

# Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser

Von Herbert Gräf und Horst Grube, Düsseldorf

## Übersicht

*Die Durchlässigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen beeinflusst wesentliche Gebrauchseigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Mörtel und Beton. Sie beruht auf der offenen Porosität von Zementstein und Zuschlag und hängt demnach von den Eigenschaften beider Bestandteile und ihrem Volumenanteil im Baustoff ab. Die Durchlässigkeit kann darüber hinaus ansteigen, wenn die Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag Fehlstellen aufweist.*

*Spezielle Prüfverfahren ermöglichen die Messung der Durchlässigkeit. Mit Hilfe eines absoluten Druckunterschieds des Prüfmediums auf den beiden Seiten definierter Prüfkörper wird der spezifische Permeabilitätskoeffizient gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ermittelt. Eine Variante dieser Prüfmethode ist die Messung der Wassereindringtiefe. Im Bauwesen von großer Bedeutung sind Diffusionsvorgänge, d. h. Transportvorgänge, die aufgrund eines Konzentrationsunterschieds ausgelöst und in Gang gehalten werden. So stellt sich die Carbonatisierung des Betons als Diffusionsvorgang dar mit der Besonderheit, daß das Vordringen des Kohlendioxids durch die Reaktion mit den vorhandenen Feststoffen verzögert wird. Für Untersuchungen des Frostwiderstands poröser Baustoffe spielt die kapillare Wasseraufnahme eine wesentliche Rolle. Ziel der hier beschriebenen Prüfungen ist die Ermittlung von Materialkennwerten, die unter genau festgelegten Prüfbedingungen ermittelt werden und so den Vergleich der Eigenschaften verschiedener Proben ermöglichen.*

## 1. Einleitung

Die Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Flüssigkeiten und Gasen ist eine Eigenschaft, die in verschiedener Hinsicht für die Gebrauchsfähigkeit und die Dauerhaftigkeit von Bauteilen maßgebend ist [1]. Hinsichtlich der Gebrauchsfähigkeit sei z. B. die Wasserdampfdiffusion in Bauteilen oder die Durchlässigkeit gegenüber drückendem Wasser erwähnt. Der chemische Widerstand, eine für die Dauerhaftigkeit wesentliche Eigenschaft, hängt maßgeblich davon ab, ob und wie schnell angreifende Flüssigkeiten in Mörtel und Beton eindringen können. Für den Frostwiderstand sind die kapillare Wasseraufnahme und der dabei erzielbare Sättigungsgrad

wichtig. Ein dauerhafter Korrosionsschutz der Bewehrung im Stahlbeton setzt voraus, daß die Passivschicht auf dem Stahl erhalten bleibt und nicht durch Carbonatisierung beeinträchtigt wird. Für den Ablauf einer Korrosion des Bewehrungsstahls in carbonatisiertem Beton sind der Nachschub an Sauerstoff durch die Betondeckung und das gleichzeitige Angebot an Feuchtigkeit maßgebend. Zur frühzeitigen Abschätzung aller dieser Risiken dient u. a. die Ermittlung der Permeabilitätskoeffizienten und der Diffusionskoeffizienten des Betons gegenüber Gasen und Wasser.

Die Gas- und Wasserdurchlässigkeit, die Gasdiffusion und die Wassereindringtiefe unter Druck an Mörtel und Beton werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie seit vielen Jahren systematisch untersucht und zu bestimmten Eigenschaften, wie z. B. Frostwiderstand, Carbonatisierungsfortschritt und Festigkeit, in Beziehung gesetzt<sup>1)</sup>). In den letzten Jahren wurden darüber hinaus internationale Vergleichsprüfungen und Ringversuche zur Gas- und Wasserdurchlässigkeit von Beton im Rahmen der Vereinigung der europäischen Zementindustrien, Cembureau, durchgeführt.

Dieser Beitrag beschränkt sich auf drei Prüfverfahren für Mörtel und Beton, und zwar auf

- die Ermittlung des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten gegenüber weitgehend inerten Gasen,
- die Ermittlung des spezifischen Diffusionskoeffizienten gegenüber weitgehend inerten Gasen und
- die Ermittlung des spezifischen Durchlässigkeitsbeiwerts gegenüber Wasser.

Die beiden erstgenannten Prüfverfahren werden hinsichtlich der offenen Porosität von Mörtel und Beton für Bauteile außerhalb ständiger Durchfeuchtung als besonders aussagekräftig angesehen, während der spezifische Durchlässigkeitsbeiwert gegenüber Wasser besonders geeignet erscheint, das Verhalten des Baustoffs gegenüber drückendem Wasser zu beschreiben.

Die Gefahr der Veränderung der Eigenschaften des Prüfkörpers durch das Prüfverfahren selbst gilt für die hier beschriebenen Verfahren in besonderem Maß, weil die Prüfmedien die offene Porosität verändern können. Deshalb werden bei der Ermittlung der Gasdurchlässigkeit weitgehend inerte Gase wie Sauerstoff und Stickstoff, nicht jedoch CO<sub>2</sub>, verwendet, und die Prüfkörper werden definierten Vorlagerungsbedingungen ausgesetzt, z. B. Klimaraumlagerung bei 20°C/65 % r.F., bis annähernd ein Feuchteausgleich mit der Umgebungsluft erreicht ist. So lassen sich weitgehend vergleichbare und reproduzierbare Materialkennwerte gewinnen, die als Absolutwerte stets nur für die verwendeten Prüfbedingungen gelten. Da jedoch auch Probekörper aus Bauteilen untersucht werden können, ist die Anbindung der Ergebnisse an die Eigenschaften des Betons im Bauteil bei entsprechender Abwägung der Einflüsse

---

<sup>1)</sup> Ein Teil der Untersuchungen wurde vom Bundesminister für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen finanziell unterstützt, wofür auch an dieser Stelle gedankt sei.

möglich und beabsichtigt. Letztendlich macht dieser Zusammenhang erst die Anwendung von Prüfverfahren sinnvoll.

In diesem Beitrag werden für jedes Prüfverfahren die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge, die im Forschungsinstitut verwendete Meßeinrichtung und die Bedeutung für das Bauen mit Beton dargestellt. Versuchsergebnisse werden hier nur angegeben, soweit sie zur Erläuterung der Wirkungsweise der Prüfverfahren dienen. Die Ergebnisse, die mit verschiedenen Versuchsparametern ermittelt wurden, werden in einem späteren Beitrag mitgeteilt.

## 2. Permeabilität gegenüber weitgehend inerten Gasen

### 2.1 Physikalische Grundlagen

Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von porösen Baustoffen wurden ausführlich von Žagar [2] untersucht. Danach erhält man mit Hilfe des Hagen-Poiseuilleschen Gesetzes für die Strömung gasförmiger Medien durch einen porösen Körper mit engen Kapillaren unter Berücksichtigung der Komprimierbarkeit des Gases folgende Gleichung für die durchströmende Gasmenge:

$$Q = K \cdot \frac{A}{\eta \cdot L} \cdot \frac{(p_e - p_a) \cdot (p_e + p_a)}{2p} \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- Q Durchflußmenge [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- K spezifischer Permeabilitätskoeffizient [ $\text{m}^2$ ]
- A Querschnittsfläche des Probekörpers [ $\text{m}^2$ ]
- L Dicke des Probekörpers parallel zur Strömung [m]
- $\eta$  Viskosität des Gases  
(z. B.  $\eta = 2,02 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$  für Sauerstoff bei  $\vartheta = 20^\circ \text{C}$ )
- $p_e, p_a$  Eingangsdruck und Ausgangsdruck des Gases absolut (bar;  $1 \text{ bar} = 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )
- p Druck (bar, absolut), bei dem das durchströmende Gasvolumen Q gemessen wird

Aufgelöst nach dem spezifischen Permeabilitätskoeffizienten K erhält man für Gase

$$K = \eta \cdot \frac{Q \cdot L}{A} \cdot \frac{2p}{(p_e - p_a)(p_e + p_a)} \quad [\text{m}^2] \quad (2)$$

In der nachfolgend beschriebenen Apparatur sind der Meßdruck p und der Ausgangsdruck  $p_a$  ungefähr gleich dem Atmosphärendruck  $1 \text{ bar} = 10^5 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$  zu setzen. Für Sauerstoff als Prüfgas bei einer Prüftemperatur von  $20^\circ \text{C}$  erhält man damit für den Permeabilitätskoeffizienten

$$K = 2,02 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{Q \cdot L}{A} \cdot \frac{2}{(p_e^2 - 1)} \quad [\text{m}^2] \quad (3)$$

wobei  $p_e$  in bar (absolut) einzusetzen ist. Gleichung (3) führt entsprechend den Voraussetzungen des Hagen-Poiseuilleschen Ge-

setzes nur für laminare Strömungen zu einem konstanten Werkstoffkennwert. Ob diese Voraussetzung zutrifft, kann man anhand der Versuchsergebnisse prüfen. Bei verschiedenem Eingangsdruck  $p_e$  (absolut) muß bei sonst gleichen Bedingungen die Durchflußmenge  $Q$  linear von  $(p_e^2 - 1)$  abhängen.

