

# Zur Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln

Von Gerd Wischers und Eberhard Krumm, Düsseldorf

## Übersicht

*Der Zementstein im Beton enthält Gelporen und bei hohem Wasserzementwert auch miteinander verbundene Kapillarporen. Während die Gelporen quasi wasserundurchlässig sind, kann durch Kapillarporen Wasser in dampfförmiger und flüssiger Phase diffundieren. — Je nach Zusammensetzung sollen Betondichtungsmittel in dreifacher Hinsicht verbessernd wirken: durch Verflüssigung und damit geringeren Wasserzementwert (weniger Kapillarporen), durch quellfähige Stoffe (Porenverengen) und durch Hydrophobieren der Porenwände (Vermindern der kapillaren Saugfähigkeit). — Abweichend von der bisherigen Prüfpraxis wurde die Wirksamkeit verschiedener Betondichtungsmittel langfristig und auch bei abwechselnder Trocknung und Durchfeuchtung untersucht. Ein Senken des Wasserzementwerts verminderte die freiwillige Wasseraufnahme und die Wasserdurchlässigkeit stärker als die Dichtungsmittel. Die ohnehin begrenzte Wirksamkeit der Betondichtungsmittel ließ zudem mit der Zeit mehr oder weniger stark nach.*

## 1. Allgemeines

Raumabschließende Bauteile aus Beton haben neben anderen Funktionen häufig zusätzlich die Aufgabe, Feuchtigkeit abzuhalten. Die Feuchtigkeit kann entweder in dampfförmiger Phase, z. B. Wasserdampf in Luft mit hoher relativer Feuchtigkeit, oder in flüssiger Phase, z. B. Wasser als Grundwasser oder in Behältern, vorliegen. Das Wasser kann ohne nennenswerten Druck, z. B. als Regen, oder mit mehr oder weniger großem Druck auf das Bauteil einwirken. Unterschiedliche Temperaturen, die den Feuchtigkeitstransport in mehrfacher Hinsicht beeinflussen können, werden in die nachfolgenden Ausführungen nicht einbezogen.

Der Baustoff Beton weist wenigstens 10 Vol.-% Poren auf, die unterschiedlich groß und zum Teil miteinander verbunden sein können. Eine absolute Wasserdichtigkeit des Betons gibt es daher nicht. Durch betontechnologische Maßnahmen kann man jedoch Beton mit einem hohen Diffusionswiderstand gegen Wasser in dampfförmiger oder flüssiger Phase herstellen. Zudem ist diejenige Menge Wasser, die pro Zeit- und Flächeneinheit durch ein Bauteil hindurchdiffundiert, neben dem spezifischen Diffusionswiderstand auch von der Dicke des Bauteils abhängig, d. h. sie nimmt mit der Dicke ab.

An der Seite, die vor Feuchtigkeitszutritt geschützt werden soll, liegt gewöhnlich eine relative Luftfeuchtigkeit unter 100 % vor, deren Höhe von der Nutzung des Raumes bestimmt wird, so daß an den Innenflächen des Bauteils stets eine mehr oder weniger große Wassermenge verdunsten wird.

Bautechnisch gilt ein Raum dann vor Feuchtigkeit geschützt, wenn die unter den jeweiligen Bedingungen des Raumes eintretende Verdunstung größer als die durchdiffundierte Wassermenge ist. Man spricht dann von „praktisch wasserundurchlässig“, wenn auch eine absolute Wasserdichtigkeit nicht gegeben ist. Bei dünnen Bauteilen von etwa 10 bis 40 cm Dicke, wie z. B. Behälterwände und Wannen, muß ein großer Diffusionswiderstand durch betontechnologische Maßnahmen erzielt werden, bei massigen Bauteilen über 50 cm Dicke, wie z. B. Schleusen und Talsperren, können aufgrund der Dicke an den Diffusionswiderstand des Betons geringere Anforderungen gestellt werden (siehe DIN 1045, Abschnitt 6.5.7.2).

Voraussetzung für die Wasserundurchlässigkeit eines Bauteils ist natürlich auch, daß keine durchgehenden Risse entstehen und daß Anschluß- und Trennfugen wasserdicht ausgebildet sind.

## **2. Porosität von Zementstein und Beton**

Der Zementstein im Beton, der die Zuschlagkörner miteinander verkittet und etwa ein Viertel bis ein Drittel des Betonvolumens ausmacht, ist ein hochporöser, anorganischer Stoff. Der Durchmesser der Poren ist sehr unterschiedlich, er reicht von ein millionstel Millimeter (= 1 Nanometer = 1nm) bis in den Millimeterbereich.

Der Entstehung und dadurch bedingt auch der Größe nach unterscheidet man drei Porenarten, nämlich Gelporen, Kapillarporen und Luftporen. Als Gelporen bezeichnet man die Räume in und zwischen den mikrokristallinen Hydratationsprodukten des Zementgels, das bei der Reaktion des Zements mit dem Anmachwasser entsteht. Der Durchmesser dieser Gelporen liegt überwiegend im Bereich von 1 bis 10 Nanometer. Die Gelporosität beträgt etwa 30 Vol.-%. Obwohl das Wasser in den Gelporen durch Temperaturen über 100 °C verdampft, ist umstritten, ob man es als flüssiges, bewegliches Wasser ansehen darf oder ob es zum Teil bei normalen Umweltbedingungen als eine Art Zwischenschichtwasser größerer Kristalle zur festen Phase des Zementsteins gerechnet werden muß.

Als Kapillarporen im Zementstein bezeichnet man die ursprünglich mit Anmachwasser gefüllten Räume, die dann bei der Hydratation mehr oder weniger von Zementgel ausgefüllt werden. Ob und in welchem Maße Kapillarporen entstehen, richtet sich daher nach dem Verhältnis von Anmachwasser zu Zement, also dem Wasserzementwert. Unterhalb eines Wasserzementwerts von 0,40 verbleiben bei weitgehender Hydratation praktisch keine Kapillarporen, weil alle ursprünglich vom Anmachwasser ausgefüllten Räume mit Gel ausgefüllt werden. Oberhalb eines Wasserzementwerts von 0,40 nimmt der Anteil der Kapillarporen auch bei voll-

ständiger Hydratation schnell zu. Er beträgt bei einem Wasserzementwert von 0,60 etwa 25 Vol.-% des Zementsteins, und die Kapillaren sind dann größtenteils untereinander verbunden. Der Durchmesser der Kapillaren ist etwa 1000mal so groß wie der der Gelporen und liegt damit im Mikrometerbereich ( $\mu\text{m}$ ). Das Wasser in den Kapillarporen ist auf jeden Fall beweglich, und zwar kann ein Transport sowohl in der dampfförmigen als auch in der flüssigen Phase erfolgen (siehe Abschnitt 4).

Luftporen entstehen entweder gewollt, z. B. durch luftporenbildende Zusatzmittel, oder als Fehlstellen infolge mangelnder Verdichtung. Ihr Durchmesser ist 100- bis 1000mal so groß wie der der Kapillarporen, d. h. er liegt im allgemeinen zwischen 0,1 und 1 Millimeter. Die Luftporen in vollständig verdichtetem Beton sind nicht miteinander verbunden, daher ist ihr Einfluß auf die Wasserdurchlässigkeit gering und braucht nicht berücksichtigt zu werden.

Dichter, hochfester Beton weist nach seinem Erhärten eine Gesamtporosität von etwa 10 Vol.-% auf; abgesehen von 1 bis 2 Vol.-% Luftporen handelt es sich dabei ausschließlich um Gelporen. Wird der Beton mit einem hohen Wasserzementwert, z. B. 0,70 oder mehr, hergestellt, so weist er auch nach vollständiger Verdichtung und nach dem Erhärten eine Gesamtporosität bis zu 20 Vol.-% auf. Solcher Beton ist weder sehr fest noch dicht.

### **3. Wassergehalt des Zementsteins bei Luftlagerung**

Je nach den Umweltbedingungen sind die Poren des Betons mehr oder weniger mit Wasser gefüllt, d. h. der Wassergehalt des porösen Baustoffs Beton ist unterschiedlich groß. Lagert Beton unter konstanten Umweltbedingungen, dann stellt sich mit der Zeit ein konstanter Wassergehalt, die sogenannte Ausgleichsfeuchte, ein. Verändert man bei weiterhin gleicher Temperatur dann die relative Luftfeuchtigkeit auf einen anderen konstanten Wert, so stellt sich eine andere Ausgleichsfeuchte ein. Dieser Vorgang ist bei weitgehend erhärtetem Beton reversibel, zwischen Anfeuchten und Austrocknen kann allerdings eine Hysterese bestehen. Trägt man über der relativen Luftfeuchtigkeit den Wassergehalt des Betons auf, so erhält man sogenannte Sorptionsisothermen. In Bild 1 ist eine solche Sorptionsisotherme für Zementmörtel aufgetragen [1].

Die Wandflächen der miteinander in Verbindung stehenden Poren im Beton ergeben eine sehr große innere Oberfläche; sie beträgt für ungemagerten Zementstein 100 bis 200  $\text{m}^2/\text{g}$ . Wie für anorganische Stoffe charakteristisch, ist die Festkörper-Oberflächenspannung der Porenwände im Beton deutlich größer als die Oberflächenspannung des Wassers, welche bei  $23^\circ\text{C}$   $72,8 \text{ dyn/cm}$  beträgt. Daher zerfließen Wassertropfen auf diesen Stoffen und benetzen sie vollständig in dünner Schicht. Nach der BET-Theorie [2] entsteht auf einem ausgetrockneten Körper, der dann Wasserdampf ausgesetzt wird, zunächst eine monomolekulare Schicht Wasser, also eine Schicht, die nur ein Wassermolekül dick ist. Erst wenn die gesamte Oberfläche monomolekular belegt ist, ent-

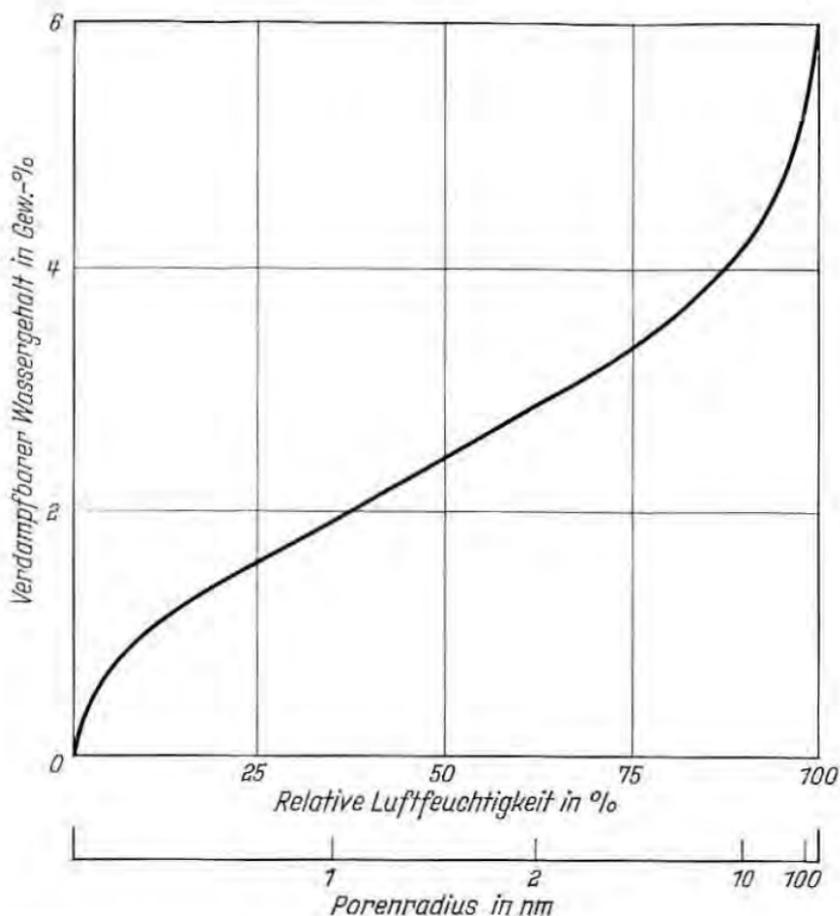


Bild 1 Sorptionsisotherme von Zementmörtel nach [1]

stehen dickere Wasserschichten mit mehreren Lagen Wassermolekülen übereinander. Die Bindungswärme der zweiten und aller weiteren Moleküllagen entspricht der Verflüssigungswärme des Wassers, so daß diese Schichten ein dem flüssigen Wasser ähnliches Verhalten haben. Für die Bindung der monomolekularen Schicht an den Feststoff der Porenwand ist jedoch eine für den Feststoff charakteristische Adsorptionswärme maßgebend, so daß diese Schicht ein von flüssigem Wasser abweichendes physikalisches Verhalten aufweisen kann. Der Durchmesser eines Wassermoleküls beträgt etwa 0,3 nm, das ist auch größenordnungsmäßig die Dicke der einzelnen Molekülschichten. Sind in einem feinporösen Stoff die Poren sehr eng, d. h. der Abstand zwischen den Feststoff-Porenwänden ist sehr klein, dann tritt neben dem Effekt der Adsorption auf der Oberfläche der Porenwand noch die sogenannte Kapillarkondensation ein. Weshalb in solchen engen Poren eine Kondensation unterhalb des normalen Sättigungspunktes stattfindet, ist noch nicht abschließend geklärt [3], wengleich als Erklärung eine Verminderung des Dampfdrucks in den Poren infolge der konkaven Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche herangezogen wird. Mit dieser Theorie läßt sich nach der von Kelvin aufgestellten Gleichung errechnen, bis zu welcher

Porengröße bei einer bestimmten relativen Luftfeuchtigkeit Kondensation eintritt. In Bild 1 ist unter der rel. Luftfeuchtigkeit auf einer gesonderten Skala der Porenradius in nm aufgetragen, bis zu dem Kondensation eintritt. Bei etwa 35 % rel. Luftfeuchtigkeit sind alle Poren mit einem Radius bis zu 1 nm mit Wasser voll kondensiert, bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 90 % alle Poren mit einem Radius bis zu 10 nm.

Die rel. Luftfeuchtigkeit des westeuropäischen Klimas beträgt im Mittel etwa 75 %. Selbst an trockenen Tagen sinkt die rel. Feuchtigkeit in der Atmosphäre selten unter 50 %, und nachts steigt sie dann bis auf Werte um 90 % wieder an. Nur in geschlossenen, beheizten Räumen kann die rel. Luftfeuchtigkeit im Winter über längere Zeit bis zu 30 % absinken.

Die Gelporen haben zum überwiegenden Teil theoretische Radien von 1 bis 3 nm. In solchen Poren ist bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von rd. 70 % Wasser kondensiert. Da insbesondere Austrocknungsvorgänge solcher feinporösen Stoffe sehr langsam ablaufen, kann man davon ausgehen, daß die Gelporen im Zementstein und Beton – zumindest bei Lagerung im Freien – stets mehr oder weniger vollständig mit Wasser gefüllt sind. (Es sei in diesem Zusammenhang nochmals darauf hingewiesen, daß es bislang ungeklärt ist, ob es sich hierbei um flüssiges Wasser in feinsten Poren oder um eine quasifeste Phase von Zwischenschichtwasser in Kristallen handelt.)

Die Kapillarporen im Zementstein sind etwa 1000mal so groß wie die Gelporen, d. h. ihr Radius liegt in der Größenordnung von 1000 nm = 1  $\mu$ m. Bei einer rel. Luftfeuchtigkeit von 97 % kondensiert Wasserdampf nur in Poren bis zu 35 nm, d. h. in den Kapillarporen des Zementsteins kondensiert Wasserdampf erst bei seiner Sättigung (100 % rel. Luftfeuchtigkeit).

