

# Dichtigkeit von Beton gegenüber organischen Flüssigkeiten

Von Horst Grube und Gerhard Spanka, Düsseldorf\*)

## Übersicht

*Der Zementstein im Beton ist ein poröser anorganischer Stoff. Er enthält Gelporen mit Porenradien kleiner als 30 nm und bei Wasserzementwerten über 0,40 zunehmend auch größere durchgehende Kapillarporen. Während die Gelporen als quasi flüssigkeitsundurchlässig anzusehen sind, können in den Kapillarporen Substanzen in flüssiger und gasförmiger Phase durch Strömungs- und Diffusionsvorgänge transportiert werden. Um Aufschlüsse über den Transport niedrigviskoser organischer Flüssigkeiten im Beton zu erlangen, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Eindringverhalten chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW) durchgeführt. Sie gehören im allgemeinen zur höchsten Wassergefährdungsklasse WGK 3 und werden häufig als besonders kritisch bezüglich ihres Eindringvermögens in Betonbauteile angesehen. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß in gut aufgebaute Betone mit Wasserzementwerten von höchstens 0,50 nur geringe Mengen an CKW eindringen und daß die Dichtigkeit des Betons durch den Zusatz geringer Mengen quellfähiger oder löslicher Kunststoffe noch deutlich gesteigert werden kann.*

## 1 Einleitung

Steigende Anforderungen an den Umweltschutz und einige Unfälle beim Umgang mit Gefahrstoffen haben dazu geführt, daß von der chemischen Großindustrie sehr schnell, in intensiver Zusammenarbeit mit den Genehmigungsbehörden, neue Bau- und Sicherheitsmaßnahmen für Gefahrstofflager ausgearbeitet wurden [1, 2, 3]. Zum Sicherheitskonzept gehören u. a. Auffangtassen und Platten, z. B. für Produktionsflächen und Faßlager. Dafür ist der Baustoff Beton besonders geeignet, da er die tragende und im Schadensfall die temporär abdichtende Funktion gegenüber umweltrelevanten Substanzen, die nicht in das Grundwasser oder Erdreich gelangen dürfen, übernehmen kann und außerdem einen hohen Widerstand ge-

\*) Erweiterte Fassung eines Vortrags von G. Spanka auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '90 des VDZ am 31.1./1.2.1990 in Düsseldorf

gen mechanische Beanspruchungen und Feuereinwirkung aufweist.

Allerdings wurde die abdichtende Funktion des Baustoffs Beton gegenüber niedrigviskosen organischen Flüssigkeiten von einzelnen Genehmigungsbehörden angezweifelt und beim Neubau solcher Sicherheitseinrichtungen der Einsatz zusätzlicher, sehr teurer chemikalienresistenter Beschichtungssysteme gefordert. Neben den hohen Kosten sind damit weitere Nachteile verbunden. Beispielsweise geht die übersichtliche, leicht überprüfbare einschalige Bauweise ebenso verloren wie die Nichtbrennbarkeit des abdichtenden Teils der Konstruktion. Außerdem können die Flächen in der Regel nicht mehr befahren werden, was für Lagerbereiche unumgänglich ist. Um die Dichtungseigenschaften des Baustoffs Beton gegenüber niedrigviskosen organischen Flüssigkeiten zu ermitteln, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Transport von Flüssigkeiten und Gasen in Beton durchgeführt. Dazu gehörte u. a. die Entwicklung eines zuverlässigen Prüf- und Nachweisverfahrens für das Eindringen organischer Substanzen in Beton sowie Versuche mit Kunststoffzusätzen, um die an sich bereits geringe Durchlässigkeit sachgerecht hergestellter Betone gegenüber diesen Stoffen noch weiter zu vermindern. Als Einwirkzeit wird in den bestehenden Vorschriften von drei Tagen ausgegangen. Dem Transport chlorierter Kohlenwasserstoffe (CKW) galt dabei besondere Aufmerksamkeit.