## 2.2 Durchführung der Messung

Geräte und Verfahren zur Messung der Permeabilität stammen meist aus dem Bereich der keramischen Industrie und werden z. B. in [2 bis 8] im Prinzip beschrieben. Die speziell für die Prüfung von Beton vorgesehene Norm [9] berücksichtigt nicht die Kompressibilität des Gases und sollte deshalb nicht verwendet werden. Es gibt Geräte, die mit Gasüberdruck und solche, die mit Gasunterdruck arbeiten. Im Forschungsinstitut wurde das Prinzip der Prüfung mit Gasüberdruck verwendet. Dementsprechend besteht das Gerät (Bild 1) aus Gasflasche, Druckminderer mit Manometer und Kon-

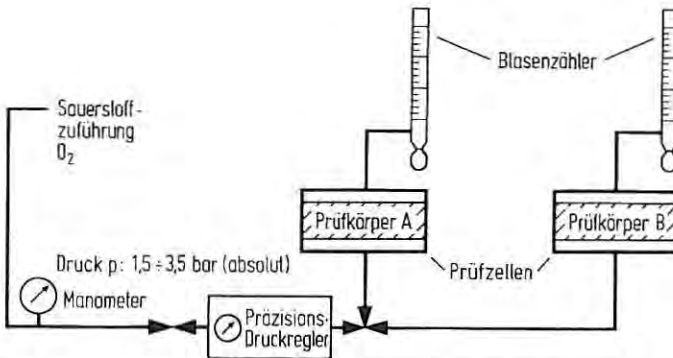


Bild 1 Funktionsskizze des Meßgeräts zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit

stanthaltung (Präzisions-Druckregler), zwei Prüfzellen, in denen die Prüfkörper eingespannt und seitlich abgedichtet werden, und zwei Blasenzählern. Letztere bestehen aus geeichten Glasrohren konstanten Querschnitts, in denen die Steiggeschwindigkeit einer Seifenblase mit Hilfe einer Stoppuhr gemessen wird. Daraus ergibt sich das durchgedrungene Gasvolumen je Zeiteinheit unter Atmosphärendruck (1 bar absolut).

Die Prüfzellen A und B können gemeinsam oder getrennt betrieben werden. Bild 2 zeigt eine Ansicht der Prüfeinrichtung. Um die großen Kräfte, die auf Prüfkörper mit 15 cm  $\varnothing$  bei den angegebenen Prüfdrücken wirken, sicher aufnehmen zu können, werden die Prüfkörper auf der Ausgangsseite durch eine Rasterfläche gestützt. Auf der Mantelfläche werden sie mit Hilfe einer Manschette aus Polyurethan abgedichtet, die mechanisch angepreßt wird. Bild 3 zeigt den

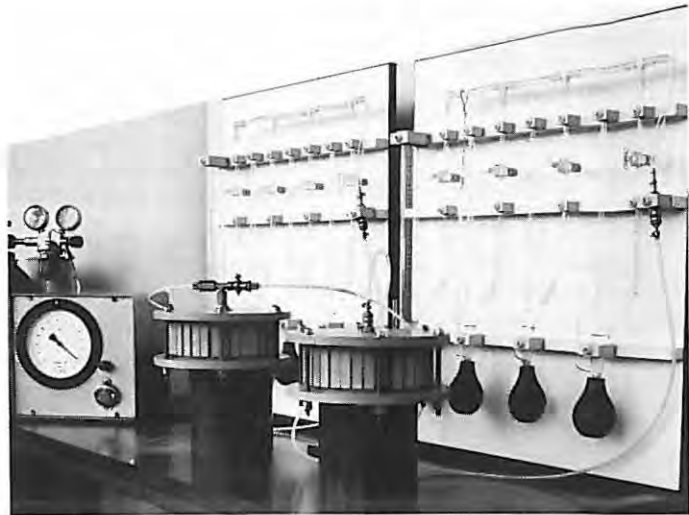


Bild 2 Ansicht der Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von Betonproben



Bild 3 Aufbau der Prüfzelle

Aufbau der Prüfzelle. Man benötigt bei dieser im Forschungsinstitut entwickelten Prüfzelle keine pneumatische Abdichtung, die bei kleinen Undichtigkeiten leicht zu Meßfehlern führen könnte. Auch bei dieser Prüfzelle hat es sich jedoch als zweckmäßig erwiesen, stets zwei planmäßig gleiche Prüfkörper zu untersuchen, um systematische Fehler sofort zu erkennen, die z. B. durch fehlerhaften Einbau möglich sind.

Die Prüfzelle ist für einen Eingangsdruck bis zu 5 bar über Atmosphärendruck bemessen. Durch Einlegen von Zwischenringen kön-

nen auch Prüfkörper mit weniger als 5 cm Höhe geprüft werden. Durch zusätzliche Gummimanschetten lassen sich Differenzen im Durchmesser zwischen 14,5 und 15 cm leicht ausgleichen. Prüfkörper mit wesentlich kleinerem Durchmesser werden z. B. so in Epoxidharz eingegossen, daß sie außen den Soll Durchmesser von 15 cm aufweisen. Die Prüfwelle dient in gleicher Form auch zum Einspannen von Prüfkörpern bei Gasdiffusionsmessungen und bei Wasserdurchlässigkeitsprüfungen. In letzterem Fall werden nicht-rostende Endplatten aus Acrylglas verwendet.

Als Prüfgas für die Gasdurchlässigkeitsprüfungen wurde aus drei Gründen Sauerstoff gewählt, nämlich

weil er in der Luft vorkommt als Gas, das zur Korrosion des Bewehrungsstahls erforderlich ist,

weil er zu keiner wesentlichen Veränderung der Porenstruktur führt, wie z. B. Kohlendioxid [10, 11]; dies erscheint wichtig, um die Prüfkörper im Laufe von Jahren wiederholt untersuchen zu können, ohne Veränderungen durch das Prüfverfahren befürchten zu müssen, und

weil er im Labor sicher zu handhaben ist.

Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde der Eingangsdruck von 1,5 bar bis 3,5 bar (absolut, d. h. 0,5 bis 2,5 bar über Atmosphärendruck) verwendet, und zwar in Abstufungen von 0,5 bar. Daraus ergaben sich 5 Druckstufen, von denen in der Regel 3 Stufen (je nach Durchlässigkeit im oberen, mittleren oder unteren Druckbereich gelegen) steigend und fallend angefahren wurden. Bei jeder Stufe wurde abgewartet, bis sich eine konstante Durchflußmenge eingestellt hatte. Je nach Durchlässigkeit des Prüfkörpers bedurfte es dazu einer Wartezeit von 5 bis 30 Minuten. Die Durchflußmengen  $Q$  wurden mit einem Blasenähler ermittelt und die Ergebnisse entsprechend Gleichung (3) ausgewertet. Die Voraussetzung der laminaren Strömung war dabei nicht immer exakt eingehalten. Dieser Einfluß auf den  $K$ -Wert war häufig größer als die Fehler, die sich aufgrund der Manometereinstellung und der übrigen Prüfbedingungen ergaben. Die Abweichung der gemessenen  $Q$ -Werte von der erwarteten Geraden im  $Q/(p_0^2 - 1)$ -Diagramm, siehe Gleichung (3), führte bei den verschiedenen Druckstufen in der Regel zu Änderungen für  $K$  von 1 bis 10 % und bei sehr durchlässigen Prüfkörpern von bis zu 25 %. Trotzdem wurden die bei 1,5 bis 3,5 bar (absolut) bei steigendem und fallendem Druck bestimmten  $K$ -Werte gemittelt. Verglichen mit den Veränderungen des  $K$ -Wertes um halbe bis ganze 10er-Potenzen, z. B. durch Änderung der Nachbehandlung bei Betonprobekörpern gleicher Zusammensetzung, erscheint die Angabe des  $K$ -Wertes als Mittelwert ausreichend genau, zumal der Einfluß  $\Delta Q$  infolge unterschiedlicher Druckstufen bei allen  $K$ -Werten in gleicher Richtung wirksam wird.