#### 4. Wassertransport im Zementstein

Der Transport des Wassers in den Poren des Zementsteins kann sowohl in der dampfförmigen als auch in der flüssigen Phase erfolgen. Zur Erläuterung der Vorgänge dienen die Bilder 2 und 3, die beide [4] entnommen sind, letzteres nach einer ursprünglichen Darstellung in [5].

Wird eine Probe aus künstlich getrocknetem Zementstein „außen“ einer niedrigen Luftfeuchtigkeit von z. B. 20 % ausgesetzt, während „innen“ weiterhin eine gegen Null gehende Luftfeuchtigkeit vorliegt, dann bewirkt der Wasserdampfpartialdruck einen Wassertransport der Dichte  $J$  durch den Zementstein. In den größeren Poren (Bild 2, links) wird die Porenoberfläche mit einer sehr dünnen Wasserschicht – weitgehend monomolekular – belegt. Die einzelnen Wassermoleküle sind zwar nicht fest gebunden, so daß ein ständiger Austausch mit anderen aus der Dampfphase auftreten kann, sie können jedoch nicht entlang der Porenwand fließen. Der Wassertransport geschieht daher nahezu ausschließlich als Wasserdampfdiffusion  $J_D$  im luftgefüllten Teil der Pore. Dieser reine dampfförmige Wassertransport ist vergleichsweise gering.

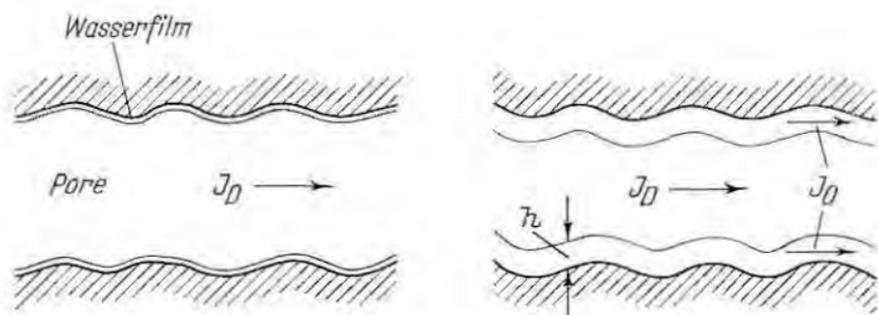


Bild 2 Wassertransport in den Poren des Zementsteins nach [4]

Bleibt der Wasserdampfpartialdruck erhalten, liegt er insgesamt jedoch auf einem höheren Niveau, z. B. „außen“ 60 % und „innen“ 40 % rel. Feuchtigkeit, dann schlägt sich auf der Porenwand ein dickerer, multimolekularer Wasserfilm nieder (Bild 2, rechts). In diesem dickeren Wasserfilm (Dicke  $h$ ) kann ein Fließen des Wassers auftreten. Der Wassertransport geschieht nun sowohl weiterhin als Wasserdampfdiffusion  $J_D$  als auch im Wasserfilm als sogenannte Oberflächendiffusion  $J_0$ . Der gesamte Wassertransport der Dichte  $J$  ist also gleich  $J_D + J_0$ . Nach den Angaben in [4] und [5] übertrifft der Wassertransport durch Oberflächendiffusion den durch Dampfdiffusion mit steigender Luftfeuchtigkeit um ein Vielfaches, bei einer rel. Luftfeuchtigkeit über 60 %, wie sie in der Atmosphäre in Westeuropa meistens vorliegt, sogar um Zehnerpotenzen. Für die Wasserdurchlässigkeit von Bauteilen ist daher die reine Wasserdampfdiffusion von untergeordneter Bedeutung.

Im Zementstein liegen nicht nur größere Poren eines Durchmessers vor, wie in Bild 2 dargestellt, sondern die unterschiedlichsten Porengrößen und -formen, die alle miteinander verbunden sein können. Während größere Poren eine multimolekulare Schicht auf den Wandungen haben und größtenteils noch mit Luft gefüllt sind, können diese Schichtdicken bereits ausreichen, um kleinere Poren ganz zu füllen, bzw. es kann dort bereits Kondensation eingetreten sein. Das poröse System weist dann nicht nur Poren unterschiedlicher Größe auf, sondern diese sind auch noch sehr unterschiedlich gefüllt, so daß in ihnen ganz verschiedene Transportmechanismen wirksam sind.

In Bild 3 werden die wesentlichsten Charakteristiken des Wassertransports durch ein System unterschiedlich großer Poren bei steigendem durchschnittlichen Wassergehalt veranschaulicht (nach [5]). Dargestellt ist eine dünne, röhrenförmige Pore, die von einer wesentlich dickeren Kugelpore unterbrochen ist. In das vollständig ausgetrocknete System strömt im Fall A Luft mit geringer Feuchte und belegt die Oberfläche. Anschließend findet Wasserdampfdiffusion statt (Fall B), bei der der Querschnitt der engen Röhre für die Menge maßgebend ist. Steigt die rel. Luftfeuchtigkeit an, dann wird die Röhre schließlich durch Kondensation mit Wasser gefüllt (mittlere Reihe von Bild 3). Ist die Kugelpore bedeutend größer als die Röhre (Fall C), dann kann die Wasserschicht in der Kugelpore weiterhin so dünn sein, daß der Transport

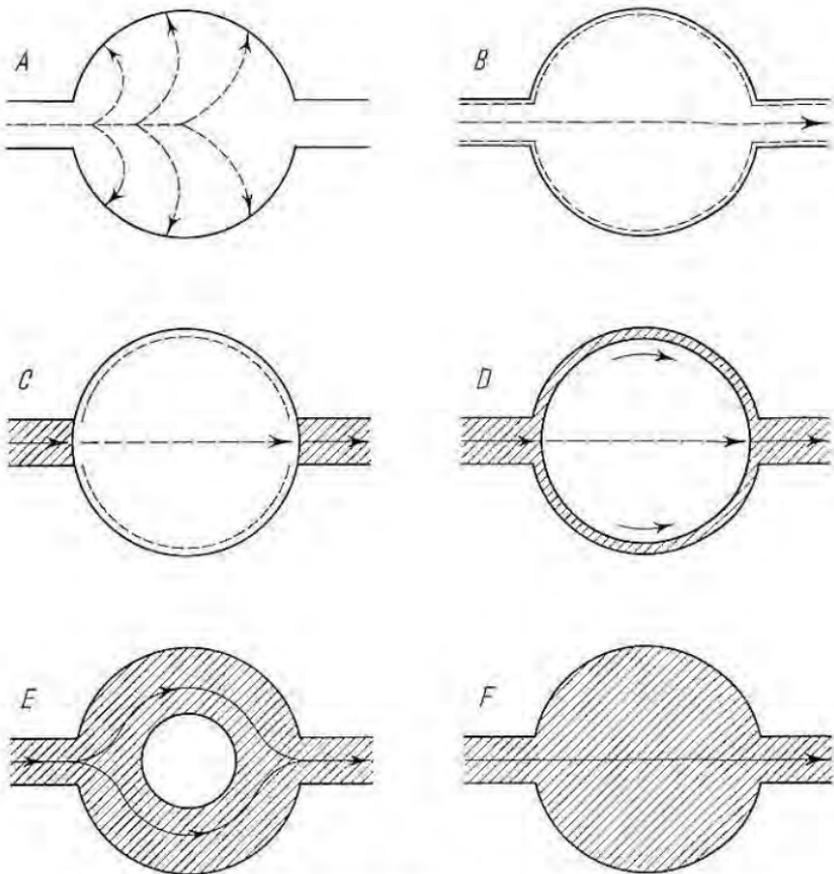


Bild 3 Wassertransport in unterschiedlich großen Poren bei steigendem Wassergehalt nach [4] und [5]

im wesentlichen in Form der Wasserdampfdiffusion durch die Kugelpore erfolgt, die damit auch für den gesamten Wassertransport maßgebend ist. Beträchtlich größer wird der Wassertransport im Falle D, wenn bei einer im Verhältnis nicht so großen Kugelpore ein nennenswerter Wassertransport als Oberflächendiffusion durch die Kugelpore erfolgt. Der Flüssigkeitstransport in Röhre und Oberflächenschicht kann von gleicher Größenordnung sein. In der unteren Reihe ist das gesamte Porensystem mehr oder weniger vollständig mit Wasser gefüllt. Im Fall E ist lediglich in einer großen Kugelpore eine Luftblase frei schwimmend vorhanden. In einem System unterschiedlicher Poren, das weitgehend wassergefüllt ist, tritt die sogenannte Sickerströmung auf. Sie setzt auf beiden Seiten des Bauteils den Ein- bzw. Austritt von flüssigem Wasser voraus, ferner eine entsprechende Wasserdruckdifferenz. Solche Sickerströmungen werden durch das Gesetz von Darcy erfaßt.

Von den Wassertransportmechanismen durch Zementstein, die nicht durch Bild 3 erfaßt sind, kommt möglicherweise noch die Knudsen'sche Molekularbewegung in Betracht [4], die in sehr engen Poren — wie z. B. den Gelporen — stattfindet, wenn die Porendurchmesser kleiner sind als die freie Weglänge der diffun-

dierenden Moleküle. Die Anwendung dieser Theorie auf die Gelporen des Zementsteins setzt eine gewisse Beweglichkeit der Wassermoleküle in den Gelporen voraus, was jedoch noch nicht völlig geklärt ist.

Ergänzt werden muß die Darstellung in Bild 3, die sich auf den Transport durch ein Element bezieht, noch um die Fähigkeit eines trockenen, feinporigen Systems, aus einem wasserbenetzbaren Stoff beim Kontakt mit flüssigem Wasser aufgrund der Kapillarkapillare flüssiges Wasser aufzusaugen, und zwar um so höher über dem vorhandenen Wasserspiegel, je dünner diese Poren sind. Nach einer Näherungsformel in [4] errechnet sich z. B. für Poren mit einem Radius von  $1 \mu\text{m}$ , was der Größenordnung der Kapillarporen im Zementstein entspricht, eine kapillare Steighöhe von rd. 1500 cm. Da das physikalische Grundgesetz der Kapillarität noch nicht erkannt ist, beschränkt man sich bei Versuchen auf die Bestimmung der Steighöhe und der aufnehmbaren Wassermenge, und zwar entweder auf die sich nach längerer Zeit einstellenden Maximalwerte oder auf die sich in einer vorgegebenen Zeit einstellenden Teilwerte.

## 5. Prüfung der Wasserdurchlässigkeit

Für die Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit von Zementstein und Beton bieten sich vom Prinzip her drei verschiedene Verfahren an, nämlich die Bestimmung der Wasserdampfdiffusion, die Bestimmung der freiwilligen Wasseraufnahme (kapillare Saugfähigkeit) und die Bestimmung des Wasserdurchflusses unter Wasserdruck (Sickerströmung).

### 5.1. Wasserdampfdiffusion

Bei der Bestimmung der Wasserdampfdiffusion wird der Probekörper für längere Zeit einem konstanten Wasserdampfdruckunterschied ausgesetzt; wenn sich gleichförmige Verhältnisse eingestellt haben, wird die Wassermenge, bezogen auf Fläche und Dicke des Probekörpers, gemessen, die pro Zeiteinheit durch den Probekörper hindurchdiffundiert. Das Ergebnis wird häufig auf die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  umgerechnet. Diese Zahl gibt an, um wieviel mal mehr Wasserdampf unter gleichen Bedingungen durch eine Luftschicht gleicher Dicke diffundieren würde. Die Zahlen sind also größer als 1, und je größer sie sind, desto größer ist der Widerstand des geprüften Stoffes gegen Wasserdampfdiffusion. Verfahren zur Wasserdampfdiffusionsmessung sind seit 2 Jahren genormt [6], schon einige Jahre vorher war ein nach dem gleichen Prinzip arbeitendes Verfahren für Beton beschrieben worden [7].

Wie aus den Bildern 2 und 3 hervorgeht, findet unter diesen Bedingungen im Innern poröser Stoffe ein Wassertransport in dampfförmiger und in flüssiger Phase statt, deren Anteile u. a. vom Niveau der mittleren rel. Luftfeuchtigkeit abhängen. Mit der relativen Feuchtigkeit ändert sich dadurch für den gleichen Stoff auch die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Ein Beispiel hierfür enthält Bild 4, das [4] entnommen ist, jedoch auf Untersuchungen in [8] beruht.

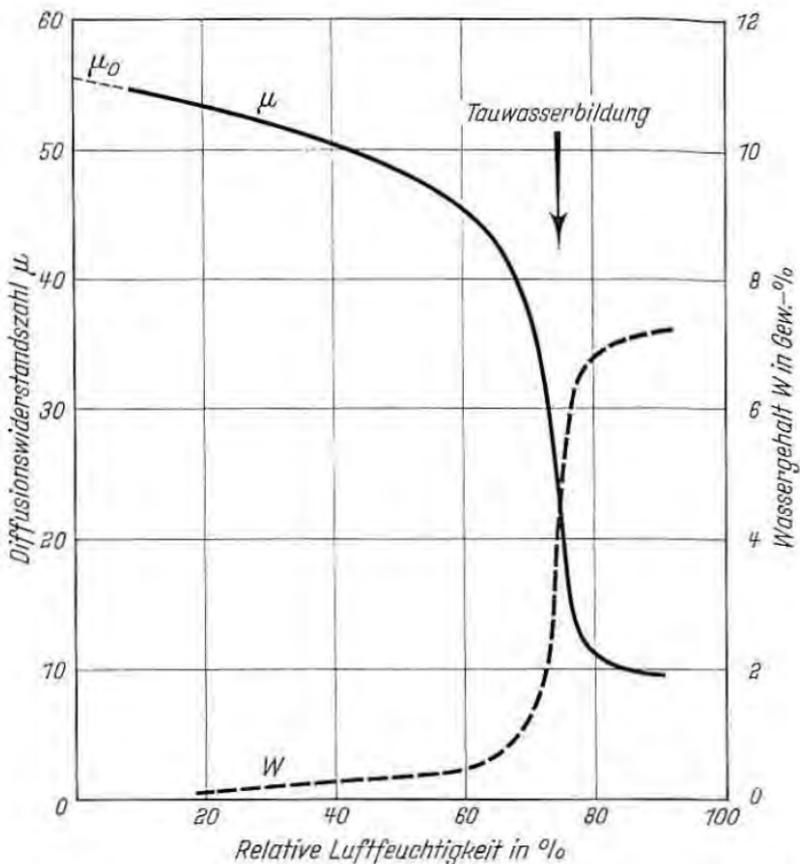


Bild 4 Diffusionswiderstand und Wassergehalt eines Zementmörtel-Prüfkörpers nach [4] und [8]

Der Prüfkörper bestand aus einer 5 cm dicken Platte aus Zementmörtel im Mischungsverhältnis 1 : 3 nach Raumeinheiten. Die Platte war neben verschiedenen Wasserdampfdruckunterschieden auch einem Temperaturgefälle von + 80 auf + 3 °C ausgesetzt, so daß schon bei mittleren Luftfeuchtigkeiten Tauwasserbildung auftrat. (Daher weicht die Kurve für den Wassergehalt dieser Platte von der Sorptionsisotherme in Bild 1 mit Beginn der Tauwasserbildung ab.) Wie zu erwarten, nahm die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  mit steigender Luftfeuchtigkeit ständig ab, weil der Anteil an Oberflächendiffusion ständig zunahm. Man kann unterstellen, daß bei sehr niedriger rel. Luftfeuchtigkeit praktisch reine Dampfdiffusion vorlag ( $\mu$  etwa 55) und daß mit zunehmender Porenfüllung schließlich nur noch ein Transport in der flüssigen Phase erfolgte ( $\mu$  etwa 10).