## **2 Stofftransport in Zementstein und Beton**

### **2.1 Porenstruktur von Zementstein und Beton**

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Betonzuschlag und Wasser — ggf. auch mit Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen — durch Erhärten des Zementleims entsteht [4]. Im Zementleim sind die einzelnen Zementkörner von Wasserhüllen umgeben und gegeneinander leicht verschiebbar. Unmittelbar nach dem Anmachen des Zementleims beginnen an der Grenzfläche zwischen Zementkorn und Wasser chemische Reaktionen, bei denen wasserhaltige Verbindungen — sogenannte Hydratphasen — gebildet werden, die in den wassergefüllten Porenraum hineinwachsen. Diese mikrokristallinen Hydratationsprodukte bestehen vorwiegend aus faser- und folienförmigem Calciumsilicahydrat, Calciumhydroxid und in geringeren Anteilen aus tafelförmigem Monosulfat und Calciumaluminathydrat. Sie haben eine rd. 1000mal größere Oberfläche als die Zementkörner, aus denen sie entstehen, und werden aufgrund ihrer submikroskopischen Struktur auch als Zementgel bezeichnet. Mit Fortschreiten der Hydratation wachsen die Hydratationsprodukte, ausgehend von den einzelnen Zementkörnern, zusammen. Dadurch verfestigt sich der Zementleim zu Zementstein [5, 6, 7, 8]. Die mikrokristallinen Hydratationsprodukte des Zementgels können auch bei dichtester Lagerung den Reaktionsraum nicht vollständig ausfüllen. Die verbleibenden Räume in und zwischen den Hydratationsprodukten werden als Gelporen bezeichnet; ihr Porenradius ist kleiner als 30 nm. Dementsprechend sind sie bei Normalklima stets weitgehend mit Wasser gefüllt. Das Wasser in diesen Poren ist verdampfbar, aber nicht wie

flüssiges Wasser in seiner Gesamtheit verschiebbar. Würde der Zementstein bis zu den Zuschlagoberflächen hin nur aus diesem dichten Zementgel bestehen, wäre der Transport von Flüssigkeiten oder Gasen im Beton ausschließlich durch Diffusionsprozesse möglich.

Weil der Frischbeton verarbeitbar sein muß, wird bei der Betonherstellung in der Regel mehr Wasser zugesetzt als für die vollständige Hydratation der Zementbestandteile notwendig ist. Die dickere Flüssigkeitshülle bewirkt einen größeren Abstand der Feststoffteilchen voneinander. Beim Entzug des Wassers durch chemische Reaktion oder Verdunstung bleiben größere durchgehende Poren zurück. Die Radien dieser sogenannten Kapillarporen betragen rd. 50 nm bis mehrere  $\mu\text{m}$ . In diesen Poren kann der Transport von Flüssigkeiten und Gasen außer durch Diffusion auch durch Strömungsprozesse erfolgen.

Um Betonbauteile zu erstellen, die die technisch notwendigen Anforderungen an die Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen erfüllen, ist die Minimierung des Kapillarporenraumes durch beton-technologische Maßnahmen die wichtigste Aufgabe [9]. Dies kann durch eine von Anfang an möglichst dichte Lage der Zementkörner, d. h. durch einen niedrigen Wasserzementwert, und durch einen möglichst hohen Hydratationsgrad, d. h. durch weitgehende Reaktion des vorhandenen Zements mit dem vorhandenen Wasser, erreicht werden. Da die Hydratation eine erhebliche Zeit benötigt und im wesentlichen im wassergefüllten Porenraum stattfindet, muß das zur Hydratation benötigte Wasser schon von Beginn an möglichst effektiv im Beton zurückgehalten werden. Diese Maßnahme nennt man Nachbehandlung. Der Einfluß des Wasserzementwerts und des Hydratationsgrads auf das Kapillarporenvolumen wird in Bild 1 verdeutlicht.

