

Abschätzung des Eindringverhaltens organischer Flüssigkeiten in Beton anhand von Stoffkennwerten

Estimating the penetration behaviour of organic liquids in concrete with the aid of material parameters

Evaluation du comportement à la pénétration de liquides organiques dans le béton sur la base de paramètres de matériaux des liquides concernés

Hans Paschmann und Gerhard Spanka, Düsseldorf

Übersicht

Beim Umgang mit umweltgefährdenden Flüssigkeiten dienen Auffangbauwerke in Form von Wannen und dichten Produktions- und Lagerflächen dem temporären Schutz von Grundwasser und Boden vor Verunreinigung. Werden solche Auffangbauwerke aus unbeschichtetem Beton hergestellt, so kommt der Dichtheit des Baustoffs besondere Bedeutung zu. Bei der Dimensionierung und Bemessung der Betonbauteile ist daher die Kenntnis über das Eindringen der betreffenden Flüssigkeit in den Beton erforderlich. Da jede Kombination von Beton und Flüssigkeit ein individuelles Eindringverhalten aufweist, wurden in der Vergangenheit meist Eignungsprüfungen in Form von Eindringversuchen für den konkreten Anwendungsfall durchgeführt. Bei der Vielzahl der dabei in Frage kommenden Flüssigkeiten stellen derartige Prüfungen einen erheblichen Aufwand dar. Die vorliegenden Untersuchungen ergeben zum einen, daß sich aus dem geprüften Eindringen einer bestimmten Flüssigkeit in einen bestimmten Beton das Eindringverhalten anderer Flüssigkeiten in den gleichen Beton anhand von Stoffkennwerten der Flüssigkeit hinreichend genau vorausbestimmen läßt. Zum anderen belegen die Untersuchungen, daß der Einfluß des Betons auf das Eindringverhalten über dessen Druckfestigkeit relativ zuverlässig abschätzbar ist.

Abstract

Catchment structures in the form of sumps and impermeable production and storage surfaces serve to protect the ground water and soil temporarily against contamination when dealing with liquids which pose a threat to the environment. The impermeability of the construction material is particularly important where such catchment structures are made of uncoated concrete. Information about the penetration of the particular liquid in the concrete is therefore necessary when dimensioning and designing the concrete components.

Each combination of concrete and liquid has an individual penetration behaviour, so in the past most suitability tests were carried out in the form of penetration tests for the specific application. For the majority of possible liquids such tests involved considerable expenditure. The investigations described here demonstrate firstly that, from the tested penetration of a given liquid in a given concrete, the penetration behaviour of other liquids in the same concrete can be determined with sufficient accuracy with the aid of the material parameters of the liquid. Secondly, the investigations confirm that the influence of the concrete on the penetration behaviour can be estimated relatively reliably through its compressive strength.

Abrégé

Lors du traitement de liquides représentant une menace pour l'environnement, la nappe phréatique et les sols peuvent être protégés temporairement contre la contamination par des structures de réception sous la forme de bassins ou de surfaces de production ou de stockage imperméables. Si ces structures de réception sont réalisées en béton non-revêtu, leur étanchéité joue un rôle primordial. Il est donc nécessaire de connaître la pénétration de ces liquides dans le béton lors du dimensionnement et de la conception des composants en béton. Chaque combinaison de béton et de liquide présente un comportement individuel, de sorte que, dans le passé, des tests de pénétration devaient être réalisés pour chaque cas d'application concret. Pour la majorité des liquides possibles, ces tests étaient synonymes de dépenses énormes. Les recherches présentées démontrent tout d'abord qu'il est possible de déterminer, à partir de la pénétration testée d'un liquide donné dans un béton donné, le comportement à la pénétration d'autres liquides dans le même béton avec une précision suffisante à l'aide des paramètres de matériau du liquide concerné. Ces recherches confirment ensuite qu'il est possible d'estimer l'influence du béton sur le comportement à la pénétration de manière relativement fiable par sa résistance à la pression.

1 Einleitung

Dichtflächen und Auffangwannen als Sekundärbarrieren beim Umgang mit umweltgefährdenden Flüssigkeiten werden aus technischen und wirtschaftlichen Gründen zunehmend aus unbeschichtetem Beton hergestellt. Bei diesen Bauwerken werden sowohl an die Konstruktion als auch an den Baustoff besondere Dichtheitsanforderungen gestellt [1, 2]. Dabei ist für eine festgelegte Beaufschlagungsdauer die Eindringtiefe der betreffenden Flüssigkeit in den Beton nachzuweisen. Bei der Vielzahl der wassergefährdenden Stoffe, die insbesondere in der chemischen Industrie hergestellt, verarbeitet und gelagert werden, ist es sehr aufwendig, das Eindringverhalten eines jeden Stoffes durch Versuche nachzuweisen. Aus diesem Grund wurden bereits von verschiedenen Seiten Vorgehensweisen erarbeitet, um den Prüfumfang zu reduzieren, z. B. durch die Einteilung häufig verwendeter Chemikalien in Hauptgruppen und die Festlegung von Referenzmedien innerhalb dieser Gruppen [3].

Auf der Grundlage theoretischer Überlegungen zum Flüssigkeits-transport in porösen Feststoffen wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie systematische Eindringversuche von zahlreichen organischen Flüssigkeiten in verschiedene Betone durchgeführt. Die Untersuchungen zeigen, daß das Eindringen der Flüssigkeiten in den Beton signifikant von deren Viskosität und Oberflächenspannung bestimmt wird. Daher läßt sich aus dem bekannten Eindringen einer ausgewählten Flüssigkeit das Eindringverhalten ähnlicher Flüssigkeiten zutreffend über die genannten Stoffkennwerte vorher-sagen. Des weiteren zeigen die Untersuchungen, daß der Einfluß des Betons auf das Eindringverhalten relativ zuverlässig über dessen Druckfestigkeit abschätzbar ist. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, den Prüfaufwand bezüglich des Eindringverhaltens von Flüssigkeiten in Beton künftig deutlich zu reduzieren.