## 5.2. Freiwillige Wasseraufnahme (kapillare Saugfähigkeit)

Hierzu wird der erhärtete Betonkörper nach milder Trocknung – z. B. bei + 30 °C – so tief in Wasser eingetaucht, daß eine

Seitenfläche wenigstens 5 mm oberhalb des Wasserspiegels verbleibt. Demgegenüber sieht die Norm zur Prüfung der Wasseraufnahme von Naturstein [9] nach 24 Stunden ein vollständiges Eintauchen vor. Gemessen wird nach definierter Lagerungsdauer die Wasseraufnahme nach Gewicht. Vorgeschlagen worden ist auch ein Spalten der Betonkörper unmittelbar nach Ende der Wasserlagerung [10], um nach Augenschein festzustellen, ob und gegebenenfalls wie tief in den Probekörper hinein die frische Bruchfläche durchfeuchtet ist. Diese Feststellung ist jedoch meist schwierig, da keine scharfe Trennlinie zwischen der durchfeuchteten und der nicht oder weniger durchfeuchteten Zone entsteht. Zur Ermittlung der an der während der Wasserlagerung freien Oberfläche auftretenden Verdunstung ist auch das lose Auflegen eines Uhrglases (qualitativ) oder eines aufgekitteten Meßzylinders mit getrocknetem Kieselgel (quantitativ) angeregt worden [10].

### **5.3. Wasserdurchlässigkeit unter Druck (Sickerströmung)**

Hierbei werden zuvor wassergelagerte Zementstein- oder Betonprobekörper bestimmter Dicke einem definierten Wasserdruck ausgesetzt. Vorausgesetzt, daß sich ein konstanter Wasserdurchfluß mit der Zeit überhaupt einstellt, wird aus diesem Durchfluß je Zeiteinheit, bezogen auf den Querschnitt und die Dicke des Probekörpers sowie auf den vorgegebenen Druckunterschied, die spezifische Durchlässigkeit nach Darcy in cm/s errechnet.

Bei der Prüfung des Betons auf Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 Blatt 1 [11] reicht der aufgebrachte Wasserdruck von  $7 \text{ kp/cm}^2 = 70 \text{ m}$  Wassersäule bei dichtem Beton nicht aus, um einen Durchfluß durch den 12 cm dicken Probekörper zu erreichen. Dann wird der Probekörper unmittelbar nach Abbau der Druckwassereinwirkung gespalten und die Eindringtiefe des Druckwassers bestimmt. Im Gegensatz zur freiwilligen Wasseraufnahme zeichnet sich hierbei eine scharfe Trennlinie zu dem nicht unter Druckwasser stehenden Bereich ab, weil der Porenwasserüberdruck die frische Bruchfläche nachhaltig durchfeuchtet. Die Frage, bis zu welcher Tiefe Druckwasser in als „wasserundurchlässig nach DIN 1048“ geltenden Beton eindringen darf, ist nicht physikalisch begründet, sondern eine reine Konvention aufgrund praktischer Erfahrungen.

T. C. Powers hat die spezifische Wasserdurchlässigkeit nach Darcy von erhärtetem Zementstein experimentell ermittelt. In Bild 5 ist die Durchlässigkeit über dem Anteil der Kapillarporen im Zementstein aufgetragen. Erst wenn der Kapillarporenanteil 25 Vol.-% übersteigt, nimmt die spezifische Wasserdurchlässigkeit drastisch zu, weil dann die Kapillarporen miteinander verbunden sind. Nach [12] ist im unteren Bildteil in einem Diagramm angegeben, welche Kapillarporosität in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad des Zements bei einem bestimmten Wasserzementwert entsteht. Der Wasserzementwert ist daher die entscheidende betontechnologische Einflußgröße, um Zementstein und Beton mit niedriger spezifischer Wasserdurchlässigkeit herzustellen.

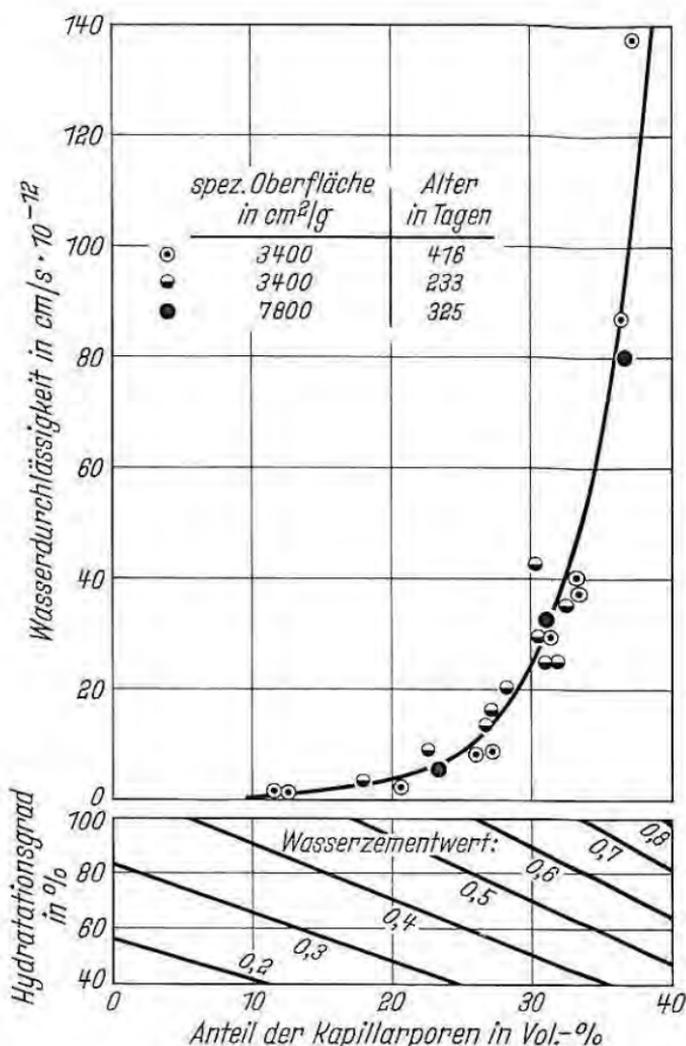


Bild 5 Wasserdurchlässigkeit von Zementstein in Abhängigkeit von Kapillarporosität und Wasserzementwert nach T. C. Powers

## 6. Betontechnologische Einflüsse auf die Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit [13, 14]

Ziel der betontechnologischen Maßnahmen zur Verminderung der Wasseraufnahme und der Wasserdurchlässigkeit muß es sein, die Gesamtporosität zu senken, insbesondere jedoch den Anteil der Kapillarporen zumindest so weit zu vermindern, daß sie nicht mehr miteinander verbunden sind. Dies kann erreicht werden durch einen Beton mit einem möglichst kleinen Wasserzementwert und mit einem nicht zu hohen Zementleimgehalt, der sich unter Baustellenbedingungen zuverlässig und möglichst vollständig verdichten läßt und sich dabei nicht entmischt.

Aus Gründen der Verarbeitbarkeit, um das Wasserabsondern (Bluten) des Betons zu mindern und zur Erzielung eines dichten Gefüges muß der Beton einen ausreichenden Mehlkorngehalt aufweisen. Unter Mehlkorn versteht man alle festen Bestandteile

unter 0,25 mm Korngröße einschließlich des Zements. Der Mehlkorngehalt sollte jedoch andererseits nicht zu groß sein, weil bei zu feinkörnigem Zuschlaggemisch die spezifische Oberfläche und damit der Zementleimbedarf stark ansteigen und ein hoher Zementleimgehalt die Gesamtporosität in jedem Fall erhöht.

Richtwerte für den Mehlkorngehalt in Abhängigkeit vom Größtkorn sind in Tabelle 3 der DIN 1045 enthalten; er beträgt z. B. für ein Größtkorn von 16 mm 450 kg je m<sup>3</sup> verdichteten Beton. Enthält der Zuschlag zu wenig Feinstteile unter 0,25 mm und soll auch der Zementgehalt nicht unnötig erhöht werden, so können zur Ergänzung des Mehlkorngehalts aufbereitetes Gesteinsmehl, gemahlener Traß, gemahlene Hochofenschlacke oder Flugasche verwendet werden. (Es sei darauf hingewiesen, daß hierfür als Betonzusatzstoffe nur solche Stoffe verwendet werden dürfen, die entweder einer diesbezüglichen Norm entsprechen, wie z. B. DIN 4226, oder für die — wie im Falle der Flugasche — ein gesondertes Prüfzeichen erteilt sein muß.)

Ein grobkörniges Zuschlaggemisch ist trotz seiner relativ niedrigen spezifischen Oberfläche aus verarbeitungstechnischen Gründen nicht zweckmäßig. Als besonders geeignet haben sich Zuschlaggemische erwiesen, deren Kornzusammensetzung etwas oberhalb der Fullerkurve liegt und die damit etwa den B-Sieblinien in den Bildern 1 bis 4 der DIN 1045 entsprechen, also z. B. bei einem Größtkorn von 16 mm der Sieblinie B 16.

Der Einfluß des Zements auf die Wasseraufnahme und Wasserdurchlässigkeit ist vergleichsweise gering. Fein gemahlene Zemente der höheren Festigkeitsklassen hydratisieren schneller, füllen daher die Kapillarporen auch schneller mit Gel aus. Während die Gesamtporosität und auch das Verhältnis von Gelporen zu Kapillarporen praktisch vom Zement unabhängig sind, werden — bei gleichem Wasserzementwert — die Kapillarporen bei fein gemahlene Zementen im statistischen Mittel häufiger unterbrochen. Grob gemahlene Zemente sondern leichter Wasser ab (Bluten), so daß hinsichtlich Verarbeitbarkeit und Mischungsstabilität nicht zu grob gemahlene Zemente zu bevorzugen sind.

Den größten Einfluß auf die Gesamtporosität und die Porenverteilung übt der Wasserzementwert aus. Beträgt z. B. bei einem zweckmäßig zusammengesetzten Zuschlaggemisch der für gute Verarbeitbarkeit erforderliche Zementleimgehalt 250 l je m<sup>3</sup> verdichteten Beton, dann muß man für den erhärteten Beton in Abhängigkeit vom Wasserzementwert mit den in Tafel 1 angegebenen Poren rechnen. (Der aus Vergleichsgründen konstant angenommene Zementleimgehalt von 250 l/m<sup>3</sup> dürfte in der Praxis bei einem W/Z-Wert von 0,40 etwas zu niedrig und bei einem W/Z-Wert von 0,80 möglicherweise etwas zu hoch sein.)

Die in einer Betonmischung enthaltene Luft läßt sich auch bei verdichtungswilligem Frischbeton nicht restlos austreiben, so daß sogenannter „vollständig verdichteter“ Frischbeton immer noch 1 bis 2 Vol.-% Luftporen enthält. Diese Luftporen sind vergleichsweise groß (im Millimeterbereich) und nicht miteinander verbunden.

Bei gleichem Zementleimgehalt nimmt die Gesamtporosität beim Ansteigen des W/Z-Werts von 0,40 auf 0,80 von 10,0 auf 15,9

Tafel 1 Poren im erhärteten Beton\*)

1	2	3	4	5	6	7
Wasser- zement- wert	Wasser l/m <sup>3</sup>	Zement kg/m <sup>3</sup>	Poren in Vol.-%			
			Gel- poren	Kapillar- poren	Luft- poren	Gesamt- porosität
0,40	139	347	7,2	1,3	1,5	10,0
0,50	152	305	6,3	4,3	1,5	12,1
0,60	163	272	5,6	6,5	1,5	13,6
0,70	172	245	5,0	8,3	1,5	14,8
0,80	179	223	4,6	9,8	1,5	15,9

\*) Konstanter Zementleimgehalt von 250 l je m<sup>3</sup> verdichteten Beton

Vol.-% zu, also um nahezu 60 %. Noch bedeutsamer ist jedoch die Verschiebung des Verhältnisses von Gelporen zu Kapillarporen. Bei einem W/Z-Wert von 0,40 sind etwa 70 % aller Poren Gelporen, Kapillarporen sind kaum vorhanden. Steigt der W/Z-Wert auf 0,80 an, dann sind nur noch knapp 30 % aller Poren Gelporen, während zugleich der Anteil der Kapillarporen auf mehr als 60 % angestiegen ist. Mit zunehmendem Wasserzementwert steigt also die Gesamtporosität beträchtlich an, der Anteil der Kapillarporen jedoch überproportional. — Auch bei konstantem Zementgehalt oder bei konstantem Wassergehalt ergeben sich in Abhängigkeit vom Wasserzementwert ähnliche Verhältnisse bei der Porosität.

## 7. Wirkungsweise der Betondichtungsmittel

Betondichtungsmittel sollen die Wasseraufnahme und die Wasserdurchlässigkeit auf verschiedene Weise vermindern, zum Teil enthalten diese Zusatzmittel Kombinationen der verschiedenen Wirkungsmechanismen [15]. Mittel, die die Oberflächenspannung des Wassers herabsetzen, wirken im Frischbeton verflüssigend und tragen auch zu einer besseren Verteilung der Feinststoffe (Mehlkorn) bei. Durch verflüssigende Mittel kann eine gleich gute Verarbeitbarkeit mit einem niedrigeren Wassergehalt erzielt werden. Dadurch erreicht man bei gleichem Zementgehalt einen niedrigeren Wasserzementwert und auch einen verminderten Zementleimgehalt, was eine verminderte Gesamtporosität und weniger Kapillarporen bedeutet (siehe Tafel 1). Die Wassereinsparung liegt in der Größenordnung von 4 bis 12 % [16], dadurch wird der Wasserzementwert bei durchschnittlichen Verhältnissen um 0,04 bis 0,12 gesenkt. Neben dem bei der Herstellung von Zellstoff anfallenden Ligninsulfonat enthalten verflüssigend wirkende Zusatzmittel andere oder weitere, meist komplexe organische Verbindungen, die zum Teil auch die Aufgabe haben, Nebenwirkungen zu unterbinden, wie z. B. Verzögerung oder Luftporenbildung.

Andere Betondichtungsmittel sollen dadurch wirken, daß sie die Poren — gemeint sind vermutlich die Kapillarporen — verengen oder sogar verstopfen. Diese Wirkung soll durch feinverteilte Stoffe erreicht werden, die bei Wasserzutritt mehr oder weniger stark quellen. Hierzu werden Metallseifen, Eiweiß-Abbaupro-

dukte, quellfähige Silicate und andere Stoffe verwendet. Ähnlich wie in flüssigen Dichtungsmitteln Wasser als Trägerstoff enthalten ist, enthalten pulverförmige Betondichtungsmittel neben dem Wirkstoff einen Trägerstoff zur gleichmäßigeren Verteilung im Beton, der oft mengenmäßig überwiegt. Bei diesen Trägerstoffen handelt es sich in der Regel um feines Gesteinsmehl, z. B. gemahlene Traß, das auf die Dichtigkeit des Betons einen günstigen Einfluß (bei fehlendem Mehlkorn) haben kann; allerdings entsprechen einer Zugabe des Dichtungsmittels von 2 % des Zementgewichts nicht einmal 10 kg Mehlkorn je m<sup>3</sup> verdichteten Beton.