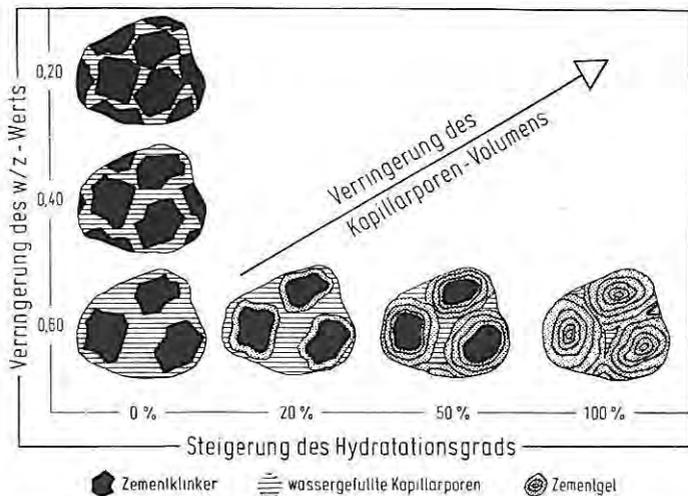


Bild 1 Modelldarstellung für die Verringerung des Kapillarporenraums durch Verringerung des w/z-Werts (Ordinate) und durch Steigerung des Hydratationsgrads (Abszisse) nach Wischers

Da selbst die unter optimalen Bedingungen erzeugten Zementgele in der Regel den „schwächeren“ Bestandteil des Betons z. B. bezüglich Druckfestigkeit und Durchlässigkeit darstellen, verbessert eine weitgehende Hohlraumfüllung durch dichte, feste Zuschläge, die 70 bis 75% des Betonvolumens ausmachen, mit einer gut abgestuften Sieblinie diese Eigenschaften erheblich. Die Zugabe von Flugasche oder anderer feinkörniger Zusatzstoffe kann die Hohlraumfüllung weiter verbessern und damit zu einer weiteren Steigerung der Festigkeit und Dichtigkeit des Betons führen, sofern der ursprüngliche Wasserzementwert beibehalten wird. Außerdem kann durch feinkörnige Zusatzstoffe das Wasserrückhaltevermögen des Frischbetons verbessert und die Gefahr vermindert werden, daß sich Anmachwasser absetzt (sogenanntes Bluten) und sich unter größeren Zuschlägen Wasseransammlungen bilden, die den dichten Verbund von Zuschlag und Zementstein beeinträchtigen.

## 2.2 Transportmechanismen von Flüssigkeiten und Gasen in Zementstein und Beton

Der Stofftransport in den Poren eines porösen Festkörpers kann in Abhängigkeit von den Porenradien und den Eigenschaften der eindringenden Substanz, z. B. durch Stoffaufnahme in luftgefüllten Kapillaren (kapillare Saugfähigkeit), als Fließvorgang aufgrund äußerer Druckunterschiede (Sickerströmung, Konvektion) oder durch Diffusion aufgrund örtlicher Konzentrationsunterschiede und der Molekularbewegung erfolgen. Während Kapillar- und Sickerströmungen an das Vorhandensein größerer, durchgehender Poren (Kapillarporen) gebunden sind, können Diffusionsvorgänge auch in sehr dichten Feststoffen mit nur geringen Anteilen durchgehender Poren einen nicht zu vernachlässigenden Stofftransport bewirken. Diese Transportmechanismen können sich bei gegebenen äußeren Druck- und Konzentrationsunterschieden überlagern und in Abhängigkeit von der Zeit zu einer für das transportierte Medium und den porösen Feststoff charakteristischen, experimentell bestimmbaren Eindringtiefe führen. Dabei erfolgt das Eindringen von Flüssigkeiten in Feststoffen, die wie Beton unterschiedliche Porengrößen aufweisen, im allgemeinen nicht in Form einer scharf abgegrenzten Flüssigkeitsfront, sondern in differenzierter Weise mit zeitlich und örtlich unterschiedlichen Gradienten [10]. Bei leichtflüchtigen Substanzen kann der Flüssigkeit die entsprechende Substanz in gasförmiger Form durch Diffusionsvorgänge vorausseilen.