Die vorliegenden Untersuchungen sind Teil des laufenden Forschungsprojektes „Sicherheit von Betonkonstruktionen technischer Anlagen für umweltgefährdende Stoffe“, das vom Bundesminister für Forschung und Technologie finanziell unterstützt wird. Die Projektleitung sowie die Koordinierung der einzelnen Forschungsvorhaben liegen beim Deutschen Ausschuß für Stahlbeton. Die Forschungsergebnisse sollen Grundlagen für umfassende Regelungen liefern und damit zu einer Erweiterung und Aktualisierung der „Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ [4] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton führen.

2 Transport von Flüssigkeiten in Beton

Der Transport von Flüssigkeiten in porösen Feststoffen wie Beton kann je nach Porengröße über die Transportarten Diffusion, Kapillarleitung und Permeation geschehen. In den sehr kleinen, weitgehend wassergefüllten Gelporen sind ausschließlich Diffusionsprozesse aufgrund örtlicher Konzentrationsunterschiede und der Molekularbewegung möglich. In größeren, luftgefüllten und miteinander verbundenen Kapillarporen kann ein Flüssigkeitstransport durch Kapillarleitung erfolgen. Antriebe für den Kapillartransport sind die Oberflächenspannung der Flüssigkeit sowie der Randwinkel zum Feststoff. In flüssigkeitgesättigten Porensystemen kann der Flüssigkeits-transport auch durch Permeation aufgrund äußerer Druckunterschiede stattfinden. Für das Eindringen von Flüssigkeiten in nicht flüssigkeitgesättigte Betone ist die Kapillarleitung die dominierende Transportart.

3 Kapillartransport

3.1 Einflußgrößen

Das kapillare Eindringen von Flüssigkeiten in Beton hängt von der Beschaffenheit des Betons (Widerstandsseite), den physikalischen Eigenschaften der eindringenden Flüssigkeit (Einwirkungsseite) sowie von Wechselwirkungen zwischen Beton und Flüssigkeit ab (siehe Bild 1).

Hinsichtlich des Betons sind sowohl die Gefügestruktur als auch der vorliegende Feuchtezustand von maßgebender Bedeutung. Die Ge-

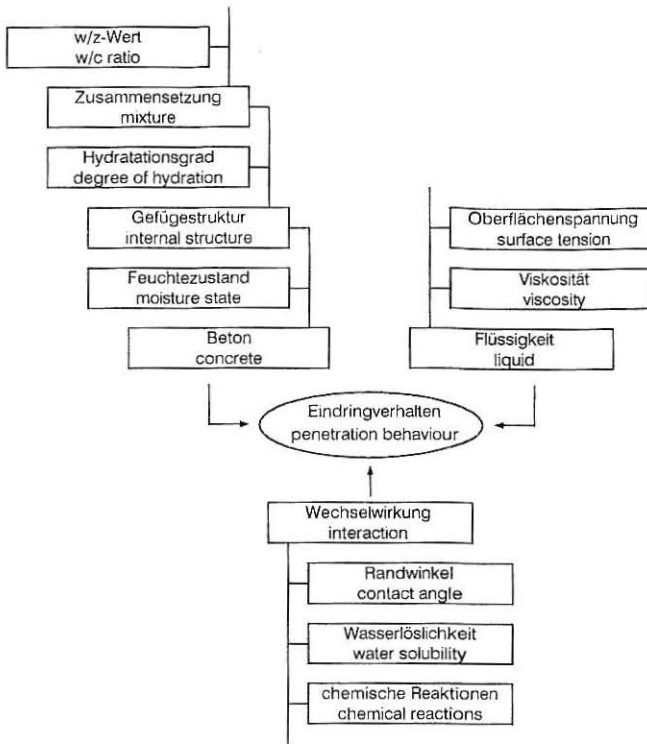


Bild 1 Einflüsse auf das Eindringverhalten

Fig. 1 Influences on penetration behaviour

fügestruktur wird im wesentlichen von der Betonzusammensetzung und vom erreichten Hydratationsgrad bestimmt. Bezüglich der Betonzusammensetzung stellt der Wasserzementwert die dominierende Einflußgröße dar [5].

Die für das Eindringverhalten maßgebenden Parameter auf der Einwirkungsseite sind die Viskosität η und die Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit. Da sich beide Stoffkennwerte mit der Temperatur ändern, ist das Eindringen von Flüssigkeiten in den Beton auch ein temperaturabhängiger Vorgang.

Neben den Einflüssen des Betons einerseits und der Flüssigkeit andererseits wird das Eindringverhalten noch von möglichen Wechselwirkungen zwischen Beton und Flüssigkeit beeinflusst. Hierbei ist die Größe des Randwinkels ϑ als Kennwert für die Benetzbarkeit von besonderer Bedeutung. Mögliche chemische Reaktionen zwischen der Flüssigkeit und Bestandteilen des Betons können das Eindringverhalten grundsätzlich verändern; im allgemeinen verzögern sie das Eindringen.

3.2 Physikalische Zusammenhänge

Beim kapillaren Transport einer Flüssigkeit in einer horizontalen zylindrischen Röhre (Kapillare) gilt für den Weg x [m] in Abhängigkeit von der Zeit t [s] die Beziehung:

$$x(t) = \left(\frac{\sigma \cdot \cos \vartheta \cdot r}{2 \cdot \eta} \cdot t \right)^{0,5}$$

Die Oberflächenspannung σ [mN/m] der Flüssigkeit in Verbindung mit dem Randwinkel ϑ [°] zur Kapillarwandung entspricht der treibenden Kraft. Der Radius r [m] der Kapillaren sowie die dynamische Viskosität η [mN · s/m²] der Flüssigkeit bestimmen den entgegenwirkenden Widerstand.

