,5	8,9	8,4
C	0,60	5,4	5,5	—
	0,65	5,7	9,5	—
	0,70	5,9	6,1	—
G	0,45	2,5	3,0	—
	0,60	2,4	3,1	—
K	0,45	3,9	3,0	2,4
	0,55	5,2	—	4,1
	0,60	5,6	5,7	5,9
	0,65	6,2	5,2	7,0
	0,70	6,9	—	8,1
	0,80	12,0	11,1	10,6
M	0,60	4,9	—	—
	0,65	8,2	7,2	—
	0,80	10,0	11,5	—

angegeben. Tafel 5 enthält die gröÙte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Einzelwerten) der luftgelagerten Betonplatten.

Über die Festigkeitsentwicklung der 66 Kiessandbetone wurde bereits berichtet [14]. Die untersuchten Betone entsprachen der Güte B 225 bis B 600.

## 5. Erörterung der Ergebnisse

### 5.1 Beurteilungsgrundsätze für das Prüfverfahren

Je nach Dichtigkeit des Betons dringt das Druckwasser bei der Prüfung nach DIN 1048 unterschiedlich tief in den Beton ein. Wenig dichter Beton kann vollständig durchfeuchtet werden, oft bis auf die der Prüffläche gegenüberliegenden Kanten und Ecken. Die Prüfung von fachgerecht hergestellten und gelagerten Probekörpern ergibt stets eine gleichmäßige Druckwasserdurchfeuchtung des Betonquerschnitts, wie z. B. in Bild 5. Nur dann gestattet das Ergebnis eine Aussage über die spezifische Durchlässigkeit des

Betons. Größere Abweichungen von der gleichmäßigen Druckwasserdurchfeuchtung im Innern der Platte oder am Plattenrand können auf ungeeignete Mischungen oder auf Mängel bei der Probekörperherstellung zurückzuführen sein.

Bei den vorliegenden Versuchen wurden die Betonplatten durchweg gleichmäßig durchfeuchtet. Nach dem Spalten der Platten wurden stets die größte und die mittlere Wassereindringtiefe festgestellt. Die mittlere Wassereindringtiefe wurde durch Flächenausgleich der Druckwasserdurchfeuchtung-Begrenzungslinie über die gesamte Plattenbreite von 20 cm ermittelt. In Bild 6 sind die größte und die mittlere Wassereindringtiefe für einige Betone unterschiedlicher Zusammensetzung und unterschiedlichen Alters aufgetragen. Da zwischen beiden Werten ein Zusammenhang besteht, die größte Wassereindringtiefe aber einfacher und genauer zu ermitteln ist, wurde für die Beurteilung der Wasserundurchlässigkeit des Betons nach DIN 1048 die größte Wassereindringtiefe als Mittel aus drei Einzelwerten zugrunde gelegt. Zur Abschätzung der möglichen Streuungen ist im folgenden in einigen Fällen auch der größte Einzelwert der größten Wassereindringtiefe mit angeben.

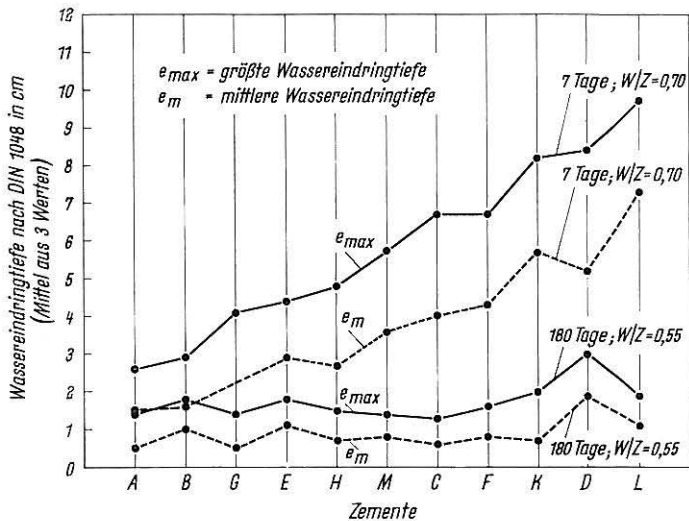


Bild 6 Größte und mittlere Wassereindringtiefe bei Prüfung nach DIN 1048

## 5.2 Einfluß des W/Z-Wertes

In den Bildern 7 bis 9 ist die größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei Prüfung nach DIN 1048 im Alter von 7, 28 und 180 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert aufgetragen. Die einzelnen Linienzüge, die die Ergebnisse für Beton aus verschiedenen Zementen wiedergeben, wurden aufgetragen, um die Tendenz zu zeigen, da die Kurvenschar aussagekräftiger als die Umhüllende ist.