Der sogenannten Hydrophobierung des Porensystems im Beton messen Fachleute, die der Betonzusatzmittelindustrie nahestehen oder sie vertreten, heute die größte Bedeutung hinsichtlich des Wirkungsmechanismus von Betondichtungsmitteln zu [17, 18, 19, 20]. Hydrophobe Stoffe sind wasserabweisend, im Gegensatz zu hydrophilen Stoffen. Auf einem hydrophilen Stoff zerfließt ein Wassertropfen und bedeckt ihn dann mit einem dünnen Wasserfilm. Demgegenüber bleibt der Wassertropfen auf einem hydrophoben Stoff in sich geschlossen oder perlt ab. Ob ein Stoff hydrophob oder hydrophil ist, hängt von seiner Oberflächenspannung ab; wenn sie groß ist, dann ist der Stoff hydrophil, also gut benetzbar. Stoffe, die eine deutlich niedrigere Oberflächenspannung als Wasser haben (unter 30 dyn/cm), sind hydrophob, weisen also Wasser ab. Als Maß für die Benetzbarkeit kann der Randwinkel  $\varphi$  zwischen Feststoff und Flüssigkeit benutzt werden, siehe Bild 6. Er ist bei hydrophoben (wasserabweisenden) Stoffen größer als 90°, rechts im Bild 6.

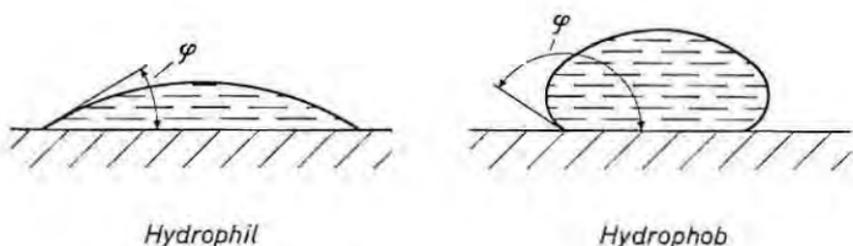
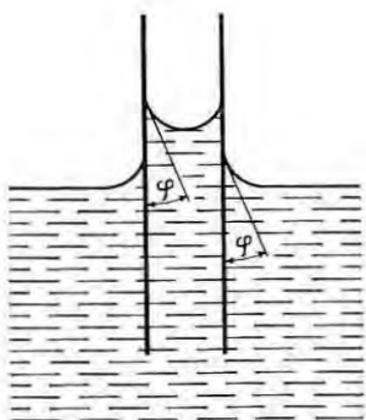
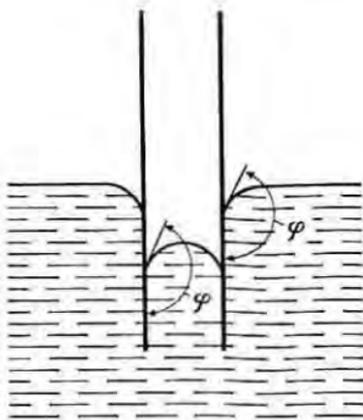


Bild 6 Benetzbarkeit von Stoffen

Ob ein Stoff hydrophob oder hydrophil ist, macht sich insbesondere bei Kapillaren aus diesem Stoff hinsichtlich ihrer kapillaren Wasseraufnahme bemerkbar, siehe Bild 7. Hydrophile Stoffe, deren Randwinkel deutlich kleiner als 90° ist, saugen Wasser in Kapillaren auf (Bild 7, links). Demgegenüber üben hydrophobe Kapillaren, deren Randwinkel größer als 90° ist, einen Widerstand gegen eindringendes Wasser aus, den man als Kapillardepresseion bezeichnet (Bild 7, rechts). Wenn die Oberflächenspannung des Feststoffs größer ist als die des Wassers, was für anorganische Stoffe wie z. B. Glas, Ziegel, Beton und Metall gilt, dann ist der Randwinkel Null, und die kapillare Saughöhe wird nur noch vom Radius der Kapillare bestimmt.



*Kapillaraszension*  
*Hydrophile Kapillare*



*Kapillardepresseion*  
*Hydrophobe Kapillare*

Bild 7 Kapillaraszension und Kapillardepresseion

Man kann einen hydrophilen Stoff mit einem Film aus bestimmten organischen Stoffen überziehen, z. B. mit Silicon, so daß dann die beschichtete Oberfläche eine sehr niedrige Oberflächenspannung aufweist und dadurch hydrophob wird. Diesen Vorgang bezeichnet man als Hydrophobierung.

Hydrophobierende Betondichtungsmittel sollen die Oberflächenspannung der Porenwandungen im Zementstein und Beton herabsetzen. Dadurch würde das sonst übliche kapillare Wasser-saugen unterbleiben und Kapillardepresseion eintreten (Bild 7, rechts). Diese Dichtungsmittel werden dem Frischbeton mit dem Anmachwasser zugegeben, mit dem sie eine Art Dispersion bilden. Sie liegen daher nach dem Verdichten des Frischbetons fein verteilt im Wasser der Kapillarporen vor, in die bei der Hydratation das Zementgel hineinwächst. Untersuchungen, ob und in welchem Maße diese organischen Teilchen in die Hydratationsprodukte eingebaut werden, sind den Verfassern nicht bekannt geworden, jedoch kann man dies aufgrund elektronenmikroskopischer Untersuchungen an Zementstein, dem Kunststoffdispersionen zugegeben waren, nicht ausschließen. Werden die ursprünglichen Kapillarporen nicht vollständig mit Hydratationsprodukten ausgefüllt — z. B. weil der Wasserzementwert oberhalb 0,40 liegt —, dann könnte beim anschließenden Austrocknen des Betons die Dispersion brechen und die Wandungen der Kapillarporen benetzen, d. h. hydrophobieren.

Ein Hydrophobieren der Gelporen scheint dagegen ausgeschlossen, weil das Wasser aus den Gelporen unter normalen Umweltbedingungen nicht verdunstet und weil die Gelporen so eng sind, daß die Dichtungsmittel-Moleküle, die um ein Vielfaches größer als Wassermoleküle sind, darin keinen Platz zur Ausbildung eines hydrophobierenden Films haben. Wenn überhaupt, so können hydrophobierende Betondichtungsmittel nur in Mörtel und Beton wirksam werden, der Kapillarporen enthält, dessen Wasserzement-

wert also größer als 0,40 ist (was allerdings in den meisten Fällen zutrifft).

Unter dem Einfluß der Atmosphäre, insbesondere in Industriegebieten, verändert sich die Oberflächenspannung aller Stoffe und strebt einem Wert zwischen 30 und 40 dyn/cm zu, was einem Randwinkel von etwas unterhalb  $90^\circ$  entspricht [4]. Hydrophobierende Filme verlieren dadurch ihre Wirksamkeit, z. B. ist neuer Autolack zunächst hydrophob (Wasser perlt ab), nach einiger Zeit jedoch nicht mehr. Auch Siliconimprägnierungen von Fassaden aus saugfähigen Stoffen verlieren — wenn auch erst im Verlauf einiger Jahre — ihre Wirksamkeit. Man muß daher davon ausgehen, daß hydrophobierende Betondichtungsmittel ebenfalls im Verlauf der Zeit in ihrer Wirksamkeit nachlassen. Da in die Poren Stoffe der Atmosphäre nur verzögert eindiffundieren, kann ein Nachlassen der Hydrophobierung in tieferen Schichten möglicherweise sehr langsam eintreten, insbesondere wenn die Porosität klein ist.

## 8. Versuchsprogramm

Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung des Versuchsprogramms (1968) waren in der Fachwelt die Auffassungen, ob überhaupt und wenn ja, dann in welcher Weise und in welchem Maße Betondichtungsmittel wirksam wären, sehr umstritten, siehe z. B. [15] und [20]. Nahezu alle veröffentlichten Untersuchungen wiesen zudem nur eine Untersuchungszeit von 28 Tagen auf, so daß die Frage nach einer Wirksamkeit über längere Dauer völlig offen war. Die Versuche sollten zumindest eine orientierende oder qualitative Klärung der vielen offenen Fragen zur Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln geben; wo immer möglich, sollten sie jedoch auch eine quantitative Aussage ermöglichen.

Allgemein anerkannte oder genormte Verfahren zur Prüfung der Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln gab es zum Zeitpunkt der Ausarbeitung des Versuchsprogramms nicht. Zwar lagen der bauaufsichtlichen Zulassung von Betonzusatzmitteln Richtlinien [21] zugrunde, die auch eine Wirksamkeitsprüfung vorsahen, aber die Aussagekraft dieser Prüfung, auf die später bei der Zulassung verzichtet wurde, war nicht befriedigend.

Dennoch wurden sowohl das Verfahren als auch die dafür vorgesehene Betonzusammensetzung in das Programm einbezogen, um einen Anschluß an die zahlreichen Untersuchungsergebnisse mit diesem Verfahren zu haben. Der dafür verwendete Beton hatte einen niedrigen Zementgehalt von  $240 \text{ kg/m}^3$ , einen relativ hohen Wassermenge von 0,75 und ein Ausbreitmaß von 45 cm. Hieraus errechnet sich bei vollständiger Hydratation des Zements eine Gesamtporosität von größenordnungsmäßig 16 Vol.-%, und zwar rd. 5 Vol.-% Gelporen, rd. 9,5 Vol.-% Kapillarporen und rd. 1,5 Vol.-% Luftporen. Bestimmt wurde die freiwillige Wasseraufnahme von 20 cm hohen und 12 cm dicken Betonplatten, die zunächst sieben Tage feucht, dann 21 Tage an Raumluft, dann sieben Tage zum Austrocknen bei  $30^\circ\text{C}$  und anschließend 28 Tage 19,5 cm tief eingetaucht in Wasser gelagert waren.

Neben dem zementarmen Beton ( $Z = 240 \text{ kg/m}^3$ ) wurde ein Beton mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  in das Versuchsprogramm einbezogen, dessen Wasserzementwert 0,50 betrug und dessen Konsistenz im Bereich K 1/K 2 lag. Für diesen Beton errechnet sich bei vollständiger Hydratation des Zements eine Gesamtporosität von größenordnungsmäßig 12 Vol.-%, und zwar rd. 6 Vol.-% Gelporen, rd. 4,5 Vol.-% Kapillarporen und rd. 1,5 Vol.-% Luftporen.

Die mehr oder weniger stark ausgeprägte verflüssigende Wirkung der in die Untersuchung einbezogenen Betondichtungsmittel wurde durch zusätzliche Mischungen berücksichtigt, bei denen bei sonst gleicher Zusammensetzung der Wassergehalt so weit vermindert wurde, daß sich annähernd die gleiche Konsistenz wie bei den Betonen ohne Zusatzmittel einstellte.

Größerer Aufschluß über die Wirksamkeit, insbesondere die Langzeitwirkung, wurde von Betonwürfeln erwartet, die zunächst 14 Tage unter Wasser, dann drei Monate zum langsamen Austrocknen an Luft von  $20^\circ\text{C}$  und 65 % rel. Feuchte und anschließend entweder bis zu drei Jahren 19,5 cm tief in Wasser eingetaucht lagerten oder einer fünfmaligen Wechsellagerung (ein Monat in Wasser, dann zwei Monate an Luft) ausgesetzt waren. Auch hierbei wurde vor allem die Wasseraufnahme zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt.

Die Wasseraufnahme — festgestellt durch Wiegen — sagt nichts darüber aus, wie das Wasser im Prüfkörper verteilt ist. Hierzu ist ein Spalten der Körper und ein visuelles Bestimmen der Eindringtiefe (dunklere Färbung der durchfeuchteten Zone) des öfteren vorgeschlagen worden. Dieses Verfahren hat sich bei der Druckwasserprüfung, z. B. nach DIN 1048, bewährt. Es ist auch bei der freiwilligen Wasseraufnahme in diesem Programm vorgesehen worden, jedoch hat sich insbesondere bei längerer Lagerungsdauer gezeigt, daß ein solches visuelles Verfahren stark streut und von Zufälligkeiten abhängig ist. Versuche, die Eindringtiefe durch im Lagerungswasser gelöste, fluoreszierende Stoffe zuverlässiger ermitteln zu können, haben nicht zum Erfolg geführt. Auf radioaktive Stoffe wurde wegen der damit verbundenen umfangreichen Sicherungsvorkehrungen verzichtet.

Das in [10] im Jahre 1970 vorgeschlagene Verfahren, ein Uhrenglas auf die oberhalb des Wasserspiegels gelegene, horizontale Fläche des Betonprüfkörpers aufzulegen, um visuell etwaige Kondensation unter dem Uhrenglas festzustellen, war den Verfassern bei Ausarbeitung des Versuchsprogramms nicht bekannt. Gegen dieses qualitative Verfahren bestehen darüber hinaus erhebliche Bedenken, weil damit eine unüberschaubare Vermischung zwischen kapillarem Wasseraufsaugen und Wasserdampfdiffusion erfaßt wird und weil für eine Kondensation auch noch andere Einflüsse maßgebend sind.

Von den möglichen Prüfverfahren wurde daher der freiwilligen Wasseraufnahme, mit der man die kapillare Saugfähigkeit erfaßt, die größte Aussagekraft für die Beurteilung der Wirksamkeit der Betondichtungsmittel beigemessen. Zusätzlich wurden die Was-

serundurchlässigkeit nach DIN 1048 sowie zur weiteren Kennzeichnung der Betone deren Rohdichte und die Betondruckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen und nach drei Jahren Wasserlagerung bestimmt.

## **9. Ausgangsstoffe und Beton**

### **9.1. Zement**

Verwendet wurden ein Portlandzement P (Gemisch aus drei handelsüblichen Portlandzementen) und ein Hochofenzement H (ebenfalls ein Gemisch aus drei handelsüblichen Hochofenzementen). Vor Versuchsbeginn wurde die insgesamt benötigte Menge an Zement für jedes der beiden Gemische in einem speziellen Mischer homogenisiert und in luftdicht verschlossenen Blechbehältern gelagert.

Die beiden Zementgemische wurden nach DIN 1164, Ausgabe 1958, und später auch nach DIN 1164, Ausgabe 1970, geprüft; außerdem wurden das Schwinden nach DIN 1164, Ausgabe 1942, und der Luftgehalt am frisch verdichteten Mörtel nach dem Druckausgleichverfahren ermittelt. Kennzeichnende Angaben über die beiden Zemente enthält Tafel 2 in den Spalten OP und OH (Zementgemisch P bzw. H ohne Zusatzmittel). Die Festigkeit der beiden Zementgemische P und H lag etwas über dem mittleren Bereich der heutigen Festigkeitsklasse Z 350. Beide Zementgemische wiesen eine mittlere Mahlfeinheit auf; die spezifische Oberfläche des Zementgemischs P betrug  $2980 \text{ cm}^2/\text{g}$ , die des Gemischs H  $3550 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Beide Zementgemische waren raumbeständig, d. h. sie bestanden den Koch- und den Kaltwasserversuch. Das Ausbreitmaß der Normmörtel (DIN 1164, Ausgabe 1958) überschritt 20 cm, so daß zusätzlich noch eine Prüfung mit einem verminderten Wasserzusatz durchgeführt wurde, die jedoch zu keiner zusätzlichen Information führte.

### **9.2. Zusatzmittel**

In die Untersuchungen wurden drei handelsübliche Dichtungsmittel einbezogen, die seinerzeit als typische Vertreter ihrer Art angesehen werden konnten und in der Praxis häufig Anwendung fanden. Die jeweiligen Hauptwirkstoffe der hier mit Nr. 1 bis Nr. 3 bezeichneten Dichtungsmittel waren

- Dichtungsmittel Nr. 1: Metalloleat,
- Dichtungsmittel Nr. 2: Metallstearat,
- Dichtungsmittel Nr. 3: Sulfitablauge.

Nach Angabe der Hersteller sollten die Mittel 1 und 2 vorwiegend hydrophobierend wirken, das Mittel 3 vorwiegend verflüssigend. Es wurden bewußt flüssige Zusatzmittel mit Wasser als Trägerstoff zur besseren Verteilung im Beton gewählt, um den Mehlkorngelinhalt nicht zu verändern. Auf den Wasserzementwert wurden die Dichtungsmittel nicht angerechnet, jedoch vergrößerten sie aufgrund ihrer geringen Menge im Beton den Wasserzementwert höchstens um 0,01.

