

Einfluß der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons auf seine Gasdurchlässigkeit

Von Herbert Gräf und Horst Grube, Düsseldorf

Übersicht

Die Gasdurchlässigkeit von vollständig verdichtetem und rissefreiem Beton, die bei einem bestimmten Austrocknungszustand ermittelt wird, dient zur Charakterisierung der sogenannten offenen Porosität. Eine jahrzehntelange Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Beton erfordert in der Betonrandzone eine geringe offene Porosität, die sich durch Bestimmung der Gasdurchlässigkeit an gesondert hergestellten oder aus Bohrkernen gewonnenen Scheiben von 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe relativ einfach überprüfen läßt. In dem Umfang nach lediglich orientierenden Untersuchungen wurden der Einfluß des Wasserzementwerts, der Zementart und der Nachbehandlung auf den Permeabilitätskoeffizienten und den Diffusionskoeffizienten des Betons für Sauerstoffgas bestimmt sowie Zusammenhänge zum Carbonatisierungsfortschritt und zur Festigkeit untersucht. Die Permeabilitätskoeffizienten von Betonen mit niedrigem Wasserzementwert und langer Nachbehandlung sind um zwei bis drei Zehnerpotenzen kleiner als die von Betonen mit hohem Wasserzementwert und kurzer Nachbehandlung. Während bei dünnen Bauteilen aus Beton die Gasdurchlässigkeit der oberflächennahen Schicht durch mangelnde Nachbehandlung stark ansteigt, insbesondere bei Verwendung langsam erhärtenden Zements, sind dickere Bauteile unter sonst gleichen Bedingungen weniger nachbehandlungsempfindlich.

1. Einleitung

Die offene Porosität des Betons in der Randzone eines Bauteils beeinflusst in hohem Maße z. B. den Frostwiderstand, den Widerstand gegen betonaggressive Medien und den dauerhaften Korrosionsschutz der Bewehrung. Letzteren erreicht man durch eine ausreichend dicke und dichte Betondeckung, deren hochalkalische Porenwasserlösung zur Bildung einer Passivschicht auf dem Bewehrungsstahl führt und diese stabil erhält. In carbonatisiertem Beton kann die Passivschicht instabil werden und der Bewehrungsstahl bei gleichzeitiger Anwesenheit von Sauerstoff und Feuchtigkeit rosten.

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des erhärteten Zementsteins im Beton entscheiden über den Diffusionswiderstand, den die Betondeckung dem eindringenden Kohlendioxid entgegen-

setzt, und damit über den Korrosionsschutz für die Bewehrung. Hierbei zählen sowohl die Fähigkeit des Zementsteins, Kohlendioxid chemisch zu binden, als auch eine möglichst geringe offene Porosität, die durch niedrigen Wasserzementwert, vollständige Verdichtung und hohen Hydratationsgrad erreicht wird.

Bei beobachteten Fällen unzureichender Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen im Freien handelte es sich in der Regel nicht um Fragen der Festigkeit des Betons als mittlerer Eigenschaft des Betonquerschnitts, sondern um die Beständigkeit der rd. 3 bis 5 cm dicken Randzone und um ihre korrosionsschützende Wirkung gegenüber dem Bewehrungsstahl [1]. Dies führte zu einem verstärkten Interesse an der Gasdurchlässigkeit und an der Porenstruktur der oberflächennahen Betonschicht. Während die Druckfestigkeit des normgelagerten Gütewürfels und die Festigkeit des Bauwerkbetons im Inneren eines Bauteils durchaus in vorherbestimmbarem Verhältnis zueinander stehen [2, 3], kann die Art und Dauer der Nachbehandlung bezüglich der Qualität des Betonrandbereichs eine dem Wasserzementwert des Betons gleichwertige Einflußgröße darstellen [4]. Dieser Erkenntnis trägt z. B. die Nachbehandlungsrichtlinie [5] Rechnung. Im übrigen gehört die Herstellung dauerhafter Betonbauwerke zum Stand der Technik [6 bis 10], wobei die Durchlässigkeit des Betons wesentlich durch den Wasserzementwert charakterisiert wird. Der Umfang notwendig werdender Instandsetzungsmaßnahmen an Außenbauteilen zeigt jedoch, daß grundlegende Erkenntnisse und daraus abgeleitete Vorschriften in der Praxis des Stahlbetonbaus nicht immer ausreichend beachtet werden [11 bis 14].

Hierzu gehört z. B. die Korrosion des Bewehrungsstahls infolge unzureichender Dicke der Betondeckung der Bewehrung, unzureichender Betonzusammensetzung (insbesondere zu hohen Wasserzementwerts), unzureichender Verdichtung des Frischbetons, unzureichender Nachbehandlung der Betonbauteile. In diesem Fall werden die in der Zusammensetzung des Frischbetons angelegten Eigenschaften im Randbereich des Festbetons nicht erreicht, weil der Zement infolge vorzeitiger Austrocknung nicht ausreichend hydratisieren kann.

Alle die Korrosion des Bewehrungsstahls fördernden Stoffe, z. B. Kohlendioxid, Sauerstoff und Wasser, gegebenenfalls auch Chloride, gelangen am leichtesten in den Beton über durchgehende „offene“ Poren, die so groß sind, daß sich die Moleküle oder Ionen frei durch die Poren bewegen können. Die „offene Porosität“ ist im wesentlichen identisch mit den sogenannten Kapillarporen, die im festen Beton als Teil des ursprünglich im Frischbeton mit Wasser gefüllten Volumens verbleiben. Die Entwicklung der Porosität im Zementstein und Beton als Gelporenraum und Kapillarporenraum wird z. B. in [15 bis 21] dargestellt. Der Durchmesser der Kapillarporen im Beton beträgt rd. 10^{-1} bis 10^{-4} mm [22]. Will man ihren Anteil im Beton verringern, so hilft neben einer besonders guten Kornabstufung aller Feststoffe bis in den zementfeinen Bereich hinein insbesondere die Wahl eines niedrigen Wasserzementwerts von Anfang an (siehe Bild 1, Ordinate). Außerdem verringert sich der Kapillarporenraum bei vorgegebenem Wasserzementwert zunehmend durch Ausfüll-

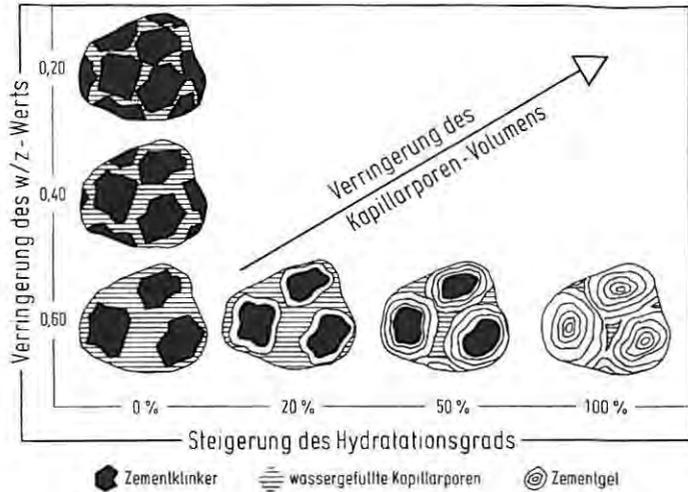


Bild 1 Modelldarstellung für die Verringerung des Kapillarporenraums durch
 – Verringerung des w/z-Werts (Ordinate)
 – Steigerung des Hydratationsgrads (Abszisse)
 (nach Wischers)

lung mit Hydratationsprodukten (s. Bild 1, Abszisse). Dieser Vorgang findet allerdings nur in wassergefüllten Poren statt, weshalb eine feuchte oder wasserrückhaltende Nachbehandlung wichtig ist.