Die Prüfungen wurden hier an Betonproben durchgeführt, deren Größe und Zusammensetzung eine Erweiterung der Untersuchungen auf Bohrerkerne aus Bauwerkbeton 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 und die Mantelflä-

che durch eine Gummimanschette konserviert wird. Der Einfluß der größeren Reserve an Feuchtigkeit aus dem Bauwerk sowie die schnellere Hydratation in massigen Betonbauteilen wird an Bohrkernen mit  $\varnothing 15 \text{ cm}$ ,  $h = 5 \text{ cm}$  aus wandartigen Bauteilen zusätzlich ermittelt.

### 2.3 Anwendungsbereich

Die Ermittlung des spezifischen Permeabilitätskoeffizienten  $K$  erlaubt die Unterscheidung von Betonen nach ihrer Gasdurchlässigkeit. Für vollständig verdichtete Konstruktionsbetone der Festigkeitsklassen B 15 bis B 55 erhält man abnehmende Permeabilitätskoeffizienten  $K$  von rd.  $10^{-14} \text{ m}^2$  bis  $10^{-19} \text{ m}^2$ . Zusammensetzung und Nachbehandlung des Betons sind auch innerhalb einer Festigkeitsklasse von großem Einfluß auf den Permeabilitätskoeffizienten. Auch Unterschiede im Feuchtegehalt beeinflussen den Permeabilitätskoeffizienten erheblich, weshalb die Prüfkörper in einem konstanten Klima vorgelagert werden müssen, wenn man verschiedene Betone miteinander vergleichen möchte.

Bezüglich des dauerhaften Korrosionsschutzes der Bewehrung im Beton ist vor allem die Durchlässigkeit gegenüber Sauerstoff und Kohlendioxid von Interesse. Aus den unter 2.2 bereits genannten Gründen wurden die Gasdurchlässigkeitsversuche hier mit Sauerstoff durchgeführt.

Deutlich sind auf Bild 4 die Unterschiede der spezifischen Gaspermeabilitätskoeffizienten von Betonen mit gleichem Zementleimgehalt zu erkennen, bei denen der Wasserzementwert, die Nachbehandlung und die Zementart variiert wurde. Nachbehandlung B bedeutet 1 Tag konserviert, C 3 Tage konserviert, D 28 Tage konserviert, danach Lagerung bei  $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r.F.}$  bis zur Prüfung im Al-

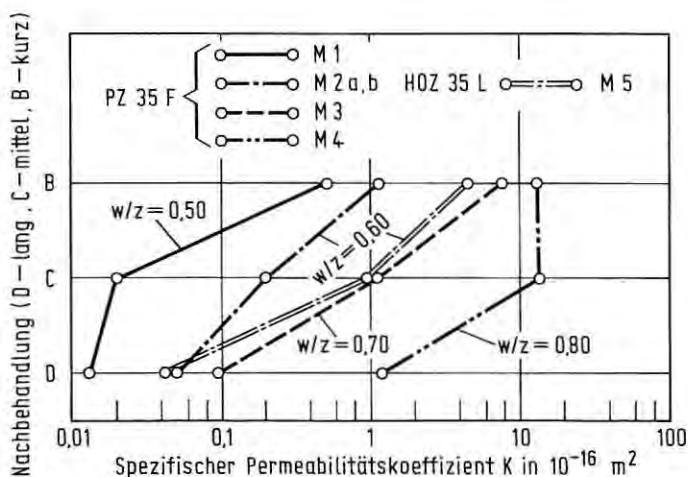


Bild 4 Zusammenhang zwischen Nachbehandlung, Wasserzementwert, Zementart und Gasdurchlässigkeit verschiedener Betone

ter von 42 Tagen (B), 49 Tagen (C) und 56 Tagen (D). Da es sich hier um gesondert hergestellte Prüfkörper mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe handelt und die Nachbehandlung im Klimaraum bei 20°C/65 % r.F. erfolgte, läßt sich dieses Diagramm nicht allgemein auf Beton aus Bauteilen übertragen. Derartige Ergebnisse werden in einem späteren Bericht mitgeteilt.

Bei Untersuchungen, ob sich der ermittelte spezifische Durchlässigkeitskoeffizient unabhängig von der Probekörperdicke darstellen läßt, zeigte sich, daß eine dickere Scheibe bei Beton und Mörtel zu geringeren Durchlässigkeitskoeffizienten führte als dünnere Scheiben, die aus demselben Körper durch Sägen gewonnen wurden (siehe Bilder 5 und 6). Der Permeabilitätskoeffizient der rd. 1,5 cm dicken Scheiben bei Ausgleichsfeuchte 20°C/65 % r.F. war erheblich größer als der der zugehörigen 5 cm dicken Scheibe, trotz der zwischenzeitlichen Befeuchtung beim Sägen. Die Unterschiede innerhalb der jeweils drei zusammengehörenden rd. 1,5 cm dicken Scheiben über die Höhe des ursprünglichen Probekörpers waren gering. Die Vergrößerung des Permeabilitätskoeffizienten beim Übergang auf dünnere Scheiben betrug bei Größtkorn 16 mm rd. Faktor 6, bei Größtkorn 2 mm rd. Faktor 3. Ursache für dieses Verhalten scheint die Tatsache zu sein, daß bei dünner werdenden Prüfkörpern die Wahrscheinlichkeit ansteigt, daß gröbere Poren, Korngrenzflächen usw. zunehmend eine durchgehende Verbindung zwischen beiden Prüfkörperoberflächen herstellen und so zu einer Erhöhung der Gasdurchlässigkeit beitragen. Daraus ergibt sich, daß Prüfwerte für Permeabilitätskoeffizienten bei Beton nur dann direkt vergleichbar sind, wenn sie auch an gleich dicken Prüfkörpern gewonnen wurden. Daraus folgt ferner, daß die Möglichkeiten, die Zunahme der Permeabilität an einem dickeren Betonkörper von der Oberfläche aus anhand von z. B. 1 cm dicken Scheiben zu ver-

300 kg/m<sup>3</sup> PZ 35 F , w/z = 0,60 , A<sub>16</sub> / B<sub>16</sub> . Nachbeh. B

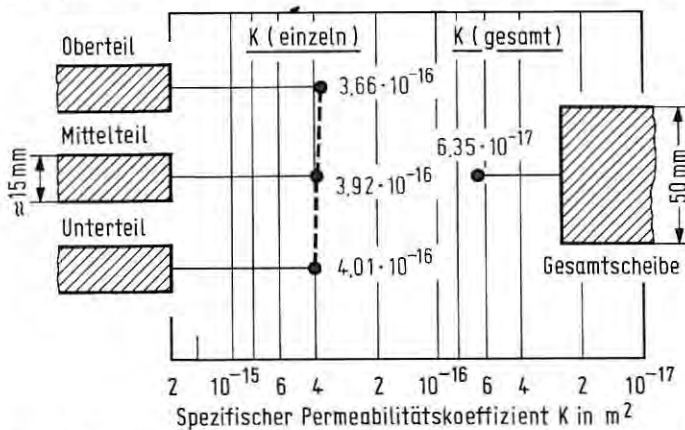


Bild 5 Permeabilitätskoeffizient K einer 5 cm dicken Betonprobe Ø 15 cm und der anschließend daraus geschnittenen 3 Scheiben von rd. 1,5 cm Dicke