Beim Eindringen von Flüssigkeiten in Beton müssen die physikalischen Gesetzmäßigkeiten für den Transport einer Flüssigkeit in einer einzelnen Kapillare auf ein komplexes System vielfältig miteinander verbundener Kapillarporen wechselnder Durchmesser übertragen werden.

Unter der Annahme einer homogenen Gefügestruktur des Betons und eines gleichmäßigen Feuchtezustands läßt sich die Beziehung zwischen der Eindringtiefe e der Flüssigkeit und der Zeit t wie folgt formulieren:

$$e(t) = b \cdot \sqrt{t} \quad \text{mit} \quad b = c \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \cos \vartheta}{\eta} \right)^{0,5}$$

Anstelle der Größe $r/2$ bei der einzelnen kreisförmigen Kapillare wird hier der Koeffizient c eingeführt, in dem die Einflüsse des Betons sowie von Wechselwirkungen zwischen Beton und Flüssigkeit auf das Eindringverhalten zusammengefaßt sind.

Bei niedrigviskosen, leicht flüchtigen organischen Flüssigkeiten ist die Eindringtiefe insbesondere bei dichteren Betonen visuell kaum zu erfassen und auch anderweitig schwierig zu bestimmen, wohingegen die Eindringmenge eine leicht meßbare Größe darstellt [6]. Da es sich bei Eindringmenge und Eindringtiefe für einen gegebenen Beton um voneinander abhängige Größen handelt, sind die nachfolgenden Überlegungen stets auf die Eindringmenge bezogen.

Die Eindringmenge E [l/m²] einer Flüssigkeit ist über das wirksame Kapillarporenvolumen p_{kw} [%] des Betons unmittelbar an die Eindringtiefe e [mm] gekoppelt:

$$E(t) = e(t) \cdot p_{kw}/100$$

Das kapillare Eindringen läßt sich daher analog zur Eindringtiefe e auch über die Eindringmenge E formulieren:

$$E(t) = B \cdot \sqrt{t} \quad \text{mit} \quad B = C \cdot \left(\frac{\sigma \cdot \cos \vartheta}{\eta} \right)^{0,5}$$

Die meisten organischen Flüssigkeiten vermögen den Beton gut zu benetzen. Der Randwinkel ϑ nimmt also sehr kleine Werte an, so

daß näherungsweise $\cos \vartheta = 1$ gesetzt werden kann. Für das Eindringen von Flüssigkeiten in den gleichen Beton und für den Fall, daß die Flüssigkeiten keine unterschiedlichen Wechselwirkungen mit dem Beton eingehen, gilt für den Koeffizienten $C = \text{const.}$ Damit ergibt sich zwischen den Eindringkoeffizienten B und den Stoffkennwerten Oberflächenspannung σ und Viskosität η der Flüssigkeiten folgender proportionaler Zusammenhang:

$$B \sim (\sigma/\eta)^{0.5}$$

4 Untersuchungen

4.1 Betone

In die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden vier verschiedene Betone einbezogen, deren Zusammensetzungen in Tafel 1 enthalten sind. Als Zuschlag wurde einheitlich Rheinkiessand der Sieblinie AB 16 nach DIN 1045 [7] verwendet. Der Zementgehalt betrug bei allen Betonen 320 kg/m^3 . Generell wurden 10 % des Zementgewichts an Steinkohlenflugasche zugegeben, wobei keine Anrechnung auf den Wasserzementwert erfolgte. Als Zement wurden ein Hochofenzement HOZ 35 L und ein Portlandzement PZ 35 F nach DIN 1164 [8] verwendet. Bei den mit HOZ 35 L hergestellten Betonen betrugen die Wasserzementwerte 0,60 (Beton H6), 0,50 (Beton H5) und 0,40 (Beton H4). Der mit PZ 35 F hergestellte Beton P5 wies einen Wasserzementwert von 0,50 auf.

Tafel 1 Zusammensetzung der Betone
Table 1 Mixture of concretes

Beton concrete	H6	H5	H4	P5
Zuschlag aggregate	Rheinkiessand gravel/sand from Rhine			
Sieblinie grading curve	AB 16			
Zementgehalt cement content	320 kg/m^3			
Flugasche fly ash	32 kg/m^3			
Zementart cement type	HOZ 35 L			PZ 35 F
w/z-Wert w/c ratio	0,60	0,50	0,40	0,50

Als Probekörper wurden Würfel mit 150 mm Kantenlänge und Balken 150x150x700 mm nach DIN 1048 [9] hergestellt. Die Probekörper verblieben einen Tag in der Form und erfuhren anschließend eine 6tägige Nachbehandlung in Folie. Für die Eindringversuche wurden aus den Balken im Anschluß an die Nachbehandlung Bohrkern mit 80 mm Durchmesser gewonnen. Die weitere Lagerung der Würfel und Bohrkern erfolgte im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte.

4.2 Flüssigkeiten

Für die systematischen Eindringversuche wurden Flüssigkeiten aus verschiedenen homologen Reihen, d.h. Flüssigkeiten derselben Stoffgruppe, jedoch unterschiedlicher Anzahl von C-Atomen, ausgewählt. In einzelnen wurden sechs Alkane, vier Ether und zehn Alkohole verwendet, wobei es sich jeweils um Substanzen mit unverzweigten Molekülketten handelte. Die physikalischen Kennwerte der Flüssigkeiten bei 20 °C (Dichte, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität) sind in Tafel 2 zusammengestellt.

Die Oberflächenspannungen der verschiedenen Flüssigkeiten variieren im Vergleich zu deren Viskositäten nur geringfügig. Die Zahlenwerte der Oberflächenspannungen wurden der Literatur entnommen [10, 11]. Die Viskositäten wurden mit Hilfe von Kapillarviskosimetern (Ubbelohde-Viskosimeter) bestimmt. Bei dem angewendeten Verfahren erhält man aus der Durchlaufzeit der Flüssigkeit durch eine Kapillare die kinematische Viskosität ν . Mit der Dichte ρ der Flüssigkeit ergibt sich daraus die dynamische Viskosität $\eta = \rho \cdot \nu$.