In [23] werden die Transportmechanismen und verschiedene Durchlässigkeitsprüfungen am Beton dargestellt. Waren anfänglich die Untersuchungen auf die Wasserdurchlässigkeit von Zementstein und Beton konzentriert, z. B. [24 bis 27], so erstrecken sich die Untersuchungen heute zunehmend auf die Gasdurchlässigkeit und auf die Diffusion in flüssiger und gasförmiger Phase in Mörtel und Beton [28 bis 32] und in diesem Zusammenhang auch auf die Carbonatisierung [33 bis 37]. Da Carbonatisierungsversuche sehr lange Zeit erfordern, kurzzeitig prüfbare Materialkennwerte jedoch das eigentliche Ziel zur Voraussage der Dauerhaftigkeit bestimmter Bauteile sind, wurden verstärkt Gasdurchlässigkeits- und Gasdiffusionsversuche an Beton durchgeführt in der Absicht, eine Korrelation zum Carbonatisierungsfortschritt in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung und Nachbehandlung herzustellen [23, 38 bis 46]. Dies ist auch ein wesentliches Ziel des nachstehenden Beitrags, in dem als Maß für den offenen Porenraum die Gasdurchlässigkeit in Form des Permeabilitätskoeffizienten K [m^2] und des Diffusionskoeffizienten D [m^2s^{-1}] ermittelt wurde. K ist ein Maß für die Gasdurchlässigkeit einer Probe unter einem absoluten Druckgefälle, D ist ein Maß für die Durchlässigkeit bei einem Partialdruckgefälle des Prüf-gases, das sich aufgrund unterschiedlicher Konzentration ergibt.

Die Verfahren zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit und der Gasdiffusion spielen eine wesentliche Rolle in der keramischen Industrie, weshalb die Meß- und Auswerteverfahren überwiegend aus

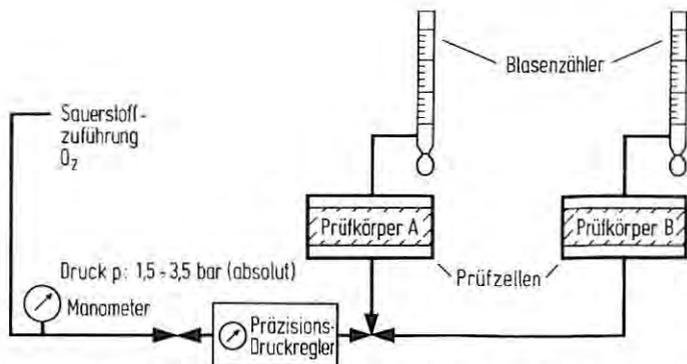


Bild 2 Funktionsskizze des Meßgeräts zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit

diesem Bereich stammen [47, 48]. Die im vorliegenden Bericht verwendeten Verfahren zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit und ihre Anwendungsbereiche sowie die Auswahl des Prüfgases Sauerstoff werden in [49] ausführlich beschrieben und diskutiert. Bild 2 zeigt nochmals die Funktionsskizze des Meßgeräts zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit. Die Prüfungen wurden hier an Betonproben durchgeführt, deren Größe und Zusammensetzung gegebenenfalls auch eine Übertragung auf die Prüfung von Bauwerksbeton ermöglichen. Dem gesondert hergestellten scheibenförmigen Prüfkörper mit Durchmesser 15 cm, $h = 5$ cm liegt die Modellvorstellung zugrunde, daß seine Dicke h zwei Betondeckungen von je 2,5 cm umfaßt, wobei beide Kreisflächen gleichartig nachbehandelt werden. Um einen Bezug zu Beton aus Bauteilen herzustellen, wurden auch Bohrkern $\varnothing 15$ cm aus dickeren Betonwänden untersucht, die sowohl im Klimaraum als auch im Freien gelagert wurden.

Finanzielle Gründe zwangen dazu, die Zahl der Versuchskörper für einen angemessenen Umfang zu beschränken. Da die Zahl der Versuchsparameter jedoch sehr groß ist, haben die Aussagen zu einigen Einflußgrößen bislang nur einen orientierenden Charakter; eine Verdichtung der Ergebnisse durch weitere Untersuchungen ist vorgesehen.

Die Versuchsergebnisse geben Aufschluß über die Auswirkungen der Betonzusammensetzung und der Nachbehandlung auf Werkstoffkennwerte, wie den spezifischen Permeabilitätskoeffizienten und den spezifischen Diffusionskoeffizienten gegenüber Sauerstoff, sowie auf den Carbonatisierungsfortschritt und die Druckfestigkeit. Damit wird deutlich, wie empfindlich die Durchlässigkeitskennwerte im Oberflächenbereich von Betonbauteilen auf Veränderungen des Wasserzementwerts und der Nachbehandlung reagieren. Mit der relativ einfach durchzuführenden Prüfung der Gasdurchlässigkeit eröffnet sich die Möglichkeit, sowohl bei der Eignungsprüfung an gesondert hergestellten Prüfkörpern als auch an Bohrkernen aus Bauwerken zuverlässig abschätzen zu können, wie die Qualität des Betons hinsichtlich seiner Gasdurchlässigkeit als einer wichtigen Einflußgröße auf die Dauerhaftigkeit zu beurteilen ist.

Tafel 1 Übersicht über die hergestellten Betone und einige Versuchsergebnisse

Betonsorte, Versuchs- bezeich- nung	Zementart u. -festig- keits- klasse	Zement- gehalt kg/m ³	Wasser- zement- wert w/z	Ausbreit- maß a cm	LP-Ge- halt Vol.-%	Frisch- betonroh- dichte kg/dm ³	Festbetonroh- dichte kg/dm ³	Druckfestig- keit an 15-cm-Würfeln N/mm ²			Spezif. Permeabilitätskoeffizient K der Scheiben \varnothing 15 cm in 10^{-16} m ² Höhe der Scheibe cm	Nachbehandlungsart								
								3 d	7 d	28 d		B (B*)			C (C*)			D (D*)		
												1 Einzelwerte	2 Mittel		1 Einzelwerte	2 Mittel		1 Einzelwerte	2 Mittel	
M 1	PZ 35 F (Za)	337	0,50	38	1,7	2,37	2,36	30	37	45	5	0,47	0,54	0,51	0,012	0,028	0,020	0,012	0,014	0,013
M 2 a b		300	0,60	44 44	1,1 n.b.	2,36 2,34	2,36 2,34	20 21	27 27	33 37	5	1,32 0,68	1,60 1,01	1,46 0,84	0,29 0,13	n.b. 0,11	0,29 0,12	0,078 0,023	n.b. 0,017	0,078 0,020
M 3		271	0,70	48	1,2	2,33	2,33	15	22	28	5	9,74	5,41	7,58	1,09	1,16	1,12	0,100	0,094	0,097
M 4		240	0,80	51	1,2	2,34	2,34	7	14	23	5	16,2	10,3	13,2	12,5	14,7	13,6	0,50	1,86	1,18
M 5	HOZ 35 L (Zb)	300	0,60	44	1,3	2,34	2,33	18	25	39	5	4,63	4,42	4,52	0,94	1,04	0,99	0,047	0,046	0,046
M 6 f k	PZ 35 F (Za)	300	0,60	44	2,0	2,36	2,34	n.b.	n.b.	36	5	1,1 1,3	1,4 2,6	1,3 2,0	0,22 0,19	0,25 0,26	0,24 0,23	0,048 0,064	0,12 0,035	0,084 0,050
M 7 f k	HOZ 35 L (Zc)	300	0,60	41	1,3	2,36	2,34	n.b.	n.b.	34	5	5,2 2,6	6,7 5,1	6,0 3,9	0,55 0,48	0,62 0,52	0,59 0,50	0,13 0,042	0,066 0,050	0,098 0,046

2. Umfang und Durchführung der Versuche

2.1 Allgemeines

Hergestellt wurden 6 verschiedene Betone (siehe Tafel 1), und zwar: M1 bis M4 mit Zement Za (PZ 35 F) und den Wasserzementwerten $w/z = 0,50; 0,60; 0,70$ und $0,80$,

M5 mit Zement Zb (HOZ 35 L mit etwa 36 % Hüttensandgehalt) und $w/z = 0,60$ und

M7 mit Zement Zc (HOZ 35 L mit etwa 61 % Hüttensandgehalt) und $w/z = 0,60$.

Beton M6 ist in seiner Zusammensetzung identisch mit Beton M2.

Beton M2 wurde außerdem an zwei zu verschiedenen Zeiten hergestellten Mischungen untersucht (M2 a, M2 b). Die Indices f und k an den Betonen M6 und M7 bedeuten, daß die Prüfkörper im Freien unter Dach (f) bzw. im Klimaraum bei $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{ r. F.}$ (k) nachbehandelt wurden.