In Bild 2 ist der prinzipielle Konzentrationsverlauf bei der Sorption bzw. Desorption von Methylenchlorid in einem Normalbeton ( $\beta_D \approx 50 \text{ N/mm}^2$ ,  $w/z = 0,50$ , 7 d in Folie und ca. zwei Monate bei  $20^\circ\text{C}/65\%$  r.F. gelagert) mit einem Gesamtporenvolumen von rd. 10% dargestellt, der drei Tage mit dem organischen Lösungsmittel bei einer Druckhöhe von 1,40 m beaufschlagt wurde. Diese Konzentrationsverläufe ergeben sich anhand von experimentellen Daten, wie z. B. Gewichtsänderung der Probe, Konzentrationsmessungen mit einem Gesamtkohlenwasserstoffanalysator sowie von rechnerischen Abschätzungen des Diffusionsfortschritts. Aus Bild 2 geht hervor, daß bereits einen Tag nach Beendigung der Beaufschlagung, also im Bild nach vier Tagen Versuchsdauer, rd. 90% der eingedrungenen Menge an Methylenchlorid durch Verdunstungsprozesse an der vor-

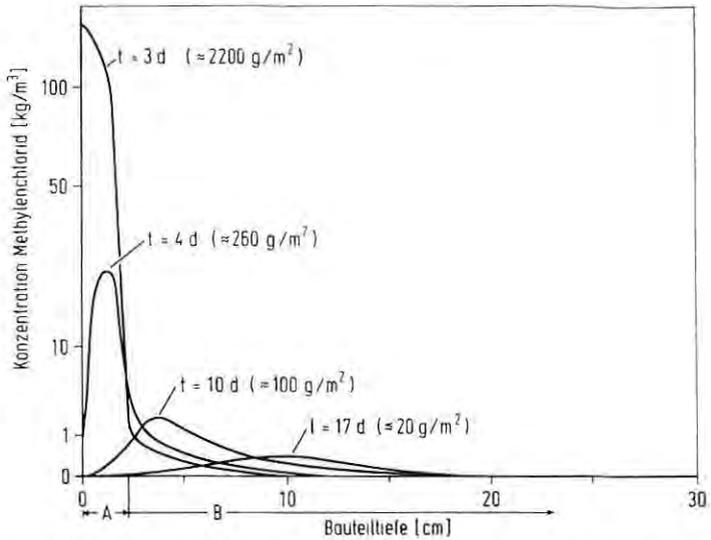


Bild 2 Konzentrationsverlauf (qualitativ und quantitativ) bei der Sorption bzw. Desorption des organischen Lösungsmittels Methylenechlorid in einem dichten Normalbeton; (A) Flüssige Eindringtiefe nach einer Belastungsdauer von 3 Tagen, (B) Gasförmige Eindringtiefe

mals beaufschlagten Oberfläche wieder an die Umgebungsluft abgegeben worden sind. Die Menge an Methylenechlorid, die den Beton nach langer Zeit in gasförmiger Form durch Diffusionsprozesse durchdringen kann, ist äußerst gering.

Eine einfache Reaktionsharzversiegelung der Betonoberfläche zur Herabsetzung der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme, eine geringere Beaufschlagung oder angepasste Entsorgungskonzepte, wie z. B. Vakuumabsaugung an der Betonoberfläche oder Entlüftung über ein Röhrensystem an der Unterseite einer oberseitig beaufschlagten Betonplatte, könnten die Sicherheit gegenüber Boden- und Grundwasserkontaminationen mit umweltrelevanten Substanzen erforderlichenfalls weiter erhöhen.