Tafel 2 Zement- bzw. Mörtel Eigenschaften

Untersuchung		O P	O H	1 P	1 H	2 P	2 H	3 P	3 H		
nach DIN 1164 Ausgabe 1958	Erstarren	Beginn	3h 10'	4h 00'	3h 50'	4h 25'	3h 55'	4h 10'	9h 30'	12h 45'	
		Ende	5h 30'	6h 00'	5h 55'	7h 15'	6h 00'	6h 20'	13h 15'	18h 45'	
		Wasseranspr.	Gew.-%	27,0	27,5	26,5	27,5	25,5	26,0	25,0	25,5
	Ausbreitmaß	cm	22,6	23,0	20,7	21,3	21,6	21,3	24,0	27,2	
	Luftgehalt <sup>1)</sup>	Vol.-%	2,3	1,8	3,1	2,6	2,9	2,5	3,2	2,7	
	Druckfestigkeit	1 Tag	82	28	66	31	78	34	34	<sup>2)</sup>	
	3 Tage	219	128	173	129	208	126	177	91		
	7 "	320	216	255	202	317	205	298	186		
	28 "	481	412	369	349	456	384	440	363		
	90 "	576	570	476	450	546	507	506	495		
	Biegezugfestigkeit	1 Tag	20	9	19	11	22	11	11	<sup>2)</sup>	
		3 Tage	45	32	38	35	45	31	41	25	
		7 "	56	49	52	52	55	43	55	39	
		28 "	80	79	69	69	77	72	71	70	
		90 "	84	85	77	83	84	82	70	81	
	Schwinden <sup>2)</sup>	28 Tage	0,33	0,47	0,27	0,40	0,33	0,67	0,40	0,60	
		56 "	0,53	0,73	0,67	0,60	0,67	0,87	0,73	0,93	
		182 "	0,60	1,00	0,67	1,00	0,73	1,20	0,73	1,20	

<sup>1)</sup> nach dem Druckausgleichverfahren (nicht in DIN 1164)

<sup>2)</sup> nach DIN 1164 Ausgabe 1942

<sup>3)</sup> nach einem Tag nicht entformbar

Alle drei Dichtungsmittel besaßen aufgrund einer Prüfung nach den Richtlinien [21] einen Prüfbescheid des Prüfausschusses für Betonzusatzmittel beim Länder-Sachverständigenausschuß für neue Baustoffe und Bauarten. Im Prüfbescheid waren als höchste Zusatzmengen 20 cm<sup>3</sup> je kg Zement für die Mittel 1 und 2 und 7 cm<sup>3</sup> je kg Zement für Mittel 3 angegeben. Als „mittlere“ Zugabemenge galt jeweils die Hälfte der zulässigen Höchstmenge.

An Normmörtel nach DIN 1164 mit den Zementgemischen P und H wurde der Einfluß der drei Zusatzmittel auf Wasseranspruch, Erstarren, Raumbeständigkeit, Einführen von Luft, Festigkeit und Schwinden untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurde die jeweils im Prüfbescheid angegebene höchste Zusatzmenge zugegeben und als Anmachwasser destilliertes Wasser verwendet. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tafel 2 zusammengestellt. Die für die Mischungen kennzeichnenden Zahlen und Buchstaben geben das Zusatzmittel und das Zementgemisch an; z. B. bedeutet „2 P“ Zusatzmittel 2 und Portlandzementgemisch P.

Die Mittel 1 und 2 beeinflussten das Erstarren wenig, Mittel 3 (Sulfitablaue) führte zu einer deutlichen Verzögerung und erwartungsgemäß auch zu einem höheren Ausbreitmaß. Alle Mittel führten geringfügig zusätzliche Luft ein. Die Festigkeit wurde durch alle Mittel herabgesetzt. Der Einfluß auf das Schwinden war nicht sehr ausgeprägt. Alle zusatzmittelhaltigen Mischungen waren raumbeständig, d. h. sie bestanden den Koch- und den Kaltwasserversuch.

### 9.3. Betonzuschlag

Der Zuschlag bestand aus Rheinsand, Rheinkies und Quarzmehl. Für die zementarmen Betone A und C (240 kg/m<sup>3</sup> Zement; siehe Abschnitt 9.4.1) wurde entsprechend den Prüfrichtlinien [21] eine Kornzusammensetzung gewählt, die etwa der Sieblinie E nach DIN 1045, Ausgabe 1959, entsprach und hier als Sieblinie I bezeichnet ist. Für die Betone B und D, deren Zementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> und deren sonstige Zusammensetzung den Anforderungen für einen wasserundurchlässigen Beton entsprachen (siehe Abschnitt 9.4.1), wurde eine Kornzusammensetzung im besonders guten Bereich etwas unterhalb der Sieblinie E nach DIN 1045, Ausgabe 1959, gewählt; sie wurde mit Sieblinie II bezeichnet. Die Siebdurchgänge der beiden Sieblinien enthält Tafel 3.

Beide Sieblinien wurden für alle damit hergestellten Betone konstantgehalten. Die bei einer Mischung aufgetretenen größten

Tafel 3 Kornzusammensetzung des Zuschlags

Sieblinie	Siebdurchgang in Gew.-%									
	Maschensieb (mm)					Rundlochsieb (mm)				
	0,06	0,09	0,12	0,2	0,5	1	3	7	15	30
I	2,1	2,5	3,5	6,9	14,7	24,1	43,1	60,0	82,0	100
II	1,3	1,6	2,2	4,0	11,0	20,0	40,2	55,3	80,2	100

Abweichungen betragen im Feinsandbereich 0,1 Gew.-% und im Bereich von 3 bis 30 mm bis zu 0,3 Gew.-%. (Eine Ausnahme hiervon bildete lediglich der Durchgang durch das 0,5-mm-Sieb der Sieblinie II, bei der eine größte Abweichung von 1,9 Gew.-% auftrat.)

#### 9.4. Beton – Zusammensetzung, Herstellung und Frischbetoneigenschaften

##### 9.4.1. Betonzusammensetzung

Ohne Dichtungsmittel wurden mit jedem der beiden Zementgemische P und H der zementarme Beton A (Kennzeichnung der Mischungen OPA bzw. OHA) und Beton B mit einem mittleren Zementgehalt (Kennzeichnung der Mischungen OPB bzw. OHB) hergestellt. Die Betone A und B wiesen folgende Zusammensetzung je m<sup>3</sup> verdichteten Beton auf:

Betonzusammensetzung	Beton A	Beton B
Kornzusammensetzung	Sieblinie I	Sieblinie II
Zuschlaggehalt	rd. 1910 kg/m <sup>3</sup>	rd. 1935 kg/m <sup>3</sup>
Zementgehalt	240 kg/m <sup>3</sup>	300 kg/m <sup>3</sup>
Wassergehalt	180 kg/m <sup>3</sup>	150 kg/m <sup>3</sup>
Wasserzementwert	0,75	0,50

Jedem der vorgenannten vier Betone (OPA und OPB sowie OHA und OHB) wurde in gesondert hergestellten Mischungen von jedem der drei Dichtungsmittel die nach dem Prüfbescheid mittlere Zugabemenge zugesetzt. Daraus ergaben sich insgesamt 12 weitere verschiedene Betonzusammensetzungen, deren kennzeichnende Zahlen und Buchstaben nacheinander das Dichtungsmittel, das Zementgemisch und die Betonzusammensetzung angeben. Beton 2HB bedeutet also Zusatzmittel 2, Hochofenzementgemisch H und Betonzusammensetzung B.

Wie bereits erwähnt, wirkten die Dichtungsmittel mehr oder weniger verflüssigend. Daher wurden zusätzlich zwölf dichtungsmittelhaltige Betonmischungen hergestellt, deren Zusammensetzung bis auf den Wassergehalt denen der Mischung A bzw. B entsprach. Der Wassergehalt wurde dabei so vermindert, daß die Konsistenz dieser Betone – gemessen durch die Anzahl der Hubstöße im Powers-Gerät – der des jeweiligen Ausgangsbetons ohne Zusatzmittel entsprach. Betone, deren sonstige Zusammensetzung Mischung A entsprach, wurden mit C gekennzeichnet; solche, deren Mischung B entsprach, erhielten D als Kennzeichnung. Gegenüber A und B wiesen die Mischungen C und D einen kleineren Wasserzementwert auf. In welchem Maße der Wasserzementwert durch die verflüssigende Wirkung der Dichtungsmittel trotz gleicher Konsistenz gesenkt werden konnte, geht aus Tafel 4, Spalte 2, hervor. Die Zusammensetzung des Betons C entspricht den Festlegungen der Prüfrichtlinien [21].

##### 9.4.2. Betonherstellung und Frischbetoneigenschaften

Von jeder der 28 Mischungen wurden sechs Platten 12x20x20 cm und 15 Würfel mit 20 cm Kantenlänge hergestellt. Hierzu wurden

Tafel 4 Frischbetoneigenschaften

Mischung	W/Z- Wert	Ausbreit- maß a  cm	Konsistenz		Verdich- tungsmaß (Walz)  —	LP- Gehalt  Vol.-%	Roh- dichte  kg/dm <sup>3</sup>
			Powersgerät				
			sofort	nach 30'			
OPA	0,75	44,5	4,5/5,5	5/6	1,13	1,6	2,39
OHA	0,75	43	4,5/5,5	5/6	1,08	1,2	2,39
1PA	0,75	47	3,5/4	—	1,10	2,8	2,33
1HA	0,75	44,5	4/4	5/6	1,11	2,2	2,34
2PA	0,75	44	5/5	5/6	1,11	2,5	2,34
2HA	0,75	46	4/4	5/6	1,10	3,0	2,33
3PA	0,75	47,5	3/3,5	4/5	1,06	2,8	2,35
3HA	0,75	49	4,5/5	6/6	1,09	1,5	2,36
1PC	0,72	39,5	4,5/5,5	6/7	1,08	3,0	2,35
1HC	0,72	41	4/5	6/7	1,10	2,6	2,34
2PC	0,72	45	4/5	5/6	1,09	2,5	2,36
2HC	0,70	43	4/4	5/6	1,11	2,3	2,35
3PC	0,70	46	4/5	6/7	1,11	3,1	2,35
3HC	0,70	45	4/4	4/5	1,07	2,8	2,36
OPB	0,50	—	10,5/20	12/24	1,35	1,4	2,41
OHB	0,50	40	9/17	11/20	1,31	1,2	2,40
1PB	0,50	38,5	8,5/14,5	11/20	1,27	1,4	2,42
1HB	0,50	—	7,5/14,5	10/20	1,27	1,25	2,40
2PB	0,50	(41)	8/14	10/19	1,30	1,2	2,42
2HB	0,50	(39,5)	8,5/15,5	10/20	1,28	1,2	2,42
3PB	0,50	(37)	7,5/12	9/17	1,31	1,7	2,41
3HB	0,50	(37,5)	7/11	10/20	1,22	1,2	2,43
1PD	0,46	(40,5)	12/20	14/25	1,26	1,8	2,43
1HD	0,49	39,5	10/17	14/24	1,25	1,6	2,41
2PD	0,46	40	10,5/18,5	14/24	1,28	1,6	2,44
2HD	0,49	38	9,5/15	12/20	1,21	1,6	2,42
3PD	0,45	—	12,5/20,5	15/25	1,36	1,9	2,43
3HD	0,47	(39,5)	8,5/15	12/21	1,28	1,9	2,42

die oberflächentrockenen Zuschläge zunächst in einem Zwangsmischer mit der Hälfte des Anmachwassers vorgemischt und 5 min lang stehengelassen. Nach Zugabe des Zements und des restlichen Anmachwassers, in dem gegebenenfalls das flüssige Dichtungsmittel verteilt worden war, wurde der Beton weitere 2 min gemischt. Nach Bestimmung der Frischbetoneigenschaften wurde der Beton in die Formen eingebracht und verdichtet. Die Probekörper der Mischungen A und C (Zementgehalt 240 kg/m<sup>3</sup>) wurden nach den Prüfrichtlinien [21] durch Stampfen mit einem Holzstampfer, die Probekörper der Mischungen B und D (Zementgehalt 300 kg/m<sup>3</sup>) auf einem Rütteltisch verdichtet. Am frischen Beton wurde die Temperatur gemessen, die Konsistenz nach verschiedenen Verfahren bestimmt sowie die Rohdichte und der Luftgehalt des verdichteten Betons nach dem Druckausgleichverfahren ermittelt. Die Frischbetontemperatur lag bis auf eine Ausnahme (23 °C) bei allen Mischungen zwischen 18 und 22 °C. Tafel 4 enthält Angaben über die Konsistenz, den Luftgehalt und die Frischbetonrohichte der insgesamt 28 Mischungen. Zur um-

fassenden Kennzeichnung der Konsistenz wurden von jeder Mischung das Ausbreitmaß  $a$  nach DIN 1048, das Verdichtungsmaß  $v$  nach DIN 1048 sowie die Anzahl der Hubstöße im Verformungsgerät nach Powers sofort und 30 min nach Beendigung des Mischens ermittelt. Der letztgenannte Wert diente zur Prüfung des sogenannten „Nachversteifens“, das nach den Prüfrichtlinien [21] eine bestimmte Größe nicht überschreiten darf. Diese Anforderung wurde von allen drei untersuchten Dichtungsmitteln erfüllt. Als maßgebend für eine vergleichbare Konsistenz – zur Einstellung des Wassergehalts bei Berücksichtigung der verflüssigenden Wirkung des Zusatzmittels – wurde die Anzahl der Hubstöße im Powersgerät sofort nach Beendigung des Mischens angesehen. Die Konsistenz der zementarmen Betone A und C war weich, die der Betone mit mittlerem Zementgehalt B und D war steif bis plastisch.

Allgemein wurde der Luftgehalt des verdichteten Betons durch die Dichtungsmittel erhöht, und zwar bei den weichen Betonen A und C mehr (größenordnungsmäßig 1 Vol.-%) als bei den steifplastischen Betonen B und D. Der erhöhte Luftgehalt führte erwartungsgemäß auch zu einer niedrigeren Frischbetonrohichte.

## **10. Lagerung und Prüfung der Betonprobekörper**

Die von jeder Mischung hergestellten 21 Probekörper (6 Platten und 15 Würfel) wurden gemäß nachfolgender Aufstellung gelagert und geprüft. Die wesentlichen Ergebnisse enthalten die Tafeln 5, 6 und 7 in Abschnitt 11.

### **Lagerung 10.1: 28-Tage-Druckfestigkeit**

3 Würfel von 20 cm Kantenlänge wurden nach DIN 1048 gelagert (7 Tage feucht, dann an Luft von 20 °C und 65 % rel. Feuchte) und im Alter von 28 Tagen auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft.

### **Lagerung 10.2: Wasserundurchlässigkeit**

3 Platten 12 x 20 x 20 cm lagerten 1 Tag feucht, dann 27 Tage unter Wasser und anschließend 4 Tage unter ansteigender Druckwasserwirkung von 1, 3 und 7 kp/cm<sup>2</sup> und wurden dann im Alter von 28 + 4 Tagen auf Wasserundurchlässigkeit und Wassereindringtiefe (mittlerer und größter Wert) nach DIN 1048 geprüft.

### **Lagerung 10.3: Kurzzeit-Wasseraufnahme**

3 Platten 12 x 20 x 20 cm wurden 7 Tage feucht, dann 21 Tage an Luft von 20 °C und 65 % rel. Feuchte, dann 7 Tage in einem Trockenschrank bei 30 °C gelagert und anschließend 19,5 cm tief in einen oben offenen, mit destilliertem Wasser gefüllten Behälter so gestellt, daß die bei der Herstellung der Platten oben gelegene Fläche 12 x 20 cm senkrecht stand. Der Raum, in dem die Behälter standen, hatte eine Temperatur von 20 °C und eine rel. Feuchte von 65 %. Der Zwischenraum zwischen den Platten betrug mindestens 5 cm. Der Wasserspiegel wurde durch Nachfüllen auf gleicher Höhe gehalten.