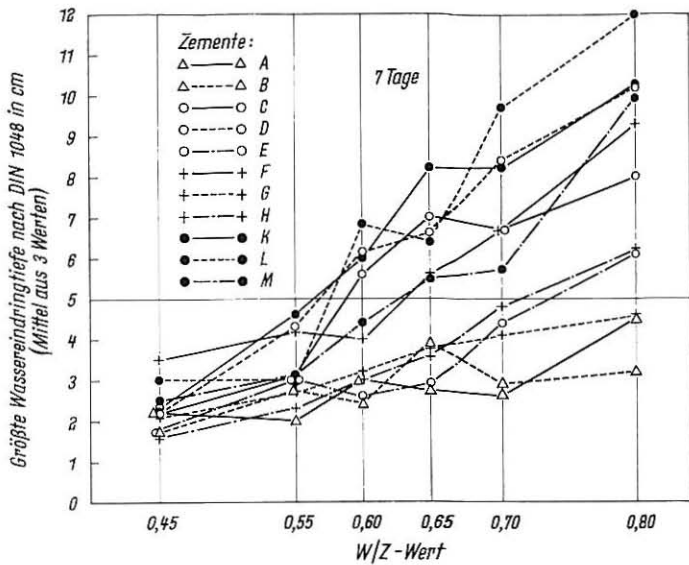


Bild 7 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) im Betonalter von 7 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

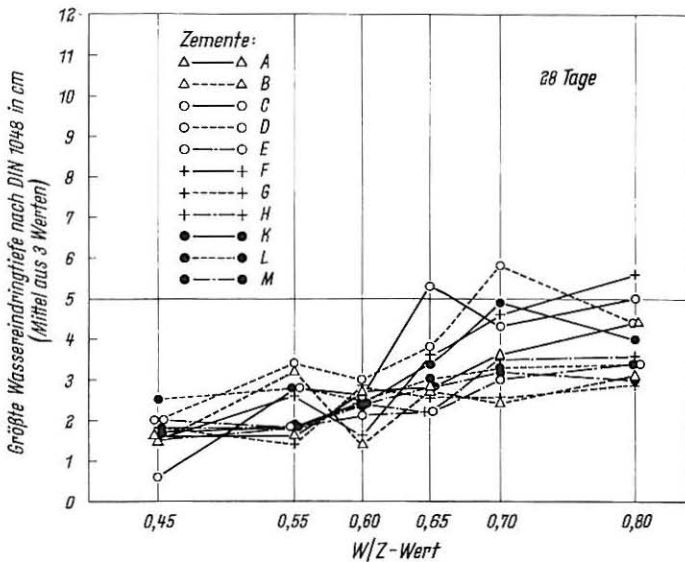


Bild 8 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) im Betonalter von 28 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

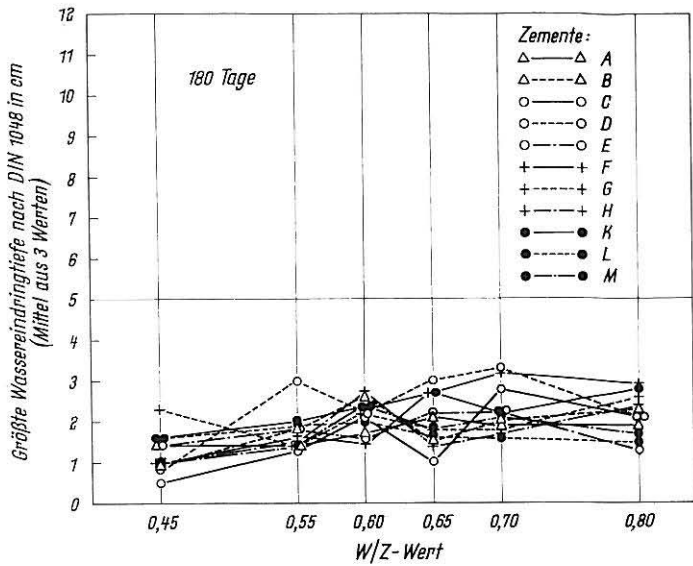


Bild 9 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) im Betonalter von 180 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