### 3 Experimenteller Teil

#### 3.1 Versuchsziel

Das Ziel bei den im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Versuchen zum Eindringverhalten niedrigviskoser organischer Flüssigkeiten in Beton war die Entwicklung eines baustellen-gerechten Betons, der gegenüber diesen Stoffen während einer ausreichenden Frist undurchlässig ist und damit bei Bauwerken wie z. B. Auffangtassen und Faßlagern im Schadensfall auch die temporär abdichtende Funktion übernehmen kann. Bei den Eindringversuchen wurde hauptsächlich das Lösungsmittel Methylenechlorid verwendet, da es sich bei dieser Substanz um den einfachsten, am schnellsten eindringenden flüssigen Vertreter der Substanzklasse

der Chlorkohlenwasserstoffe handelt. Chlorkohlenwasserstoffe werden zu den schwer abbaubaren Chemikalien gerechnet, die nicht in das Grundwasser oder den Boden gelangen dürfen. Ihnen wird außerdem nachgesagt, daß sie besonders leicht in Beton eindringen können.

### 3.2 Betontechnologische Einflußgrößen

Um zu ermitteln, welche Mengen eines organischen Lösungsmittels über drei Tage in Normalbeton eindringen und welche Eindringtiefen dabei erreicht werden, wurden zunächst Betone mit Wasserzementwerten von  $w/z = 0,50$  und  $0,60$  hergestellt und an diesen Betonen Eindringversuche mit Methylenchlorid durchgeführt, siehe Tafel. Dabei kamen, wie bei allen folgenden Versuchen, zwei Zementarten — PZ 35 F und HOZ 35 L — zum Einsatz. Der Zementgehalt betrug jeweils  $320 \text{ kg/m}^3$ . Als Zuschlag wurde generell Rheinkießsand der Sieblinie A/B 16 verwendet. Durch die Zugabe von jeweils  $32 \text{ kg/m}^3$  Flugasche, d. h. 10 % des Zementgewichts, wurde der Feinstkorngehalt erhöht. Dabei erfolgte keine Anrechnung der Flugasche auf den Wasserzementwert. Die Konsistenz des Frischbetons wurde mit einem Fließmittel eingestellt.

Man kann vorweg feststellen, daß die Menge an Methylenchlorid, die in einen gut aufgebauten Beton mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  innerhalb von 72 Stunden eindringt, mit rd.  $2 \text{ l/m}^2$  sehr gering ist (siehe 3.5.1). Darüber hinaus wurde versucht, die Undurchlässigkeit derartiger Betone durch konventionelle betontechnische Maßnahmen zu erhöhen, wie z. B. Reduzierung des Wasserzementwerts, Zugabe von Silicastaub oder die Einführung von Luftporen zur Verminderung der Kapillaraktivität. Durch die beiden erstgenannten Maßnahmen können zwar geringere Eindringmengen erreicht werden, jedoch nur um den Preis erheblicher Festigkeitssteigerungen. Damit erhält man ungünstigere Voraussetzungen für die Rißbreitensteuerung durch Bewehrung. Die Einführung von Luftporen bewirkte zwar keine Verminderung der Eindringmengen, jedoch eine in diesem Anwendungsbereich willkommene Herabsetzung der Festigkeit. Außerdem weisen Luftporenbetone in der Regel einen größeren Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auf als die entsprechenden Nullbetone.

Neben diesen üblichen betontechnischen Maßnahmen wurden Versuche mit verschiedenen Kunststoffzusätzen in einer Menge von 2 und 10 Gew.-% vom Zementgewicht durchgeführt, um eine größere Dichtigkeit, insbesondere gegenüber niedrigviskosen organischen Lösungsmitteln, herbeizuführen (siehe 3.3).

