

Über den Einfluß der Porosität des erhärteten Betons auf seine Gebrauchseigenschaften

Von Herbert Gräf und Justus Bonzel, Düsseldorf

Übersicht

Die Gebrauchseigenschaften und damit auch die Dauerhaftigkeit von Beton hängen sehr wesentlich von der Porosität der Zementsteinmatrix des erhärteten Betons ab. Eine geringere Porosität verbessert die Dauerhaftigkeit. Direkt läßt sich die Porosität von Beton wegen der großen Bandbreite der im Beton vorkommenden Poren, die sich größenmäßig vom Millimeter- bis zum Nanometerbereich erstrecken, nicht darstellen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß man durch die indirekten Meßverfahren der Quecksilberpenetration und der Sauerstoffpermeabilität (Gasdurchlässigkeit) die Porosität von Beton so beschreiben kann, daß damit eine in baupraktischer Hinsicht nutzbare Beurteilung der Dauerhaftigkeit möglich ist. Der aus den Ergebnissen beider Verfahren entwickelte Porositätsfaktor P ist ein praxisgerechtes Kriterium für die Porosität. Ein kleiner Porositätsfaktor eines Betons beschreibt ein günstiges Verhältnis von Kapillar- und Gelporen und bedeutet i. a. eine gute Betonqualität. Zu Beginn der Hydratation sind nur größere Kapillarporen vorhanden; mit fortschreitendem Erhärtungsverlauf wird der Kapillarporenraum zunehmend mit festen Hydratationsprodukten ausgefüllt und nimmt deshalb ab. Dadurch steigt mit zunehmender Erhärtung der Anteil der Gelporen, d. h. der im Zementgel verbleibenden sehr kleinen Hohlräume, am Gesamtporenraum.

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde durch einen Vergleich des nach 28 Tagen ermittelten Porositätsfaktors mit den von dem jeweiligen Beton erreichten Gebrauchseigenschaften ein Maßstab für die Beurteilung der Eigenschaften des erhärteten Betons aufgestellt. Mit dem Porositätsfaktor lassen sich somit die später zu erwartenden Gebrauchseigenschaften des Betons frühzeitig abschätzen. Zudem ist es möglich, tendenziell auf der Basis des Porositätsfaktors Kennwerte für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen festzulegen.

1 Einleitung

Bei der Beurteilung der zu erwartenden Gebrauchseigenschaften des erhärteten Betons wird in der Regel von den Ausgangsstoffen und von Erfahrungswerten der Betonzusammensetzung, wie z. B. dem Wasserzementwert, sowie bei einigen Betoneigenschaften, wie z. B. der Festigkeit, dem Verformungsverhalten und der Wasserundurchlässigkeit, von Prüfergebnissen mit genormten Prüfverfah-

ren ausgegangen. Solange dabei mit den gewählten Baustoffen, der gewählten Betonzusammensetzung, der Frischbetonbeschaffenheit und der erforderlichen Widerstandsfähigkeit der Erfahrungsbereich nicht verlassen und alle Arbeiten, wie z. B. Herstellung, Verarbeitung sowie Nachbehandlung des Betons bzw. der Betonbauteile und die Betondeckung der Bewehrung, sachgerecht ausgeführt werden, sind auf diese Weise für den jeweiligen Anwendungsfall anforderungsgerechte und dauerhafte Betonbauteile zu erstellen. Ist jedoch, wie auch die Praxis gezeigt hat, eine der vorgenannten Bedingungen nicht erfüllt, so kann die Dauerhaftigkeit der Betonbauteile, wie z. B. Witterungsbeständigkeit, Frostwiderstand, Frost-Tausalz-Widerstand und/oder Korrosionsschutz der Bewehrung, unzureichend sein. Dies trifft dann insbesondere für die oberflächennahen Schichten von Außenbauteilen zu und ist zu Anfang meist nicht feststellbar, weil es für die Kurzzeitprüfung der Dauerhaftigkeit derzeit noch keine ausreichenden Prüfverfahren und darauf bezogene Anforderungsmodelle gibt.

Seit langem ist bekannt, daß ein wesentliches Merkmal fast aller nichtmetallischen anorganischen Baustoffe ihr poröser Struktur Aufbau ist und daß im allgemeinen die Eigenschaften des Betons von seiner Porosität und seiner Durchlässigkeit sehr wesentlich und vielschichtig beeinflußt werden. Die Porenstruktur des Betons kann, je nach Zusammensetzung und Einbau, sehr unterschiedliche Porengrößen und Porengrößenverteilungen aufweisen. Daher wurden — ausgehend von einem umfangreichen Literaturstudium — in den Jahren 1983 bis 1988 im Forschungsinstitut der Zementindustrie, mit finanzieller Unterstützung durch die AIF, umfangreiche Untersuchungen über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und über ihren Einfluß auf die Gebrauchseigenschaften von Beton durchgeführt [1]. Die Untersuchungen sollten einen Beitrag zur Frage liefern, ob, inwieweit und gegebenenfalls unter welchen Bedingungen von Kennwerten der Porosität bzw. der Durchlässigkeit des erhärteten Betons auf wichtige Gebrauchseigenschaften insbesondere des Bereichs Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen frühzeitig geschlossen werden kann.

2 Ausgangsstoffe, Betone, Gebrauchseigenschaften

In die Untersuchungen wurden drei handelsübliche Zemente einbezogen, und zwar bei allen Betonversuchen ein Portlandzement Z 35 F nach DIN 1164 sowie bei einigen Versuchen ein Hochofenzement Z 35 L nach DIN 1164 und ein Flugaschezement Z 35 F gemäß bauaufsichtlicher Zulassung. Ihre wesentlichsten Kennwerte sind in Tafel 1 zusammengestellt. Der Betonzuschlag wurde aus den Rheinkiesandkorngruppen 0/2 mm, 2/8 mm und 8/16 mm eFT nach DIN 4226 Teil 1 des Düsseldorfer Raumes und aus geringen Mengen Quarzsand 0/0,2 mm und 1/2 mm zusammengesetzt. Seine Kornzusammensetzung lag in der Mitte des Sieblinienbereiches AB 16 nach DIN 1045.

Mit PZ 35 F wurden Betone mit Wasserzementwerten von 0,50, 0,60, 0,70 und 0,80 hergestellt, mit den beiden übrigen Zementen überwiegend nur Betone mit einem Wasserzementwert von 0,60. Der Zementgehalt wurde zur besseren Vergleichbarkeit der Porositätskennwerte so gewählt, daß alle Betone einen etwa gleichen Zement-

Tafel 1 Kenndaten der einbezogenen Zemente bei Prüfung nach DIN 1164

Kennwerte und Eigenschaften		PZ 35 F	HOZ 35 L	FAZ 35 F
Druckfestigkeit in N/mm ² nach	2 Tagen	23	12	19
	7 Tagen	36	34	33
	28 Tagen	44	53	46
Spezifische Oberfläche in cm ² /g		3420	3460	3700
Hüttensand bzw. Flugaschegehalt in Gew.-%, bezogen auf die Summe von Portlandklinker und Hüttensand bzw. Flugasche		—	36	20
Klinkerphasen bei PZ 35 F in Gew.-%	C ₃ S	53,5	—	—
	C ₂ S	17,3	—	—
	C ₃ A	10,3	—	—
	C ₄ AF	8,5	—	—
Gesamtgehalt CaO in Gew.-%		62,97	55,30	49,10

leimgehalt von rd. 275 dm³/m³ aufwies. Mit dem Beton wurden Würfel von 15 cm Kantenlänge für die Druckfestigkeitsprüfung und Scheiben mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe für die Prüfung der Sauerstoffpermeabilität, der Quecksilberpenetration, des dynamischen Elastizitätsmoduls, der Chlorideindringtiefe und des Frostwiderstandes hergestellt. Zur Prüfung der Carbonatisierungstiefe wurden Prismen 5 cm x 10 cm x 50 cm verwendet.

Für die Prüfung der Quecksilberpenetration wurden im Betonalter von rd. 29 Tagen jeweils drei Bohrkern mit einem Durchmesser von 8 mm und einer Höhe von höchstens 5 cm — zur Vermeidung einer Hydratationsbeeinflussung und einer Änderung des Betonfeuchtigkeitsgehaltes mit Äthanol anstelle von Wasser als Kühlflüssigkeit — an verschiedenen Stellen aus dem mörtelreichen Anteil der Betonscheiben ($\varnothing = 15$ cm, $h = 5$ cm) herausgebohrt.

Weitere Einzelheiten über die Betonzusammensetzung, die Frischbetonbeschaffenheit, die Herstellung des Betons und der Prüfkörper, die z. B. aus Gründen der Frischbetonbeschaffenheit in einigen Fällen Besonderheiten erforderte, sowie über die verschiedenen Prüfungen enthält [1] und teilweise [2]. Für die Nachbehandlung der Betone wurden bis zu fünf verschiedene, auf das praktische Gesehen abgestimmte Verfahren (Nachbehandlungen A bis E) angewendet, die aus Tafel 2 hervorgehen. Bei den hier aus Prüfverfahrensgründen gewählten kleinen Prüfkörpern dürfte die gemäß Nachbehandlungsrichtlinie für Außenbauteile aus Beton mit PZ 35 F und $w/z = 0,60$ sowie mit HOZ 35 L und $w/z = 0,50$ bei Umweltbedingungen II und Temperatur ≥ 10 °C mindestens erforderliche Nachbehandlung angenähert der hier gewählten Nachbehandlung C + Vorlagerung bis zur Prüfung entsprechen. Die wesentlichen Kennwerte und Prüfergebnisse der Betone sind in den Tafeln 3, 4 und 5 zusammengestellt, siehe auch [1].

Tafel 2 Nachbehandlungsarten für Betonprobekörper bei konstanter Lagerungstemperatur von 20 °C

- A: 1d Schalung + 1d Zugluft¹⁾ + 26d Klimaraum mit 65% r.F.
B: 1d Schalung + 27d Klimaraum mit 65% r.F.
C: 1d Schalung + 2d konserviert²⁾ + 25d Klimaraum mit 65% r.F.
D: 1d Schalung + 27d konserviert²⁾
E: 1d Schalung + 6d H₂O + 21d Klimaraum mit 65% r.F.

Von Nachbehandlungsende bis zum Prüfungstermin wurden die Probekörper entweder weiter im Klimaraum bei 20 °C und 65% r.F. gelagert oder den jeweiligen Belastungen ausgesetzt (z. B. Außenlagerung, Frost).