470 kg/m<sup>3</sup> PZ 35 F , w/z = 0,60 , Normensand 0/2 , Nachbeh. B

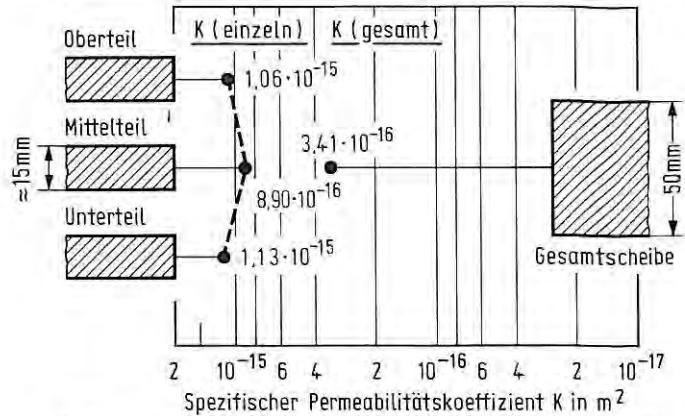


Bild 6 Permeabilitätskoeffizient K einer 5 cm dicken Mörtelprobe Ø 15 cm und der anschließend daraus geschnittenen 3 Scheiben von rd. 1,5 cm Dicke

folgen, in quantitativer Hinsicht gering erscheint. Dies wurde auch schon in [12] beobachtet.

Weiterhin zeigte sich erwartungsgemäß an den 5 cm dicken Scheiben, daß der Mörtel bei gleichem Wasserzementwert eine größere Gasdurchlässigkeit aufwies (Bild 6) als der Beton (Bild 5). Ursache ist der größere Zementsteingehalt im Mörtel und die damit verbundene größere effektive Porosität.

### 3. Diffusion von weitgehend inerten Gasen

#### 3.1 Physikalische Grundlagen

Für das Vordringen von Gasen wie Sauerstoff (O<sub>2</sub>) oder Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in einem Betonbauteil wird in der Regel nicht ein absoluter Druckunterschied wie bei der Ermittlung des Permeabilitätskoeffizienten K [m<sup>2</sup>] gegeben sein, sondern lediglich ein Unterschied im Partialdruck, der sich aus der unterschiedlichen Konzentration der Gase im Beton und in der umgebenden Luft ergibt. Die Ausbreitung von Molekülen oder Ionen aufgrund derartiger Konzentrationsunterschiede und der Molekularbewegung bezeichnet man als Diffusion. Die einen porösen Festkörper durchdringenden Moleküle bilden einen Diffusionsstrom I [g · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>], der bei eindimensionaler Betrachtung nach dem 1. Fickschen Gesetz folgendermaßen definiert wird [13]:

$$I = -D \frac{dc}{dx} \quad [\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

D spezif. Diffusionskoeffizient [m<sup>2</sup> · s<sup>-1</sup>]

$\frac{dc}{dx}$  Konzentrationsänderung dc [g · m<sup>-3</sup>] auf dem infinitesimalen Weg dx [m]

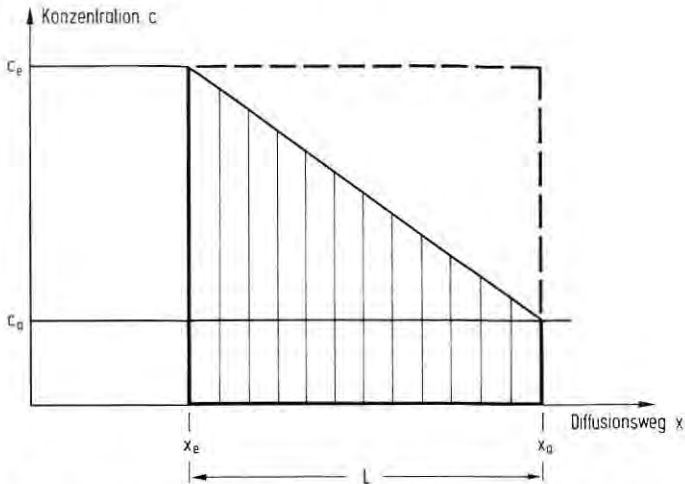


Bild 7 Konzentrationsverteilung bei eindimensionaler stationärer Diffusion

Bei stationären Randbedingungen sowie homogenem und isotropem Werkstoff erhält man einen konstanten Diffusionsstrom bei konstantem Konzentrationsgefälle (Bild 7). Der konstante Diffusionskoeffizient  $D$  ist dann

$$D = -l \cdot \frac{x_a - x_e}{c_a - c_e} = l \cdot \frac{L}{\Delta c} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (5)$$

mit  $c_e$ ,  $c_a$  Eingangs(e)- und Ausgangs(a)-Konzentration des diffundierenden Mediums  
 $(c_a - c_e = \Delta c = \text{Konzentrationsunterschied in } \text{g} \cdot \text{m}^{-3})$

$x_e$ ,  $x_a$  Eingangs- und Ausgangskoordinate auf dem Diffusionsweg ( $x_a - x_e = L = \text{Prüfkörperdicke in m}$ )

Der beschriebene Zusammenhang wird allgemein (siehe z. B. [14]) zur Ermittlung des Diffusionskoeffizienten als Werkstoffkennwert genutzt.

Die weg(x)- und zeit(t)-abhängige Änderung der Konzentration des diffundierenden Stoffes beim Eindringen in einen Körper (z. B. in ein Bauteil), dessen Dicke groß ist im Verhältnis zur Eindringtiefe, erfolgt entsprechend dem 2. Fickschen Gesetz. Es lautet für eindimensionale Diffusion

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (6)$$

Bild 8 stellt das mit zunehmender Zeit abnehmende Konzentrationsgefälle dar, das bei konstanter Eingangskonzentration zu einem immer geringer werdenden Diffusionsfortschritt in x-Richtung führt. Als Lösung der Differentialgleichung (6) erhält man

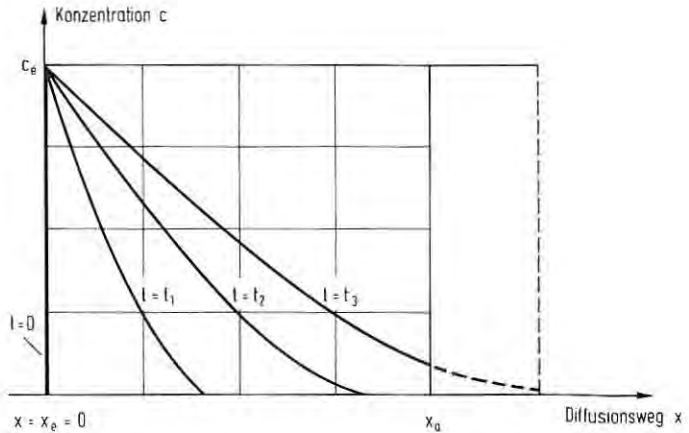


Bild 8 Konzentrationsverteilung bei eindimensionaler instationärer Diffusion

$$\frac{c - c_1}{c_2 - c_1} = 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (7)$$

worin  $\operatorname{erf}(x)$  die Gaußsche Fehlerfunktion darstellt, die durch das Integral

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-\xi^2) d\xi \quad (8)$$

definiert ist.

Darin ist enthalten, daß der Diffusionsweg  $x$  proportional zur Wurzel aus der Einwirkungszeit und dem Diffusionskoeffizienten ist.

$$x \sim \sqrt{D \cdot t} \quad (9)$$

Bei konstantem Diffusionskoeffizienten  $D$  verhalten sich demnach die Wege wie 1 : 2 : 3, wenn sich die Zeiten  $t_1 : t_2 : t_3$  wie 1 : 4 : 9 verhalten (Bild 8).