Alle vorgenannten Betone wurden einer 7tägigen wasserzurückhaltenden Nachbehandlung in Folie unterzogen. Für die Eindringversuche wurden insofern Betone einer Qualität hergestellt, die auf der Baustelle bei einer dem heutigen Stand der Technik entsprechenden Ausführung mindestens erreicht werden kann. Im Anschluß an die Nachbehandlung wurden aus den mit diesen Betonen hergestellten Würfeln mit 150 mm Kantenlänge Bohrkerne mit einem Durchmesser von 80 mm gewonnen und diese auf der Unterseite auf eine Länge von 120 mm abgesägt. Vor der Belastung mit dem organischen Lösungsmittel lagerten die Bohrkerne im allgemeinen zwei bis sechs Monate im Klimaraum bei  $20^\circ\text{C}/65\% \text{ r. F.}$  Unter diesen

Tafel: Übersicht über die bei den Eindringversuchen verwendeten Betone sowie einige Frisch- und Festbetondaten

Beton Nr.	Zementart u. Festigkeitsklasse	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	Flugasche kg/m <sup>3</sup>	Wasserzementwert*)	Fließmittel BVF % d. Zements	weitere Zusatzstoffe % d. Zements	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> cm	LP-Gehalt Vol.-%	Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	Druckfestigkeit an 15-cm-Würfeln N/mm <sup>2</sup>		
											2 d	7 d	28 d
1	PZ 35 F	320	32	0,50	3,0	—	44	1,6	2,40	2,39	34,2	44,7	54,5
2	HOZ 35 L	320	32	0,58	0,9	—	49	1,0	2,34	2,36	6,5	21,9	41,6
3	HOZ 35 L	320	32	0,50	2,8	—	50	1,2	2,40	2,38	15,7	31,8	50,0
4	HOZ 35 L	320	32	0,50	1,0	2 (quellf. Kunststoff)	43	1,5	2,37	2,37	12,8	31,9	47,5
5	HOZ 35 L	320	32	0,50	3,0	2 (lösl. Kunststoff)	53	1,3	2,40	2,37	15,4	33,1	52,7
6	HOZ 35 L	320	32	0,52	2,1	10 (quellf. Kunststoff)	52	1,6	2,34	2,31	6,9	22,0	39,4
7	HOZ 35 L	320	32	0,50	2,8	10 (lösl. Kunststoff)	58	1,3	2,33	2,33	13,0	29,5	48,1

\*) Die angestrebten Wasserzementwerte waren  $w/z = 0,50$  und  $w/z = 0,60$ ; die teilweise geringfügigen Abweichungen bei der Betonherstellung ergaben sich durch die zur Einstellung der Konsistenz benötigten, auf den Wasserzementwert angerechneten Fließmittelmengen.

Bedingungen wird ein Austrocknungsgrad erreicht, der wesentlich über dem von Betonbauteilen liegt, die der freien Bewitterung ausgesetzt sind. Damit ist gewährleistet, daß die im folgenden gezeigten Versuchsergebnisse auch in Bauteilen sicher erreicht werden.

### 3.3 Konzept zur Steigerung der Undurchlässigkeit von Beton gegenüber organischen Flüssigkeiten

Die Tatsache, daß Beton bei Durchlässigkeitsversuchen mit Wasser eine Selbstabdichtung z. B. durch Quellen vorhandener Hydrate, durch Nachhydratation im wassergefüllten Porenraum und durch Verstopfung von Kapillaren durch im Wasser mitgeführte Produkte erfährt, führte zu der Überlegung, durch die Verwendung löslicher oder quellfähiger Kunststoffe, die fein verteilt in den Beton eingebracht werden, beim Eindringen von gegenüber Normalbeton inerten organischen Flüssigkeiten eine Selbstabdichtung herbeizuführen.

Die beiden prinzipiellen Wirkungsweisen der Kunststoffe in derart modifizierten Betonen sind in Bild 3 dargestellt [11, 12]. Oben ist von links nach rechts die Situation für ein Kunststoffgranulat mit einem Durchmesser von rd. 200 µm dargestellt, das bei der Betonherstellung als Feststoff eingebracht wurde und aus nicht vernetzten Kettenmolekülen besteht. Die Kunststoffteilchen können sich in Methylenchlorid und vielen anderen chlorierten oder aromatischen Kohlenwasserstoffen vollständig lösen. Bereits nach sehr kurzen Einwirkungszeiten ergibt sich beim Kontakt der entsprechenden organischen Flüssigkeit mit den Kunststoffteilchen eine zusammen-