- ¹⁾ Bei der Nachbehandlung A wurden zur Simulation der klimatischen Verhältnisse an einem Bauwerk die Probekörper nach 1 Tag Schalung für rd. 1 weiteren Tag in Schalung bei freier Betonoberseite einer Zugluft mit einer Windgeschwindigkeit von ca. 1,5 m sec⁻¹ ausgesetzt.
- ²⁾ Konserviert bei den Nachbehandlungen C und D bedeutet, daß die Probekörper 2 Tage (C) und 27 Tage (D) luftdicht in einer 0,1 mm dicken Folie verpackt waren.

3 Charakterisierung von Beton bestimmter Zusammensetzung und Nachbehandlung durch Porositäts- und Durchlässigkeitskennwerte

3.1 Allgemeines

Seit langem bemüht man sich mit unterschiedlichen Bestimmungsverfahren, Porositäts- und Durchlässigkeitskennwerte des erhärteten Betons zu bestimmen und den Beton damit zu kennzeichnen, siehe u. a. [1]. Für eine genauere Beschreibung mit Porositäts- und Durchlässigkeitskennwerten haben sich die Bestimmungen mit der Sauerstoffpermeabilität (siehe u. a. [1 bis 6]), mit der Sauerstoffdiffusion (siehe u. a. [1, 7 bis 9]), mit der Quecksilberpenetration (siehe u. a. [1, 10 bis 14]) und mit der Stickstoffsorption (siehe u. a. [1, 15 bis 17]) durchgesetzt. Angaben über die Leistungsfähigkeit dieser Bestimmungsverfahren, deren Vor- und Nachteile sowie deren Gültigkeitsbereiche enthalten [1, 5, 18 und 19]. Bild 1, das [20] entnommen wurde, gibt einen Überblick über die im Beton vorhandenen Porenarten und über die Anwendung der Bestimmungsverfahren.

Allgemein ist zur Bestimmung von Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerten anzumerken, daß die dabei zu untersuchenden Betonprüfkörper einen dem Bauteilbeton ähnlichen Hydratations- und Erhärtungszustand aufweisen müssen, wenn sie Aussagen über die zu erwartenden Gebrauchseigenschaften des Betonbauteils ergeben sollen. In der Regel wird daher dafür nur ausreichend erhärteter Beton zu untersuchen sein. Die Bestimmung der Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte an jungem, noch nicht ausreichend erhärtetem Beton ist im allgemeinen nicht sinnvoll, da dieser Beton den maßgeblichen Hydratationsgrad noch nicht erreicht hat und daher die Kennwerte für die erforderlichen Gebrauchseigenschaften noch nicht aufweisen kann. Außerdem können die Ergebnisse der Porositäts- bzw. Durchlässigkeitsbestimmungen bei jungem Beton auch durch das Prüfverfahren selbst stärker verändert werden. Aus diesem Grund wurden die Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte zwar nach unterschiedlicher Nachbehandlung (Verfahren A

bis E nach Tafel 2), aber stets nur nach einer Mindesterhärtungszeit bei 20 °C am erhärteten Beton ermittelt. Das Bestimmungsalter des Betons lag — bedingt durch die Prüfvorbereitungen — im allgemeinen zwischen 35 und 56 Tagen (siehe Tafel 3) und war nur in Sonderfällen deutlich größer. Die unterschiedlichen Prüfmuster (zwischen 35 und 56 Tagen) begünstigen etwas die besser nachbehandelten Betone (siehe Tafel 3). Sie war aber erforderlich, weil die Austrock-

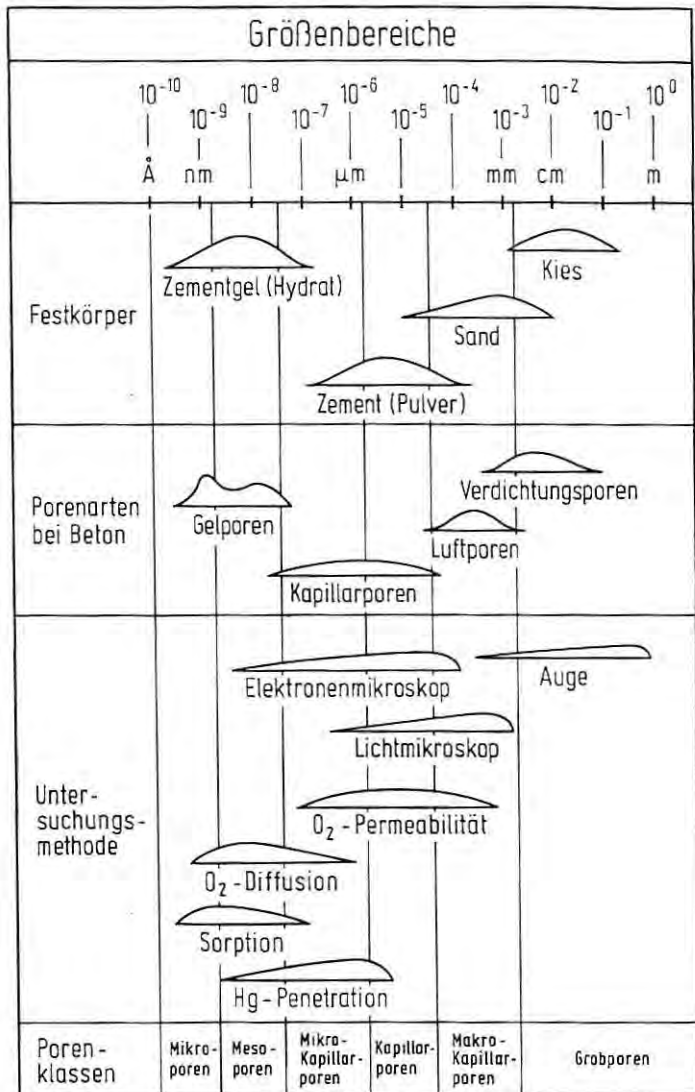


Bild 1 Größenbereiche und Prüfverfahren für Poren im Beton

Tafel 3 Porositätskennwerte von Beton unterschiedlicher Zusammensetzung und Nachbehandlung

Zement	w/z-Wert	Nachbehandlung	Permeabilitätskoeffizient K		Maximum der diff. Porenverteilung M im Alter von 31 d in 10^{-9} m	Porositätsfaktor P (n. Abschn. 3.2) in 10^{-23} m ³
			Prüfalter in d	in 10^{-16} m ²		
PZ 35 F	0,80	A	35	60,203	580	349,177
		B	42	13,512	310	41,887
		C	49	7,507	205	15,389
		D	56	1,801	75	1,350
		E	56	—	—	—
	0,70	A	35	15,411	405	62,414
		B	42	4,157	250	10,392
		C	49	1,223	190	2,323
		D	56	0,156	72	0,112
		E	56	—	—	—
	0,60	A	35	3,021	315	9,516
		B	42	0,959	200	1,918
		C	49	0,243	140	0,340
		D	56	0,051	80	0,040
		E	56	0,012	56	0,0067
	0,50	A	35	0,612	170	1,040
		B	42	0,146	64	0,093
		C	49	0,063	61	0,038
		D	56	0,015	58	0,0087
		E	56	0,0035	55	0,0019

(Fortsetzung Tafel 3)

HOZ 35 L	0,80	A	35	81,134	780	632,845
		B	42	14,301	405	57,919
		C	49	3,609	190	6,857
		D	56	0,761	70	0,532
	0,70	A	35	45,217	565	255,476
		B	42	10,043	310	31,133
		C	49	1,131	175	1,979
		D	56	0,122	75	0,091
	0,60	A	35	7,403	385	28,501
		B	42	4,503	290	13,058
		C	49	0,631	165	1,041
		D	56	0,047	55	0,025
		E	56	0,013	57	0,0074
	0,50	A	35	2,400	220	5,280
		B	42	1,103	103	1,136
		C	49	0,132	70	0,092
D		56	0,011	50	0,0055	
FAZ 35 F	0,60	A	35	7,153	345	24,667
		B	42	3,454	220	7,598
		C	49	0,606	145	0,878
		D	56	0,058	90	0,052
		E	56	0,010	60	0,006

nungszeit zwischen Nachbehandlungsende und Messung der Permeabilität bei allen Betonen 28 Tage betragen sollte.

Bei den Hauptversuchen wurde auf die sehr aufwendigen Bestimmungen der Sauerstoffdiffusion und der Stickstoffsorption verzichtet, weil zwischen der Sauerstoffpermeabilität und der Sauerstoffdiffusion eine feste Beziehung gefunden wurde [1, 8 und 21] und weil sich eine baupraktisch ausreichende Kennzeichnung der Betonporosität bzw. -durchlässigkeit mit dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K für Sauerstoff und dem Maximum M der differentiellen Porenverteilung, bestimmt mit Quecksilberpenetration, als möglich erwies [1, 21]. Der bei der Quecksilberpenetration als Kennwert ebenfalls anfallende Gesamtporenraum wurde dabei nicht herangezogen, weil er nur den mit der Quecksilberpenetration meßbaren Porenraum — also nicht den real vorhandenen Gesamtporenraum — darstellt und weil er sich bei vielen der untersuchten Betone zu wenig unterschied.