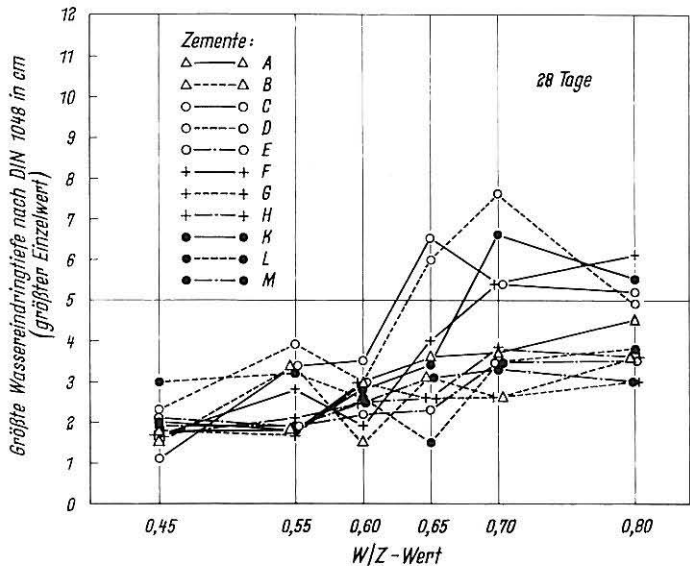


Bild 10 Größte Wassereindringtiefe (größter Einzelwert) im Betonalter von 28 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

Beim 7 Tage alten Beton (Bild 7) nahm die größte Wassereindringtiefe mit wachsendem W/Z-Wert deutlich zu. Im ungünstigsten Fall betrug sie bei  $W/Z = 0,45$  maximal 3,5 cm, bei  $W/Z = 0,60$  maximal 6,8 cm und bei  $W/Z = 0,80$  maximal 12 cm.

Auch im Alter von 28 Tagen (Bild 8) war die Wassereindringtiefe bei Beton mit größerem W/Z-Wert größer als bei Beton mit kleinerem W/Z-Wert. Der Einfluß des W/Z-Wertes war jedoch viel geringer als im Alter von 7 Tagen. Die größte Wassereindringtiefe betrug bis zum W/Z-Wert von 0,60 maximal 3,4 cm und bis zum W/Z-Wert von 0,80 maximal 5,8 cm.

Bei Prüfungen nach 180 Tagen Wasserlagerung (Bild 9) war unter Berücksichtigung der Streuungen nur noch eine sehr geringe Abhängigkeit der Wassereindringtiefe vom W/Z-Wert festzustellen, die ohne praktische Bedeutung sein dürfte. Da aber die Druckfestigkeit auch nach 180 Tagen noch deutlich vom W/Z-Wert abhängig ist [14], kann aus diesen Ergebnissen gefolgert werden, daß der für den jeweiligen Beton größte Undurchlässigkeitsgrad nach DIN 1048 bereits bei einem bestimmten Dichtigkeitsgrad des Zementsteins erreicht und anschließend trotz weiterer Hydratation und Druckfestigkeitszunahme nicht mehr verbessert wird.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen in Bild 8 und zum Abschätzen der Streuungen ist in Bild 10 der größte Einzelwert der größten Wassereindringtiefe des 28 Tage alten Betons in Abhängigkeit vom W/Z-Wert aufgetragen. Wie zu erwarten, ergaben sich dabei etwas größere Werte als bei den Mittelwerten der größten Wassereindringtiefe (Bild 8). Der größte Einzelwert der größten Wassereindringtiefe betrug bis zum W/Z-Wert von 0,60 maximal 3,9 und bis zum W/Z-Wert von 0,80 maximal 7,6 cm.

Die für Wasserundurchlässigkeit empfohlene obere Grenze der größten Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) von 5 cm wurde nach 7tägiger Wasserlagerung von allen Betonen mit  $W/Z = 0,45$ , nach 28tägiger Wasserlagerung von allen Betonen mit  $W/Z \leq 0,60$  und nach der allerdings meist praktisch nicht abzuwartenden 90- oder 180tägigen Wasserlagerung von allen untersuchten Betonen nicht überschritten. Eine größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) von 3 cm wurde von den wenigstens 23 Tage alten Betonen mit einem W/Z-Wert von 0,45 sicher unterschritten.

### 5.3 Einfluß des Alters

Die Abhängigkeit zwischen Alter des Betons und Wasserdurchlässigkeit – ebenfalls beurteilt nach der größten Wassereindringtiefe nach DIN 1048 (Mittel aus drei Werten) – geht aus den Bildern 11 bis 13 hervor. Die Wassereindringtiefe nahm allgemein mit dem Alter ab. Diese Abnahme, die auch vom W/Z-Wert und vom Zement abhing, wurde mit wachsendem Alter geringer.

Beim Beton mit  $W/Z = 0,70$  (Bild 11) betrug die größte Wassereindringtiefe nach DIN 1048 im Alter von 7 Tagen maximal 9,7 cm und im Alter von 28 Tagen maximal 5,8 cm. Der Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe wurde durchweg erst nach 90 bis 180 Tagen erreicht, er lag etwa zwischen 1,5 und 3,3 cm.



Auch bei Beton mit  $W/Z = 0,60$  (Bild 12) nahm die Wassereindringtiefe zunächst mit wachsendem Alter deutlich ab. Der Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe wurde durchweg im Alter von 28 bis 90 Tagen erreicht. Er lag etwa zwischen 1,1 und 2,7 cm. Nach dem 28. Tag verringerte sich die größte Wassereindringtiefe aber praktisch nicht mehr wesentlich.