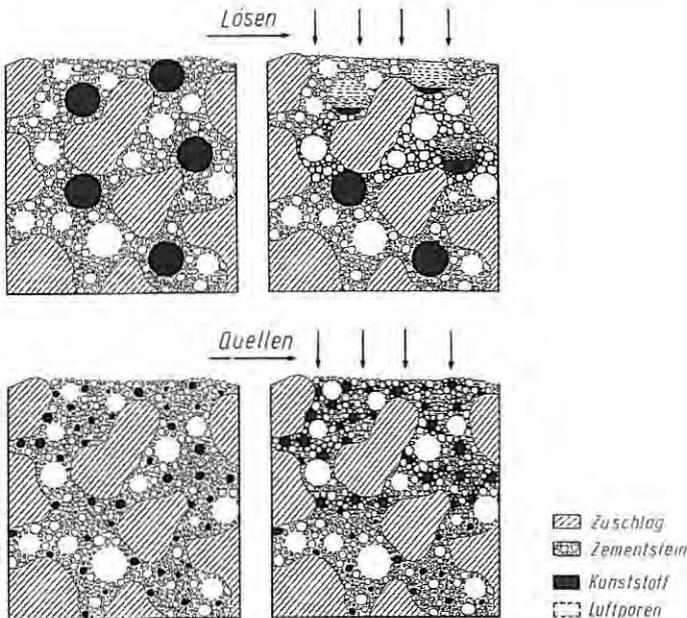


Bild 3 Selbstabdichtung von Beton durch lösliche oder quellfähige Kunststoffzusätze (Patent angemeldet)

hängende hochviskose Lösung, die sich an der Eindringfront anreichert, die Kapillarporen des Betons vollständig ausfüllt und dadurch das weitere Eindringen des organischen Lösungsmittels behindert.

Unten ist von links nach rechts die Situation für einen Kunststoff dargestellt, der bei der Herstellung des Betons als wäßrige Dispersion eingebracht wurde und aus schwach vernetzten Kettenmolekülen besteht. Diese Kunststoffe sind in organischen Lösungsmitteln weitgehend unlöslich. Sie können aber große Mengen organischer Substanzen unter starken Quellerscheinungen aufnehmen. Bei diesem „Lösungsvorgang“ können die quellfähigen Kunststoffe an dem Ort, an dem sie sich befinden, in Abhängigkeit von der Dicke des Polymerfilms, dem Quellvermögen des Kunststoffs mit dem entsprechenden Lösungsmittel und der Größe der Kapillarporen des Betons diese vollständig verstopfen oder zumindest in ihrem freien Durchmesser reduzieren. Dadurch behindern sie, ähnlich wie die löslichen Kunststoffe, das weitere Eindringen des Lösungsmittels.

### 3.4 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Um sicherzustellen, daß bei den Eindringversuchen mit niedrigviskosen leichtflüchtigen organischen Flüssigkeiten keine Verfälschung der Versuchsergebnisse durch mehraxiale Verteilungsvorgänge im Probekörper oder durch Verdunstungsverluste an den Oberflächen des Probekörpers auftreten, wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie der in Bild 4 dargestellte Versuchsaufbau entwickelt, der ein einaxiales Eindringen der jeweiligen Prüfflüssig-