Alle Betone haben ungefähr gleichen Zementleimgehalt und wurden mit Zuschlag aus Rheinsand und -kies der gleichen Sieblinie im Bereich A_{16}/B_{16} hergestellt. Die Betone wurden in einem Zwangsmischer rd. 2 Minuten nach Zugabe aller Stoffe gemischt. Angewendet wurden drei Nachbehandlungsarten (siehe Tafel 2): B (kurz), C (mittel) und D (lang).

Tafel 2 Nachbehandlung der Probekörper bis zur Prüfung

Nachbehandlungsart	Lagerungsart und -dauer bei 20°C bis zur Prüfung der Permeabilität		Prüfalter Tage	Weitere Lagerung bis zum Alter von 1 Jahr	Weitere Lagerung bis zum Alter von rd. 1,5 Jahren	
B („kurz“)	41 d Klimaraum 65 % r.F. ¹⁾		42	Klimaraum $20^{\circ}\text{C}/65\% \text{ r.F.}$	Lagererraum $20^{\circ}\text{C}/\approx 55\% \text{ r.F.}$	
C („mittel“)	1 d konserv. in Schalung	2 d konserv. in Folie	46 d Klimaraum 65 % r.F. ¹⁾			49
D („lang“)		27 d konserv. in Folie	28 d Klimaraum 65 % r.F. ¹⁾			56

¹⁾ Mantelfläche der Scheiben konserviert mit Gummimanschette, Schmalseiten der Balken konserviert mit Acrylanstrich

2.2 In Schalung hergestellte Prüfkörper

Von den Betonen M1 bis M5 wurden je Betonzusammensetzung und je Nachbehandlung zwei Betonscheiben von 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe zur Untersuchung der Gasdurchlässigkeit hergestellt. In der Regel wurde der spezifische Permeabilitätskoeffizient K [m^2] gegenüber Sauerstoffgas bestimmt, vergleichsweise jedoch auch der spezifische Diffusionskoeffizient D [$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$].

Die Carbonatisierungstiefe der Betone M1 bis M5 wurde an Balken $50 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ gemessen, die wie die Scheiben nachbehandelt wurden. Außerdem wurde die Carbonatisierung im Alter von rd. 1,5 Jahren an einem Teil der Betonscheiben gemessen.

Die Druckfestigkeit wurde im Alter von 3, 7 und 28 Tagen an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge ermittelt sowie im Alter von rd. 1,5 Jahren auch an Kleinbohrkernen mit 5 cm Durchmesser und 5 cm Höhe aus den Betonscheiben. Die Würfel lagerten bis zur Prüfung in Folie. Die Nachbehandlung für die Scheiben und Balken ist in Tafel 2 angegeben. Die zylindrischen Mantelflächen der Scheiben waren während der Lagerung mit einer Gummimanschette abgedichtet, um eine gleichmäßige Austrocknung senkrecht zu den Prüfflächen zu erreichen. Entsprechend waren die Balken an den Schmalseiten mit Acryllack beschichtet.

Da die dünnen Betonscheiben bei gleicher Nachbehandlung der Oberflächen zweifellos schneller austrocknen als die Randzonen eines dickeren Betonbauteils, wurde in einem Orientierungsversuch an Beton M2 geprüft, ob sich der Einfluß der Nachbehandlung auch an den Stirnflächen von 30 cm hohen Zylindern mit 15 cm Durchmesser im erwarteten Maß zeigt. Dazu wurden die Stirnflächen zweier Zylinder entsprechend B und D nachbehandelt, während die Mantelflächen mit Folie konserviert wurden. Beim Absägen der Scheiben wurde der Beton jedoch befeuchtet, so daß die Scheiben bis zum Prüfalter von rd. 60 Tagen bei $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r. F.}$ im Klimaraum nachgelagert werden mußten.

2.3 Prüfkörper aus größeren Betonbauteilen

Weiterhin wurde der Einfluß dickerer Bauteile auf die Gasdurchlässigkeit der Randzone an wandförmigen Probekörpern untersucht, die so geschalt und wärmedämmend waren, daß die Entwicklung der Hydratationswärme und die Austrocknungsbedingungen den Verhältnissen an einer 40 cm dicken Betonwand entsprachen. Von den in Bild 3 dargestellten Wänden wurden insgesamt 4 Stück hergestellt, je zwei mit PZ 35 F (Beton M6) und HOZ 35 L (Beton M7), Wasserzementwert $w/z = 0,60$. Zwei der Wände mit Beton M6 und Beton M7 wurden im Klimaraum gelagert (k), zwei Wände im Freien unter Dach (f). Die Schalung an der Vorderseite wurde nach 1, 3 und 30 Tagen entfernt (Nachbehandlung B*, C* und D*). Von der vorderen Schalfläche wurden je 4, von den übrigen Bereichen je 2 gleiche Scheiben für die Prüfung der Gasdurchlässigkeit gewonnen (siehe Bild 3). Die Nachbehandlung (B*, C* und D*) der aus Bohrkernen gewonnenen Scheiben $\varnothing 15 \text{ cm}$, $h = 5 \text{ cm}$ weicht von B, C, D auf Tafel 2 in den nachfolgenden Punkten ab:

– Die Temperaturerhöhung gegenüber der Frischbetontemperatur von rd. 20°C betrug im Wandbauteil im Alter von rd. 1 Tag $\Delta t \approx 14^\circ\text{C}$ (im Freien) und $\Delta t \approx 18^\circ\text{C}$ (im Klimaraum) bei Beton M6 sowie $\Delta t \approx 5^\circ\text{C}$ (im Freien) und $\Delta t \approx 9^\circ\text{C}$ (im Klimaraum) bei Beton M7. Im Klimaraum herrschten $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r. F.}$, im Freien zu dieser Zeit rd. $10 \dots 15^\circ\text{C}/80\% \text{ r. F.}$ Die austrocknende Wirkung der Umgebungsluft wird hier im Betonalter von 1 Tag nicht so sehr von ihrer relativen Feuchte als vielmehr vom Temperaturunterschied zum Bauteil

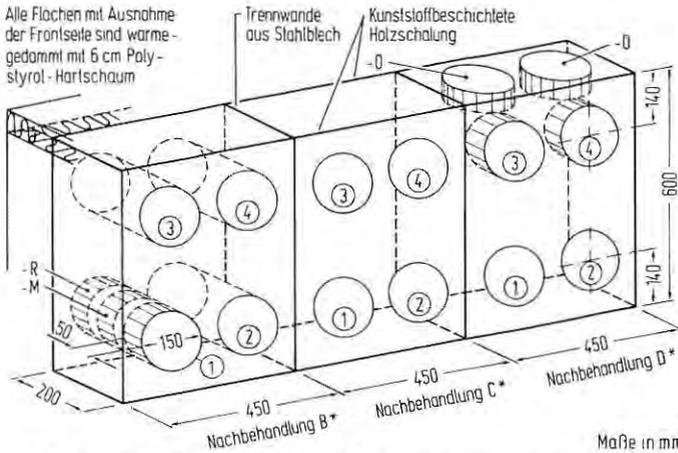


Bild 3 Aufbau der Wandschalung und Lage der entnommenen Bohrkern

bestimmt und gegebenenfalls erhöht. Dies ist der in der Praxis meist vorliegende Fall für massive Bauteile und solche aus frühhochfestem Beton.

– Die Scheiben aus den Wänden wurden aus Bohrkernen im Alter von 30 Tagen hergestellt. Die Probekörper wurden dabei allseits rd. 3 Stunden lang befeuchtet. Sie wurden danach mit der Gummimanschette umgeben und bis zur Prüfung 30 bis 40 Tage lang im Klimaraum bei 20°C/65 % r. F. gelagert, um einen mit den vorangehenden Versuchen vergleichbaren Austrocknungszustand zu erzielen.

– Auf die Scheiben aus den Wänden wirkt die Austrocknung nach dem Entfernen der Schalung nur einseitig. Dementsprechend können die Scheiben aus Bohrkernen geringere Gasdurchlässigkeiten aufweisen als die gesondert hergestellten Prüfkörper.

– Die Austrocknung der Betonoberfläche in den Wänden wird bei gleichem Entschalungszeitpunkt geringer sein als bei den gesondert hergestellten Scheiben, weil eine größere Feuchtigkeitsreserve aus dem Inneren der Wand zur Verfügung steht.