Beim Beton mit  $W/Z = 0,45$  (Bild 13) ergab sich der Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) meist nach 28- bis 90tägiger Wasserlagerung. Er lag etwa zwischen 0,5 und 2 cm, die Abnahme der größten Wassereindringtiefe nach dem 7. Tag war jedoch gering. Auch aus den Bildern 12 und 13 geht hervor, daß der Grad der Wasserundurchlässigkeit des Betons nach DIN 1048 von einem bestimmten Dichtigkeitsgrad des Zementsteins an trotz weiterer Hydratation und Druckfestigkeitszunahme nicht mehr wesentlich verbessert wird.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen in Bild 12 und zum Abschätzen der Streuungen ist in Bild 14 noch der größte Einzelwert der größten Wassereindringtiefe des Betons mit  $W/Z = 0,60$  in Abhängigkeit vom Alter aufgetragen. Wie zu erwarten, ergaben sich dabei etwas größere Werte als in Bild 12. Aber auch der größte Einzelwert der größten Wassereindringtiefe dieses Betons blieb im Alter von 28 Tagen und höher deutlich unter 4 cm.

Die für Wasserundurchlässigkeit empfohlene obere Grenze der größten Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) von 5 cm wurde bei  $W/Z = 0,60$  nach 28 Tagen Wasserlagerung und bei den Betonen mit größeren  $W/Z$ -Werten erst nach 90 und 180 Tagen Wasserlagerung nicht mehr überschritten.

#### **5.4 Einfluß des Zements**

Die Zusammensetzung und die Eigenschaften der Zemente gehen aus Tafel 1 hervor. Die Zemente A und B waren sehr fein gemahlene (spez. Oberfläche 5320 und 4430  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) und schnell erhärtende Portlandzemente der Güte Z 475. Die übrigen 4 Portlandzemente (Zemente C bis F) entsprachen der Güte Z 375 und waren weniger fein gemahlen (spez. Oberfläche 2430 bis 3090  $\text{cm}^2/\text{g}$ ). Etwa gleiche Normdruckfestigkeiten zeigte der Eisenportlandzement (Zement G). Auch der sehr fein gemahlene Traßzement (Zement M, spez. Oberfläche 4490  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) und der fein gemahlene Hochofenzement mit rd. 48 Gew.-% Hüttensand (Zement H, spez. Oberfläche 4030  $\text{cm}^2/\text{g}$ ) entsprachen der Güte Z 375. Die Hochofenzemente K und L enthielten 72 bzw. 78 Gew.-% Hüttensand und entsprachen der Güte Z 275 (spez. Oberfläche 4010 bzw. 3270  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

Einige kennzeichnende Ergebnisse über den Einfluß des Zements auf die Wasserdurchlässigkeit gegenüber Druckwasser sind für Beton mit  $W/Z = 0,70$  in Bild 15 und für Beton mit  $W/Z = 0,55$  in Bild 16 aufgetragen. Ganz allgemein zeigte sich dabei in jungem Alter und bei größeren  $W/Z$ -Werten ein deutlicher Einfluß des Zements. Die größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) in jungem Alter war durchweg bei Beton mit langsamer erhärtenden Zementen deutlich größer als bei schneller erhärtenden Zementen. Sie nahm jedoch mit wachsendem Alter sowie mit abnehmendem

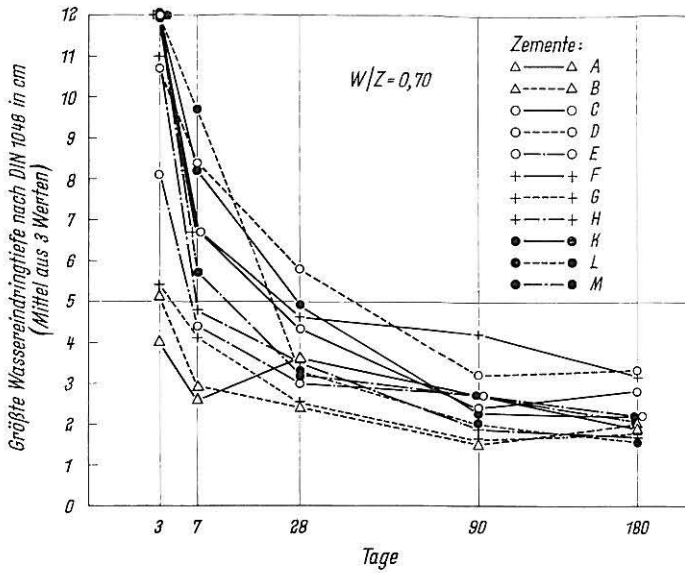


Bild 11 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei  $W/Z = 0,70$  in Abhängigkeit vom Betonalter