3.2 Charakterisierung

Die Ergebnisse der Untersuchungen über die Porositäts- und die Durchlässigkeitskennwerte von Betonen, die noch nicht Gebrauchseinwirkungen ausgesetzt waren, sind in Tafel 3 zusammengestellt, siehe auch [1, 21]. Den Mittelwerten der Tafel 3 liegen bei den Betonen mit PZ sechs Einzelwerte und zur Begrenzung des Versuchsumfangs bei den Betonen mit HOZ und mit FAZ zwei Einzelwerte zugrunde. Wie auch aus Bild 2 zu erkennen ist, nahm der spezifische Permeabilitätskoeffizient K sowohl mit kleinerem w/z -Wert als auch mit besserer Nachbehandlung insgesamt deutlich und im Bereich kleiner w/z -Werte und — was in Bild 2 nicht erkennbar ist — guter Nachbehandlung geringfügig ab. Dieses Verhalten des Betons wurde auch von Art und Festigkeitsklasse des Zements beeinflusst. Von Beton mit Zementen der Festigkeitsklasse Z 35 wies der

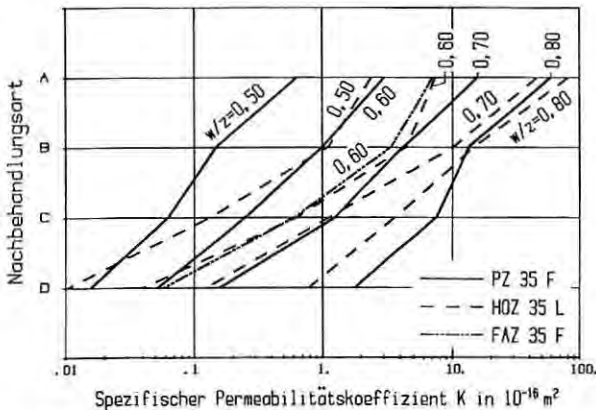


Bild 2 Permeabilität K von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung ohne Gebrauchseinwirkung

Tab. 7: Frischbeton- und behandelteigenschaften von Beton, anschließend Carbonatisierung und Nachbehandlung

Beton	w/z-Wert	Nach- behandlung	Frischbeton- eigenschaften		Carbonatisierungstiefe nach 3 Jahren in mm bei		Druckfestig- keit ²⁾ nach 28 Tagen in N/mm ²	dynamischer E-Modul nach 28 Tagen in kN/mm ²	Cl ⁻ -Eindringtiefe in mm	
			Ausbreitmaß cm	Luftgehalt cm	Außen- lagerung	Klimaraum- lagerung 20/65			nach 0,5 Jahren	nach 1 Jahr
PZ 35 F	0,80	A	50/52	2,0	7,5	17,0	—	26,59	—	—
		B			6,5	15,0	—	30,84	—	—
		C			6,0	11,5	—	29,20	—	—
		D			5,0	9,0	20	36,19	—	—
	0,70	A	47/50	2,0	6,0	16,0	—	29,78	—	—
		B			5,5	12,0	—	31,87	—	—
		C			4,5	9,5	—	35,07	—	—
		D			4,0	8,0	28	37,51	—	—
	0,60	A	43/45	1,8	5,5	12,0	—	33,74	18	25 ³⁾
		B			4,5	11,0	—	36,07	16	25 ³⁾
		C			3,5	9,0	—	38,26	15	25 ³⁾
		D			1,5	7,0	35	39,37	15	25 ³⁾
0,50	A	37/40	1,9	4,5	10,5	—	36,99	—	—	
	B			4,0	9,0	—	38,98	—	—	
	C			2,5	7,5	—	40,54	—	—	
	D			1,5	6,0	45	41,54	—	—	
HOZ 35 L	0,80	D	51/53	1,8	—	—	28	—	—	
	0,70	D	47/48	2,0	—	—	32	—	—	
	0,60	A	46/47	1,8	13,5	25,0 ¹⁾	—	23,71	14	25 ³⁾
		B			11,0	21,0	—	25,95	13	25 ³⁾
		C			7,5	14,5	—	36,91	10	15
D		5,0			11,0	39	39,14	8	12	
0,50	D	37/39	2,0	—	—	54	—	—		
FAZ 35 F	0,60	A	46/48	2,0	6,0	16,0	—	29,95	12	18
		B			4,0	13,0	—	34,31	10	15
		C			3,0	9,5	—	36,47	9	14
		D			1,5	5,0	32	38,49	7	12

¹⁾ Probekörper (Prismen 5 cm x 10 cm x 50 cm) auf der vollen Breite durchcarbonatisiert (2 x 25 mm), tatsächlicher Wert liegt wahrscheinlich noch höher

²⁾ ermittelt an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge

³⁾ Probekörper (Scheiben Ø 15 cm, h = 5 cm) nach 1a Lagerung in 3molarer NaCl-Lösung völlig mit Cl⁻ durchsetzt, tatsächliche Eindringtiefe ist wahrscheinlich noch höher

Tafel 5 Frostwiderstand von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung

Zement	w/z-Wert	Nachbehandlung	Frostwiderstand von Beton charakterisiert durch											Spez. Permeabilitätskoeffizient K in $10^{-16}m^2$	
			Gewichtsverlust in % nach Anzahl FTW					Elastizitätsmodul in kN/mm^2 nach Anzahl FTW					nach Anzahl FTW		
			20	40	60	80	100	0	20	40	60	80	100	0	100
PZ 35 F	0,60	B	1,50	3,50	5,90	8,20	11,30	33,19	34,63	33,16	32,67	26,84	26,75	0,63	2,18
		D	0,34	1,30	2,20	3,70	4,60	38,34	37,77	37,64	37,30	37,11	36,61	0,08	0,26
		E	0,25	0,63	1,10	2,20	3,00	37,38	38,28	37,99	37,86	38,39	38,46	0,05	0,19
	0,50	B	0,35	1,15	2,20	3,00	4,50	37,95	38,86	38,32	37,83	36,92	35,90	0,24	1,10
		D	0,30	0,50	1,05	1,90	2,15	39,64	39,45	39,23	39,07	38,92	38,84	0,05	0,20
		E	0,20	0,40	0,60	0,70	1,20	40,76	41,29	41,37	41,28	41,38	41,35	0,01	0,09
HOZ 35 L	0,60	B	7,30	11,20	14,80	19,20	21,40	25,41	23,72	22,29	1)	1)	1)	—	—
		D	2,50	3,80	5,80	7,00	7,70	38,03	37,79	37,47	37,68	37,59	37,22	—	—
		E	0,21	0,43	0,77	1,10	1,40	32,96	34,22	34,42	33,80	34,00	34,50	—	—

1) Wegen starker Gefügauflockerung nicht mehr bestimmbar

Beton mit dem schneller erhärtenden Zement (PZ 35 F) bei den Nachbehandlungen A, B und C in gleichem Betonalter einen deutlich kleineren K auf als die Betone mit den langsamer erhärtenden Zementen (FAZ 35 F und HOZ 35 L). Dieser Unterschied konnte jedoch durch eine bessere Nachbehandlung, z. B. durch Nachbehandlung C anstelle von B, ausgeglichen werden. Bei den guten Nachbehandlungen D und E war er praktisch nicht vorhanden.

Das Maximum M der differentiellen Porenverteilung des noch nicht Gebrauchseinwirkungen ausgesetzten Betons (bestimmt durch Quecksilberpenetration, siehe [1]) nahm ebenfalls bei allen untersuchten Betonen sowohl mit kleinerem w/z-Wert als auch mit besserer Nachbehandlung deutlich und im Bereich kleiner w/z-Werte und guter Nachbehandlung nur noch wenig ab, siehe Bild 3. Ähnlich wie beim spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K war auch M bei Beton mit PZ 35 F, den Nachbehandlungen A, B und C und sonst gleichen Voraussetzungen kleiner als beim Beton mit HOZ 35 L und etwas kleiner als beim Beton mit FAZ 35 F. Auch diese Unterschiede konnten durch eine bessere Nachbehandlung ausgeglichen werden; sie traten bei den guten Nachbehandlungen D und E, abgesehen von einer Ausnahme bei Beton mit FAZ 35 F und Nachbehandlung D, nicht auf.

Durch Zuordnung der Ergebnisse der Porositäts- und der Durchlässigkeitsuntersuchungen zu den Erfahrungswerten der Zusammensetzung und der Nachbehandlung von Beton für bestimmte Anwendungen wurde ein Vorschlag für eine Charakterisierung der Dauerhaftigkeit von Beton durch Grenzwerte für den spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und für das Maximum M der differentiellen Porenverteilung des noch nicht Gebrauchseinwirkungen ausgesetzten Betons erarbeitet. Diese Grenzwerte sind in Tafel 6 zusammengestellt. Um sie besser den wichtigsten Anwendungsgebieten der DIN 1045 und der Nachbehandlungsrichtlinie zuordnen zu kön-

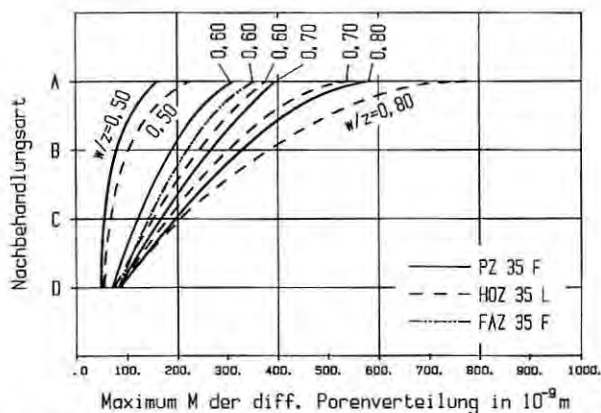


Bild 3 Maximum M der differentiellen Porenverteilung von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung ohne Gebrauchseinwirkung

Tafel 6 Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte von Beton

	Beton nach DIN 1045 z. B. für	Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte		
		Spezif. Permeabilitätskoeffizient K in 10^{-16}m^2 höchstens	Maximum M der different. Porenver- teilung in 10^{-9}m höchstens	Porositätsfaktor $P = K \cdot M$ in 10^{-23}m^3 höchstens
1	Innenbauteile ¹⁾	(10)	(300)	(30)
2	Außenbauteile	0,80	160	1,30
3	Bauteile m. hohem Frostwiderstand	0,50	125	0,80
	Bauteile m. hohem Widerstand gegen schwach- angreifende Stoffe n. DIN 4030			
4	Bauteile m. hohem Widerstand gegen noch stärkere äußere Einwir- kungen als bei Zeile 3	0,10	60	0,10

¹⁾ Die aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten Werte für Innenbauteile wurden lediglich zum Vergleich mit aufgenommen.

nen, wurden dabei in Tafel 6 — abweichend von dem Vorschlag in [1] und [21] — die folgenden vier Gruppen unterschieden:

- a) Innenbauteile
- b) Außenbauteile
- c) Bauteile mit hohem Frostwiderstand und Bauteile mit hohem Widerstand gegen schwach betonangreifende Stoffe nach DIN 4030
- d) Bauteile mit hohem Widerstand gegen noch stärkere äußere Einwirkungen als bei c).