Um den Einfluß des dickeren Bauteils auf die Gasdurchlässigkeit des Betons der Randzone deutlich werden zu lassen, wurden aus den Betonen M6 und M7 je 6 Scheiben \varnothing 15 cm, h = 5 cm gesondert in Schalung hergestellt und auf den Wänden im Freien bzw. im Klimaraum gelagert. Dabei waren je 2 dieser Scheiben 1, 3 und 30 Tage lang konserviert in Folie. Im Betonalter von 30 Tagen wurden alle Scheiben im Klimaraum bei 20°C/65 % r. F. bis zur Prüfung der Gasdurchlässigkeit im Alter von rd. 60 Tagen gelagert. Die Nachbehandlung der gesondert hergestellten Scheiben aus den Betonen M6 und M7, die ständig im Klimaraum gelagert wurden (k), war damit die gleiche wie bei den Betonen M2 und M5 (siehe Tafel 2); im Freien richtete sich ihre Temperatur jedoch nach der veränderlichen Außentemperatur. Unabhängig von den etwas abweichenden Bedingungen wird die Nachbehandlung der gesondert hergestellten

Scheiben aus Wandbeton M6 und M7 wie bei den Prüfkörpern aus Bohrkernen mit B*, C* und D* bezeichnet.

Die angegebenen Werte für den Permeabilitätskoeffizienten K [m^2] sind mittlere Werte aus 3 Druckstufen und 2 oder 4 Prüfkörpern. Die Prüfung der Carbonatisierungstiefe erfolgte entsprechend dem in [50] beschriebenen Verfahren (Einzelwertmessung). Die angegebenen Werte sind jeweils Mittelwerte von Betonober- und -unterseite der Balken oder Scheiben.

Für die Umrechnung der mittleren Druckfestigkeit aus jeweils 3 Kleinbohrkernen aus einer Scheibe in Druckfestigkeiten des Würfels mit 15 cm Kantenlänge wurde angenommen $\beta_w = 0,95 \cdot \beta_c$.

3. Versuchsergebnisse

Tafel 1 und Bild 4 enthalten die an gesondert hergestellten Scheiben ermittelten Permeabilitätskoeffizienten K [m^2] von den Betonen M1 bis M5 in Abhängigkeit von den drei Nachbehandlungsarten B, C und D. Die Durchlässigkeitskoeffizienten erstrecken sich über drei Größenordnungen. Deutlich sind Überlappungsbereiche erkennbar. Ein sehr gut nachbehandelter Beton mit Wasserzementwert $w/z = 0,80$ kann danach ähnlich dicht werden wie ein schlecht nachbehandelter Beton mit Wasserzementwert $w/z = 0,60$.

Der Permeabilitätskoeffizient stellt nur ein indirektes Maß für die Durchlässigkeit des Betons gegenüber dem durch Diffusion eindringenden CO_2 dar. Trägt man jedoch (siehe Bild 5) die nach 1 Jahr an den Balken mit Querschnitt $5 \times 10 \text{ cm}^2$ ermittelten Carbonatisierungstiefen über den in jungem Alter (42 bis 56 Tage) gemessenen Permeabilitätskoeffizienten K [m^2] wie in Bild 4 auf, so erhält man

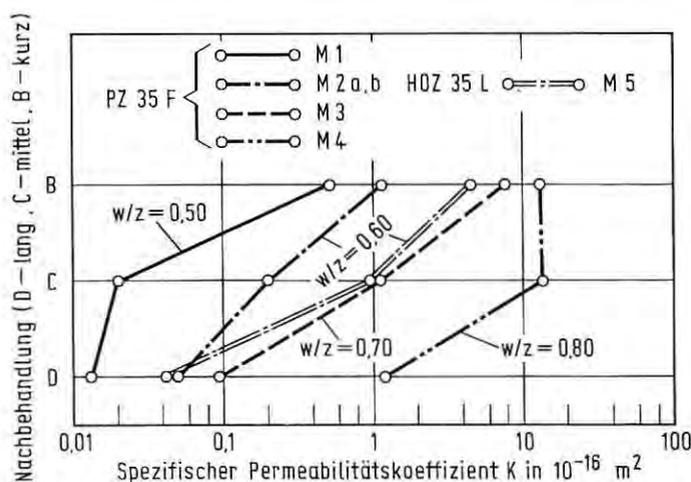


Bild 4 Einfluß von Wasserzementwert, Zementart und Nachbehandlung des Betons auf seinen spezifischen Permeabilitätskoeffizienten (Betone M1 bis M5)

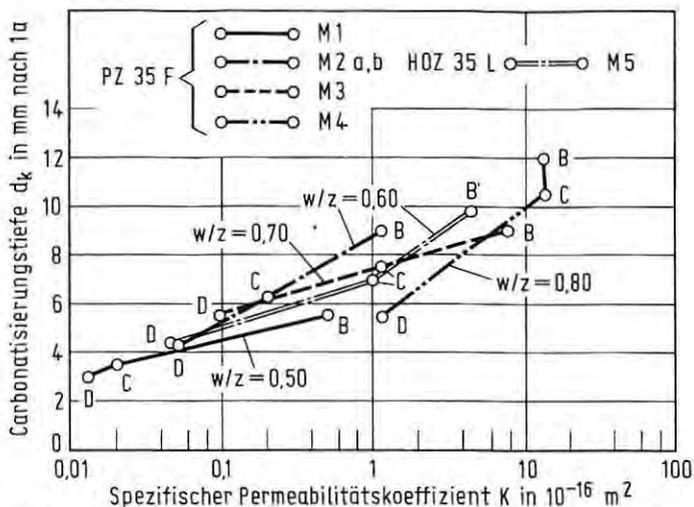


Bild 5 Carbonatisierungstiefe d_k nach 1 Jahr Lagerung im Klimaraum bei $20^\circ\text{C}/65\%$ r. F. in Abhängigkeit von Wasserzementwert, Nachbehandlung und Zementart, aufgetragen über der Permeabilität (Beton M1 bis M5)

tendenziell deutlich eine steigende Carbonatisierungstiefe mit steigendem Permeabilitätskoeffizienten K . Die Korrelation im wenig durchlässigen (linken) Bereich des Bildes ist straffer als die im rechten Bereich, wo häufig bei gleicher Durchlässigkeit eine längere Nachbehandlung zu den geringeren Carbonatisierungstiefen führte.

Der Beton mit Hochofenzement zeigt beim untersuchten Wasserzementwert $w/z = 0,60$ bei schlechter Nachbehandlung etwas größere Permeabilitätskoeffizienten (Bild 4) und etwas größere Carbonatisierungstiefen (Bild 5) als der entsprechende Beton mit Portlandzement.

Bild 6 zeigt den Zusammenhang zwischen Permeabilitätskoeffizient K [m^2] und Diffusionskoeffizient D [m^2s^{-1}], ermittelt an jeweils denselben Probekörpern der Betone M1 bis M4 (PZ 35 F) mit Nachbehandlungen B und D und Wasserzementwerten $w/z = 0,50$; $0,60$; $0,70$ und $0,80$ im Alter von rd. 1,5 Jahren. Ihr Zusammenhang läßt sich durch eine Gerade annähernd darstellen. Die hier eingezeichneten Geraden beschreiben mit Mittelwert und äußerer Begrenzung das Ergebnisfeld, das C. D. Lawrence [51] ermittelt hat.