4.3 Eindringversuche

Die Eindringversuche wurden nach dem in [4] beschriebenen Verfahren durchgeführt. Wegen der Einflüsse von Hydratationsgrad und Feuchtezustand auf das Eindringverhalten wurden die Prüfungen erst im Betonalter von drei Monaten nach austrocknender Lagerung bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte durchgeführt. Um einen weitgehend eindimensionalen Eindringvorgang zu erreichen, wurden die verwendeten Bohrkern an der Mantelfläche abgedichtet und in Längsrichtung über ein aufgesetztes Standrohr mit der Flüssigkeit beaufschlagt. Die Eindringmengen wurden während einer mindestens 72stündigen Beaufschlagungsdauer an jeweils zwei Probekörpern bestimmt.

Bei sämtlichen Eindringversuchen mit den organischen Flüssigkeiten wurde der theoretisch hergeleitete lineare Zusammenhang zwischen der Eindringmenge und der Quadratwurzel der Zeit bestätigt. Das grundsätzlich beobachtete Eindringverhalten wird in Bild 2 erläutert, in dem die Eindringmenge über der im Wurzelmaßstab dargestellten Beaufschlagungsdauer aufgetragen ist. Die Regression der zu verschiedenen Zeitpunkten der Beaufschlagungsdauer gemessenen Eindringmengen ergibt im Wurzelmaßstab eine Gerade, die im allgemeinen nicht durch den Ursprung geht. Zwischen der Eindringmenge E [l/m^2] und der Beaufschlagungsdauer t [h] besteht dementsprechend der funktionale Zusammenhang $E_t = A + B \cdot \sqrt{t}$ mit den Koeffizienten A [l/m^2] und B [$l/(m^2 \cdot h^{0.5})$].

Das additive Glied A resultiert insbesondere aus dem zunächst schnelleren Eindringen der Flüssigkeit an der offenen Probenoberfläche und im oberflächennahen Bereich. Analog zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen nach DIN 52 617 [12] wird als repräsentative Größe für das Eindringverhalten der Ein-

Tafel 2 Physikalische Kennwerte der Flüssigkeiten
Table 2 Physical properties of liquids

Flüssigkeit		Dichte	Oberflächen- spann.	dyn. Visko- sität
liquid		bulk density	surface tension	dyn. viscosity
		ρ	σ	η
		kg/dm ³	mN/m	mN·s/m ²
Alkane	n-Pentan	0,63	16,0	0,22
	n-Hexan	0,66	18,4	0,30
	n-Heptan	0,68	20,3	0,39
	n-Octan	0,70	21,8	0,50
	n-Nonan	0,72	22,9	0,68
	n-Decan	0,73	23,9	0,88
Ether	Diethylether	0,71	17,0	0,26
	Di-n-Propylether	0,74	19,5	0,44
	Di-n-Butylether	0,76	22,0	0,68
	Di-n-Pentylether	0,78	24,8	1,10
Alkohole	Methanol	0,79	22,6	0,57
	Ethanol	0,79	22,8	1,17
	n-Propanol	0,80	23,8	2,13
	n-Butanol	0,80	24,6	2,79
	n-Pentanol	0,81	25,6	3,81
	n-Hexanol	0,81	26,3	5,02
	n-Heptanol	0,82	27,3	6,48
	n-Octanol	0,82	27,5	7,79
	n-Nonanol	0,83	27,5	10,13
	n-Decanol	0,83	27,5	12,70

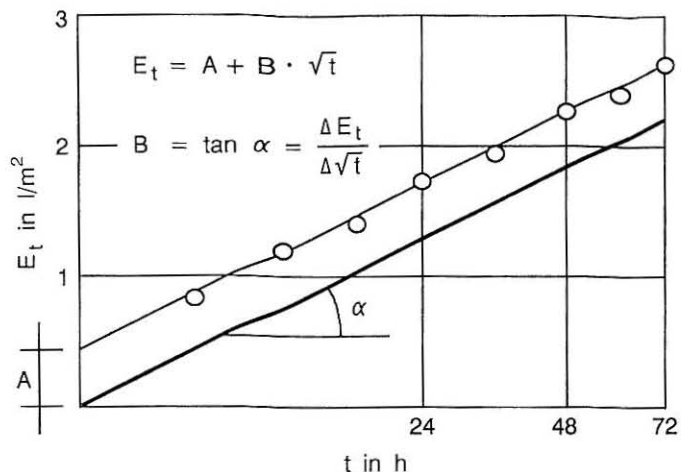


Bild 2 Mathematische Beschreibung des Eindringverhaltens
 Fig. 2 Mathematical description of penetration behaviour