Nach 1, 6 und 24 Stunden sowie nach 3, 7, 14 und 28 Tagen wurde die Wasseraufnahme durch Wägung bestimmt. Dazu wurden die Probekörper vor dem Wiegen mit einem fest ausgedrückten Schwamm oberflächlich abgetrocknet. Unmittelbar nach der Bestimmung der 28tägigen Wasseraufnahme wurden die Platten gebrochen und die Eindringtiefe des Wassers (mittlerer und größter Wert) festgestellt.

Die 28tägige Wasseraufnahme von Probekörpern der Betonserie C nach Lagerung 10.3 galt in den Prüfrichtlinien [21] als Maßstab zur Beurteilung der Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln.

#### **Lagerung 10.4: Langzeit-Wasseraufnahme**

9 Würfel von 20 cm Kantenlänge wurden 1 Tag feucht, dann 13 Tage unter Wasser, dann 3 Monate an Luft von 20 °C und 65 % rel. Feuchte gelagert und anschließend 3 Jahre 19,5 cm tief in einen oben offenen, mit Leitungswasser gefüllten Behälter so gestellt, daß die bei der Herstellung der Würfel oben gelegene Fläche senkrecht stand. Der Raum, in dem die Behälter standen, hatte eine Temperatur von 20 °C und eine rel. Feuchte von 65 %. Der Zwischenraum zwischen den Würfeln betrug mindestens 5 cm. Der Wasserspiegel wurde durch Nachfüllen auf gleicher Höhe gehalten.

Nach 1, 6 und 24 Stunden, nach 3, 7, 14 und 28 Tagen sowie nach 1, 2 und 3 Jahren (z. T. auch ergänzend nach 3 und 6 Monaten) wurde die Wasseraufnahme durch Wägung bestimmt. Nach 28 Tagen und nach 1 Jahr wurden jeweils 3 Würfel unmittelbar nach der Wasseraufnahmebestimmung gespalten, um die Eindringtiefe und Verteilung des Wassers im Bruchquerschnitt festzustellen. Da sich diese Untersuchung als wenig aufschlußreich herausstellte, wurde von den verbliebenen 3 Würfeln nach 3 Jahren nur einer gespalten und an den beiden anderen die Druckfestigkeit bestimmt.

#### **Lagerung 10.5: Wasseraufnahme bei Wechsellagerung**

3 Würfel von 20 cm Kantenlänge wurden zunächst wie unter 10.4 gelagert, dann nach der 3monatigen Luftlagerung jedoch einem 5maligen Wechsel von jeweils 1 Monat unter Wasser und 2 Monaten an Luft von 20 °C und 65 % rel. Feuchte ausgesetzt und abschließend nochmals 3 Monate unter Wasser gelagert. Die gesamte Lagerungsdauer betrug damit 21½ Monate. Das Gewicht der Würfel wurde bei jedem Lagerungswechsel festgestellt, außerdem im letzten Lagerungsabschnitt nach 1 und 24 Stunden sowie nach 7, 14, 28 und 91 Tagen.

### **11. Erörterung der Versuchsergebnisse**

Bei der nachfolgenden Zusammenstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, die an etwa 600 Betonprobekörpern ermittelten Ergebnisse nach den charakteristischen Betoneigenschaften Druckfestigkeit, Wassereindringtiefe und Wasseraufnahme zu ordnen und dabei die anderen Einflußgrößen – insbesondere die Lagerung – zu berücksichtigen.

## 11.1. Betondruckfestigkeit

Neben dem Wasserzementwert, dem am Frischbeton bestimmten Luftporengehalt und der Rohdichte des 28 Tage alten Betons bei Lagerung 10.1 nach DIN 1048 enthält Tafel 5 die Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen und nach 3 Jahren.

Der 28 Tage alte Beton lagerte nach DIN 1048 (Lagerung 10.1). Der zementarme Beton A wies ohne Zusatzmittel mit dem Zementgemisch P eine Würfeldruckfestigkeit von 318 kp/cm<sup>2</sup> und mit dem Zementgemisch H eine solche von 257 kp/cm<sup>2</sup> auf. Auf diese beiden Festigkeiten (jeweils 100 %) sind in Spalte 6 in der oberen

Tafel 5 Wasserzementwert, Luftporengehalt, Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone mit und ohne Dichtungsmittel

1	2	3	4	5	6	7	8
Beton	W/Z-Wert	LP-Gehalt	Rohdichte	Druckfestigkeit nach 28 Tagen		Druckfestigkeit nach 3 Jahren	
			Lagerung 10.1 (DIN 1048)			Lagerung 10.4	
	—	Vol.-%	kg/dm <sup>3</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	%	kp/cm <sup>2</sup>	%
OPA OHA	0,75	1,6 1,2	2,32 2,32	318 257	100 100	404 410	100 100
1PA 2PA 3PA	0,75	2,8 2,5 2,8	2,29 2,31 2,29	278 314 310	87 99 97	353 364 367	87 90 91
1HA 2HA 3HA		2,2 3,0 1,5	2,30 2,29 2,31	247 235 281	96 91 109	388 351 398	95 86 97
1PC 2PC 3PC		0,72 0,72 0,70	3,0 2,5 3,1	2,30 2,31 2,31	321 332 333	101 104 105	426 415 395
1HC 2HC 3HC	0,72 0,70 0,70	2,6 2,3 2,8	2,31 2,31 2,32	266 287 319	104 112 124	413 416 479	101 101 117
OPB OHB	0,50	1,4 1,2	2,40 2,39	586 480	100 100	738 702	100 100
1PB 2PB 3PB	0,50	1,4 1,2 1,7	2,38 2,40 2,40	541 541 609	92 92 104	651 683 738	88 93 100
1HB 2HB 3HB		1,2 1,2 1,2	2,39 2,39 2,40	469 461 511	98 96 106	591 595 721	84 85 103
1PD 2PD 3PD		0,46 0,46 0,45	1,8 1,6 1,9	2,41 2,41 2,39	564 573 634	96 98 108	743 800 817
1HD 2HD 3HD	0,49 0,49 0,47	1,6 1,6 1,9	2,39 2,39 2,39	458 442 575	95 92 120	738 713 739	105 102 105

Hälfte von Tafel 5 alle anderen Festigkeiten bezogen, die sich bei Zusatz von Dichtungsmitteln für alle Betone A und C ergaben.

Die 28-Tage-Druckfestigkeit des Betons B mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  ist im unteren Teil der Tafel 5 aufgeführt; sie betrug ohne Zusatzmittel mit dem Zementgemisch P  $586 \text{ kp/cm}^2$  und mit dem Zementgemisch H  $480 \text{ kp/cm}^2$ . In Spalte 6 sind wieder die hierauf bezogenen Festigkeiten der Betone B und D mit Zusatzmitteln angegeben.

Die früheren Prüfrichtlinien [21] gestatteten, daß Dichtungsmittel die Betondruckfestigkeit herabsetzen, und zwar im Einzelfall bis zu 30 % und im Mittel (Ergebnisse mit den Zementgemischen P und H) bis zu 20 %. Diese Anforderungen wurden von allen drei Dichtungsmitteln erfüllt, denn der niedrigste Einzelwert lag bei 87 %, und das Mittel lag jeweils nur wenig unter 100 % oder darüber. Das in erster Linie verflüssigende Dichtungsmittel Nr. 3 (Sulfitablauge) führte sogar im allgemeinen zu einer höheren Festigkeit; bei Berücksichtigung seiner wassereinsparenden Wirkung betrug die Festigkeitssteigerung bis zu 24 %.

In den Spalten 7 und 8 ist die Festigkeit der Betonwürfel aufgeführt, die nach Lagerung 10.4 nach 14tägiger Wasserlagerung und einem dreimonatigen Austrocknen dann 3 Jahre 19,5 cm tief in Wasser von  $20^\circ\text{C}$  lagerten. Die Würfel wurden also in einem weitgehend durchfeuchteten Zustand geprüft, was sich gegenüber weitgehend ausgetrockneten Probekörpern festigkeitsmindernd auswirkt [22]. Die an den zementarmen Betonen A ermittelte Festigkeit im durchfeuchteten Zustand betrug für das Zementgemisch P  $404 \text{ kp/cm}^2$  und für das Zementgemisch H  $410 \text{ kp/cm}^2$ . Für Beton B betrug die entsprechenden Festigkeiten  $738 \text{ kp/cm}^2$  für Zementgemisch P und  $702 \text{ kp/cm}^2$  für Zementgemisch H. Es war somit eine große Nacherhärtung eingetreten, die sich für Zementgemisch P zu 26 % und für Zementgemisch H zu 46 % errechnete, in Wirklichkeit jedoch noch um 10 bis 20 % größer gewesen sein dürfte, wenn man den festigkeitsmindernden Einfluß einer Durchfeuchtung berücksichtigt. Der Einfluß der drei Dichtungsmittel entsprach nach 3 Jahren etwa dem nach 28 Tagen, d. h. die Zusatzmittel hatten bei Langzeitprüfung keinen zusätzlichen negativen oder positiven Einfluß auf die Betondruckfestigkeit.

## 11.2. Wassereindringtiefe in den erhärteten Beton

Die Wassereindringtiefe wurde unter Druckwasser an 28 Tage altem Beton nach DIN 1048 (Lagerung 10.2), als freiwillige Wasseraufnahme nach 28tägiger Wasserlagerung gemäß den früheren Prüfrichtlinien [21] (Lagerung 10.3) sowie im Rahmen der Langzeituntersuchungen nach 28tägiger, 1jähriger und 3jähriger Wasserlagerung (Lagerung 10.4) ermittelt. Festgestellt wurden jeweils die mittlere und die maximale Eindringtiefe.

Bei der Druckwasserprüfung ergab sich eine verhältnismäßig deutliche Grenze zwischen durchfeuchtetem (dunkler erscheinendem) und trockenem Beton, die gut markiert und dann ausgemessen werden konnte. Dagegen war bei freiwilliger Wasseraufnahme, insbesondere nach lang andauernder Wassereinwirkung, eine eindeutige Grenze der Eindringtiefe nicht mehr wahrnehmbar. Einen

weiteren Nachteil der Prüfung auf Wassereindringtiefe stellen die Zufälligkeiten dar, die an der Bruchfläche vorliegen und nicht repräsentativ für den ganzen Prüfkörper sein müssen. Dieser Mangel macht sich stärker bei der Bestimmung der maximalen Eindringtiefe bemerkbar als bei der mittleren Eindringtiefe, bei der über größere Strecken gemittelt wird. Aus diesen auch in Abschnitt 8 schon dargelegten Gründen wurde daher der Bestimmung der Eindringtiefe keine große Bedeutung beigemessen.

In Tafel 6 sind daher nur die Eindringtiefen an 28 Tage altem Beton bei der Druckwasserprüfung (Lagerung 10.2) und die Ein-

Tafel 6 Wassereindringtiefe in 28 bzw. 35 Tage alten Beton mit und ohne Dichtungsmittel

1	2	3	4	5
Beton	Eindringtiefe bei Druckwasser Lagerung 10.2 (DIN 1048)		Eindringtiefe b. freiw. Aufnahme Lagerung 10.3	
	Mittlere Eindringtiefe	Maximale Eindringtiefe	Mittlere Eindringtiefe	Maximale Eindringtiefe
	mm	mm	mm	mm
OPA OHA	25 11	45 24	11 10	34 28
1PA 2PA 3PA	21 18 21	40 33 33	9 7 10	15 15 22
1HA 2HA 3HA	12 15 27	20 28 43	8 6 9	16 14 24
1PC 2PC 3PC	12 20 20	28 28 29	9 9 10	16 18 18
1HC 2HC 3HC	14 16 20	34 27 36	9 9 7	17 17 11
OPB OHB	10 16	17 29	4 6	14 17
1PB 2PB 3PB	10 6 14	18 13 24	3 4 4	12 12 12
1HB 2HB 3HB	9 9 11	17 19 19	5 5 7	10 12 17
1PD 2PD 3PD	9 12 12	16 19 17	7 7 7	12 19 16
1HD 2HD 3HD	9 15 16	15 24 24	6 7 4	13 12 6

dringtiefen an 35 Tage altem Beton nach anschließender 28tägiger Wasserlagerung (Lagerung 10.3) gemäß den früheren Richtlinien [21] zusammengestellt. Die obere Hälfte der Tafel 6 enthält die Ergebnisse an den zementarmen Betonen A und C, die untere Hälfte die an den Betonen B und D mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$ .

Der Einfluß der Dichtungsmittel auf die Eindringtiefe bei der Druckwasserprüfung war nicht sehr ausgeprägt und lag im Bereich der Streuungen. Bei denjenigen Reihen, bei denen die Wassereindringtiefe beim Ausgangsbeton ohne Zusatzmittel relativ groß war, lieferten die vergleichbaren Betone mit Zusatzmitteln im allgemeinen eine kleinere Eindringtiefe, umgekehrt lieferten die Betone mit Zusatzmitteln im allgemeinen eine größere Eindringtiefe, wenn die Eindringtiefe in den Beton ohne Zusatzmittel relativ klein war. Auch der Einfluß der Zementgemische war unterschiedlich, so lieferte Zementgemisch P bei Beton A im allgemeinen eine größere, bei Beton B eine kleinere Eindringtiefe als Zementgemisch H. Ausgeprägt war nur der schon von anderen Versuchen [14] bekannte Einfluß des Wasserzementwerts auf die Eindringtiefe bei der Druckwasserprüfung. Die Eindringtiefe in Beton mit einem Wasserzementwert von rd. 0,50 war bis auf eine Ausnahme (Beton OHB) deutlich kleiner als die in Beton mit einem Wasserzementwert von 0,75.

Bei freiwilliger Wasseraufnahme in 28 Tagen gemäß den früheren Richtlinien [21], siehe Spalten 4 und 5 in Tafel 6, lieferten zementarme Betone mit Zusatzmitteln eine kleinere Eindringtiefe als der entsprechende Nullbeton. Die Verminderung war bei der mittleren Eindringtiefe allerdings nur klein (8,5 statt 10,5 mm), bei der maximalen Eindringtiefe war sie größer (17 statt 31 mm). Demgegenüber wirkten die drei Dichtungsmittel bei Beton mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  kaum; die mittlere Eindringtiefe war praktisch gleich, bei einigen zusatzmittelhaltigen Betonen sogar etwas größer; die maximale Eindringtiefe war durch die Zusatzmittel im allgemeinen etwas vermindert. Eine bessere Betonzusammensetzung wirkte sich auch hier wesentlich stärker aus als die Verwendung eines Dichtungsmittels.

### 11.3. Freiwillige Wasseraufnahme des erhärteten Betons

Vor der Wasserlagerung trockneten die Betonprobekörper weitgehend aus. Bei der Kurzzeitlagerung 10.3, die den früheren Prüfrichtlinien [21] entspricht, lagerten die zunächst 7 Tage feucht gehaltenen Platten hierzu drei Wochen an Luft von  $20^\circ\text{C}$  und dann 1 Woche an Luft von  $30^\circ\text{C}$ . Bei der Langzeitlagerung 10.4 und bei der Wechsellagerung 10.5 konnten die zuvor 14 Tage unter Wasser gelagerten Würfel in einer 3monatigen Luftlagerung bei  $20^\circ\text{C}$  und 65% rel. Feuchte austrocknen. Ob und gegebenenfalls in welcher Verteilung über dem Querschnitt die Probekörper danach noch verdunstbares Wasser enthielten, wurde nicht näher untersucht.