Auf den Bildern 7 und 8 sind für die Betone M1 bis M4 Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit und Permeabilität aufgetragen. Dabei zeigt die Kurve im Bild 7 einen steilen Anstieg der Würfel-druckfestigkeiten im Prüfalter von 28 Tagen aufgetragen über der Durchlässigkeit, gemessen im Alter von 56 Tagen. In beiden Fällen waren die Prüfkörper entsprechend D nachbehandelt (28 Tage konserviert). Dieselben Prüfkörper mit Nachbehandlung D und die übrigen mit Nachbehandlung C und B wurden nach rd. 1,5jähriger Lagerung im Klimaraum noch einmal bezüglich ihrer Gasdurchlässigkeit

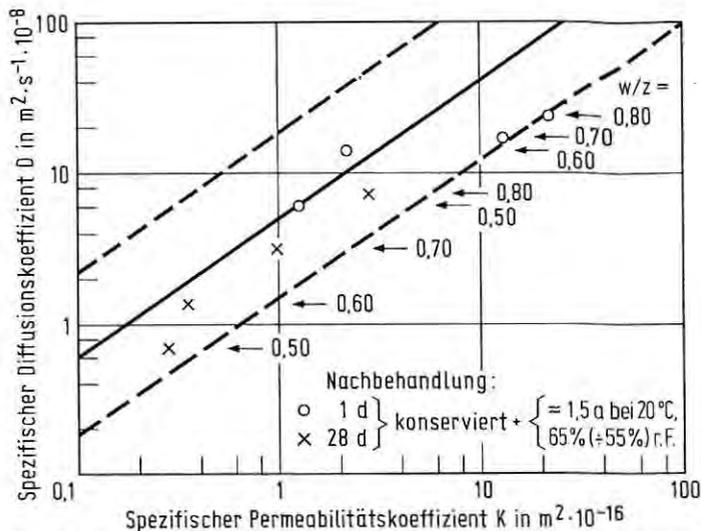


Bild 6 Zusammenhang zwischen dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K und dem spezifischen Diffusionskoeffizienten D für Sauerstoff (Geraden nach C. D. Lawrence)

geprüft (siehe Bild 8). Dabei zeigte sich, daß alle Prüfkörper, auch die mit Nachbehandlung C und B durchlässiger geworden waren. Die aus je drei Kleinbohrkernen aus einer Scheibe ermittelten und in Würfeldruckfestigkeiten umgerechneten Druckfestigkeiten der Nachbehandlung D übertrafen die Würfeldruckfestigkeit β_{w28} (auf Bild 7), und zwar um so mehr, je größer der Wasserzementwert war. Zusammen mit den Druckfestigkeiten, die an den Scheiben der

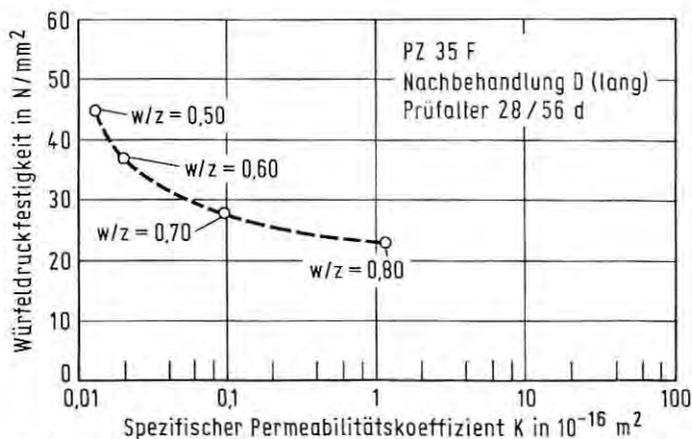


Bild 7 Würfeldruckfestigkeit β_{w28} in Abhängigkeit vom Wasserzementwert, aufgetragen über der Permeabilität im Alter von 56 Tagen

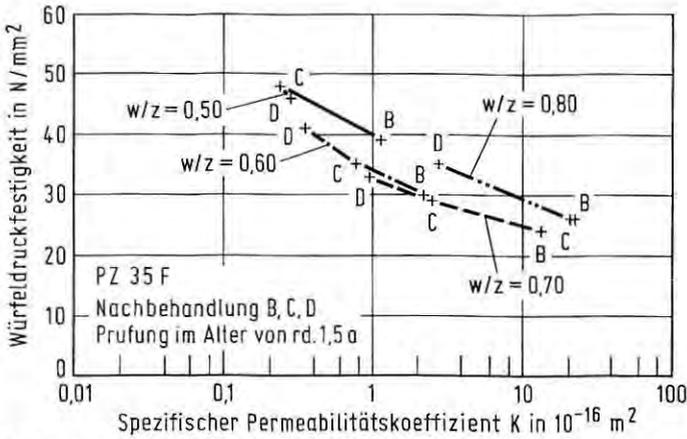


Bild 8 Druckfestigkeit von Kleinbohrkernen, umgerechnet in Würfeldruckfestigkeiten, aufgetragen über der Permeabilität (Versuchsparameter: w/z-Wert und Nachbehandlung)

Nachbehandlung C und B ermittelt wurden, ergibt sich kein eindeutiger Zusammenhang mehr zwischen Druckfestigkeit und Permeabilität.

Trägt man die Carbonatisierungstiefen für die Betone M1 bis M4, die an Balken im Alter von 1 Jahr gewonnen wurden (Mittelwert zwischen Betonober- und -unterseite), in Abhängigkeit von der Nachbehandlung über der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen auf, so erhält man die drei Kurven auf Bild 9. Man erkennt, daß

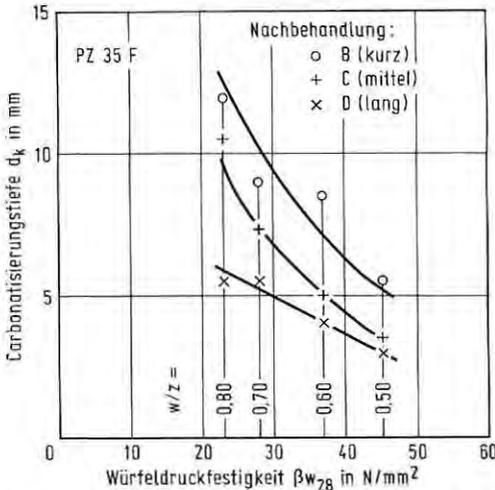


Bild 9 Carbonatisierungstiefe d_k der Betone M1 bis M4 an Balken nach 1 Jahr Lagerung bei 20 °C/65 % r. F., aufgetragen über der zugehörigen 28-Tage-Würfeldruckfestigkeit (Versuchsparameter: w/z-Wert und Nachbehandlung)

man z. B. durch Verlängerung der Nachbehandlung von 1 auf 3 Tage eine ähnliche Verringerung der Carbonatisierungstiefe erreichen kann wie durch Erhöhung der Würfeldruckfestigkeit der Ausgangsmischung um rd. eine Festigkeitsklasse (10 N/mm²).

Einen ähnlichen Zusammenhang stellt man auf Bild 10 fest, wo die Carbonatisierungstiefen d_k über den Druckfestigkeiten von Kleinbohrkernen $h = d = 5$ cm derselben Scheiben nach 1,5 Jahren Lagerung im Klimaraum bei 20° C/65 % r. F. (z. T. 55 % r. F.) aufgetragen sind. Die Verlängerung der Nachbehandlung, insbesondere von z. B. 1 Tag auf 3 Tage (B und C), führt zu einer Verringerung der Carbonatisierungstiefe, die prozentual die Erhöhung der Druckfestigkeit weit übertrifft.

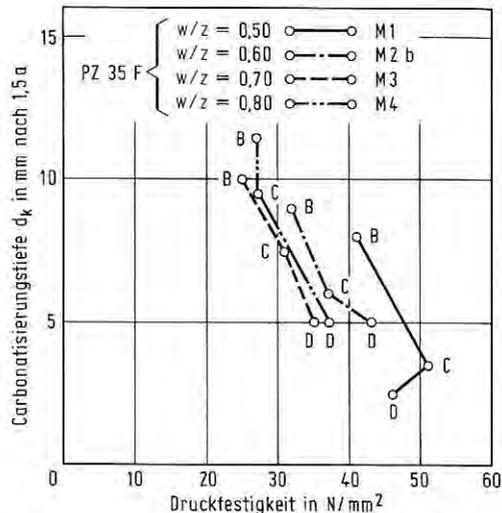


Bild 10 Carbonatisierungstiefe d_k der Betone M1 bis M4 an Scheiben nach rd. 1,5 Jahren Lagerung bei 20° C/65 % r. F., aufgetragen über der Druckfestigkeit von Kleinbohrkernen $h = d = 5$ cm aus denselben Scheiben (Parameter: Wassermischungsverhältnis, Nachbehandlung)

Bei den bisher beschriebenen Versuchen wurde noch nicht berücksichtigt, daß die verwendeten kleinen Prüfkörper bei der Austrocknung kaum eine Reserve an Feuchtigkeit aufweisen wie ein dickeres Bauteil und daß die Hydratationswärme abfließt, ohne die am Bauteil übliche Temperaturerhöhung zu verursachen. Beides führt am Bauteil zu einem höheren Hydratationsgrad unter sonst gleichen Verhältnissen, wirkt sich also verglichen mit den dünnen Scheiben wie eine günstigere Nachbehandlung aus. Ungünstiger ist am Bauteil andererseits, daß der noch warme Beton nach dem Ausschalen in der Regel von kühlerer Umgebungsluft ausgetrocknet wird, weil dies einer Trocknung bei sehr geringer Luftfeuchtigkeit entspricht.