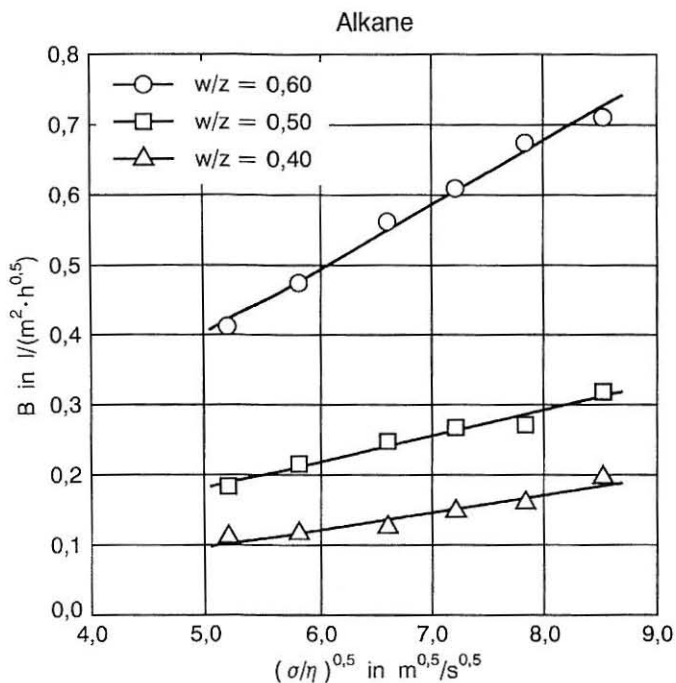


Bild 3 Einfluß von $(\sigma/\eta)^{0.5}$ auf die Eindringkoeffizient B der Alkane bei verschiedenen w/z-Werten
 Fig. 3 Influence of $(\sigma/\eta)^{0.5}$ on penetration coefficients B of alkanes due to different w/c ratios

dringkoeffizient B angesehen, der der Steigung der Regressionsgeraden entspricht.

5 Ergebnisse

5.1 Eindringverhalten innerhalb homologer Reihen

5.1.1 Homologe Reihe der Alkane

Im Bild 3 sind für die HOZ-Betone mit den w/z-Werten 0,60, 0,50 und 0,40 die im Versuch bestimmten Eindringkoeffizienten B der sechs Alkane über den zugehörigen Kennwerten $(\sigma/\eta)^{0,5}$ aufgetragen. Bei allen drei Betonen nehmen mit kleiner werdendem Kennwert (steigender Viskosität) die Eindringkoeffizienten vom Pentan bis zum Decan annähernd linear ab. Innerhalb der homologen Reihe der Alkane läßt sich das Eindringen in den Beton also durch die proportionale Beziehung $B \sim (\sigma/\eta)^{0,5}$ beschreiben. Bei allen sechs Alkanen handelt es sich um wasserunlösliche Flüssigkeiten.

5.1.2 Homologe Reihe der Ether

Bild 4 zeigt analog zu 5.1.1 den Zusammenhang zwischen den versuchsmäßig bestimmten Eindringkoeffizienten B der vier Ether und den zugehörigen Kennwerten $(\sigma/\eta)^{0,5}$. Auch hier nehmen mit kleiner werdendem Kennwert (steigender Viskosität) die Eindringkoeffizien-

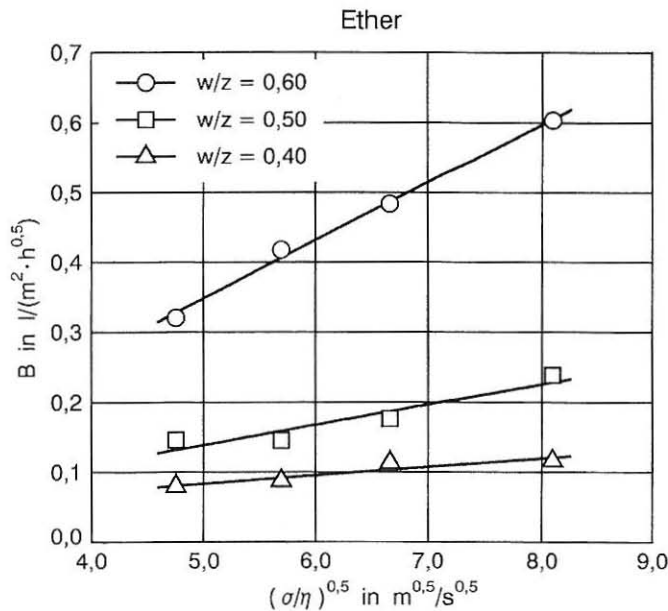


Bild 4 Einfluß von $(\sigma/\eta)^{0,5}$ auf die Eindringkoeffizient B der Ether bei verschiedenen w/z-Werten

Fig. 4 Influence of $(\sigma/\eta)^{0,5}$ on penetration coefficients B of ethers due to different w/c ratios

ten vom Diethylether bis zum Di-n-Pentylether annähernd linear ab. Innerhalb der homologen Reihe der Ether wird das Eindringverhalten also ebenfalls vom proportionalen Zusammenhang $B \sim (\sigma/\eta)^{0,5}$ bestimmt. Bei allen vier Ethern handelt es sich, wie bei den Alkanen, um wasserunlösliche Flüssigkeiten.

5.1.3 Homologe Reihe der Alkohole

Im Bild 5 sind analog zu 5.1.1 und 5.1.2 die im Versuch ermittelten Eindringkoeffizienten B der zehn Alkohole in Abhängigkeit von den zugehörigen Kennwerten $(\sigma/\eta)^{0,5}$ dargestellt. Die bei den Alkanen und Ethern festgestellte lineare Beziehung ist nicht auf die gesamte homologe Reihe der Alkohole übertragbar. Bei allen drei Betonen zeigt sich im Bereich des Butanols eine „Störung“, die vermutlich mit der unterschiedlichen Wasserlöslichkeit der Alkohole im Zusammenhang steht. In Wasser lösliche Flüssigkeiten dringen erfahrungsgemäß schlechter in Betone ein als wasserunlösliche Flüssigkeiten. Bei den ersten drei Alkoholen der Reihe (Methanol, Ethanol, Propanol) handelt es sich um wasserlösliche Flüssigkeiten, wohingegen die Alkohole ab dem Pentanol nicht mehr in Wasser löslich sind. Beim Butanol erfolgt der Übergang zwischen löslich und unlöslich. Betrachtet man die beiden Gruppen der wasserlöslichen und -unlöslichen Alkohole jeweils für sich, so ist auch beim Eindringverhalten der Alkohole die proportionale Beziehung $B \sim (\sigma/\eta)^{0,5}$ erkennbar.