Der Diffusionskoeffizient  $D$  in porösen Strukturen ist erheblich kleiner als der Diffusionskoeffizient  $D_0$ , den man bei unbehinderter Diffusion des einen Gases in das andere erhält. Das Verhältnis der beiden Diffusionskoeffizienten

$$\frac{D}{D_0} = \epsilon_{\text{eff}} \quad (10)$$

bezeichnet man als effektive Porosität  $\epsilon_{\text{eff}}$  [5]. Ähnliche Zusammenhänge bestehen auch für Ionendiffusion in flüssigkeitsgefüllten Poren poröser Festkörper [15]. Wenn weiterhin die diffundierenden Moleküle dauerhafte Verbindungen mit den Feststoffen der Porenwände eingehen können, wie es zwischen Kohlendioxid und dem eingelagerten Calciumhydroxid bei Anwesenheit ausreichender

Feuchtigkeit möglich ist, nimmt der Diffusionskoeffizient  $D_r$  unter Berücksichtigung dieser Reaktion im Verhältnis zum Diffusionskoeffizienten  $D$  weiter ab [15], und zwar im Verhältnis der eingedrungenen nicht reagierenden Moleküle  $N$  zur Gesamtsumme der eindiffundierenden Moleküle ( $N + M$ )

$$\frac{D_r}{D} = \frac{N}{N + M} \quad (11)$$

Obwohl zunächst zu erwarten ist, daß sich nur die Diffusion eines nicht mit dem porösen Feststoff reagierenden Gases entsprechend Gleichung (7) verhält, konnte in [15, 16] gezeigt werden, daß auch der Diffusionsfortschritt beim Carbonatisierungsvorgang annähernd linear von  $\sqrt{t}$  abhängt.

### 3.2 Durchführung der Diffusionsmessung

Als Prüfgase für die Diffusionsprüfung wurden Sauerstoff und Stickstoff eingesetzt. Mit entsprechenden Änderungen für die Ein- und Ausleitung der Gase konnte die im Abschnitt 2.2 bereits beschriebene Prüfeinrichtung auch für die Diffusionsmessungen verwendet werden. Bild 9 zeigt eine Prinzipskizze der Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Gasdiffusion. Man erkennt die Zuführung von Sauerstoff und Stickstoff, die Einrichtungen zur Herstellung des gleichen absoluten Drucks beider Gase, ihre Einleitung in die Prüfeinrichtung und den Gasanalysator, der auf der mit Stickstoff beaufschlagten Seite des Prüfkörpers die „Verunreinigung“ durch die Sauerstoffmenge angibt, die durch den Prüfkörper hindurchdiffundiert ist. Zur Gasanalyse auf der mit Stickstoff beaufschlagten Seite wurde das Gerät Magnos III verwendet, das eine Sauerstoffkonzentration bis zu 0,01 Vol.-% noch nachweisbar macht. Die Durchflußmesser zeigen die

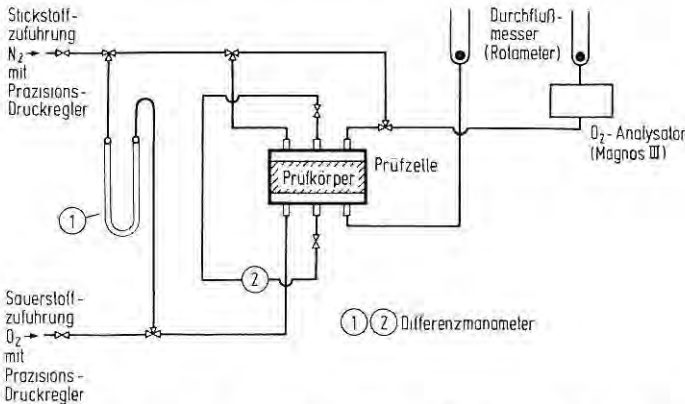


Bild 9 Funktionsskizze der Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Gasdiffusion an Betonproben

Größe des Gasstromes  $Q$  an, der zur Berechnung der Diffusionsrate  $S$  erforderlich ist. Die Versuchsergebnisse wurden entsprechend Gleichung (5) mit folgenden Meßgrößen ausgewertet: Mit

$$S = D \cdot A \cdot \frac{\Delta c}{L} = I \cdot A \quad (12)$$

nach Gleichung (5) und mit  $\Delta c = c_1 - (c_2 - c_3)$  in  $N_{O_2} \cdot m^{-3}$  erhält man auf der Austrittseite des Prüfkörpers für das diffundierte  $O_2$ :

$$S = D \cdot A \cdot \frac{c_1 - (c_2 - c_3)}{L} \quad (13)$$

Im Gasstrom des mit diffundiertem  $O_2$  gemischten  $N_2$  gilt:

$$S = Q \cdot (c_2 - c_3) \quad (14)$$

Setzt man Gl. (13) und (14) gleich, so erhält man

$$D = \frac{Q \cdot L}{A} \cdot \frac{c_2 - c_3}{c_1 - (c_2 - c_3)} \quad [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (15)$$

Darin bedeuten:

$S$  Diffusionsrate (Anzahl oder Masse der diffundierten  $O_2$ -Moleküle pro Zeit in  $N_{O_2} \cdot s^{-1}$  oder  $mol\ O_2 \cdot s^{-1}$ )

$N$  Anzahl der Moleküle

$D$  spezif. Diffusionskoeffizient [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$A$  Durchströmter Querschnitt des Prüfkörpers [ $m^2$ ]

$L$  Dicke des Prüfkörpers [ $m$ ]

$c$  Konzentration (Anzahl oder Masse der  $O_2$ -Moleküle je Normal-kubikmeter Gas in  $N_{O_2} \cdot m^{-3}$  oder  $mol\ O_2 \cdot m^{-3}$ )

$c_1$  Konzentration  $O_2$  im  $O_2$ -Strom

$c_2$  Konzentration  $O_2$  im  $N_2$ -Strom

$c_3$  Konzentration  $O_2$  als Verunreinigung im „reinen“  $N_2$ -Strom

$Q$  gemessene Durchflußrate des  $N_2$  [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] unter Normaldruck

Die in Vol.-% anfallenden Meßwerte der Gaskonzentrationen können, da sie alle bei gleichem absoluten Druck gemessen werden, auch direkt in Vol.-% eingesetzt werden. In den durchgeführten Versuchen traten z. B. folgende Konzentrationen auf:

$c_1 \approx 100$  Vol.-%;  $c_2 \approx 0,05$  bis 1 Vol.-% und  $c_3 \approx 0,001$  Vol.-% (Herstellerwert).

### 3.3 Anwendungsbereich

Die Ermittlung des spezifischen Diffusionskoeffizienten  $D$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] erlaubt die Unterscheidung von Betonen nach ihrer Durchlässigkeit gegenüber eindiffundierenden Gasen. Für vollständig verdichtete Konstruktionsbetone der Festigkeitsklassen B 15 bis B 55 erhält

man abnehmende Diffusionskoeffizienten  $D$  für Sauerstoff von rd.  $10^{-6}$  bis  $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Zusammensetzung und Nachbehandlung des Betons sind auch innerhalb einer Festigkeitsklasse von großem Einfluß auf den Diffusionskoeffizienten  $D$ , ebenso Unterschiede im Feuchtegehalt, weshalb die Prüfkörper vor der Prüfung in einem konstanten Klima vorgelagert werden müssen, wenn man verschiedene Betone miteinander vergleichen möchte.

Die Messung des Diffusionskoeffizienten eröffnet die Möglichkeit, Voraussagen z. B. über den wahrscheinlichen Carbonatisierungsfortschritt eines Betons anhand seines Diffusionskoeffizienten zu treffen, wenn für einen anderen ähnlichen Beton der Diffusionskoeffizient und der Carbonatisierungsfortschritt ermittelt wurden.

Weiterhin stehen der spezifische Permeabilitätskoeffizient  $K$  und der spezifische Diffusionskoeffizient  $D$  der Betone gegenüber Sauerstoff in einem Zusammenhang, den Lawrence [17] entsprechend Bild 10 angibt.