In vielen Fällen genügt für die Praxis eine Trendaussage allein aufgrund der Bestimmung des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K. Für eine genauere Charakterisierung des Betons durch Porositätskennwerte sind jedoch der spezifische Permeabilitätskoeffizient K und das Maximum M der differentiellen Porenverteilung erforderlich, weil sie zwei unterschiedliche Porenbereiche repräsentieren, die beide für die Charakterisierung des Betons notwendig sind. Da sich diese Charakterisierung des Betons durch K und M sowohl als ausreichend als auch als notwendig erwies, wurde außerdem untersucht, ob sich der Beton auch durch einen übergeordneten Porositätskennwert ausreichend charakterisieren läßt, der sich aus K und M ergibt. Als übergeordneter Wert zur Charakterisierung des Betons erwies sich dabei der Porositätsfaktor P entsprechend der vereinfachten Formel:

$$P = K \cdot M$$

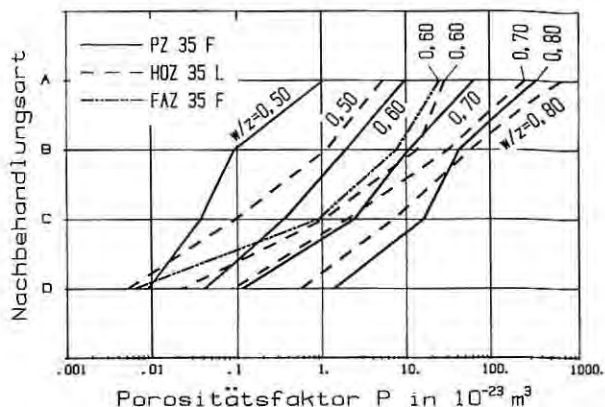


Bild 4 Porositätsfaktor P von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung ohne Gebrauchseinwirkung

Der Porositätsfaktor P für die untersuchten Betone geht ebenfalls aus Tafel 3 hervor und ist in Bild 4 aufgetragen. Seine möglichen Grenzwerte enthält Tafel 6. Nach alleiniger Betrachtung des Zusammenhangs zwischen den Porositätskennwerten und den Kennwerten der Betonzusammensetzung und der Nachbehandlung muß jedoch zunächst auch für den Porositätsfaktor P festgesetzt werden, daß er alleine für eine genaue Charakterisierung des Betons u. U. nicht ausreicht, weil die alleinige Begrenzung des Produktes P eine Überschreitung der Grenzwerte für K oder M nicht ausschließt. Auch aus diesem Grund muß zunächst die Beziehung zwischen Porositätskennwerten und Gebrauchseigenschaften des Betons betrachtet werden.

4 Zusammenhang zwischen wichtigen Gebrauchseigenschaften von Beton und seinen Porositäts- und Durchlässigkeitskennwerten

Für eine Charakterisierung von Beton durch Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte ist ihr Zusammenhang mit den Gebrauchseigenschaften von sehr wesentlicher Bedeutung. Zur weiteren Überprüfung der in Abschnitt 3 herausgestellten Porositäts- bzw. Durchlässigkeitskennwerte für die Charakterisierung von Beton wurde daher auch der Zusammenhang mit einigen wichtigen Gebrauchseigenschaften — teilweise umfangreich und teilweise lediglich orientierend — untersucht. Dabei wurde im allgemeinen stärker der Zusammenhang zwischen dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und den Gebrauchseigenschaften überprüft, weil die Bestimmung der Permeabilität weniger aufwendig ist als die Bestimmung des Maximums der differentiellen Porenverteilung M mit Hilfe der Quecksilberpenetration und weil mit der Permeabilität häufig eine für baupraktische Zwecke ausreichende Trenderaussage möglich ist. Zur besseren Annäherung an die realen Verhältnisse wurde

jedoch meist auch der Zusammenhang zwischen Gebrauchseigenschaften und dem Porositätsfaktor P (siehe Abschnitt 3.2) betrachtet, der auch die Veränderungen im Mikrokapillarporenbereich mit erfaßt.

4.1 Zusammenhang zwischen Porositätskennwerten und Druckfestigkeit

Zur Begrenzung des Untersuchungsumfanges und wegen der Erkenntnis, daß die Druckfestigkeit des Betons mit abnehmendem Porengehalt des Zementsteins zunimmt, wurde die Druckfestigkeit zunächst nur orientierend an einigen Betonen mit der günstigen Nachbehandlung D im Alter von 28 Tagen ermittelt. Der sich dabei ergebende Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K bzw. dem Porositätsfaktor P bei noch nicht einer Gebrauchsbeanspruchung ausgesetzten Betonen geht aus Bild 5 hervor. Leider erstrecken sich die Druckfestigkeitsergebnisse aus Gründen der Begrenzung des Untersuchungsumfanges nur auf die Bereiche für etwa $K \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $P \leq 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$. Wegen der guten Nachbehandlung D sind diese Bereiche kaum von stärkeren Veränderungen der Kapillarporen beeinflusst (siehe dazu auch Abschnitt 4.2). Erwartungsgemäß nimmt die Druckfestigkeit des Betons sowohl mit wachsendem K als auch mit wachsendem P deutlich ab. Diese Abnahme ist bei der Abhängigkeit von K etwas ausgeprägter als bei der von P. Für die vorliegenden Ergebnisse ist die Darstellung in Abhängigkeit von P den realen Verhältnissen mehr angenähert, weil P auch Veränderungen der Mikrokapillarporen berücksichtigt. Für eine Charakterisierung der Druckfestigkeit durch Porositätskennwerte ist die Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit von P auch deshalb brauchbarer als die Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit von K, weil sich

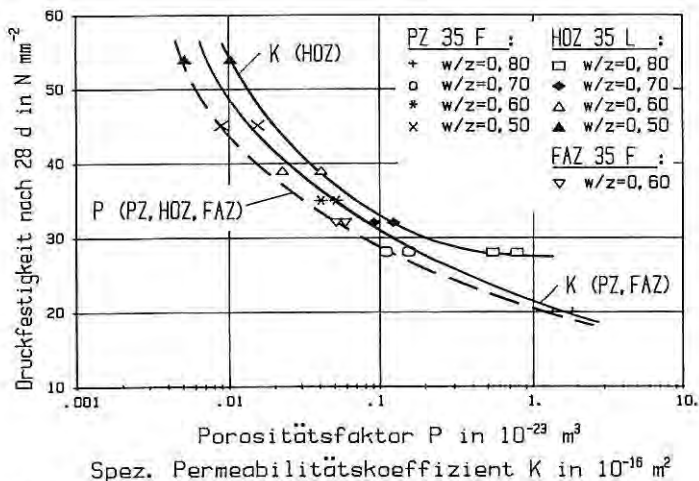


Bild 5 Druckfestigkeit von Beton verschiedener Zusammensetzung und der günstigen Nachbehandlung D in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P und vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K

der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und P — abgesehen von den HOZ-Betonen mit w/z von 0,70 und 0,80 — durch eine Kurve darstellen läßt. Demgegenüber ergibt sich für den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Permeabilität K ein systematischer Unterschied zwischen den HOZ-Betonen und den PZ-Betonen. Die systematischen Abweichungen der HOZ-Betone beim Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Permeabilität K dürften damit zu erklären sein, daß K die Veränderungen im Mikrokapillarporenbereich nicht genügend berücksichtigt. Durch weitere Untersuchungen wird zu klären sein, ob die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Druckfestigkeit und Porositätsfaktor P in einer Kurve auch für Betone mit weniger guten Nachbehandlungen als D und für Beton mit anderen Zementen zutrifft und warum dies für die sehr gut nachbehandelten HOZ-Betone mit den großen w/z -Werten von 0,70 und 0,80 nicht zutrifft.

4.2 Zusammenhang zwischen Porositätskennwerten und Elastizitätsmodul

Der Zusammenhang zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K bzw. dem Porositätsfaktor P des noch nicht einer Gebrauchsbeanspruchung ausgesetzten Betons geht aus Bild 6 hervor. Der Elastizitätsmodul nimmt sowohl mit wachsendem K als auch mit wachsendem P ab, und zwar in den Bereichen etwa $K > 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $P > 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$ stärker als in den Bereichen etwa $K \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $P \leq 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$. Während die Änderungen des Elastizitätsmodul in den Bereichen von etwa $K \leq 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $P \leq 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$ überwiegend durch Änderungen im Mikrokapillarporenbereich bedingt sein dürften, werden sie in den Bereichen $K > 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$

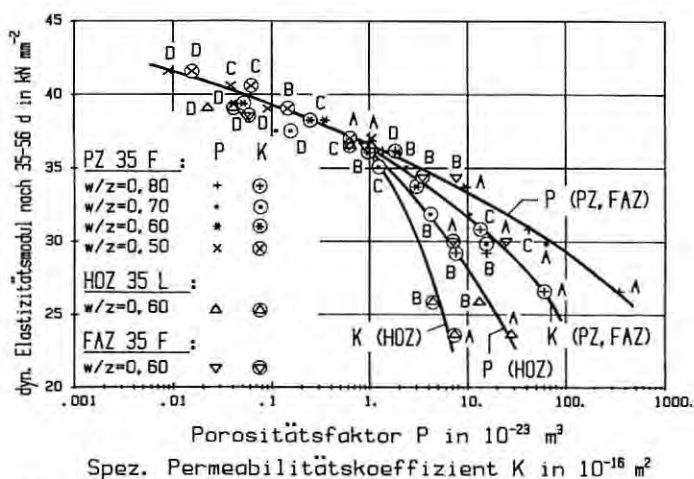


Bild 6 Dynamischer Elastizitätsmodul von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P und vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K

und $P > 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$ immer stärker durch die Zunahme der Kapillarporen beeinflusst, die durch größeren w/z-Wert, langsamer erhärtenden Zement oder schlechtere Nachbehandlung bedingt ist. Besonders ausgeprägt zeigt sich dies bei den Betonen mit HOZ 35 L und den dafür ungünstigen Nachbehandlungen A und B. Diese Betone sind zu wenig erhärtet und liegen möglicherweise deshalb jeweils noch unterhalb der Gesamtkurven der Zusammenhänge zwischen K und dem Elastizitätsmodul. Es ist davon auszugehen, daß aus dem gleichen Grunde die Gesamtkurve für den Zusammenhang zwischen K und dem Elastizitätsmodul in den Bereichen von etwa $K > 1 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und $P > 1 \cdot 10^{-23} \text{ m}^3$ zunehmend unterhalb der Gesamtkurve für den Zusammenhang zwischen P und dem Elastizitätsmodul liegt, wobei die Gesamtkurve für P den realen Verhältnissen näher kommt als die Gesamtkurve für K.

Abschließend bleibt hierzu noch anzumerken, daß der Elastizitätsmodul sehr stark von der Zementleimenge, von der Zuschlagart und vom Feuchtigkeitsgehalt zum Zeitpunkt der Prüfungen beeinflusst wird. Daher wurden alle untersuchten Betone mit gleicher Zementleimenge und mit gleichem Zuschlag hergestellt und der Elastizitätsmodul stets an lufttrockenen Prüfkörpern ermittelt.