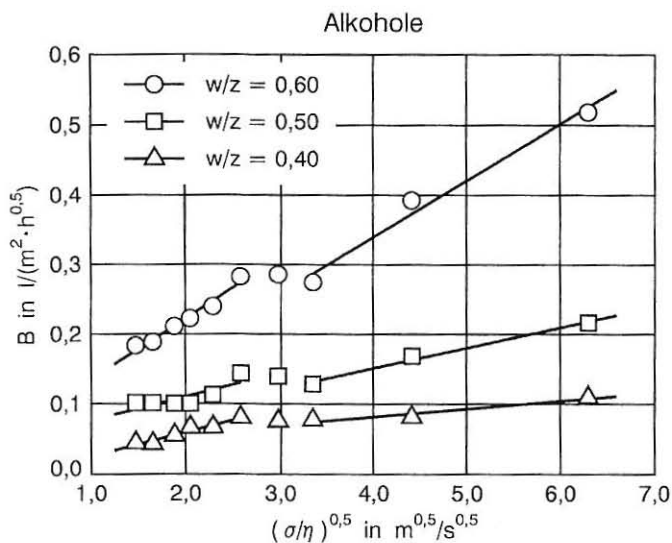


Bild 5 Einfluß von $(\sigma/\eta)^{0,5}$ auf die Eindringkoeffizient B der Alkohole bei verschiedenen w/z -Werten

Fig. 5 Influence of $(\sigma/\eta)^{0,5}$ on penetration coefficients B of alcohols due to different w/c ratios

5.2 Vergleich des Eindringverhaltens von Flüssigkeiten aus verschiedenen homologen Reihen

In 5.1 wurde der proportionale Zusammenhang zwischen den Eindringkoeffizienten B und den Kennwerten $(\sigma/\eta)^{0,5}$ innerhalb der verschiedenen homologen Reihen gezeigt. Betrachtet man den Einfluß von Viskosität und Oberflächenspannung auf das Eindringen in den Beton unabhängig von der jeweiligen homologen Reihe, so stellt man fest, daß $(\sigma/\eta)^{0,5}$ auch dann noch einen geeigneten Kennwert zur Abschätzung des Eindringverhaltens darstellt. Bild 6 zeigt diesen Zusammenhang für die verwendeten Alkane, Ether und Alkohole an den Betonen mit den w/z -Werten 0,60 und 0,50. Um das praktische Verhalten anschaulicher darzustellen, sind anstelle der Eindringkoeffizienten B die aus $B \cdot \sqrt{72}$ berechneten Eindringmengen E_{72} nach 72stündiger Beaufschlagungsdauer angegeben. Da der Einfluß der Wasserlöslichkeit auf das Eindringverhalten gegenüber dem Einfluß der Viskosität deutlich zurücktritt, wird hier nicht mehr zwischen wasserlöslichen und -unlöslichen Substanzen unterschieden.

Für $w/z = 0,60$ (Beton H6) liegen bei linearer Regression alle gemessenen Eindringmengen in einem Streubereich von $\pm 0,65 \text{ l/m}^2$ um die Regressionsgerade (Bandbreite $1,3 \text{ l/m}^2$). Bei den niedrigviskosen Flüssigkeiten mit Eindringmengen E_{72} zwischen 4 und 6 l/m^2 ent-

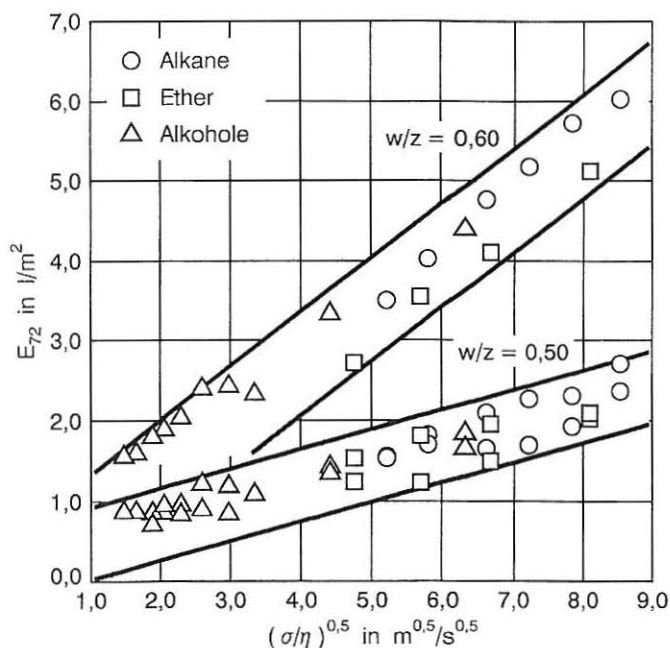


Bild 6 Einfluß von $(\sigma/\eta)^{0,5}$ auf die Eindringmengen E_{72} der Alkane, Ether und Alkohole bei verschiedenen w/z -Werten

Fig. 6 Influence of $(\sigma/\eta)^{0,5}$ on penetration volumes E_{72} of alkanes, ethers and alcohols due to different w/c ratios

spricht dies einer Vorhersagegenauigkeit von ± 10 bis ± 15 %. Bei $w/z = 0,50$ (Betone H5 und P5) beträgt der Streubereich der gemessenen Eindringmengen $\pm 0,45$ l/m² (Bandbreite 0,9 l/m²). Hier ergibt sich für niedrigviskose Flüssigkeiten mit Eindringmengen E_{72} zwischen 2 und 3 l/m² eine Vorhersagegenauigkeit von ± 15 bis ± 20 %. Für den im Bild nicht dargestellten Beton H4 mit $w/z = 0,40$ liegen die gemessenen Eindringmengen in einem Streubereich von $\pm 0,35$ l/m² (Bandbreite 0,7 l/m²). Bei den nur sehr geringen Absolutwerten der Eindringmengen liegen die prozentualen Streuungen hier verständlicherweise höher.