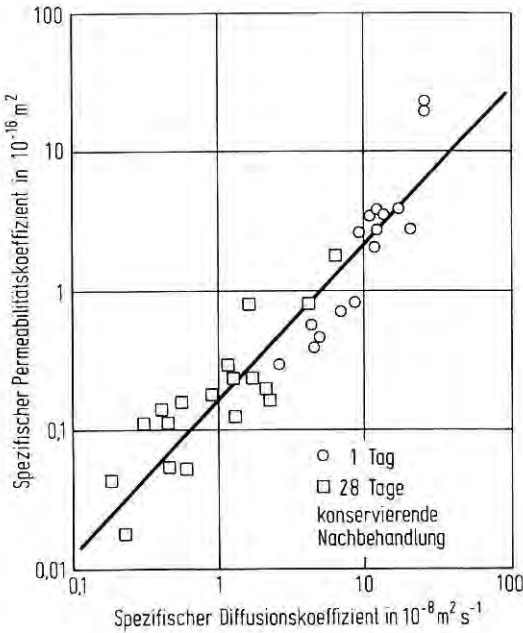


Bild 10  
Zusammenhang zwischen spezifischem Permeabilitätskoeffizienten und spezifischem Diffusionskoeffizienten für Beton (nach Lawrence)

#### 4. Permeabilität gegenüber drückendem Wasser

##### 4.1 Physikalische Grundlagen

Das von Darcy empirisch gefundene Strömungsgesetz für Wasser in Rohren

$$Q = k \cdot \frac{A \cdot \Delta h}{L} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (16)$$

ist in dem für Gase und Flüssigkeiten allgemeingültigen Gesetz von Hagen-Poiseuille, siehe Gleichung (1), enthalten, wenn für die Druckdifferenz  $p_a - p_e = \Delta h$  in m (Wassersäule) und für das als inkompressibel betrachtete Medium Wasser der Ausdruck

$$\rho = \frac{p_a + p_e}{2} \text{ eingesetzt werden.}$$

Der spezifische Permeabilitätskoeffizient  $K$  [ $m^2$ ] aus der allgemeingültigen Gleichung (1) nach Hagen-Poiseuille und der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] nach Darcy hängen dann für inkompressible Flüssigkeiten über die Beziehung

$$k = K \frac{\rho_w \cdot g}{\eta} \quad (17)$$

zusammen. Darin bedeuten

$\rho_w$  Dichte des Wassers [ $kg/m^3 = N \cdot s^2 \cdot m^{-4}$ ]

$g$  Erdbeschleunigung  $9,81 m \cdot s^{-2}$

$\eta$  Viskosität [ $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ]

Dabei ist die Temperaturabhängigkeit der Größen  $\rho_w$  und  $\eta$  zu berücksichtigen.

Obwohl diese Gesetze für die Strömung in Rohren abgeleitet wurden, haben sie sich auch bei der Prüfung von Böden und Festkörpern mit offener Porosität bewährt. Der Durchlässigkeitsbeiwert  $k$

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (18)$$

kann betrachtet werden als die scheinbare Geschwindigkeit der Flüssigkeit im Festkörperquerschnitt beim hydraulischen Gefälle 1. Bei der Prüfung von Zementstein und Beton zeigt sich, daß  $k$  nicht konstant ist, sondern mit andauernder Durchfeuchtung erheblich abnimmt.

Eine Variante der Wasserdurchlässigkeitsprüfung stellt die Wassereindringprüfung nach DIN 1048 [18], Abschnitt 4.7, dar. Valenta [19] hat die theoretischen Grundlagen des Wassereindringens ausführlich untersucht. In Gleichung (18) ist mit  $v = Q/A$  und dem hydraulischen Gefälle  $i = \Delta h/L$  der bekannte Zusammenhang

$$v = k \cdot i \quad (19)$$

enthalten.

Schreibt man für  $v = \frac{dx}{dt}$  und für  $i = (\Delta h/x)^n$ , wobei für Darcy  $n = 1$  zu setzen wäre, so erhält man für die Wassereindringtiefe  $x$  in Abhängigkeit von der Zeit

$$x^n \cdot dx = k \cdot \Delta h^n \cdot dt$$

$$\text{integriert } \frac{x^{n+1}}{n+1} + C = k \cdot \Delta h^n \cdot t \quad (20)$$

für  $t = 0$ ;  $x = 0 \rightarrow C = 0$  und mit  $n = 1$

$$x = \sqrt{2k \cdot \Delta h \cdot t} \quad (21)$$

Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es sich um eine Näherungslösung handelt, weil z. B. die Veränderung von  $k$  mit der Zeit oder die Kapillaraktivität des Betons nicht berücksichtigt wird.

Besteht der gesamte Prüfvorgang bei der Wassereindringprüfung aus mehreren Druckstufen  $\Delta h_i$ , die jede für sich die Zeit  $t_i$  aufrechterhalten werden, so beträgt die Eindringtiefe nach Ablauf der Zeit  $t_n = \sum_1^n t_i$  nach Valenta näherungsweise

$$x_n = \sqrt{2k \cdot \sqrt{\Delta h_1 \cdot t_1 + \Delta h_2 \cdot t_2 + \dots + \Delta h_i \cdot t_i}} \quad (22)$$

#### 4.2 Durchführung der Messung

Für die Messung der Durchlässigkeit von Beton gegenüber drückendem Wasser (siehe Bild 11) wurde im Prinzip die gleiche Prüfeinrichtung verwendet wie zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit

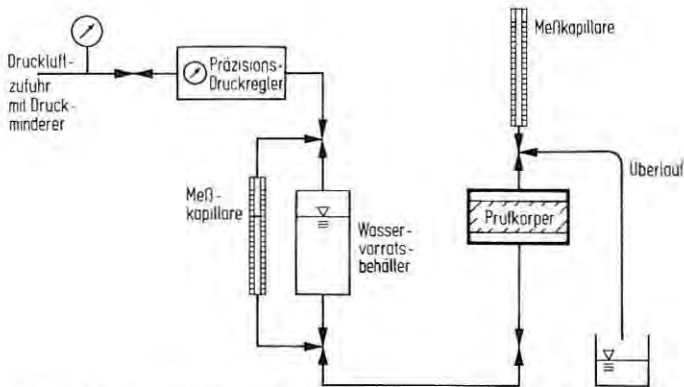


Bild 11 Funktionsskizze der Prüfeinrichtung zur Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit von Beton

(siehe Bild 1). Zwischengeschaltete Kapillaren gestatteten die getrennte Ermittlung der ein- und auslaufenden Wassermenge. Auch hier wurden die bereits genannten Prüfkörper mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Höhe verwendet. Zur Druckerzeugung wurde Preßluft benutzt, die direkt auf einen kleinen, zur Hälfte mit Wasser gefüllten Druckbehälter einwirkte.

Da sich die Durchlässigkeit des Zementsteins mit zunehmender Wassersättigung stark ändert, sei es durch Quelleffekte oder durch Verstopfung der Poren mit Hydratationsprodukten, ist es zur Ermittlung der zeitabhängigen Wasserdurchlässigkeit wichtig, den Prüfkörper so schnell und so vollständig wie möglich mit Wasser zu sättigen. Dafür reichten nach den vorliegenden Erfahrungen weder die kapillare Wasseraufnahme noch die sogenannte „Vakuumsättigung“ aus.

Im Forschungsinstitut wurde deshalb der Prüfkörper in der Prüfeinrichtung einseitig mit erhöhtem Wasserdruck beaufschlagt, während auf der anderen Seite eine Vakuumpumpe angeschlossen wurde.



Nach der Sättigung des Prüfkörpers mit Wasser begann die Prüfung mit dem vorgesehenen einseitigen Überdruck auf der Eingangsseite und mit Atmosphärendruck auf der Ausgangsseite. Zu Beginn der Messung war stets die zufließende Wassermenge etwas größer als die abfließende, weil noch vorhandener Porenraum gefüllt und verdrängt wurde. Außerdem kann auf der drucklosen Seite des Prüfkörpers während des Versuchs ein Teil der im Wasser gelösten Druckluft entweichen. Die beobachteten Luftblasen auf der Ausgangsseite waren jedoch so selten, daß dadurch kein wesentlicher Einfluß auf den Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten hervorgerufen werden dürfte. Lediglich die Messungen der ein- und auslaufenden Wassermenge mit den Kapillaren, die jeweils nur über kurze Zeit andauerten, wiesen erhebliche Streuungen auf, während die Ermittlung der spezifischen Durchlässigkeit mit Hilfe der durchgelaufenen, aufgefangenen Wassermenge über einen längeren Beobachtungszeitraum, z. B. 8 bis 16 h, diese Streuungen vermied. Bild 12 zeigt die Abnahme des spezifischen Durchlässigkeitsbeiwerts  $k$  mit der Versuchsdauer an einem trockenen, 2 Jahre alten Beton mit Wasserzementwert  $w/z = 0,60$  anhand der aufgefangenen Wassermengen. Der Prüfdruck betrug hier 2,5 bar über Atmosphärendruck.