4.3 Zusammenhang zwischen Porositätskennwerten und Chlorideindringtiefe

Die für Beton mit w/z = 0,60 und mit drei unterschiedlichen Zementen nach rd. fünf- bzw. elfmonatiger Lagerung der Betonprüfkörper ($\varnothing 15 \text{ cm}$, $h = 5 \text{ cm}$) in 3molarer NaCl-Lösung im Betonalter von rd. sechs Monaten und von rd. einem Jahr ermittelten Chlorideindringtiefen sind in Abhängigkeit vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K in Bild 7a und in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor

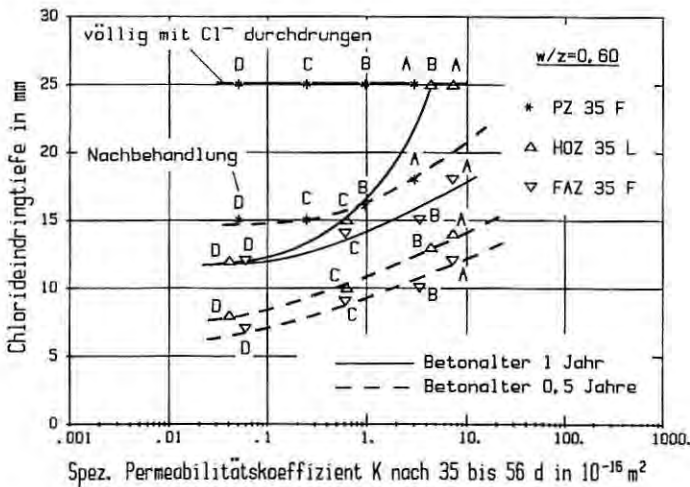


Bild 7a Chlorideindringtiefe von Beton mit w/z = 0,60 und Nachbehandlung A bis D in Abhängigkeit vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K

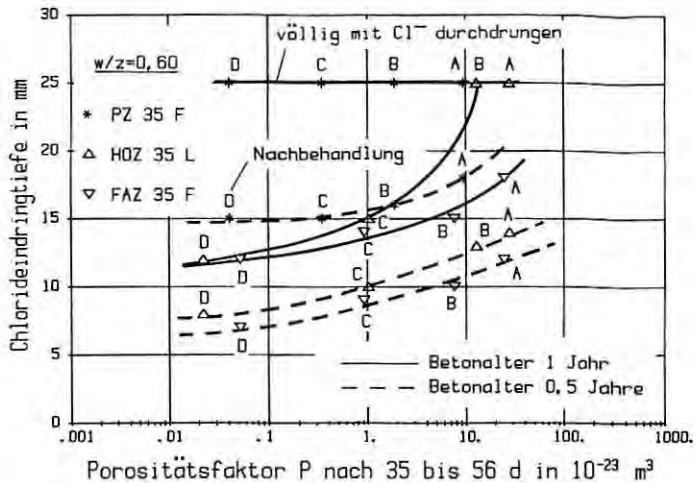


Bild 7b Chlorideindringtiefe von Beton mit $w/z = 0,60$ und Nachbehandlung A bis D in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P

P in Bild 7b aufgetragen. Die Bilder verdeutlichen, daß die Chlorideindringtiefe im Betonalter von sechs Monaten und von einem Jahr sowohl mit wachsendem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K als auch mit wachsendem Porositätsfaktor P zunehmend größer wird, bis die Prüfkörper vollständig mit Chlorid durchdrungen sind. Die erhaltenen Chlorideindringtiefen verteilen sich auf drei Dekaden des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K, jedoch auf vier Dekaden des Porositätsfaktors P, der daher besser differenziert.

Außerdem ist festzustellen, daß es einen zahlenmäßig gleichen Zusammenhang zwischen der Chlorideindringtiefe und dem jeweiligen Porositätskennwert für die untersuchten Betone mit unterschiedlichen Zementen nicht gibt, weil die Chlorideindringtiefe sowohl bei gleichem Permeabilitätskoeffizienten K als auch bei gleichem Porositätsfaktor P für die untersuchten Portlandzementbetone deutlich größer (Ausnahme bei vollständiger Chloriddurchdringung der Prüfkörper) und für die untersuchten Flugaschezementbetone etwas kleiner war als für die untersuchten Hochofenzementbetone. Bemerkenswert ist darüber hinaus, daß die Prüfkörper aller untersuchten Portlandzementbetone und der Hochofenzementbetone mit den Nachbehandlungen A und B im Alter von einem Jahr, d. h. nach elfmonatiger Einlagerung, von Chlorid vollständig durchdrungen waren und daß der Unterschied zwischen den Chlorideindringtiefen des Hochofenzementbetons und des Flugaschezementbetons mit den Nachbehandlungen C und D bei Prüfung im Betonalter von einem Jahr trotz größerer Absolutwerte kleiner war als im Betonalter von sechs Monaten.

Zusammenfassend ist dazu festzuhalten, daß die Chlorideindringtiefe von Beton mit $w/z = 0,60$ im Betonalter von 0,5 und einem Jahr bei Verwendung von FAZ 35 F oder von HOZ 35 L deutlich geringer als bei Verwendung von PZ 35 F ist. Mit Porositätskennwerten allei-

ne ist diese Gebrauchseigenschaft des Betons daher nicht zu beurteilen und zu kennzeichnen. Für konkretere Folgerungen sind jedoch weitere Untersuchungen insbesondere mit $w/z < 0,60$ erforderlich, zumal bei Meerwasser und/oder Frost-Tausalz-Einwirkungen nach DIN 1045 der w/z -Wert 0,50 nicht überschreiten darf.

4.4 Zusammenhang zwischen Porositätskennwerten und Carbonatisierungstiefe

Die Carbonatisierungstiefe — ein wichtiges Kriterium für die Beurteilung des Korrosionsschutzes der Bewehrung im Beton — ist im Alter von drei Jahren für die untersuchten Betone in Bild 8a in Abhängigkeit vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und in Bild 8b in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P aufgetragen. Erwartungsgemäß war die Carbonatisierungstiefe aller Betonarten stets um so größer, je größer der w/z -Wert und je schlechter die Nachbehandlung waren. Sie war bei Klimaraumlagerung, die annähernd der Lagerung von Innenbauteilen entspricht, größer als bei der Außenlagerung, die etwa einer nicht überdachten Lagerung von Außenbauteilen im Freien entspricht.

Die Bilder 8a und 8b zeigen, daß die Carbonatisierungstiefe sowohl mit wachsendem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K als auch mit wachsendem Porositätsfaktor P zunehmend größer wurde. Die Zunahme der Carbonatisierungstiefe erstreckte sich für die untersuchten Betone über vier Dekaden des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und war damit deutlich ausgeprägter als bei ihrer Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P (sechs Dekaden), der daher besser differenziert. Durch eine geeignete Verschiebung können die Kurven in Bild 8a mit den Kurven in Bild 8b zur Deckung gebracht werden. Dies zeigt, daß beim Zusammenhang zwischen dem Porositätsfaktor P und der Carbonatisierungstiefe der Porositätsfaktor P

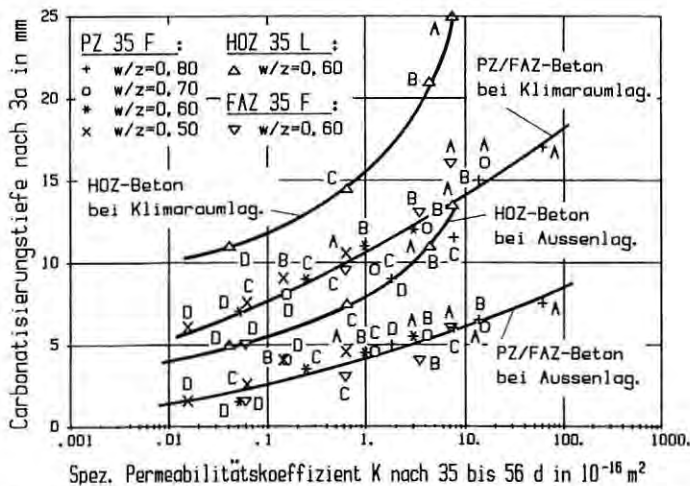


Bild 8a Carbonatisierungstiefe von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K

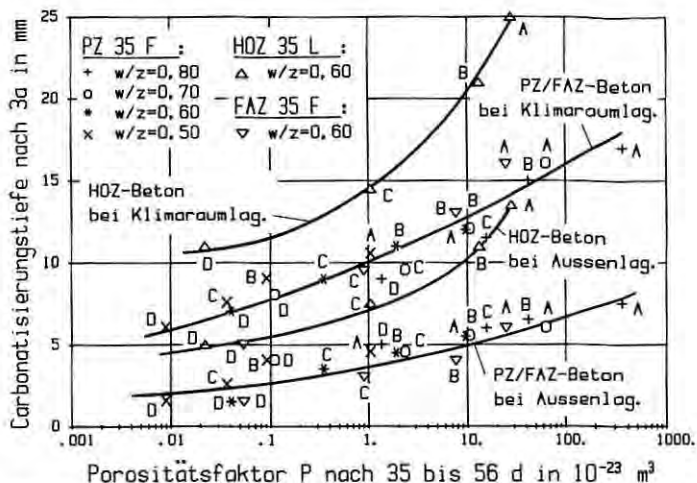


Bild 8b Carbonatisierungstiefe von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P

durch den wesentlich einfacher bestimmbarer Permeabilitätsfaktor K, multipliziert mit einem entsprechenden Faktor, ersetzt werden kann.

Darüber hinaus lassen die beiden Bilder erkennen, daß auch ein zahlenmäßig gleicher Zusammenhang zwischen der Carbonatisierungstiefe und den jeweiligen Porositätskennwerten für Betone mit gleichem Wasserzementwert, gleicher Nachbehandlung und gleicher anschließender Lagerung, aber mit unterschiedlicher Zementart, nicht in jedem Fall gegeben ist. Von den untersuchten Betonen zeigten die Betone mit PZ 35 F und mit FAZ 35 F etwa gleiches Verhalten. Die vergleichbaren Betone mit HOZ 35 L wiesen sowohl bei gleichem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K als auch bei gleichem Porositätsfaktor P stets eine größere Carbonatisierungstiefe auf als die entsprechenden Betone mit den beiden übrigen Zementen.