Eine vorab durchgeführte orientierende Untersuchung an einem 30 cm hohen Zylinder, dessen obere und untere Stirnflächen den

300 kg/m³ PZ 35 F w/z = 0,60 A₁₆ / B₁₆

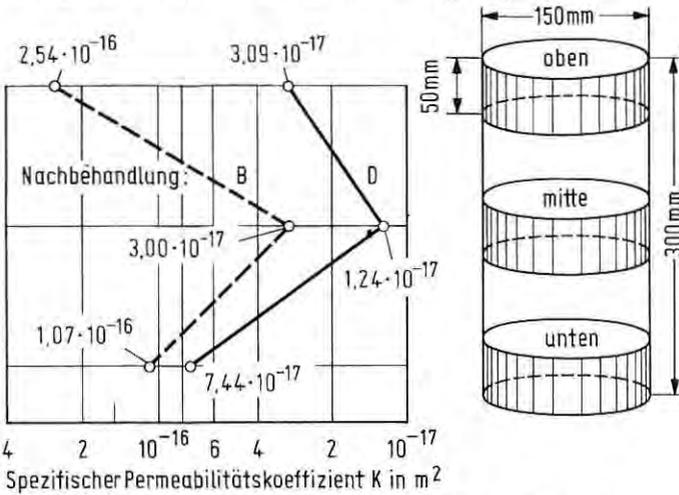


Bild 11 Permeabilitätskoeffizient K von je 3 Scheiben \varnothing 15 cm aus Zylindern h = 30 cm mit unterschiedlicher Nachbehandlung (Ober- und Unterseite Nachbehandlung B oder D, Mantelfläche dauernd geschallt bzw. konserviert)

Nachbehandlungen B und D ausgesetzt wurden, zeigt (siehe Bild 11) in beiden Fällen, daß die Permeabilität im Bereich der Austrocknung auch bei „dicken“ Bauteilen zunimmt.

An Bohrkernabschnitten aus Wänden (siehe Bild 3) und an gesondert hergestellten Scheiben, wie sie in Abschnitt 2 beschrieben sind, wurden die auf den Bildern 12 und 13 dargestellten Permeabilitätskoeffizienten ermittelt. Variiert wurden die Nachbehandlung B*, C*, D* sowie die Zementart der Betone M6 (PZ 35 F) und M7 (HOZ 35 L). Der Wasserzementwert betrug stets w/z = 0,60.

Man erkennt bei Durchführung des Versuchs im Klimaraum bei 20 °C/65 % r. F. (Bild 12), daß die Permeabilitätskoeffizienten für die gesondert hergestellten Scheiben (siehe auch Tafel 1) mit denen von Bild 4 für Beton M2 (Wasserzementwert w/z = 0,60) im Wiederholversuch gut übereinstimmen. Die Prüfkörper aus der Betonwand wiesen wegen des höheren Hydratationsgrads durch Erwärmung und wegen der größeren Feuchtigkeitsreserve aus dem dickeren Bauteil bei Nachbehandlung B* geringere Gasdurchlässigkeiten auf als die gesondert hergestellten Scheiben. Die Unterschiede von der Nachbehandlung B* zur sehr langen wasserrückhaltenden Nachbehandlung D* (28tägige Schalzeit) sind nur wenig ausgeprägt. Demnach führen die Erwärmung des Bauteils und das Temperaturgefälle zur geschaltten Fläche hin bei langer Nachbehandlung D* zu einem durchlässigeren Beton in den Wänden als in den gesondert hergestellten Scheiben. Auffallend ist, daß im Bauteil, das durch die Hydratation erwärmt wurde, der Beton mit HOZ 35 L stets geringere Gasdurchlässigkeiten aufwies als der Beton mit PZ 35 F. Die mit R, M und O bezeichneten Prüfkörper (siehe Bild 3) zeigten aufgrund ihrer Lage und Nachbehandlung in der Regel kleinere Durchlässigkeiten

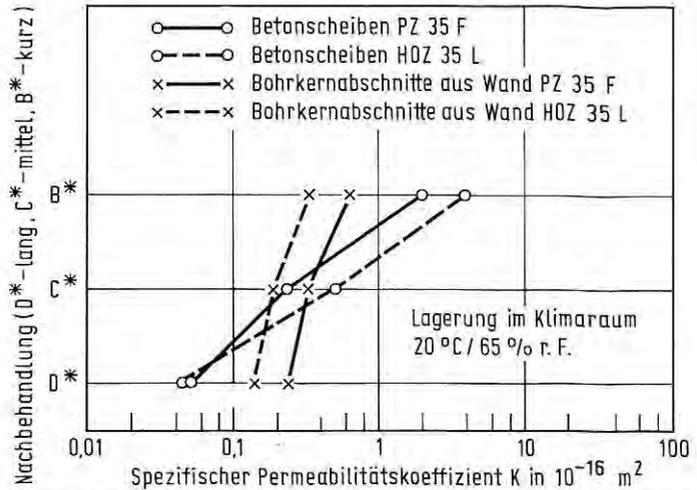


Bild 12 Permeabilitätskoeffizienten von Wandbeton in Abhängigkeit von der Nachbehandlung und von der Zementart. Wasserzementwert $w/z = 0,60$.

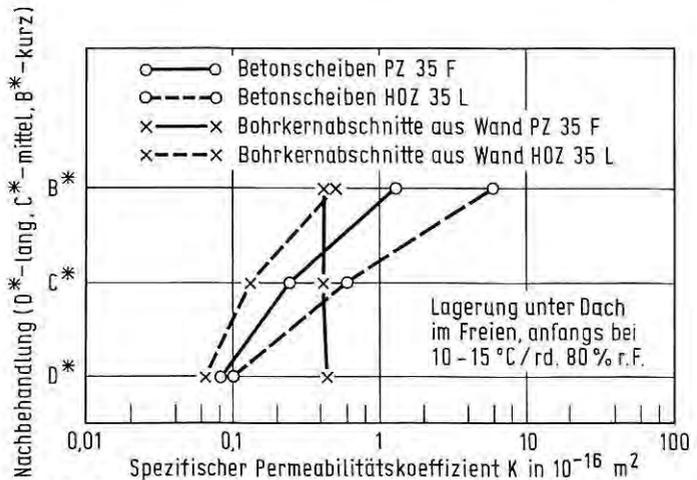


Bild 13 Permeabilitätskoeffizienten von Wandbeton in Abhängigkeit von der Nachbehandlung und von der Zementart. Wasserzementwert $w/z = 0,60$.

als die entsprechenden Prüfkörper an der zugehörigen Nachbehandlungsaußenfläche.

Auf Bild 13 sind die Gasdurchlässigkeiten dargestellt, die sich bei Wänden und gesondert hergestellten Scheiben bei Lagerung im Freien unter Dach ergaben. Bei den gesondert hergestellten Scheiben traten ähnliche Gasdurchlässigkeiten auf wie bei den Versuchen im Klimaraum. In der Wand wirkte sich die längere Nachbe-

handlung auf den Beton mit HOZ ähnlich günstig aus wie bei Lagerung im Klimaraum, während die Prüfkörper aus PZ-Beton von der längeren Schalzeit fast unbeeinflusst blieben. Auch bei nur eintägiger Schalzeit waren bei allen Lagerungen die spezifischen Permeabilitätskoeffizienten des Wandbetons stets $K < 1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$.