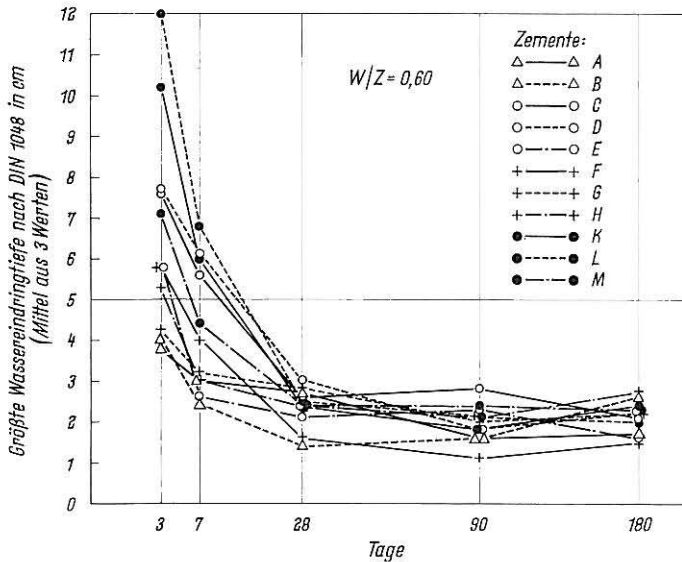


Bild 12 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei  $W/Z = 0,60$  in Abhängigkeit vom Betonalter

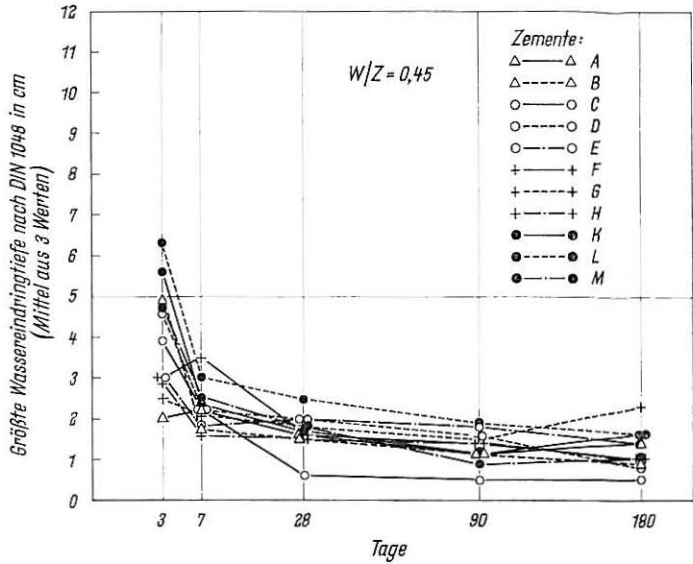


Bild 13 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei  $W/Z = 0,45$  in Abhängigkeit vom Betonalter

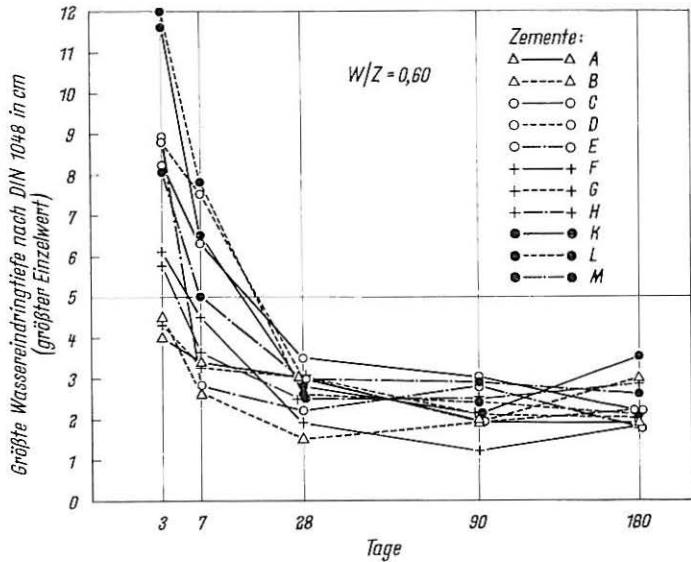


Bild 14 Größte Wassereindringtiefe (größter Einzelwert) bei  $W/Z = 0,60$  in Abhängigkeit vom Betonalter