Vergleicht man die (hier nicht wiedergegebenen) Betonrohddichten nach 28tägiger Wasserlagerung mit den Rohddichten nach dem 3monatigen Austrocknen, so ergab sich für Beton A eine Differenz, die einem Austrocknen von etwa 5 bis 6 Vol.-% entsprach, und für

Beton B eine solche von etwa 3 bis 4 Vol.-%. Die Betondichtungsmittel wirkten sich hierauf nur sehr wenig aus. Auch waren die Unterschiede zwischen der 3wöchigen Lagerung an Luft von 20 °C mit der anschließenden 1wöchigen Lagerung an Luft von 30 °C und der 3monatigen Luftlagerung bei 20 °C vernachlässigbar klein.

In Abschnitt 8 war für vollständig hydratisierten Beton A eine Gesamtporosität von rd. 16 % errechnet worden, davon rd. 9,5 Vol.-% Kapillarporen, rd. 1,5 Vol.-% Luftporen und der Rest Gelporen. Die Rohdichtedifferenz zwischen wassergelagertem und ausgetrocknetem Beton A entsprach hingegen nur einer Wassermenge von 5 bis 6 Vol.-%. Es war zu erwarten, daß die Gelporen bei der Luftlagerung nicht austrockneten und daß die Luftporen sich bei der Wasserlagerung nicht füllten. Selbst bei diesen berechtigten Annahmen sind dann die Kapillarporen bei der Luftlagerung nur zu knapp  $\frac{2}{3}$  ausgetrocknet. Entsprechendes gilt für Beton B, für den sich die Kapillarporen zu rd. 4,5 Vol.-% und das Volumen des verdunsteten Wassers nur zu 3 bis 4 Vol.-% errechneten.

#### 11.3.1. *Freiwillige Wasseraufnahme bei Kurzzeitlegerung*

In den Spalten 2 bis 5 der Tafel 7 sind die wesentlichen Ergebnisse der freiwilligen Wasseraufnahme bei Lagerung 10.3 wiedergegeben. Nach 28 Tagen hatte Beton A ohne Dichtungsmittel rd. 5,9 Vol.-% Wasser aufgenommen, was praktisch der Verdunstung durch Austrocknen entsprach, so daß dieser Beton den gleichen Wassersättigungsgrad aufwies wie ein Beton, der unmittelbar nach der Herstellung 28 Tage unter Wasser gelagert hatte. Gleiche Verhältnisse lagen für Beton B vor, der ohne Dichtungsmittel in 28 Tagen rd. 3,6 Vol.-% Wasser aufnahm.

In Spalte 5 ist die 28-Tage-Wasseraufnahme der Betone mit Dichtungsmitteln bezogen auf die der Betone ohne Dichtungsmittel aufgeführt, und zwar in der oberen Hälfte für die Betone A und C und in der unteren Hälfte für die Betone B und D. Mit Ausnahme einer Mischung (Beton 3HB) führten die Dichtungsmittel immer zu einer niedrigeren Wasseraufnahme, zum Teil zu einer deutlich niedrigeren. Maßgebend bei den früheren Prüfrichtlinien [21] waren die Ergebnisse mit Beton C, bezogen auf den Nullbeton A. Die Anforderung der Prüfrichtlinien, daß die Verminderung der Wasseraufnahme im Einzelfall mindestens 15 % und im Mittel (Ergebnisse mit den beiden Zementgemischen P und H) mindestens 20 % betragen muß, wurde von allen drei Dichtungsmitteln erfüllt, allerdings von Zusatzmittel Nr. 3 (Sulfitablauge) mit im Mittel 20,5 % Verminderung nur knapp. Demgegenüber wirkten bei dieser Prüfung die beiden Dichtungsmittel Nr. 1 und Nr. 2 stärker, denn sie verminderten die Wasseraufnahme im Beton C um 39,5 bzw. 34,5 % gegenüber Beton A.

Bei Beton B, der aufgrund seines höheren Zementgehalts von 300 kg/m<sup>3</sup> und seines niedrigeren Wasserzementwerts von 0,50 auch ohne Zusatzmittel eine um nahezu 40 % niedrigere Wasseraufnahme als Beton A aufwies, verminderten die Dichtungsmittel ebenfalls die freiwillige Wasseraufnahme nach 28 Tagen. Die prozentuale Abnahme war allerdings etwas geringer; sie betrug im Mittel (alle drei Dichtungsmittel und die beiden Zementgemische) für Beton D rd. 27 % gegenüber Beton B.

Tafel 7 Freiwillige Wasseraufnahme von Betonen mit und ohne Dichtungsmittel bei verschiedener Lagerung

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Beton	Lagerung 10.3 (Kurzzeit)				Lagerung 10.4 (Langzeit)							Lagerung 10.5 (Wechsel)	
	Wasseraufnahme in Vol.-% nach			Rel. Aufn.	Wasseraufnahme in Vol.-% nach					Rel. Aufn.	Vol.-% nach	Rel. Aufn.	
	1 Stunde	1 Tag	28 Tagen	28 Tage	1 Stunde	1 Tag	28 Tagen	1 Jahr	3 Jahren	3 Jahre	21,5 Mon.	21,5 Mon.	
OPA OHA	2,75 3,09	4,86 5,12	5,91 5,95	100 100	1,27 1,46	2,76 2,38	4,50 3,34	5,03 3,99	5,10 *) 4,09	100 100	4,97 4,10	100 100	
1PA 2PA 3PA	1,93 2,14 2,71	3,15 3,90 4,47	4,23 5,21 5,73	72 88 97	1,11 1,36 1,53	2,05 2,37 3,01	3,55 3,82 4,68	4,74 5,17 5,40	4,84 5,27 5,93	95 103 116	4,13 4,48 5,65	83 91 114	
1HA 2HA 3HA	2,30 2,45 2,92	3,36 3,58 4,81	4,28 4,35 5,66	72 73 95	1,46 1,46 1,72	2,09 2,22 2,74	2,92 3,44 3,95	3,61 4,38 4,59	4,07 4,61 4,84	100 113 118	3,87 4,04 4,35	94 99 106	
1PC 2PC 3PC	1,52 1,72 1,92	2,45 3,14 3,64	3,47 3,95 4,68	59 67 79	1,11 1,36 1,37	2,01 2,50 2,99	3,46 4,04 4,91	4,48 4,52 5,29	4,90 4,75 5,25	96 93 103	3,77 4,21 5,23	76 85 105	
1HC 2HC 3HC	2,00 2,01 2,43	2,87 2,97 3,86	3,66 3,83 4,75	62 64 80	1,30 1,42 1,45	2,04 2,18 2,45	2,94 3,05 3,21	3,49 3,83 3,86	3,86 3,99 3,83	94 98 94	3,41 3,32 3,72	83 81 91	
OPB OHB	1,48 1,76	2,59 2,95	3,52 3,70	100 100	0,69 1,09	1,38 1,72	2,32 2,35	3,16 2,87	3,19 2,76	100 100	2,72 2,43	100 100	
1PB 2PB 3PB	1,12 1,16 1,51	1,84 1,88 2,42	2,47 2,56 3,10	70 73 88	0,67 0,75 0,95	1,24 1,29 1,74	2,08 2,18 2,73	2,77 2,89 3,32	3,15 3,22 3,59	99 101 113	2,10 2,22 2,86	77 82 105	
1HB 2HB 3HB	1,20 1,25 1,87	1,80 1,91 2,91	2,40 2,47 3,76	65 67 102	0,83 0,78 1,03	1,28 1,24 1,64	1,94 2,07 2,23	2,53 2,51 2,54	2,82 2,85 2,79	102 103 101	2,02 2,21 2,41	83 91 99	
1PD 2PD 3PD	1,53 1,29 1,24	2,25 1,96 1,93	2,91 2,60 2,53	83 74 72	0,60 0,57 0,58	1,06 0,96 1,17	1,77 1,69 1,87	2,52 2,22 2,44	2,74 2,34 2,51	86 73 79	1,69 1,80 1,96	62 66 72	
1HD 2HD 3HD	1,29 1,54 1,55	1,91 2,18 2,23	2,39 2,70 2,71	65 73 73	0,65 0,83 0,69	1,05 1,21 1,24	1,57 1,76 1,67	1,83 2,48 2,10	2,12 2,62 2,28	77 95 83	1,73 1,91 1,72	72 78 71	

\*) korrigierter Wert; siehe Ausführungen im Text

Bezieht man alle Werte auf den zementarmen Beton A ( $240 \text{ kg/m}^3$  Zement), so wurde die 28tägige Wasseraufnahme bei einem höheren Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  und einem niedrigeren Wasserzementwert von 0,50 um knapp 40 % vermindert; verwendete man zusätzlich noch eines der drei Dichtungsmittel und berücksichtigte dessen Einfluß auf die Verarbeitbarkeit, dann verminderte sich die 28tägige Wasseraufnahme um weitere 15 %. Den bei weitem größeren Einfluß auf die freiwillige Wasseraufnahme hatte also die Senkung des W/Z-Werts (weniger Anmachwasser und höherer Zementgehalt).

### 11.3.2. *Freiwillige Wasseraufnahme bei Langzeitlagerung*

Die Spalten 6 bis 11 in Tafel 7 geben die wesentlichen Ergebnisse der freiwilligen Wasseraufnahme bei einer Wasserlagerung bis zu 3 Jahren wieder. Der in Spalte 10 für den Beton OPA ohne Zusatzmittel angegebene Wert ist aufgrund des Verhaltens der vergleichbaren Betone durch graphischen Ausgleich korrigiert worden. Gemessen wurde ein niedrigerer Wert. Da auch bei einigen anderen Betonen die Wasseraufnahme nach 1jähriger Wasserlagerung nicht mehr zunahm, sondern manchmal sogar etwas rückläufig war, wird vermutet, daß durch das ständige Verdunsten an der Fläche oberhalb des Wasserspiegels und durch das ständige Nachfließen durch die im Wasser liegenden Flächen dort durch Ausfällungen eine gewisse Abdichtung entstand, die das Nachfließen behinderte.

In Spalte 11 ist die Wasseraufnahme in 3 Jahren der Betone mit Dichtungsmitteln bezogen auf die der Betone ohne Dichtungsmittel aufgeführt. Im Vergleich zu den günstigen Ergebnissen bei 28tägiger Wasserlagerung in Spalte 5 wiesen die dichtungsmittelhaltigen Betone C nach 3jähriger Wasserlagerung nur eine praktisch vernachlässigbar kleine Verminderung der Wasseraufnahme gegenüber Beton A ohne Zusatzmittel auf (1,5 bis 5 %). Bei dem zementarmen Beton A ging die zunächst günstige Wirkung der Dichtungsmittel offensichtlich mit der Zeit verloren.

Demgegenüber blieb die Wirksamkeit der Dichtungsmittel, wenn ihr Einfluß auf die Verarbeitbarkeit berücksichtigt wurde, bei Beton B mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  und einem W/Z-Wert von 0,50 großenteils erhalten. Im Mittel (alle drei Dichtungsmittel und die beiden Zementgemische) betrug die Wasseraufnahme nach 3jähriger Wasserlagerung für Beton D rd. 18 % weniger als für Beton B ohne Dichtungsmittel; die Wirksamkeit der Dichtungsmittel hatte danach hier in den 3 Jahren nur um  $\frac{1}{3}$  gegenüber den Feststellungen nach 28 Tagen nachgelassen.

Bezieht man wiederum alle Werte auf den zementarmen Beton A ( $240 \text{ kg/m}^3$  Zement), so wurde die 3jährige Wasseraufnahme durch einen höheren Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  und einen niedrigeren Wasserzementwert von 0,50 um rd. 35 % vermindert; verwendete man zusätzlich noch eines der drei Dichtungsmittel und berücksichtigte dessen Einfluß auf die Verarbeitbarkeit, dann verminderte sich die Wasseraufnahme nach 3 Jahren um weitere 12 %.

### 11.3.3. *Freiwillige Wasseraufnahme nach Wechsellagerung*

In den Spalten 12 und 13 der Tafel 7 ist die freiwillige Wasseraufnahme aufgeführt, die sich nach 5maliger Wechsellagerung (1 Monat unter Wasser, 2 Monate Luftlagerung) und einer abschließenden 3monatigen Lagerung unter Wasser ergab. (Auch alle anderen Meßwerte liegen vor, bringen jedoch gegenüber diesen Ergebnissen keinen weiteren Aufschluß.)

Insbesondere die angabegemäß hydrophobierend wirkenden Dichtungsmittel Nr. 1 und Nr. 2 verminderten die 3monatige Wasseraufnahme nach einer Wechsellagerung bei Beton C um größenordnungsmäßig 20 % gegenüber dem zementarmen Beton A. Stärker ausgeprägt war der Einfluß der Dichtungsmittel bei Zugabe zu dem Beton B mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$ , wenn auch hier der Einfluß auf die Verarbeitbarkeit berücksichtigt wurde. Der zusatzmittelhaltige Beton D wies im Mittel gegenüber Beton B ohne Dichtungsmittel eine um rd. 30 % verminderte Wasseraufnahme auf. Dies entsprach größenordnungsmäßig den Feststellungen bei Kurzzeitlagerung nach 28 Tagen in Spalte 5, unterster Teil.

Bezieht man wiederum alle Werte auf den zementarmen Beton A ohne Zusatzmittel, dann wurde nach einer 5maligen Wechsellagerung die 3monatige Wasseraufnahme durch Erhöhung des Zementgehalts auf  $300 \text{ kg/m}^3$  und Senken des W/Z-Werts auf 0,50 um rd. 43 % vermindert; verwendete man zusätzlich noch eines der drei Dichtungsmittel und berücksichtigte dessen Einfluß auf die Verarbeitbarkeit, dann verminderte sich die Wasseraufnahme um weitere 17 %.

## 12. **Beurteilung der Wirksamkeit der Betondichtungsmittel**

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Betondichtungsmittel wurden die Eindringtiefe bei Druckwassereinwirkung, die Eindringtiefe bei Atmosphärendruck und die freiwillige Wasseraufnahme nach unterschiedlicher und verschieden langer Lagerung bestimmt, vergleiche auch Abschnitt 8.

Ebenso wie die früheren Prüfrichtlinien [21] sehen auch die neuen Wirksamkeitsprüfrichtlinien, Fassung Oktober 1974, [23] die Bestimmung der Eindringtiefe bei Druckwassereinwirkung nicht vor, vergleiche auch die Erläuterungen zu den neuen Richtlinien [24].

Maßgebend für die Beurteilung der Wirksamkeit von Dichtungsmitteln war nach den früheren Richtlinien und ist auch nach den neuen Richtlinien die freiwillige Wasseraufnahme nach Kurzzeitlagerung. Darüber hinaus ist auch die Ermittlung der Eindringtiefe bei freiwilliger Wasseraufnahme in beiden Richtlinien enthalten. Aus den in den Abschnitten 8 und 11.2 schon dargelegten Gründen und nach den bei diesen Untersuchungen gemachten Erfahrungen scheint jedoch die Eindringtiefe bei Atmosphärendruck kein aussagekräftiges Kriterium für die Beurteilung der Wirksamkeit von Betondichtungsmitteln zu sein.

Die früheren Richtlinien [21] sahen einen weichen, zementarmen Beton mit  $240 \text{ kg/m}^3$  Zement und einen dadurch relativ hohen Wasserzementwert (bei diesen Untersuchungen 0,75) vor. Ein ge-

gegebenfalls vorhandener verflüssigender Einfluß des Dichtungsmittels dürfte zum Senken des Wassergehalts und damit des Wasserzementwerts berücksichtigt werden.