4. Erörterung der Ergebnisse und Folgerungen für die Praxis

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß die verwendeten Prüfkörper mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe geeignet sind, den Einfluß von Wasserzementwert, Nachbehandlung und Zementart auf die Gasdurchlässigkeit von Beton bis 16 mm Größtkorn darzustellen (Bild 4). Die Gasdurchlässigkeit des Festbetons steigt an, je früher die Austrocknung des Betons einsetzt und je höher der Ausgangswasserzementwert gewählt wird. Das Verfahren scheint auch geeignet zur Untersuchung von Prüfkörpern aus Beton, die als Bohrkern mit 15 cm Durchmesser aus Bauteilen entnommen wurden (Bilder 12 und 13). Dies dürfte auch für Beton mit 32 mm Größtkorn gelten. Stets muß jedoch berücksichtigt werden, daß der jeweilige Feuchtigkeitsgehalt einen wesentlichen Einfluß auf die Gasdurchlässigkeit ausübt, weshalb die Prüfkörper für vergleichende Untersuchungen vor der Gasdurchlässigkeitsprüfung ca. 4 Wochen lang im Klimaraum bei 20 °C/65 % r. F. vorgelagert werden müssen. Da eine längere Wasserrückhaltende oder gar wasserzuführende Nachbehandlung ebenso zu einer dichteren Betonstruktur führen kann wie ein niedrigerer Wasserzementwert von Anfang an, kann das Prüfverfahren nicht ohne Vorinformation zwischen beiden Einflüssen trennen. Man kann jedoch feststellen, daß ein Beton im Sinne der Dauerhaftigkeitsrichtlinie des DAfStb [7] in der Regel bei diesem Prüfverfahren einen spezifischen Permeabilitätskoeffizienten von $K < 1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ aufweist.

Da die Carbonatisierung auf einem Diffusionsvorgang beruht, stellte sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Permeabilitäts- und Diffusionskoeffizient. Hier ergab sich noch keine sehr straffe Korrelation, was an der noch geringen Anzahl der untersuchten Prüfkörper liegen mag (Bild 6). Immerhin konnte gezeigt werden, daß tendenziell eine höhere Permeabilität auch zu einer größeren Carbonatisierungstiefe führt (Bild 5), jedoch scheinen Masse und Verteilung der mit dem eindringenden CO_2 reagierenden Bestandteile des Zementsteins einen größeren Einfluß auszuüben. Dies wäre eine Erklärung dafür, daß bei gleicher Permeabilität (Bild 5) gut nachbehandelte Betone mit höherem Wasserzementwert eine geringere Carbonatisierungstiefe aufweisen können als schlecht nachbehandelte Betone mit niedrigerem Wasserzementwert. Ähnliches dürfte auch für den Diffusionskoeffizienten gelten. Eine Abschätzung der Spannweite der ermittelten Diffusionskoeffizienten D und der Spannweite der ermittelten Carbonatisierungstiefen d_k an denselben Prüfkörpern läßt ein Verhältnis von

$$\frac{d_{ka}}{d_{kb}} = \frac{\sqrt{D_a}}{\sqrt{D_b}}$$

erwarten [29, 49]. Setzt man hier das Verhältnis der Diffusionskoeffizienten D von Bild 6 ein, z. B. für Beton M1 ($w/z = 0,5$; Nachbehandlung D) und für Beton M4 ($w/z = 0,8$; Nachbehandlung B), so dürfte man erwarten, daß sich die zugehörigen Carbonatisierungstiefen wie

$$\frac{d_{k1}}{d_{k4}} = \frac{\sqrt{0,7 \cdot 10^{-8}}}{\sqrt{24 \cdot 10^{-8}}} = \frac{0,84}{4,9} = \frac{1}{5,8}$$

verhielten. Das gemessene Verhältnis für dieselben Prüfkörper (Bild 10) beträgt $d_{k1}/d_{k4} = 2,2 / 11,5 = 1 / 5,2$.

Ein annähernd stetiger Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Durchlässigkeit des Betons (Bild 7) ist nur dann erkennbar, wenn gleiche Vorlagerungsbedingungen geschaffen wurden. Bild 8 zeigt, daß die tatsächliche Druckfestigkeit eines Betons der Festigkeitsklasse B 25 (Serienfestigkeit 35 N/mm^2) mit Wasserzementwert $w/z = 0,60$ auch im Randbereich eines Bauteils im Mittel bei rd. 35 N/mm^2 liegen kann, wenn die konservierende Nachbehandlung nur 3 Tage lang andauert.

Die wandförmigen Probekörper zeigten, daß Beton mit Wasserzementwert $w/z = 0,60$ sowohl mit PZ 35 F als auch mit HOZ 35 L selbst bei Schalzeiten von nur einem Tag Permeabilitätskoeffizienten von $K < 1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ aufwies (Bilder 12 und 13), wenn bei einer Ausgangstemperatur von 20°C eine deutliche Temperaturerhöhung im Bauteil auftrat. Insbesondere bei dünnen Bauteilen und kühler Witterung erweist sich danach eine Verlängerung der wasserrückhaltenden Nachbehandlung [5] als besonders wichtig. Aus den sehr ähnlichen Permeabilitätskoeffizienten für Nachbehandlung B* bis D* beim Beton der Wände darf nicht geschlossen werden, daß auch ein fast gleicher Carbonatisierungsfortschritt zu erwarten wäre. Hier sind die Anmerkungen zu Bild 5 zu beachten, die auf den nicht zu vernachlässigenden Einfluß der Hydratationsprodukte auf den Carbonatisierungsfortschritt bei gleicher Permeabilität hinweisen. Der Carbonatisierungsfortschritt an den Wandbetonen wird über mehrere Jahre verfolgt und zu gegebener Zeit nachgetragen.

Der Einfluß dickerer Bauteile auf die Permeabilität und den Carbonatisierungsfortschritt bei ungeschalteten Oberflächen wird ebenfalls noch untersucht.

5. Zusammenfassung

5.1 Zur Beurteilung von Fragen der Dauerhaftigkeit von Beton werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Zusammenhänge zwischen der Betonzusammensetzung und -nachbehandlung einerseits sowie der Gasdurchlässigkeit gegenüber Sauerstoff, dem Carbonatisierungsfortschritt und der Druckfestigkeit andererseits untersucht. Hierzu werden erste, orientierende Versuchsergebnisse mitgeteilt.

5.2 Die verwendeten Prüfkörper mit $\varnothing 15 \text{ cm}$, $h = 5 \text{ cm}$, erscheinen geeignet, Einflüsse der Betonzusammensetzung und der Nachbe-

handlung auf die Permeabilität und den Diffusionswiderstand von Beton gegenüber Sauerstoff hinreichend zuverlässig anzuzeigen. Die Ergebnisse sind reproduzierbar. Die Prüfkörper können gesondert in Schalung hergestellt oder als Bohrkern aus Bauteilen gewonnen werden.

5.3 Die Gasdurchlässigkeit im Festbeton steigt an, je früher die Austrocknung des Betons einsetzt und je höher der Ausgangswasserzementwert ist. Tendenziell gilt das auch für den Carbonatisierungsfortschritt.

5.4 Die Permeabilitätskoeffizienten von sehr dichtem Beton mit Wasserzementwert $w/z = 0,50$ und 28tägiger konservierender Nachbehandlung unterscheiden sich um bis zu 3 Zehnerpotenzen von denen von wenig dichtem Beton mit Wasserzementwert $w/z = 0,80$ und nur 1tägiger wasserrückhaltender Nachbehandlung, wenn die Prüfkörper nach rd. 1 monatiger Lagerung bei $20\text{ °C}/65\text{ \% r. F.}$ geprüft werden. In höherem Alter bei stärkerer Austrocknung geht dieser Unterschied auf rd. 2 Zehnerpotenzen zurück. Die entsprechenden Diffusionskoeffizienten unterscheiden sich um rd. 1,5 Zehnerpotenzen.

5.5 Bei gleicher Permeabilität zweier Betone kann der Beton mit höherem Wasserzementwert und längerer wasserrückhaltender Nachbehandlung einen geringeren Carbonatisierungsfortschritt aufweisen als ein Beton mit niedrigerem Wasserzementwert und früher Austrocknung.

5.6 Bei dünnen Bauteilen wirkt sich bei gleicher Betonzusammensetzung die Nachbehandlung besonders stark auf den Permeabilitätskoeffizienten aus. Desgleichen zeigt sich hier die Nachbehandlungsempfindlichkeit langsam erhärtender Zemente deutlich.

5.7 Bei dickeren Bauteilen, bei denen eine größere Feuchtigkeitsreserve zur Verfügung steht und bei denen die eigene Wärmeentwicklung die Hydratation beschleunigt, geht der Einfluß der Nachbehandlungsdauer auf die Gasdurchlässigkeit des Betons der Randzone zurück.

5.8 Wenn Vorkenntnisse über die Betonzusammensetzung und die Umgebungsbedingungen vorliegen, können Durchlässigkeitsprüfungen zur Voraussage des wahrscheinlichen Carbonatisierungsfortschritts dienen.