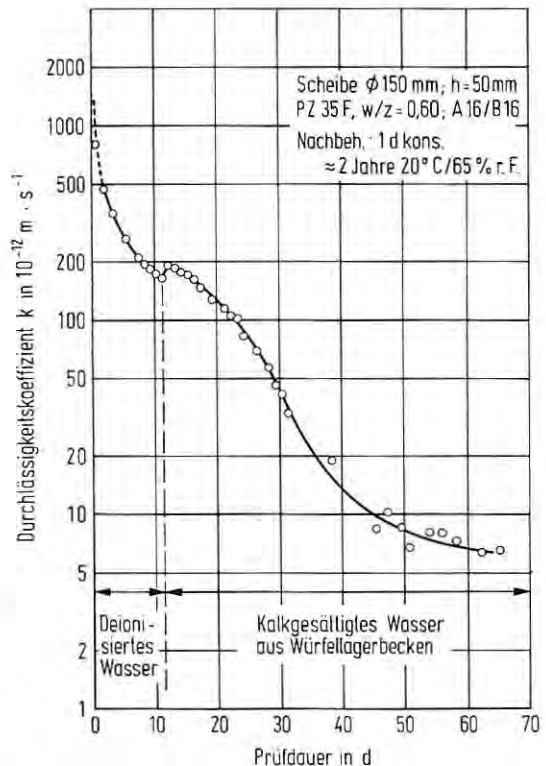


Bild 12  
 Wasserdurchlässigkeitsbeiwert  $k$  in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Die beschriebene Meßeinrichtung gestattet auch die Ermittlung der Wassereindringtiefe in einer Richtung in Abhängigkeit von der Zeit, solange diese kleiner ist als die Prüfkörperhöhe von 5 cm. Soweit nicht speziell mit Meßfühlern ausgestattete Prüfkörper zur Verfügung stehen, müßte für die Messung jeweils ein Körper nach der vorgesehenen Zeit ausgebaut und gespalten werden.

Einfacher zu handhaben ist die Prüfung der Wassereindringtiefe nach DIN 1048, bei der das Wasser auf einer Fläche mit 10 cm Durchmesser in einen Halbraum eindringt (siehe Bild 13). Die Druckstufen betragen 2 Tage lang 1 bar, 1 Tag lang 3 bar und 1 Tag lang 7 bar. Danach werden die Prüfkörper mittig gespalten. Als Wassereindringtiefe nach DIN 1048 gilt der Mittelwert aus den maximalen Wassereindringtiefen von drei Prüfkörpern normal zur Prüffläche.

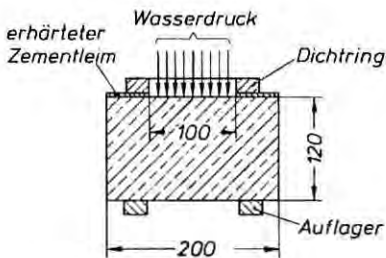


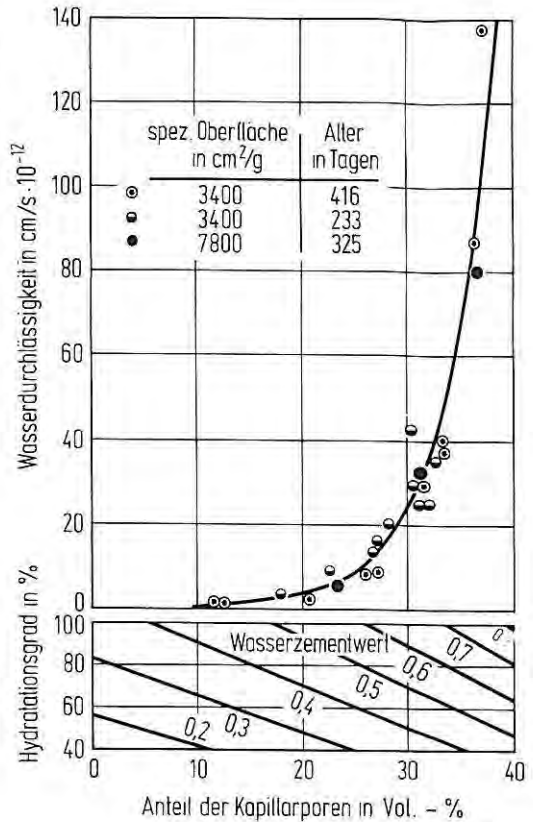
Bild 13  
Prüfung der Wasserdurchlässigkeit  
nach DIN 1048

#### 4.3 Anwendungsbereich

Powers u. a. [20] haben die Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwerts  $k$  an wassergesättigtem Zementstein in Abhängigkeit von der Hydrationsdauer intensiv untersucht. Eines der wesentlichen Ergebnisse zeigt Bild 14, das von Locher und Wüschers [21] durch ein Diagramm ergänzt wurde, aus dem auch der Einfluß des Wasserzementwertes und des Hydrationsgrades des Zements erkennbar wird. Die angegebenen Durchlässigkeitsbeiwerte gelten für Zementstein, der von Anfang an in Wasser gelagert wurde.

Bei der Übertragung von Wasserdurchlässigkeitsprüfungen an Zementstein auf Beton sind nachfolgende Gesichtspunkte zu beachten: Ruettgers u. a. [22] zeigten an Betonprüfkörpern, daß die Wasserdurchlässigkeit mit zunehmendem Anteil an dichtem Zuschlag theoretisch abnehmen muß, weil die Zahl der durchgehenden Poren je Querschnittseinheit „effektiv“ (siehe Abschnitt 3.1) abnimmt und der vom eindringenden Medium zurückzulegende Weg zunimmt. Dieser Einfluß wird in [23] auch anhand von Diffusionsmessungen nachgewiesen. Mit steigendem Wasserzementwert und Zuschlagdurchmesser können jedoch auch die Zahl und die Größe von wassergefüllten Poren zunehmen, die sich unter den Zuschlägen durch Absetzen des Mörtels und infolge Blutens bilden können. Dies führte insgesamt bei [22] zu einer erhöhten Durchlässigkeit mit steigendem Durchmesser des Zuschlags. Die gleiche Beobachtung machte auch Brodersen [23] bei der Messung der Chloriddiffusion. Am Zementstein gewonnene Ergebnisse lassen sich deshalb im all-

Bild 14  
Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und vom Hydratationsgrad (nach Powers)



gemeinen nicht nach einem einfachen physikalischen Gesetz auf die Durchlässigkeit von Beton übertragen.

Wegen der extrem langen Versuchsdauer werden Wasserdurchlässigkeitsversuche heute in der Regel nur durchgeführt, wenn der Beton im Bauwerk sehr hohem Wasserdruck wie z. B. bei Offshore-Bauwerken [24, 25] ausgesetzt ist. Wenn schon ein Beton, wie auf Bild 12 gezeigt, der weder für solche Zwecke zusammengesetzt ( $w/z = 0,60$ ) noch entsprechend nachbehandelt war, fast „dicht“ wird, erkennt man, daß Betone mit  $w/z = 0,40$  bis  $0,45$  und hinreichender Nachbehandlung leicht Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich von  $k \approx 1 \cdot 10^{-14}$  m/s erreichen. Die Auswirkung dieser Zahl erkennt man am besten anhand von Gleichung (16).

Um die Prüfdauer abzukürzen, arbeiteten Graf und Walz [26] schon früh an einem Verfahren zur Messung der Wassereindringtiefe. Auch hier zeigte sich von Anfang an, daß das Ergebnis neben der Zusammensetzung erheblich von der Nachbehandlung der Prüfkörper abhing. Selbst die Lagerung in feuchtem Sand führte während der kurzen Prüfdauer im Verhältnis zu vorangehender Wasserlagerung zu erheblich größeren Wassereindringtiefen, wie Weigler und Reissmann [27] feststellten. Die Autoren zogen damals den

auch heute noch gültigen Schluß, daß die Prüfbedingungen sehr genau definiert werden müssen und daß die Prüfung nur für Betone sinnvoll ist, die drückendem Wasser ausgesetzt sind. Anhand weiterer Prüfungen zeigte Bonzel [28], daß austrocknende Bedingungen vor der Prüfung stets zu erheblich größeren Wassereindringtiefen führten als die in DIN 1048 vorgesehene Wasserlagerung.