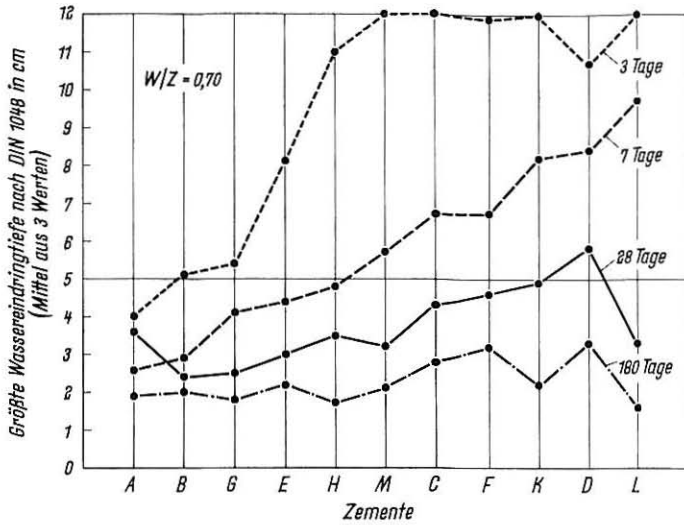


Bild 15 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei W/Z = 0,70 in Abhängigkeit vom Zement

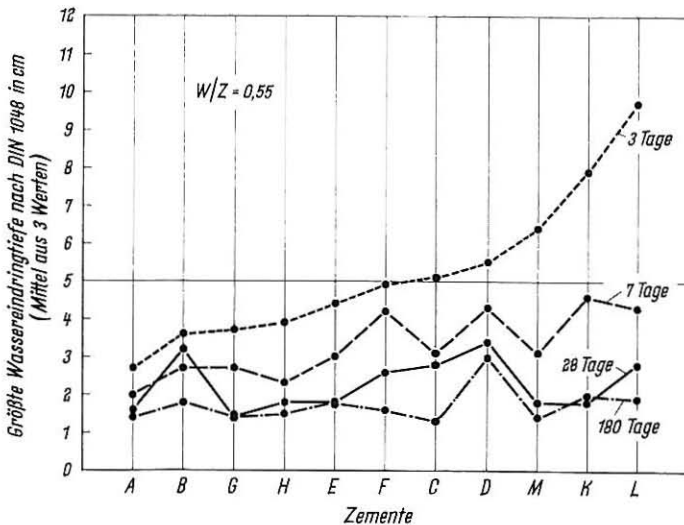


Bild 16 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei W/Z = 0,55 in Abhängigkeit vom Zement

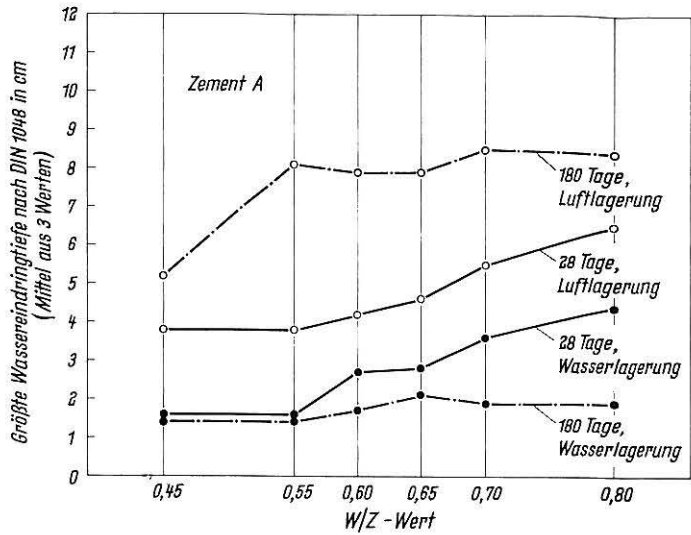


Bild 17 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei Beton mit Zement A in Abhängigkeit von der Lagerung

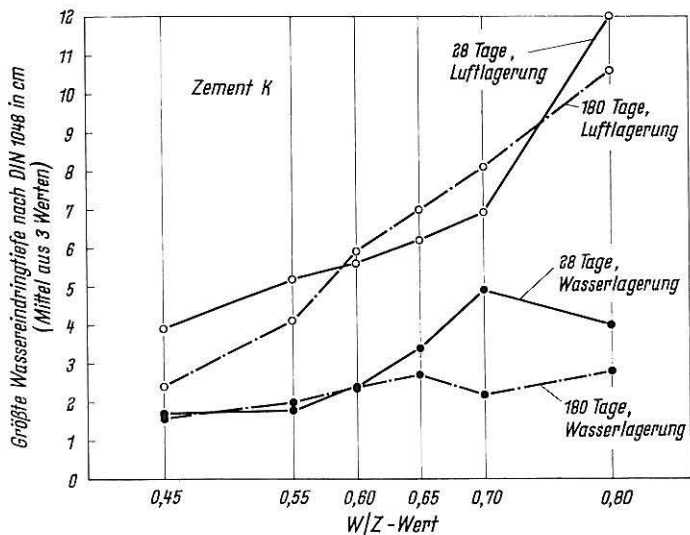


Bild 18 Größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) bei Beton mit Zement K in Abhängigkeit von der Lagerung