SCHRIFTTUM

- [1] Wischers, G.: Langzeitverhalten von Betonbauwerken. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984) H. 8, S. 589/592.
- [2] Henzel, J., und H. Grube: Festigkeitsuntersuchungen an Bauwerksbeton und zugehörigen Gütewürfeln. Der Bauingenieur 41 (1966) H. 12, S. 487/491.
- [3] Lewandowski, R.: Vergleich von Bauwerksfestigkeiten und Güteprüfungen. Betonstein-Zeitung 37 (1971) H. 8, S. 477/481.
- [4] Nischer, P.: Austrocknen von jungem Belon. Betonwerk + Fertigteil-Technik 42 (1976) H. 3, S. 117/120, H. 4, S. 180/184, H. 5, S. 242/246.
- [5] Richtlinie zur Nachbehandlung von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Februar 1984.

- [6] DIN 1045 – Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung (Ausgabe Dezember 1978).
- [7] Richtlinie zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton (März 1983). Ergänzt. Bestimm. zu DIN 1045 (12.78). Deutscher Ausschuß für Stahlbeton.
- [8] Walz, K.: Anleitung für beständigen Beton. Bearbeitung eines Berichts des ACI Committee 201 („Guide to Durable Concrete“ – ACI-Journal 74 (1977) H. 12, S. 573/604). beton 29 (1979) H. 7, S. 254/257, H. 8, S. 285/289, H. 9, S. 323/327, H. 10, S. 360/366; ebenso Betontechnische Berichte 20 (1979), Beton-Verlag, Düsseldorf 1980, S. 61/112.
- [9] Weigler, H.: Beton – ein dauerhafter Baustoff. beton 25 (1975) H. 4, S. 128/131.
- [10] Weigler, H.: Beton – Anforderungen und Möglichkeiten. Betonwerk + Fertigteil-Technik 46 (1980) H. 10, S. 595/602.
- [11] Soretz, S.: Lernen aus Fehlern am Baugeschehen. Zement und Beton 25 (1980) H. 4, S. 140/145.
- [12] Bauschäden. Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer-Gesellschaft Stuttgart, Themendokumentation Nr. 1, 1982.
- [13] Linder, R.: Schäden im Betonfertigteilbau. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984) H. 5, S. 299/304, und H. 7, S. 481/487.
- [14] Grunau, B.: Betonschäden und -sanierung. Baugewerbe 64 (1984) H. 16, S. 22/29.
- [15] Powers, T.C., und T.L. Brownard: Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of the American Concrete Institute 18 (1947) H. 7, S. 865/880.
- [16] Powers, T.C.: Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Journal of the American Ceramic Society 41 (1958) H. 1, S. 1/6.
- [17] Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1960.
- [18] Wischers, G.: Physikalische Eigenschaften des Zementsteins. beton 11 (1961) H. 7, S. 481/488; ebenso Betontechnische Berichte 1961, Beton-Verlag, Düsseldorf 1962, S. 199/213.
- [19] Richartz, W., und F.W. Locher: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilicathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips 18 (1965) H. 9, S. 449/459.
- [20] Locher, F.W., und G. Wischers: Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins. Zement-Taschenbuch 1972/73, Bauverlag, Wiesbaden-Berlin 1972.
- [21] Wittmann, F.: Bestimmung physikalischer Eigenschaften des Zementsteins. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 232, Berlin 1974.
- [22] Setzer, M.J.: Zum Mikrogefüge des Zementsteins und dessen Einfluß auf das mechanische Verhalten des Betons. Zement und Beton (1975) H. 85/86, S. 29/35.
- [23] Lawrence, C.D.: Durability of Concrete. Molecular Transport Processes and Test Methods. Cement and Concrete Association, Technical Report 42.544, Juli 1981.
- [24] Ruettggers, A., E.N. Vidal und S.P. Wing: An Investigation of the Permeability of Mass Concrete with Particular Reference to Boulder Dam. Proceedings ACI 31 (1935) S. 378/389.
- [25] Graf, O., und K. Walz: Versuche und Erläuterungen für die Prüfung von Beton auf Wasserundurchlässigkeit. Die Bautechnik 15 (1937) H. 25, S. 321/324, H. 29, S. 388/391, und H. 32, S. 424/427.
- [26] Powers, T.C., L.E. Copeland, J.C. Hayes und H.M. Mann: Permeability of Portland Cement Paste. Proceedings ACI 51 (1954) S. 285/298.

- [27] Bonzel, J.: Der Einfluß des Zements, des Wasserzementwerts, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. *beton* 16 (1966) H. 9, S. 379/383; ebenso *Betontechnische Berichte* 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 145/168.
- [28] Wierig, H.J.: Die Wasserdampfdurchlässigkeit von Zementmörtel und Beton. *Zement-Kalk-Gips* 18 (1965) H. 9, S. 471/482.
- [29] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. *Bauverlag*, Wiesbaden und Berlin 1974.
- [30] Chon Chen, L., und D.L. Katz: Diffusion of Methane through Concrete. *ACI-Journal* 75 (1978) S. 673/679.
- [31] Brodersen, H.A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Zonen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. *Dissertation RWTH Aachen* 1982.
- [32] Frey, R., und D. Funk: Kinetische Untersuchung der Chloridwanderung in Betonen. *TIZ-Fachberichte* 108 (1984) H. 11, S. 760/763, 109 (1985) H. 1, S. 40/43, H. 3, S. 199/202.
- [33] Meyer, A., H.-J. Wierig und K. Husmann: Carbonatisierung von Schwerbeton. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, H. 102, Berlin 1967.
- [34] Carbonatisierung des Betons. Bericht der VDZ-Kommission „Carbonatisierung“. *beton* 22 (1972) H. 7, S. 296/299; ebenso *Betontechnische Berichte* 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 125/133.
- [35] Kurz, M.: The influence of extremely short-term curing on the rate of carbonation in concrete. *Geohydraulik*, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1974, S. 250/257.
- [36] Wierig, H.-J.: Longtime studies on the carbonation of concrete under Normal outdoor Exposure. *RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure*, Hannover 1984, Proceedings S. 239/249.
- [37] Nischer, P.: Einfluß von Umwelt und Betongüte auf die Karbonatisierung. *Betonwerk + Fertigteile-Technik* 50 (1984) H. 11, S. 752/757.
- [38] Figg, J.W.: Methods of measuring the air and water permeability of concrete. *Magazine of Concrete Research* 25 (1973) Nr. 85, S. 213/219.
- [39] Jansky, H.-J., und H. Fritsche: Zur spezifischen Gasdurchlässigkeit von Spritzbeton. *Betontechnik* 2 (1981) H. 5, S. 152/153.
- [40] Grube, H.: Einfluß der Nachbehandlung auf die Porosität von Beton. *Int. Kolloquium Chloridkorrosion*, Wien 1983. *Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österr. Zementfabrikanten*, H. 36, S. 54/59.
- [41] Grube, H., und C.D. Lawrence: Permeability of Concrete to Oxygen. *RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure*, Hannover 1984, Proceedings S. 68/79.
- [42] Gráf, H., und H. Grube: Oxygen Permeability of Concrete. *RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure*, Hannover 1984, Proceedings S. 80/89.
- [43] Hurling, H.: Oxygen Permeability of Concrete. *RILEM-Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure*, Hannover 1984, Proceedings S. 91/101.
- [44] Cather, R., J.W. Figg, A.F. Marsden und T.P. O'Brien: Improvements to the Figg method for determining the air permeability of concrete. *Magazine of Concrete Research* 36 (1984) Nr. 129, S. 241/245.
- [45] N.N.: Permeability Testing of Site Concrete – a review of methods and experiences. *The Concrete Society*, London, November 1985, *Technical Report*, S. 1/68.

- [46] Grube, H.: Influence of concrete materials, mix design and construction techniques on permeability. The Concrete Society, One-day-Conference „Permeability of concrete and its control“, London Dezember 1985.
- [47] Zagar, L.: Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 26 (1955) H. 12, S. 777/782.
- [48] Schwiete, H.E., und V. Ludwig: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. Tonindustrie-Zeitung 90 (1966) H. 12, S. 562/574.
- [49] 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, und H. 6, S. 222/226.
- [50] Grube, H., und J. Krell: Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton. beton 36 (1986) H. 3, S. 104/109.
- [51] Lawrence, C.D.: Transport of Oxygen through Concrete. The British Ceramic Society Meeting „Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement“, Imperial College, London April 1984.