Man kann insgesamt feststellen, daß sich die Prüfung der Wassereindringtiefe nach DIN 1048 mit Wasserlagerung bis zur Prüfung bewährt hat, um eine falsche Zusammensetzung von Betonen für wasserundurchlässige Bauwerke zu erkennen. Bei einer Neufassung von DIN 1048 sollte auf die „Abdichtung“ neben der Prüffläche mit Zementleim verzichtet werden, weil die Prüfung ohne diese Behandlung erheblich einfacher und sehr viel sicherer durchzuführen ist. Die Prüfung würde sehr erleichtert, wenn über 3 oder 4 Tage ein gleichbleibender Prüfdruck verwendet werden könnte. Als Überschlagswert ergibt sich für gleiche Eindringtiefe nach Gl. (22) ein äquivalenter Prüfdruck von 4 bar über 3 Tage oder von 3 bar über 4 Tage. Der Nachweis für die Gleichwertigkeit mit den derzeit gültigen Druckstufen müßte jedoch noch an verschiedenen zusammengesetzten Betonen erbracht werden. Daran wird zur Zeit gearbeitet.

## **5. Zusammenfassung**

5.1 Zur Untersuchung von Fragen der Dauerhaftigkeit und der Gebrauchsfähigkeit von Beton werden im Forschungsinstitut der Zementindustrie u. a. die Gasdurchlässigkeit, die Gasdiffusion und die Wasserdurchlässigkeit als Prüfverfahren verwendet.

5.2 Für jedes Verfahren werden grundlegende physikalische Zusammenhänge, die im Forschungsinstitut verwendete Meßeinrichtung sowie die Bedeutung der Prüfungen für den Betonbau beschrieben. Die physikalischen Zusammenhänge werden dabei nur so weit dargestellt, wie sie für die Auswertung der Versuchsergebnisse erforderlich sind.

5.3 Für die Gas- und Wasserdurchlässigkeitsprüfungen sowie für die Gasdiffusionsversuche wird eine im Forschungsinstitut entwickelte Prü fzelle verwendet, in der Betonprüfkörper mit 15 cm Durchmesser und bis zu 5 cm Höhe untersucht werden können. In die Prü fzelle können sowohl gesondert hergestellte Prüfkörper als auch Bohrkernabschnitte aus Bauteilen eingebaut werden.

5.4 Die Vorlagerungsbedingungen und das Prüfmedium haben einen großen Einfluß auf das Ergebnis. Für die Gasdurchlässigkeitsprüfungen eignen sich insbesondere weitgehend inerte Prüfgase wie Sauerstoff und Stickstoff. Bei Wasserdurchlässigkeitsprüfungen führt die Wasserbelastung in der Regel zu einer Abnahme der Durchlässigkeit mit der Zeit.

5.5 Die Prüfungen der Gasdurchlässigkeit und der Gasdiffusion dienen zur Beschreibung der offenen Porosität von Betonen, die keine ständige Wasserbelastung aufweisen, also z. B. der Witterung ausgesetzt sind. Die Versuche dienen dem Ziel, Zusammenhänge zwischen der offenen Porosität, der Festigkeit und z. B. dem Carbonatisierungsfortschritt herzustellen.

5.6 Die Prüfung der Wasserdurchlässigkeit und der Wassereindringtiefe sind geeignete und bewährte Verfahren, um das Verhalten des Betons bei dauernder Druckwasserbelastung zu untersuchen. Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen an nicht vollständig wassergesättigten Prüfkörpern führen erst nach wochen- oder monatelanger Prüfdauer bei abnehmender Durchlässigkeit zu maßgeblichen spezifischen Durchlässigkeitsbeiwerten. Wasserdurchlässigkeitsuntersuchungen erscheinen deshalb nicht geeignet zur Beurteilung der offenen Porosität von Betonen, die der freien Witte- rung ausgesetzt sind.

5.7 Damit die Prüfung der Wassereindringtiefe innerhalb von nur vier Tagen zu aussagekräftigen Ergebnissen führen kann, sollte sie weiterhin nur an wassergesättigten Prüfkörpern durchgeführt werden.

5.8 Für die Ermittlung der Wassereindringtiefe nach DIN 1048 wird vorgeschlagen, auf den Auftrag von Zementleim neben der Wassereindringfläche zu verzichten und einen Prüfzyklus mit gleichbleibendem Druck zu verwenden.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Wischers, G.: Langzeitverhalten von Betonbauwerken. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984) H. 8, S. 589/592.
- [2] Žagar, L.: Die Grundlagen zur Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Baustoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 26 (1955) H. 12, S. 777/782.
- [3] Schwiete, H. E., und V. Ludwig: Über die Bestimmung der offenen Porosität im Zementstein. Tonindustrie-Zeitung 90 (1966) H. 12, S. 562/574.
- [4] Därr, G. M., und V. Ludwig: Determination of permeable porosity. Matériaux et Constructions 6 (1973) H. 33, S. 185/190.
- [5] Žagar, L.: Effektive Porosität in feinporigen keramischen Werkstoffen nach der Gasdiffusionsmethode. sprechsaal für keramik glas email silikate 100 (1967) H. 4, S. 143/148.
- [6] Beck, H., u. a.: Ermittlung der Gasdurchlässigkeit von feuerfesten Steinen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 31 (1960) H. 10, S. 607/616.
- [7] DIN 51058 – Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe. Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit feuerfester Steine (Ausgabe Juni 1983).
- [8] TGL 13724 – Prüfung keramischer Roh- und Werkstoffe. Bestimmung der Gasdurchlässigkeit (Ausgabe September 1971).
- [9] TGL 21094/12 – Prüfung des erhärteten Betons. Bestimmung der spezifischen Gasdurchlässigkeit (Ausgabe September 1975).
- [10] Kropp, J.: Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein. Dissertation Universität Karlsruhe, 1983.
- [11] Manns, W., und O. Schatz: Über die Beeinflussung der Festigkeit von Zementmörteln durch Karbonatisation. Betonstein-Zeitung 33 (1967) H. 4, S. 148/156.
- [12] Grube, H.: Einfluß der Nachbehandlung auf die Porosität von Beton. Int. Kolloquim Chloridkorrosion, Wien 1983. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österr. Zementfabrikanten, H. 36, S. 54/59.

- [13] Ulich, H., und W. Jost: Kurzes Lehrbuch der physikalischen Chemie, 10. und 11. Aufl., Steinkopf-Verlag, Darmstadt 1957.
- [14] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1974.
- [15] 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, und H. 3, S. 199/202.
- [16] 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.
- [17] Lawrence, C. D.: Transport of Oxygen through Concrete. The British Ceramic Society Meeting „Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement“. Imperial College, London, 13.–14. April 1984.
- [18] DIN 1048 Teil 1 – Prüfverfahren für Beton (Dez. 1978).
- [19] Valenta, D.: Kinetics of Water Penetration into Concrete as an Important Factor of its Deterioration and of Reinforcement Corrosion. Inl. Symposium „Durability of Concrete – 1969“ Prag, Preliminary Report, Part I, A–S. 177/193.
- [20] 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.
- [21] Locher, F. W., und G. Wischers: Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins, Abschnitt 4.6 Wasserdurchlässigkeit. Zement-Taschenbuch 1984 (48. Ausgabe), Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1984, S. 86/88.
- [22] Ruettgens, 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.
- [23] Brodersen, H. A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Zonen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Dissertation RWTH Aachen, 1982.
- [24] Haynes, H. H.: Permeability of concrete in seawater. Performance of concrete in marine environment. American Concrete Institute 1980, ACI Special Publication SP-65, S. 21/28.
- [25] Grube, H.: Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton. Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt 1982.
- [26] 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.
- [27] Weigler, H., und K. Reissmann: Zur Prüfung der Wasserundurchlässigkeit von Beton. Betonstein-Zeitung (1963) H. 5, S. 260/262.
- [28] Bonzel, J.: Der Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserundurchlässigkeit des Betons. beton 16 (1966) H. 9, S. 379/383, und H. 10, S. 417/421; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 145/168.