5.3 Einfluß des Betons auf das Eindringverhalten

Unabhängig von der jeweiligen Flüssigkeit erwiesen sich w/z -Wert und Eindringmenge als gut korrelierbare Größen. Da auch die Druckfestigkeit üblicher Betone ohne festigkeitsbeeinflussende Zusatzstoffe maßgeblich vom w/z -Wert bestimmt wird, bietet sich die Größe der Druckfestigkeit zur Abschätzung des Eindringverhaltens an.

Für das kapillare Eindringen von Wasser in Beton wird im CEB-FIP Model Code 1990 [13] zur Abschätzung des Wassereindringkoeffizienten M_W [m/s^{0.5}] die Beziehung

$$\log M_W = -(4 + 0,02 \cdot f_{ck}) \quad \text{bzw.} \quad M_W = 10^{-(4 + 0,02 \cdot f_{ck})}$$

angegeben, wobei f_{ck} [N/mm²] die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen bedeutet. Überträgt man diese Beziehung formal auf den Zusammenhang zwischen der Würfel-

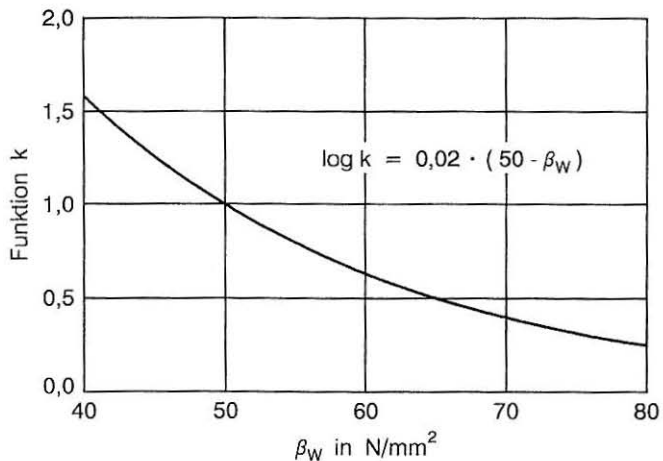


Bild 7 Funktion k zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit auf das Eindringverhalten

Fig. 7 Function k considering the influence of concrete strength on penetration behaviour

druckfestigkeit β_w [N/mm²] des Betons und dem Eindringkoeffizienten B, so ergibt sich bei einer gewählten Normierung auf 50 N/mm² die im Bild 7 dargestellte Funktion k zur Berücksichtigung des Einflusses der Betondruckfestigkeit auf das Eindringverhalten:

$$k(\beta_w) = 10^{0,02 \cdot (50 - \beta_w)}$$

In Anlehnung an das Prüfalter bei den Eindringversuchen wurden auch die Druckfestigkeiten β_w der verwendeten Betone im Alter von drei Monaten an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge bestimmt. Die Festigkeiten sind als Mittelwerte von jeweils drei Würfeln zusammen mit den zugehörigen Funktionswerten k (β_w) in Tafel 3 enthalten.

Tafel 3 Druckfestigkeiten β_w und Funktionswerte k (β_w) der Betone
Table 3 Compressive strengths β_w and values k (β_w) of concretes

Beton / concrete	H6	H5	H4	P5
β_w in N/mm ² (Würfel / cube 150 mm , 91 d)	41	58	74	64
k(β_w)	1,51	0,69	0,33	0,53

Im Bild 8 sind für alle Betone und alle Flüssigkeiten die im Versuch ermittelten Eindringmengen E_{72} über $k \cdot (\sigma/\eta)^{0,5}$ aufgetragen. Bei linearer Regression liegen alle Eindringmengen in einem Streubereich von $\pm 0,75$ l/m² um die Regressionsgerade (Bandbreite 1,5 l/m²).

6 Folgerungen

Die Untersuchungen zeigen, daß sich beim Umgang mit umweltgefährdenden Flüssigkeiten die Anzahl der Eignungsprüfungen bezüglich des zu erwartenden Eindringverhaltens deutlich reduzieren läßt. Durch die Wahl geeigneter Referenzbetone und Referenzflüssigkeiten läßt sich das Eindringverhalten auch bei abweichenden Verhältnissen hinsichtlich Betonzusammensetzung und vorliegender Flüssigkeit über Stoffkennwerte gut abschätzen.

Bei den Eindringprüfungen sind bestimmte Randbedingungen zu berücksichtigen. Seitens des Betons haben, wie bereits erwähnt, neben dessen Zusammensetzung auch der vorhandene Feuchtezustand sowie der erreichte Hydratationsgrad maßgebenden Einfluß auf das Eindringen von Flüssigkeiten. Im Gegensatz zur Betonzusammensetzung lassen sich Feuchtezustand und Hydratationsgrad des Bauwerksbetons zum Zeitpunkt einer möglichen Beaufschlagung nicht vorhersagen. Beim labormäßigen Nachweis des Eindringverhaltens sind für diese Einflußgrößen daher auf der sicheren Seite liegende Prüfbedingungen festzulegen. Da sich sowohl zunehmender Feuchtegehalt als auch zunehmender Hydratationsgrad