W/Z-Wert bei den langsamer erhärtenden Zementen mehr ab als bei den schneller erhärtenden Zementen. Der Einfluß des Zements war bei größeren W/Z-Werten (vgl. Bild 15) im Alter von 90 oder 180 Tagen, bei W/Z-Werten von 0,60 und 0,55 im Alter von 28 Tagen und bei  $W/Z = 0,45$  meist schon im Alter von 7 Tagen nicht mehr zu erkennen, d. h. praktisch von dem Zeitpunkt an, bei dem der jeweilige Beton den für Wasserundurchlässigkeit erforderlichen Dichtigkeitsgrad erreicht hatte. Beton mit einem W/Z-Wert von 0,55 erreichte diesen Dichtigkeitsgrad bei schnell erhärtenden Zementen bereits nach 3 Tagen, bei allen übrigen Zementen nach 7 bis 28 Tagen Wasserlagerung, Beton mit einem W/Z-Wert von 0,70 bei schnell erhärtenden Zementen nach 7 Tagen, bei Zementen mit mittlerer Erhärtungsgeschwindigkeit nach 28 bis 90 Tagen und bei langsam erhärtenden Zementen vorwiegend nach 90 bis 180 Tagen Wasserlagerung.

## 5.5 Einfluß der Lagerung

Der Einfluß der Luftlagerung des Betons vor der Prüfung nach DIN 1048 geht aus Tafel 5 hervor. Zur Erklärung der Ergebnisse ist die größte Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Werten) luft- und wassergelagerter Prüfkörper nach 28 und 180 Tagen für den schnell erhärtenden Portlandzement A in Bild 17 und für den langsam erhärtenden, hüttensandreichen Hochofenzement K in Bild 18 dargestellt.

Die Wassereindringtiefe war bei den vorwiegend luftgelagerten Betonplatten deutlich größer als bei den ständig wassergelagerten. Während sie bei den wassergelagerten Platten allgemein bis zum Erreichen des Kleinstwertes mit wachsendem Alter abnahm, wurde sie bei den luftgelagerten Platten des Betons mit Zement A mit dem Alter größer. Die luftgelagerten Platten des Betons mit Zement K wiesen im Alter von 28 Tagen und 180 Tagen vorwiegend etwa die gleiche Wassereindringtiefe auf, allerdings waren die 28 Tage-Werte dieses Betons durchweg größer als beim Beton mit Zement A. Während die luftgelagerten Platten des Betons mit Zement A insbesondere nach 180 Tagen nur eine schwache Abhängigkeit vom W/Z-Wert zeigten (vgl. Bild 17), nahmen die entsprechenden Werte des Betons mit Zement K nach 28 Tagen und selbst noch nach 180 Tagen sehr deutlich mit wachsendem W/Z-Wert zu.

Die Luftlagerung hatte jedoch nicht nur eine größere Wassereindringtiefe als die Wasserlagerung zur Folge, sondern auch eine größere Streuung der Einzelwerte.

## 6. Schlußfolgerungen

Die Untersuchung von 66 sehr verschieden zusammengesetzten Kiessandbetonen der Güten B 225 bis B 600, die im Alter von 3, 7, 28, 90 und 180 Tagen nach Wasserlagerung und teilweise nach Luftlagerung auf Wasserundurchlässigkeit geprüft wurden, gestattet nachstehende Folgerungen:

6.1 Das Verfahren nach DIN 1048 erwies sich geeignet zur Nachprüfung des Einflusses der Betonzusammensetzung und des Alters

auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. Die Wasserundurchlässigkeit wurde dabei mit der größten Wassereindringtiefe (Mittel aus drei Einzelwerten) der Prüfung nach DIN 1048 beurteilt, die einfacher und genauer zu ermitteln ist als die mittlere Wassereindringtiefe, aber in fester Beziehung zu ihr steht.

6.2 Die größte Wassereindringtiefe nahm auch bei Beton aus sehr unterschiedlichen Zementen mit abnehmendem W/Z-Wert und mit wachsendem Alter des Betons ab, allerdings nur bis zu einem Kleinstwert.

6.3 Der Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe war bei Beton mit kleineren W/Z-Werten im allgemeinen etwas geringer als bei Beton mit größeren W/Z-Werten. Er war bei Beton mit kleinen und mittleren W/Z-Werten aber praktisch schon vorhanden, als der Hydratationsgrad und die Druckfestigkeit noch deutlich zunahmen.