Die neuen Richtlinien [23] sehen die Verwendung eines Betons mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  und mit einem Wasserzementwert von 0,60 vor, der nur bei angabegemäß vorwiegend verflüssigend wirkenden Mitteln gesenkt werden darf.

Auch in den neuen Richtlinien ist nur eine Kurzzeitlagerung (entsprechend der Lagerung 10.3 dieser Untersuchungen) vorgesehen. Daß aus deren Ergebnissen nicht auf eine Langzeitwirkung der Dichtungsmittel geschlossen werden darf, geht aus Bild 8 hervor. Für diese Darstellung wurde jeweils der Mittelwert aus den drei untersuchten Dichtungsmitteln benutzt, obwohl das Dichtungsmittel Nr. 3 (Sulfitablauge) häufig weniger wirksam war als die beiden anderen, als vorwiegend hydrophobierend angegebenen Dichtungsmittel. Wenn nach dem Verfahren der früheren Richtlinien der

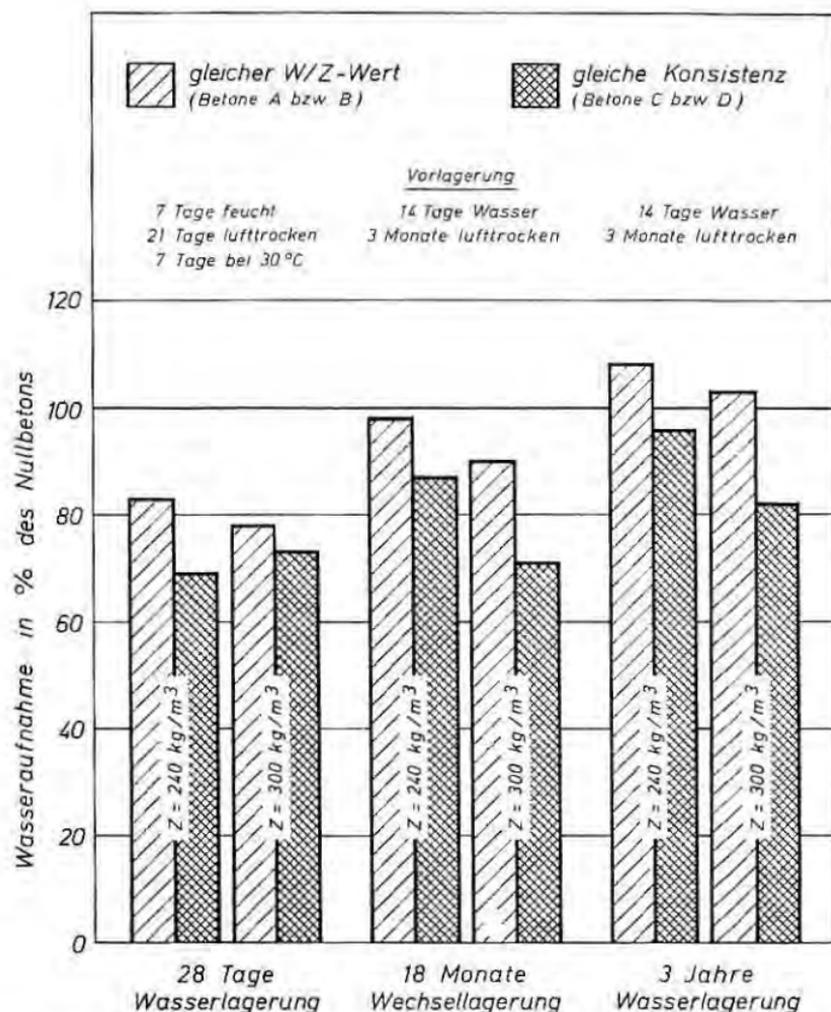


Bild 8 Wasseraufnahme von Betonen mit Dichtungsmitteln im Vergleich zu zugehörigen Nullbetonen

Wasserzementwert gegenüber dem Nullbeton A gesenkt wurde, verminderten die beiden hydrophobierenden Dichtungsmittel die Wasseraufnahme nach Kurzzeitlagerung um 35 bis 40 %; nach 3 Jahren ging diese Wirkung jedoch auf 5 % zurück. Auch bei Beton mit einem Zementgehalt von  $300 \text{ kg/m}^3$  und einem Wasserzementwert von 0,50 kommt die mit der Zeit abnehmende Wirkung der Dichtungsmittel zum Ausdruck.

Welchen Einfluß betontechnologische Maßnahmen im Vergleich zur Zugabe von Dichtungsmitteln auf die Wasseraufnahme haben, zeigt Bild 9. Aufgetragen ist für die verschiedenen Lagerungsarten zunächst in der linken Säule die absolute Wasseraufnahme in Vol.-% des zementarmen Betons. Rechts davon ist die Wirkung der Dichtungsmittel zu dieser Mischung bei Einstellung der gleichen Konsistenz dargestellt. Die Höhe der dritten Säule gibt an, in welchem starkem Maße der zementarme Beton hinsichtlich Wasseraufnahme bleibend verbessert werden kann, wenn ohne Dichtungsmittel nur der Zementgehalt auf  $300 \text{ kg/m}^3$  erhöht und der Wasser-

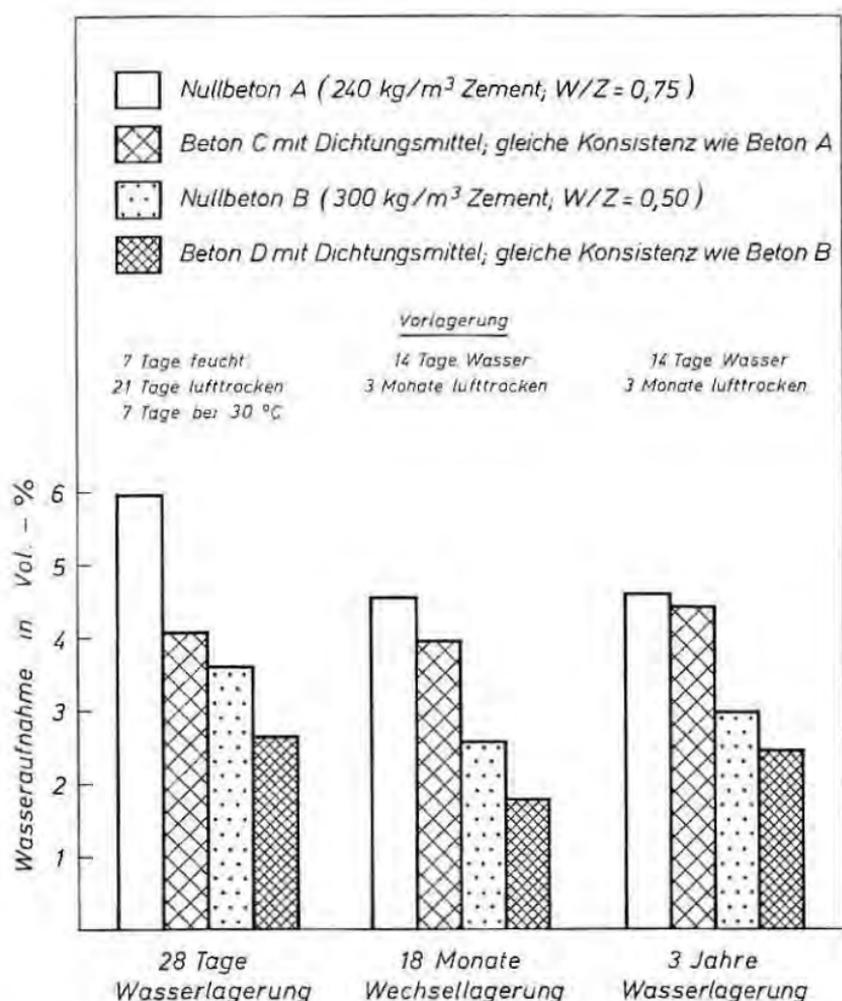


Bild 9 Verminderung der Wasseraufnahme durch betontechnische Maßnahmen und durch Zugabe von Betondichtungsmitteln

zementwert auf 0,50 gesenkt wird. Auch dieser Beton läßt sich durch Dichtungsmittel noch etwas verbessern (siehe jeweils rechte Säule), wenn dabei der verflüssigende Einfluß der Dichtungsmittel für ein weiteres Senken des Wasserzementwerts ausgenutzt wird.

### 13. Zusammenfassung

Beton weist je nach seinem Aufbau einen Gesamtporenraum zwischen 10 und 20 Vol.-% auf, der sich aus Gelporen, Kapillarporen und Luftporen zusammensetzt. Diese Poren haben ganz unterschiedliche Größe und Form und sind je nach den Umweltbedingungen mehr oder weniger mit Wasser gefüllt. Der Transport des Wassers in den Poren kann sowohl in dampfförmiger als auch in flüssiger Phase erfolgen.

Zur Verminderung der Wasseraufnahme und der Wasserdurchlässigkeit muß der Beton eine möglichst geringe Gesamtporosität aufweisen, insbesondere muß der Anteil der Kapillarporen so klein sein, daß diese nicht untereinander verbunden sind. Das ist zu erreichen durch einen Beton mit einem möglichst niedrigen Wasserzementwert.

Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurden etwa 600 Betonprobekörper mit zwei grundsätzlich verschiedenen Betonzusammensetzungen hergestellt, die sich im wesentlichen durch den Zementgehalt (240 bzw. 300 kg/m<sup>3</sup>) und den Wasserzementwert-Bereich (0,45–0,50 bzw. 0,70–0,75) unterschieden. Diese verschiedenen Betone wurden sowohl ohne als auch mit drei handelsüblichen Dichtungsmitteln hergestellt, wobei teils der Wasserzementwert konstantgehalten, teils die verflüssigende Wirkung der Dichtungsmittel zur Senkung des Wasserzementwerts ausgenutzt wurde.

Im Vordergrund der Untersuchungen stand die freiwillige Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck sowohl nach ununterbrochener, lang andauernder Wassereinwirkung (bis zu 3 Jahren) als auch nach einer Wasserlagerung, die mehrmals von einer Luftlagerung unterbrochen wurde. Darüber hinaus wurden auch die Wassereindringtiefe bei Druckwassereinwirkung und bei Atmosphärendruck sowie die Druckfestigkeit nach 28 Tagen und nach 3 Jahren untersucht.

Bei lang andauernder Wassereinwirkung und auch bei Wechselagerung waren die untersuchten Dichtungsmittel nur wirksam, wenn sie einem an sich schon gut zusammengesetzten Beton zugegeben wurden und dabei die verflüssigende Wirkung eine Senkung des Wasserzementwerts ermöglichte. Die Herstellung eines besser zusammengesetzten Betons führte jedoch auch ohne Dichtungsmittel zu stärkeren Verminderungen der Wasseraufnahme als jedes der zugesetzten Dichtungsmittel. Auch die Wassereindringtiefe wurde durch Zugabe eines Dichtungsmittels nicht so wirksam verringert wie durch eine bessere Zusammensetzung des Betons.

Die 28-Tage-Druckfestigkeit der Betone mit Dichtungsmitteln war trotz i. a. höheren Luftgehalts nur geringfügig kleiner als die der entsprechenden Betone ohne Dichtungsmittel, bei den Betonen

mit verringertem Wasserzementwert vielfach sogar etwas größer. Dieses Verhalten hat sich auch nach 3jähriger Wasserlagerung kaum verändert.

Ein signifikanter Unterschied in der Wirkung der drei untersuchten Dichtungsmittel ergab sich nicht. Die beiden vorwiegend hydrophobierend wirkenden Mittel verminderten die Wasseraufnahme und die Wassereindringtiefe etwas mehr als das in erster Linie verflüssigende Mittel, das jedoch die Druckfestigkeit günstig beeinflusste.

## SCHRIFTTUM

- [1] Powers, T. C., und T. L. Brownyard: Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. Part 2 — Studies of Water Fixation. Proc. Amer. Concr. Inst. 43 (1946/47) S. 249/336.
- [2] Brunauer, S., P. H. Emmett und E. Teller: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. Journ. Amer. Chem. Soc. 60 (1938) S. 309/319.
- [3] Lexikon der Physik. Herausgeg. von H. Franke, 3. Aufl., Stuttgart 1969.
- [4] Klopfer, H.: Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1974.
- [5] Rose, D. A.: Water movement in unsaturated porous materials. Rilem-Bulletin. Neue Serie H. 29, Dezember 1965, S. 119/123.
- [6] DIN 52 615 Blatt 1 — Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen; Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung (Ausg. Juni 1973).
- [7] Wierig, H.-J.: Ein einfaches Verfahren zur Messung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Mörtel und Beton. Zement-Kalk-Gips 16 (1963) H. 4, S. 125/130.
- [8] Krischer, O., W. Wissmann und W. Kast: Feuchtigkeitseinwirkungen auf Baustoffe aus der umgebenden Luft. Gesundheits-Ingenieur 79 (1958) H. 5, S. 129/147.
- [9] DIN 52 103 — Prüfung von Naturstein; Bestimmung der Wasseraufnahme (Ausg. Nov. 1972).
- [10] Karsten, R.: Eignungsprüfung von zementgebundenen Abdichtungsstoffen zur Gütesicherung im Sinne der DIN 4117. Das Baugewerbe 50 (1970) H. 10, S. 907/910.
- [11] DIN 1048 Blatt 1 — Prüfverfahren für Beton; Frischbeton, Festbeton gesondert hergestellter Probekörper (Ausg. Jan. 1972).
- [12] Locher, F. W., und G. Wischers: Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins. Zement-Taschenbuch 1974/75, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1974, S. 45/60.
- [13] Walz, K.: Grundlagen und praktische Bedeutung der Undurchlässigkeit des Betons gegen Flüssigkeiten. Bau + Bauindustrie 21 (1968) H. 3, S. 122/129, und H. 4, S. 240/243.
- [14] Bonzel, J.: Einfluß des Zements, des W/Z-Wertes, des Alters und der Lagerung auf die Wasserdurchlässigkeit 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.
- [15] Albrecht, W.: Über die Wirkung von Betondichtungsmitteln. Betonstein-Zeitung 32 (1966) H. 10, S. 568/573.
- [16] Albrecht, W., und U. Mannherz: Zusatzmittel, Anstrichstoffe, Hilfsstoffe für Beton und Mörtel. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1968.

- [17] Horstschäfer, H.-J.: Neuere Erkenntnisse über Dichtungsmittel. Haus der Technik Vortragsveröffentlichungen H. 352, Vulkan-Verlag, Essen 1975, S. 34/40.
- [18] Depke, F. M.: Hydrophobierter Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 38 (1972) H. 3, S. 148/153.
- [19] Karsten, R.: Der heutige Stand der Anwendung von dichtenden Zusätzen zu Mörtel und Beton. Das Baugewerbe 51 (1971) H. 17, S. 1326/1330.
- [20] Schmidt, U.: Betondichtungsmittel erfüllen ihren Zweck. Das Baugewerbe 47 (1967) H. 21, S. 1397/1398.
- [21] Richtlinien für die Prüfung von Betondichtungsmitteln (DM) — Fassung 1958 mit Änderung 1960. Bundesbaublatt 9 (1960) H. 9, S. 541/542.
- [22] Dahms, J.: Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. beton 18 (1968) H. 9, S. 361/365; ebenso Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf 1969, S. 113/126.
- [23] Richtlinien für die Prüfung der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln (Wirksamkeitsprüfrichtlinien), Fassung Oktober 1974. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6 (1975) H. 1, S. 19/22.
- [24] Walz, K.: Erläuterungen zu den „Richtlinien für die Prüfungen der Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln“ (Wirksamkeitsprüfrichtlinien), Fassung Oktober 1974. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik 6 (1975) H. 1, S. 10/14.