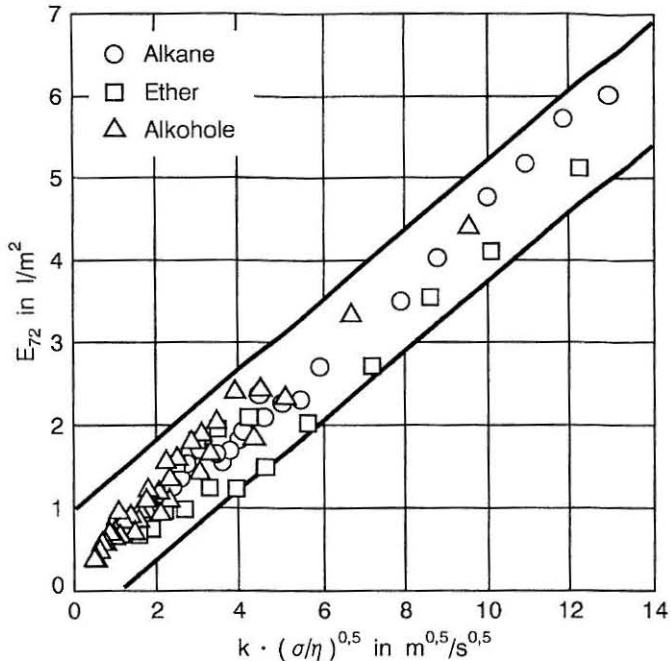


Bild 8 Zusammenhang zwischen $k \cdot (\sigma/\eta)^{0,5}$ und den Eindringmengen E_{72} der Alkane, Ether und Alkohole

Fig. 8 Relation between $k \cdot (\sigma/\eta)^{0,5}$ and penetration volumes E_{72} of alkanes, ethers and alcohols

dichtungssteigernd auswirken, können die gewählten Bedingungen einer austrocknenden Vorlagerung bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte und eines vergleichsweise frühen Prüfalalters von drei Monaten als ungünstig wirkend angesehen werden.

Seitens der Flüssigkeit ist zu beachten, daß deren Eindringen in den Beton bei zunehmendem Randwinkel zum Feststoff, bei zunehmender Löslichkeit in Wasser sowie bei chemischen Reaktionen mit Bestandteilen des Betons im allgemeinen gebremst wird. Die den Beton gut benetzenden und chemisch nicht angreifenden organischen Flüssigkeiten, und dabei besonders die wasserunlöslichen Substanzen, sind daher als ungünstiger wirkend, d.h. besser eindringend, zu betrachten.

7 Zusammenfassung

7.1 Die Kapillarleitung ist die dominierende Transportart für das Eindringen von Flüssigkeiten in nicht wassergesättigte Betone.

7.2 Das kapillare Eindringen wird von der Beschaffenheit des Betons (Widerstandsseite), den physikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit (Einwirkungsseite) sowie von Wechselwirkungen zwischen Beton und Flüssigkeiten bestimmt.

7.3 Die für das Eindringverhalten maßgebenden Einflußgrößen auf der Einwirkungsseite sind die Viskosität η und die Oberflächenspannung σ der Flüssigkeit.

7.4 Innerhalb der homologen Reihen der Alkane und Ether zeigt sich ein proportionaler Zusammenhang zwischen den Eindringkoeffizienten oder Eindringmengen dieser ausnahmslos wasserunlöslichen Flüssigkeiten und deren Kennwerten $(\sigma/\eta)^{0.5}$. Bei der homologen Reihe der Alkohole wird diese Proportionalität wahrscheinlich durch die unterschiedliche Wasserlöslichkeit der einzelnen Alkohole gestört.

7.5 Auch beim Zusammenfassen der Stoffgruppen der Alkane, Ether und Alkohole und ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Wasserlöslichkeit der Substanzen stellt $(\sigma/\eta)^{0.5}$ einen geeigneten Kennwert zur Abschätzung des Eindringverhaltens dar.

7.6 Bei Betonen, deren Festigkeitsentwicklung nur begrenzt von Zusatzstoffen mitbestimmt wird, stellt die Druckfestigkeit eine geeignete Größe zur Abschätzung des Eindringens von solchen organischen Flüssigkeiten dar.

7 Summary

7.1 Capillary suction is the dominant type of transport for the penetration of liquids in concretes which are not saturated with water.

7.2 The capillary penetration is determined by the nature of the concrete (resistance side), the physical properties of the liquid (active side), and the interactions between concrete and liquid.

7.3 The influencing variables which are decisive for the penetration behaviour on the active side are the viscosity η and the surface tension σ of the liquid.

7.4 Within the homologous series of the alkanes and ethers there is a proportional relationship between the penetration coefficients or penetration quantities of these liquids (which are without exception water-insoluble) and their parameters $(\sigma/\eta)^{0.5}$. This proportionality is upset in the homologous series of the alcohols, probably due to the differing water solubilities of the individual alcohols.

7.5 Even if the alkane, ether and alcohol groups are combined, and without taking the different water solubilities of the substances into account, $(\sigma/\eta)^{0.5}$ represents a suitable parameter for estimating the penetration behaviour.

7.6 With concretes where the strength development is only determined to a limited extent by additions the compressive strength represents a suitable variable for estimating the penetration of such organic liquids.

SCHRIFTTUM/LITERATURE

- [1] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) in der Fassung vom 23. September 1986
- [2] Muster-Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe (Muster-VAWS) in der Fassung vom 8. November 1990

- [3] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Sachstandsbericht; H. 416, 1991
- [4] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton: Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Teile 1 und 2 (09/92)
- [5] Paschmann, H., und H. Grube: Einfluß mineralischer und organischer Zusatzstoffe auf die Dichtigkeit gegenüber organischen Flüssigkeiten und auf weitere Eigenschaften des Betons. Beton 44 (1994), H. 1, S. 24/29, und H. 2, S. 86/91
- [6] Grube, H., und G. Spanka: Dichtigkeit von Beton gegenüber organischen Flüssigkeiten. Beton 40 (1990), H. 4, S. 148/151, und H. 5, S. 200/203
- [7] DIN 1045 (07/88): Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [8] DIN 1164 Teil 1 (03/90): Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement; Begriffe, Bestandteile, Anforderungen, Lieferung
- [9] DIN 1048 Teil 5 (06/91): Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [10] Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chemical Technology. Interscience Publishers, John Wiley & Sons Inc., New York 1966
- [11] Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie. Verlag Chemie, Weinheim 1978
- [12] DIN 52 617 (05/87): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen
- [13] CEB-FIP Model Code 1990. Bulletin d'Information No. 203, 1991