6.4 Im Mittel verringerte sich die größte Wassereindringtiefe bei Beton mit einem W/Z-Wert von 0,45 nach 7tägiger und bei Beton mit einem W/Z-Wert von 0,60 nach 28tägiger Wasserlagerung nicht mehr wesentlich. Bei Beton mit W/Z-Werten von 0,70 und 0,80 wurde der für den Kleinstwert der größten Wassereindringtiefe erforderliche Dichtigkeitsgrad des Zementsteins erst nach 90 bis 180 Tagen erreicht.

6.5 Die größte Wassereindringtiefe war in jungem Alter bei schnell erhärtenden Zementen geringer als bei Zementen mit mittlerer Erhärtungsgeschwindigkeit und deutlich geringer als bei langsam erhärtenden Zementen. Der Einfluß des Zements war praktisch nicht mehr zu erkennen, wenn der jeweilige Beton den für Wasserundurchlässigkeit erforderlichen Dichtigkeitsgrad erreicht hatte.

6.6 Dieser Dichtigkeitsgrad wurde von Beton mit einem W/Z-Wert von 0,55 bei schnell erhärtenden Zementen bereits nach 3tägiger, bei allen übrigen Zementen nach 7- bis 28tägiger Wasserlagerung und von Beton mit einem W/Z-Wert von 0,70 bei schnell erhärtenden Zementen nach 7tägiger, bei Zementen mit mittlerer Erhärtungsgeschwindigkeit nach 28- bis 90tägiger und bei langsam erhärtenden Zementen vorwiegend nach 90- bis 180tägiger Wasserlagerung erreicht.

6.7 Luftlagerung vor der Prüfung auf Wasserundurchlässigkeit hatte eine deutlich größere Wassereindringtiefe sowie eine wesentlich größere Streuung der Ergebnisse zur Folge als ständige Wasserlagerung.

6.8 Alle Betone mit W/Z-Werten bis zu höchstens 0,60 waren bei zweckmäßigem Mehlkorngesamtgehalt, vollständiger Verdichtung und sorgfältiger Nachbehandlung spätestens im Alter von 28 Tagen „wasserundurchlässig“ (größte Wassereindringtiefe bei Prüfung nach DIN 1048  $\leq$  5 cm). Eine größte Wassereindringtiefe von 3 cm wurde von den wenigstens 28 Tage alten Betonen mit einem W/Z-Wert von 0,45 sicher unterschritten.

## SCHRIFTTUM :

- [1] Walz, K.: Undurchlässiger Beton. Bautechnik-Archiv, H. 13, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1956.
- [2] Graf, O., und K. Walz: Versuche und Erläuterungen zu den Richtlinien für die Prüfung von Beton auf Wasserundurchlässigkeit. Bautechnik 15 (1937) H. 25.
- [3] Würfel, H.: Betonarbeiten an den Mittelwesterstaufen. Vorträge der 52. Hauptversammlung des Deutschen Beton-Vereins 1955, S. 173/214.
- [4] Bonzel, J.: Beurteilungsgrundsätze und technologische Maßnahmen für Beton in angreifenden Wässern. Betonstein-Zeitung 29 (1963) H. 11, S. 633/636.
- [5] Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. beton 11 (1961) H. 7, S. 481/486; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 199/213.
- [6] Powers, T. C.: Structure and physical properties of hardened portland cement paste. Portland Cement Association, Bulletin 94, Chicago 1958.
- [7] Graf, O.: Versuche über die Wasserundurchlässigkeit von Zementmörtel und Beton. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, H. 65, Berlin 1931.
- [8] Walz, K.: Die heutigen Erfahrungen über die Wasserdurchlässigkeit des Mörtels und des Betons. Bautechnik-Archiv von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1931.
- [9] Anleitung für die Zusammenstellung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. Bautechnik-Archiv von K. Walz. Beton- und Stahlbetonbau 53 (1958) H. 11, S. 100/101; ebenso Sonderdruck, 2. Auflage, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1963.
- [10] Weigler, H., und K. Reissner: Die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton. Betonstein-Zeitung 1963) H. 5, S. 260/262.
- [11] Walz, K.: Stand der Neufeststellungen. beton 11 (1961) H. 7, S. 481/486; Teils „Beton“ der Stahlbetonberichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 137/140.
- [12] Walz, K.: Verarbeitbarkeit und physikalische Eigenschaften des Frischbetons. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, H. 91, Berlin 1938; ebenso Albrecht, W., und H. Schmitt: Die Festigkeitsmessung von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 100, Berlin 1964, S. 38/60.
- [13] 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.
- [14] Bonzel, J., und J. Dahms: Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwertes und der Lagerung auf die Festigkeitsentwicklung des Betons. beton 16 (1966) H. 7, S. 299/305, und H. 8, S. 341/342.