Gemäß früheren Untersuchungen kann der zementbedingte Unterschied bei der Carbonatisierungstiefe jedoch praktisch in gewissen Grenzen ausgeglichen werden, wenn für den Beton mit der größeren Carbonatisierungstiefe durch Verringerung des Wasserzementwertes eine gleiche Frühfestigkeit (etwa im Alter von sieben Tagen) erreicht wird. Dies bedeutet auch eine entsprechende Verringerung der Porositätskennwerte. Der gleiche Effekt ist auch durch eine bessere Nachbehandlung zu erreichen. In welchen Grenzen diese Verbesserungen möglich sind, kann durch horizontale Verbindungslinien zwischen den entsprechenden Punkten in den Bildern 8a und 8b abgeschätzt werden.

Die unterschiedlichen Carbonatisierungstiefen dürften durch die unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Zemente und durch den dadurch bewirkten unterschiedlichen Erhärtungsverlauf

der sonst aber gleichen Betone bedingt sein. Nicht weiter nachgegangen wurde im Rahmen dieser Untersuchungen der Frage, warum die Betone mit FAZ 35 F Carbonatisierungstiefen in der gleichen Größe wie die Betone mit PZ 35 F aufwiesen und sich damit deutlich von den Carbonatisierungstiefen der Betone mit HOZ 35 L unterschieden. Möglicherweise ist dies damit zu begründen, daß der Beton mit FAZ 35 F einerseits einen größeren Klinkeranteil als der Beton mit HOZ 35 L besaß und andererseits einen besonders hochwertigen Klinker enthielt, wodurch trotz einer insgesamt langsameren Erhärtung höhere Frühfestigkeiten erreicht wurden. Somit war beim Beton mit FAZ 35 F zu einem frühen Zeitpunkt auch der Anteil an CaO im Porenwasser größer, der ggf. erst später für die zusätzliche CSH-Bindung verwendet wird.

Zusammenfassend ist aus den Bildern 8a und 8b zu entnehmen, daß bei Beachtung der Porositätskennwerte in Tafel 6 bei den mittleren Umgebungsbedingungen (= II, Spalte 3, gemäß DAfStb-Nachbehandlungsrichtlinie [22]) für Außenbauteile in der Bundesrepublik Deutschland etwa folgende Betone geeignet wären:

- a) Für eine Carbonatisierungstiefe im Betonalter von drei Jahren von höchstens etwa 6 mm:
- Beton mit PZ 35 F, $w/z = 0,50$ und mindestens Nachbehandlung B,
 - Beton mit PZ 35 F, $w/z = 0,60$ und mindestens Nachbehandlung C,
 - Beton mit FAZ 35 F, $w/z = 0,60$ und mindestens Nachbehandlung C,
 - Beton mit HOZ 35 L, $w/z = 0,60$ und mindestens Nachbehandlung D.
- b) Für eine Carbonatisierungstiefe im Betonalter von drei Jahren von höchstens etwa 10 mm, auch Beton mit HOZ 35 L, $w/z = 0,60$ und mindestens Nachbehandlung C.

Diese Forderungen sind auch von dem Beton mit PZ 35 F, $w/z = 0,70$ und mindestens Nachbehandlung D erfüllbar. Er darf lt. DIN 1045 für Außenbauteile jedoch nicht verwendet werden, da der w/z -Wert die Grenze von 0,60 (früher 0,65) überschreitet.

4.5 Zusammenhang zwischen Porositätskennwerten und Frostwiderstand

Zur Beurteilung des Frostwiderstandes der Betone wurden je Betonart zwei Scheiben ($\varnothing = 15$ cm, $h = 5$ cm) bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln nach dem VDZ-Verfahren (siehe [23]) ausgesetzt. Dabei wurden der Gewichtsverlust, die dadurch bedingten Änderungen des dynamischen Elastizitätsmoduls und teilweise auch die dadurch eingetretenen Änderungen des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K bestimmt. In den Bildern 9, 10 und 12 sind der Gewichtsverlust, die Änderung des dynamischen Elastizitätsmoduls und der spezifische Permeabilitätskoeffizient K der untersuchten Betone in Abhängigkeit von der Anzahl der Frostwechsel aufgetragen. Aus den Bildern 11a und 11b geht der Zusammenhang zwischen dem Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln und dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K bzw. dem Porositätsfak-

tor P der Betone vor der Frostbeanspruchung hervor. Bild 13 zeigt die mit der Quecksilberpenetration ermittelte Porengrößenverteilung vor und nach 100 Frost-Tau-Wechseln für die Betone mit PZ 35 F, $w/z = 0,60$ und den Nachbehandlungen B und D.

Der Gewichtsverlust bei der Frost-Tauwechsel-Bbeanspruchung war — wie zu erwarten — für jede Betonart (Zement, w/z -Wert) um so größer, je schlechter die Nachbehandlung war (Bild 9). Besonders

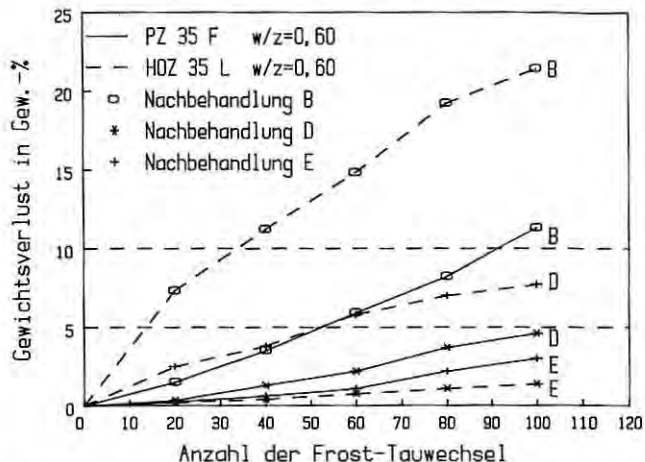


Bild 9 Gewichtsverlust von Beton mit $w/z = 0,60$ und verschiedenen Nachbehandlungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel

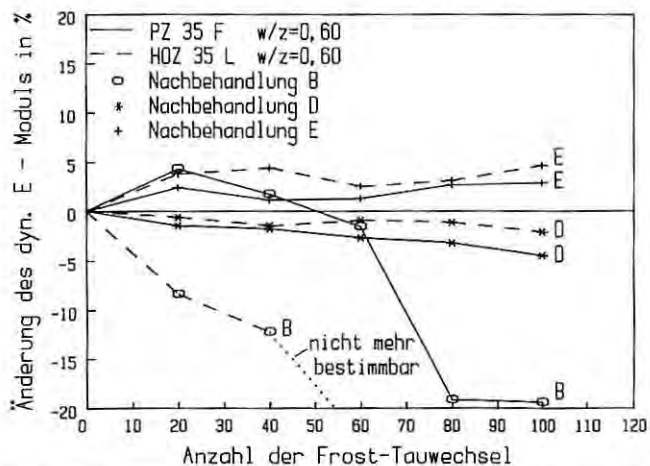


Bild 10 Änderung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Beton mit $w/z = 0,60$ und verschiedenen Nachbehandlungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel

ausgeprägt war dies beim untersuchten HOZ-Beton mit $w/z = 0,60$, dessen Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei der dafür nicht ausreichenden Nachbehandlung B mit 21,4 Gew.-% sehr groß, bei der sehr guten Nachbehandlung E aber mit am kleinsten war. Der Portlandzementbeton mit $w/z = 0,60$ besaß bei Nachbehandlung B mit einem Gewichtsverlust von 11,3 Gew.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ebenfalls keinen hohen Frostwiderstand. Der mit $w/z = 0,50$ hergestellte Portlandzementbeton wies bei allen dafür untersuchten Nachbehandlungen, d. h. auch bei der Nachbehandlung B, einen hohen Frostwiderstand auf (siehe Tafel 6, Beton 7/90, S. 301).

Das sich bei der Beurteilung des Frostwiderstandes mit dem Gewichtsverlust ergebende Verhalten spiegeln auch die Änderungen des dynamischen Elastizitätsmoduls während der Frost-Tau-Wechsel wider (Bild 10). Lediglich die Betone mit $w/z = 0,60$ und Nachbehandlung B zeigten nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei dem Portlandzement Z 35 F eine starke Abnahme des Elastizitätsmoduls von 19,4% und bei dem HOZ 35 L eine so starke Gefügelockerung, daß der Elastizitätsmodul nicht mehr bestimmt werden konnte. Bei allen übrigen auf Frostwiderstand geprüften Betonen wurden nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei den Nachbehandlungen B und D nur Elastizitätsmodulabnahmen bis zu etwa 5% und bei der Nachbehandlung E Elastizitätsmodulzunahmen bis zu etwa 5% festgestellt.

Wie die Bilder 11a und 11b zeigen, wird der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln mit wachsendem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und mit wachsendem Porositätsfaktor P zunehmend größer. Abgesehen vom HOZ-Beton mit Nachbehandlung D läßt sich der Zusammenhang durch eine Kurve mit nur geringen Abweichungen der Ergebnisse darstellen. Die Zunahme des Gewichtsverlustes mit zunehmendem K erstreckt sich für die untersuchten

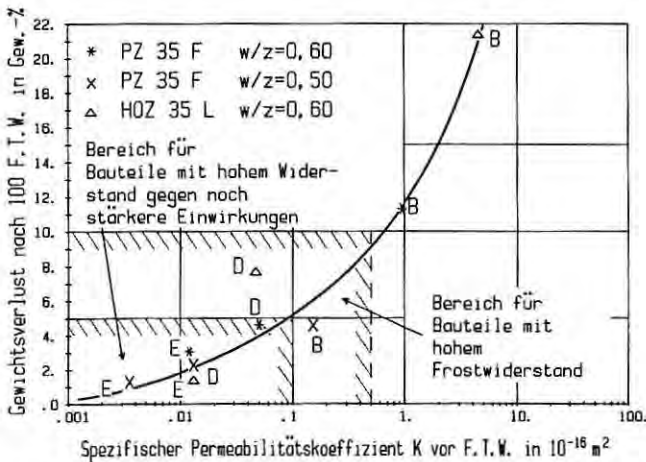


Bild 11a Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit vom spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K, ermittelt vor Einwirkung von Frost-Tau-Wechseln

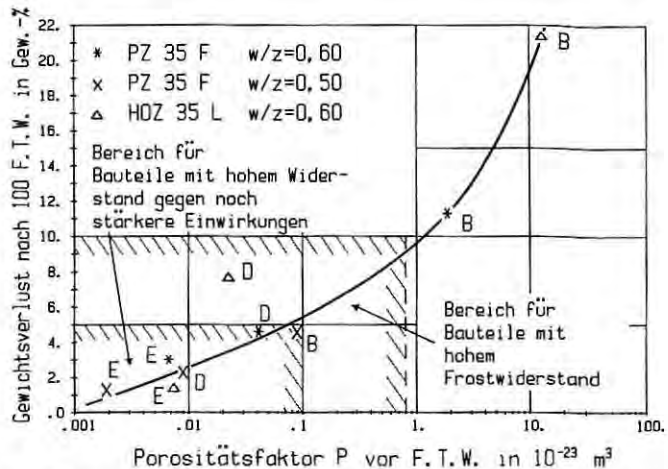


Bild 11b Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit vom Porositätsfaktor P, ermittelt vor Einwirkung von Frost-Tau-Wechseln

Betone über vier Dekaden von K und ist damit ausgeprägter als bei der Abhängigkeit von P, der für die Darstellung der Ergebnisse fünf Dekaden benötigt und daher besser differenziert.

Bei Zugrundelegen der Porositätskennwerte gemäß Tafel 3 und von Richtwerten für die Begrenzung des Gewichtsverlustes nach 100 Frost-Tau-Wechseln (etwa 10 Gew.-% für Außenbauteile, 7,5 Gew.-% für Beton mit hohem Frostwiderstand und 5 Gew.-% für noch stärker beanspruchte Betone; siehe auch Tafeln 5 und 6 in Beton 7/90, S. 300/301, sowie Bilder 11a und 11b) dürften von den untersuchten Betonen geeignet sein:

- Für Außenbauteile (s. auch Tafel 6, Zeile 2):
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,50, Nachbehandlungen B, D und E,
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,60, Nachbehandlungen D und E,
 Beton mit HOZ 35 L, w/z = 0,60, Nachbehandlungen D und E.
- Für Beton mit hohem Frostwiderstand (s. auch Tafel 6, Zeile 3):
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,50, Nachbehandlungen B, D und E,
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,60, Nachbehandlungen D und E,
 Beton mit HOZ 35 L, w/z = 0,60, Nachbehandlungen D und E.
- Für noch stärker beanspruchte Betone (s. auch Tafel 6, Zeile 4):
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,50, Nachbehandlungen B, D und E,
 Beton mit PZ 35 F, w/z = 0,60, Nachbehandlungen D und E,
 Beton mit HOZ 35 L, w/z = 0,60, Nachbehandlung E.

Zur weiteren Klärung dieses Sachverhaltes sind ergänzende Untersuchungen notwendig. Es ist außerdem anzumerken, daß der relativ hohe Gewichtsverlust des Hochofenzementbetons mit Nachbehandlung D ein Ausreißer sein muß. Die Betone mit der Nachbehandlung C und die FAZ-Betone, die wegen der Begrenzung des

Versuchsumfanges nicht mitgeprüft wurden, wären in dieses Schema noch einzuordnen.

Während mit Hilfe der Porositätskennwerte des Betons ohne vorherige Gebrauchsbeanspruchung die zu erwartende Größenordnung des Frostwiderstandes etwa abgeschätzt werden kann (Bilder 11a, 11b), weisen die Ergebnisse in Bild 12 für vier Portlandzementbetone — für die anderen Betone dürfte Entsprechendes gelten — darauf hin, daß der spezifische Permeabilitätskoeffizient K der Betone mit zunehmender Anzahl der Frost-Tau-Wechsel größer wird. K war nach 100 Frost-Tau-Wechseln für Beton mit $w/z = 0,60$ bei Nachbehandlung B um $1,55 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und bei Nachbehandlung D um $0,18 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ sowie für Beton mit $w/z = 0,50$ bei Nachbehandlung B um $0,86 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ und bei Nachbehandlung D um $0,15 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ größer als beim entsprechenden Beton ohne Frost-Tauwechsel-Belastung. Die in Bild 12 für die vier Betone eingetragenen Kurven verlaufen (Ordinate im logarithmischen Maßstab) nahezu geradlinig und parallel. Diese Ergebnisse bedeuten, daß in dem mit Hilfe der Sauerstoffpermeabilität erfaßten Porenbereich (siehe Bild 1, Beton 7/90, S. 298) durch die Frost-Tauwechsel-Belastung die größeren Poren leicht zunehmen.

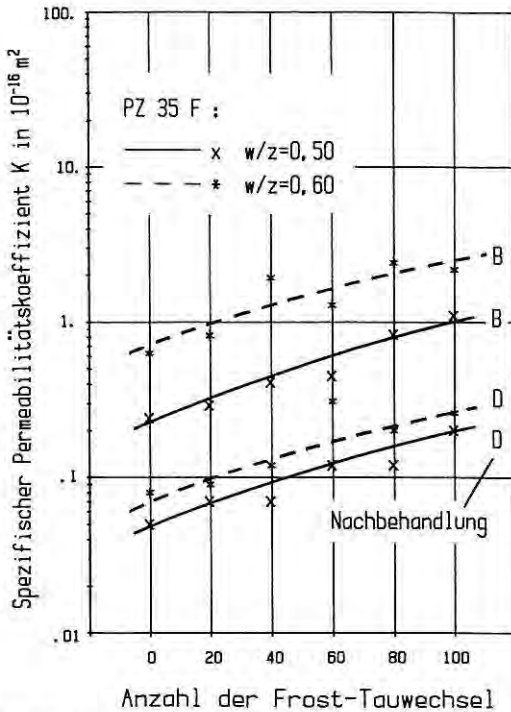


Bild 12 Spezifischer Permeabilitätskoeffizient K von Beton verschiedener Zusammensetzung und Nachbehandlung in Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel

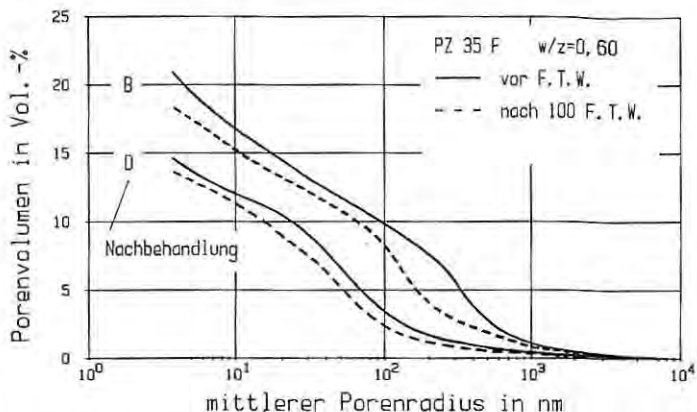


Bild 13 Porenvolumen von Beton mit $w/z = 0,60$ und verschiedenen Nachbehandlungen in Abhängigkeit vom Porenradius (Integrale Porenverteilungskurve)

Wie man aus Bild 13, das für die Betone mit PZ 35 F, $w/z = 0,60$ und den Nachbehandlungen B und D die mit Hilfe der Quecksilberpenetration vor und nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelte Porengrößenverteilung (Porensammenlinien) enthält, erkennen kann, verringert sich durch die 100 Frost-Tau-Wechsel in geringem Umfang das Gesamtporenvolumen des mit diesem Bestimmungsverfahren erfaßten Porenbereiches (siehe Bild 1). Gleichzeitig verschiebt sich das Maximum der differentiellen Porenverteilung zu den kleineren Poren hin. Diese Änderungen sind bei den Betonen mit der weniger guten Nachbehandlung B deutlich größer als beim Beton mit der guten Nachbehandlung D. Umfangreiche Frost-Tau-Wechsel führen durch die Aufweitung von Poren zu einer Verringerung des Mikroporengehaltes und zu einer Vergrößerung des Kapillarporengehaltes. Die Änderung der Porenkennwerte durch Frost-Tau-Wechsel ist jedoch bei einem jeweils sachgerecht hergestellten Beton (siehe auch die vorhergehenden Absätze dieses Abschnittes und Tafel 6) unbedeutend und daher nicht zu beachten.

5 Folgerungen für die Praxis

Die Untersuchungen haben ergeben, daß zwischen der Betonporosität und den für das Erreichen einer bestimmten Betonqualität wichtigsten Betondaten für Zusammensetzung und Einbau — dem w/z -Wert und der Nachbehandlung des Betons — ein sehr enger Zusammenhang besteht. Die am erhärteten Beton bestimmte Porosität ist, beurteilt an Größe, Anzahl und Verteilung der Poren, um so günstiger für den Beton, je kleiner der w/z -Wert und je besser die Nachbehandlung ist. Der Einfluß von w/z -Wert und Nachbehandlung auf die Verringerung der Betonporosität ist sehr groß und so wirksam, daß für das Erreichen einer bestimmten Porosität etwas weniger gute Werte der einen Einflußgröße in gewissen Grenzen durch besonders gute Werte der anderen Einflußgröße ersetzbar

sind. Das bedeutet, daß bei sehr sorgfältigem Vorgehen ein Beton geringer Porosität sowohl mit einem kleinen w/z -Wert und einer kürzeren Nachbehandlung als auch mit einem größeren w/z -Wert und einer sehr guten, entsprechend langen Nachbehandlung erreicht werden kann. Trotzdem ist aus baupraktischer Sicht die obere Begrenzung des w/z -Wertes in Abhängigkeit von den jeweiligen Einwirkungen und den dafür geforderten Betoneigenschaften unverzichtbar, weil eine sehr gute Nachbehandlung sehr aufwendig ist und trotz der vorliegenden Erkenntnisse in der Regel nicht durchgeführt wird und weil die Nachprüfung der Porosität des erhärteten Betons derzeit noch sehr aufwendig ist und keine Regelprüfung sein kann.

Da die Betonporosität jedoch auch vom Zement beeinflußt wird, ist es durchaus sinnvoll, bei Beton mit langsam erhärtendem Zement für das Erreichen bestimmter Betoneigenschaften und das Nichtüberschreiten entsprechender Porositätsgrenzwerte entweder einen kleineren w/z -Wert oder eine bessere Nachbehandlung als für Beton mit schneller erhärtendem Zement vorzusehen, was im Grundsatz in der Nachbehandlungsrichtlinie [22] für Außenbauteile nach DIN 1045 bereits verankert ist. Natürlich muß dann sichergestellt werden, daß dabei der kleinere w/z -Wert oder die bessere Nachbehandlung auch angewendet wird, da sonst die Betonqualität insbesondere der oberflächennahen Schichten der Betonbauteile wesentlich beeinträchtigt sein kann. Aus dem gleichen Grunde und weil größere Prüfkörper den Untersuchungsaufwand um ein Vielfaches vergrößert hätten, wurden bei den Untersuchungen auch bewußt kleinere Prüfkörper verwendet, deren Dauerhaftigkeitsverhalten dem der oberflächennahen Schichten der Betonbauteile besser entspricht.

Für die Beurteilung der Porosität des erhärteten Betons haben sich bei den vorliegenden Untersuchungen als Porositätskennwerte sowohl der spezifische Permeabilitätskoeffizient K (bestimmt mit O_2 -Permeabilität) und das Maximum M der differentiellen Porengrößenverteilung (bestimmt mit Hg-Penetration) als auch der mit Hilfe der beiden vorgenannten Porositätskennwerte nach der Gleichung $P = K \cdot M$ errechnete Porositätsfaktor P als geeignet erwiesen. Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse sollten die in Tafel 6 für bestimmte Gebrauchseinwirkungen (abgestimmt auf Größt- w/z -Werte und Mindestnachbehandlungszeiten nach DIN 1045 und Nachbehandlungsrichtlinie [22]) vorgeschlagenen Grenzwerte für die Porositätskennwerte, und zwar entweder für K und M oder für P , nicht überschritten werden.

Zwischen jedem der drei Porositätskennwerte und einigen wichtigen Gebrauchseigenschaften des erhärteten Betons (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Chlorideindringtiefe, Carbonatisierungstiefe und Frostwiderstand) ergab sich ein enger Zusammenhang. Da von den eingetragenen Kennwerten nur der Porositätsfaktor P den Mikrokapillarporen- und den Kapillarporenbereich weitergehend berücksichtigt, war sein Zusammenhang mit den Gebrauchseigenschaften sehr viel enger als für K und M . Für den Gebrauchsbereich hoher Dauerhaftigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen war der Zusammenhang zwischen P und den Gebrauchseigenschaften für alle untersuchten Betone weitgehend durch eine mathematisch beschreibbare Kurve je Eigenschaft darstellbar, soweit dabei nicht wei-

tere Einflüsse zu berücksichtigen sind. Als ein solch weiterer Einfluß auf den Zusammenhang zwischen den Porositätskennwerten und einigen Gebrauchseigenschaften — der Chlorideindringtiefe und der Carbonatisierungstiefe — erwies sich erwartungsgemäß die Zementart. Für den dafür ebenfalls engen Zusammenhang zwischen dem Porositätsfaktor P und den Gebrauchseigenschaften ergaben sich jedoch Sonderkurven bei der Chlorideindringtiefe sowohl für die PZ-Betone als auch für die FAZ- und HOZ-Betone und bei der Carbonatisierungstiefe sowohl für die PZ- und FAZ-Betone als auch für die HOZ-Betone.

Darüber hinaus ist zu den Untersuchungsergebnissen und ihrer Auswertung derzeit noch einschränkend anzumerken, daß mit diesen Untersuchungen nur die grundsätzliche Möglichkeit, den Beton und seine Gebrauchseigenschaften mit seinen Porositätskennwerten zu charakterisieren, bestätigt wurde, daß aber zur Anwendung dieser Erkenntnisse und zur Festlegung von gesicherten und allgemeingültigen Grenzwerten für Porositätskennwerte zur Charakterisierung von Beton und seinen Gebrauchseigenschaften noch weitere Untersuchungen notwendig sind. In diese Untersuchungen müßten u. a. weitere Zemente, Betonzuschläge anderer Art und Zusammensetzung insbesondere im Feinbereich, Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel einbezogen werden sowie andere Erährungsbedingungen, die sich nicht nur auf 20 °C und 65% relative Luftfeuchtigkeit und vergleichsweise kleine Prüfkörper abstützen. Dabei wäre u. a. auch der Frage nachzugehen, ob z. B. für die Porositätskennwerte von Luftporenbeton andere Grenzwerte in Frage kommen.

Für eine Anwendung dieser Erkenntnisse sind auch noch Fragen der Prüfung zu klären. Wenn die Porositätskennwerte zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton an gesondert hergestellten Prüfkörpern bestimmt werden sollen, muß u. a. auch dafür gesorgt werden, daß Verdichtung, Nachbehandlung und Lagerung dieser Prüfkörper bei gleicher Betonzusammensetzung zu ähnlichen Betonqualitäten führen wie bei den oberflächennahen Schichten des Bauteilbetons. Bei einer langen Feuchthaltung dieser gesondert hergestellten Prüfkörper oder bei einer Wasserlagerung bis zur Prüfung, die in Zukunft für alle Prüfkörper vorgesehen ist, würden diese Prüfungen keinen Aufschluß über die Qualität der oberflächennahen Schichten der Betonbauteile zulassen.

6 Zusammenfassung

Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie über den Einfluß der Porosität und der Durchlässigkeit des erhärteten Betons auf seine Gebrauchseigenschaften durchgeführten Untersuchungen ergaben folgendes:

6.1 Zur Beschreibung der Porosität des erhärteten Betons erwies sich der Porositätsfaktor P — das Produkt aus dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und dem Maximum M der differentiellen Porenverteilung — als besonders geeignet, da er Mikrokapillarporen und Kapillarporen berücksichtigt. Für eine orientierende Aussage reicht der spezifische Permeabilitätskoeffizient K aus.

6.2 Die Porosität des erhärteten Betons wird im wesentlichen vom w/z -Wert und von der Nachbehandlung bestimmt. Vorwiegend im

Bereich ungünstiger Nachbehandlung ist unter sonst gleichen Verhältnissen die Porosität von Beton mit langsamer erhärtendem Zement etwas größer als die von Beton mit schneller erhärtendem Zement. Dieser Unterschied kann jedoch durch eine längere Nachbehandlung in gewissen Grenzen ausgeglichen werden.

6.3 Zwischen dem Porositätsfaktor P und einigen Gebrauchseigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul, Chlorideindringtiefe, Carbonatisierungstiefe und Frostwiderstand) des erhärteten Betons ergab sich ein enger Zusammenhang, der im Bereich ausreichender Dauerhaftigkeit gegenüber äußeren Einwirkungen durchweg durch nur eine Kurve für alle untersuchten Betone darstellbar ist.

6.4 Für einige Gebrauchseigenschaften (Chlorideindringtiefe, Carbonatisierungstiefe) war ihr Zusammenhang mit der Porosität erwartungsgemäß auch von der Zementart abhängig.

6.5 Mit Hilfe des Porositätsfaktors P war sowohl Beton mit bestimmtem w/z-Wert und bestimmter Nachbehandlung als auch Beton mit einer bestimmten Gebrauchseigenschaft — allerdings mit der zusätzlichen Beachtung von 6.4 — charakterisierbar.

6.6 Zur Klärung der für eine Anwendung noch offenen Fragen und zur Festlegung allgemeingültiger Grenzwerte für die Porositätskennwerte von Beton mit bestimmten Gebrauchseigenschaften sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

SCHRIFTTUM

- [1] Gräf, H.: Über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluß auf Gebrauchseigenschaften von Beton. Dissertation Universität Essen, 1988
- [2] Gräf, H., und H. Grube: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. *beton* 36 (1986), H. 5, S. 184/187; H. 6, S. 222/226
- [3] Powers, T. C., L. E. Copeland, J. C. Hayes and H. M. Mann: Permeability of Portland Cement Paste. *Jour. Am. Con. Inst.* 26 (1954), pp. 285/298, PCA Bulletin Nr. 53 (1955)
- [4] Zagar, L.: Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 26 (1955), H. 12, S. 777/782
- [5] Schwiete, H. E., und U. Ludwig: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. *Tonindustriezeitung*, 90 (1966), H. 12, S. 562/574
- [6] Lawrence, C. D.: Measurements of permeability. *Cement and Concrete Association*, pp. 443 (1985)
- [7] Schwiete, H. E., und H. J. Böhme: Bestimmung der effektiven Porosität durch Gasdiffusionsmessungen. *ZKG* 23 (1970), H. 3, S. 125/134
- [8] Lawrence, C. D.: Transport of oxygen through concrete. *British Ceramic Society: „Chemistry and Chemically Related Properties of Cement“*, London, April 1984
- [9] Seishi, G., and D. M. Roy: Diffusion of ions through hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 11 (1981), pp. 751/757
- [10] Modry, S., M. Savala and J. van Brakel: Thematic Bibliography of Mercury Porosimetry. *Powder Technology*, 29 (1981), pp. 13/43

- [11] Van Brakel, J., S. Modry and M. Savala: Mercury Porosimetry: State of the Art. *Powder Technology*, 29 (1981), pp. 1/12
- [12] Drake, L. C.: Pore Size Distribution in Porous Materials. Application of High Pressure Mercury Porosimeter to Cracking Catalysts. *Ind. and Engineering Chemistry* Vol. 41, No. 4 (1949), pp. 780/785
- [13] Winslow, D. N., and S. Diamond: A Mercury Porosimetry Study of the Evolution of Porosity in Portland Cement. *Jour. of Materials* 5 (1970), Nr. 3, pp. 564/585
- [14] Schneider, U., und H. J. Herbst: Porositätskennwerte von Beton. *TIZ International, Powder Magazine*, Vol. 113, No. 4 (1989), S. 311/321
- [15] Powers, T. C., and T. L. Brownard: Studies of the Physical Properties of HCP. *Jour. Am. Conc. Int.* 1946—47, *PCA Bulletin* 22 (1948), Part 3, Theoretical Interpretation of Adsorption Data, Part 4. The Thermodynamics of Adsorption
- [16] Splittgerber, H.: Sorptionsmessungen an erhärtetem Zementstein. Diplomarbeit TU München, 1965
- [17] Setzer, M. J.: Oberflächenenergie und mechanische Eigenschaften des Zementsteins. Dissertation TU München, 1972
- [18] Gertis, K., und H. Werner: Die Problematik der Porenanalyse von Baustoffen. *DAfStb*, H. 258 (1976)
- [19] Stippel, H.: Porosität der Baustoffe des Bauwesens. *Bau* (1985), H. 5, S. 257/260
- [20] Setzer, M. J.: Zum Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluß auf das mechanische Verhalten des Betons. *Zement und Beton* (1975), H. 85/86, S. 29/34
- [21] Gräf, H., und H. Grube: Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit. *beton* 36 (1986), H. 11, S. 426/429; H. 12, S. 473/476
- [22] Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton (Fassung Feb. 84). Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin 1984
- [23] Siebel, E.: Laboratory investigations of the frost resistance of concrete and their correlation with field performance. *Proceedings of the Rilem Seminar on the Durability of Concrete Structure under Normal Outdoor Exposure*, 26.—29.5.1984, Hannover