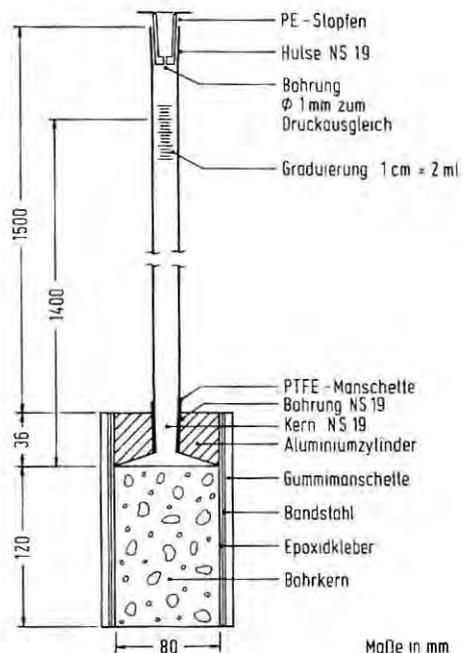


Bild 4 Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie entwickelte Prüfvorrichtung zur Messung des Eindringens organischer Flüssigkeiten in Beton

Maße in mm

keit gewährleistet. Außerdem ist es jederzeit möglich die Eindringmenge abzulesen.

Bei der Vorbereitung der Bohrkerns hat sich folgende Vorgehensweise bewährt: An der Betonoberseite des Bohrkerns wird ein an der Unterseite konisch ausgedrehter zylindrischer Aluminiumkörper, der mit einer Bohrung zur Aufnahme des Glasstandrohres versehen ist, mit Klebefolie fixiert. Dann wird der ganze Probekörper einschließlich Aluminiumzylinder unter gleichzeitigem Beschichten mit einem hochreaktiven Epoxidharzkleber in einen rostbeständigen Bandstahl mit einer Dicke von 0,025 mm eingewickelt. Um sicherzustellen, daß das frische und das erhärtete Epoxidharz ständig auf die Mantelfläche des Prüfkörpers angepreßt wird, wird die Metallfolie zusätzlich mit einem Gummiband unter starkem Zug umwickelt. Dadurch erreicht man, daß die Abdichtung selbst dann gegen den Innendruck der Prüfflüssigkeit dicht bleibt, wenn die Beschichtung durch das eindringende Lösungsmittel angelöst und dadurch die Haftung des Epoxidharzes am Beton partiell gestört wird. Zur vollständigen Aushärtung des Epoxidharzes wurden die Prüfkörper zwei Tage bei Raumtemperatur gelagert.

Die so hergestellten Prüfkörper wurden über eine Teflonmanschette mit einem im oberen Bereich graduierten Standrohr aus Glas, Höhe 150 cm, das unten mit einem NS-19-Kern und oben mit einer NS-19-Hülse versehen ist, verbunden und dann das Standrohr bis zu einer Höhe von 1,40 m mit dem entsprechenden Lösungsmittel aufgefüllt. Die Druckhöhe von 1,40 m entspricht den geltenden Grundsätzen für Auffangwannen [13]. Um größere Verdunstungsverluste bei Versuchen mit leichtflüchtigen organischen Flüssigkeiten zu vermeiden, wird das Glasstandrohr an der Oberseite mit einem Polyethylenstopfen, der zum Druckausgleich eine 1-mm-Bohrung aufweist, verschlossen. Der Verdunstungsverlust der Prüfflüssigkeit wird in einem gleichartigen Standrohr ohne Betonprobe bestimmt und beträgt z. B. für Methylenchlorid unter diesen Bedingungen über drei Tage rd. 2 ml. Um eine konstante Versuchstemperatur zu gewährleisten, wurden die Versuche im Klimaraum bei 20 °C/65% r. F. durchgeführt.

### **3.5 Versuchsergebnisse**

#### **3.5.1 Eindringmengen und Eindringtiefen**

Die Messungen zum Eindringen von Flüssigkeiten in Beton erstreckten sich in der Regel über drei bis vier Tage, in Einzelfällen wurden sie bis auf 28 Tage ausgedehnt. Die im Text erwähnten abgelesenen Eindringmengen beziehen sich immer auf eine Versuchsdauer von drei Tagen, wenn nicht ausdrücklich auf einen anderen Prüfzeitraum hingewiesen wird.

Zur Kontrolle der über die Abnahme der Spiegelhöhe der Flüssigkeit im Standrohr bestimmten Eindringmenge wurde nach dem Versuchsende auch die Gewichtszunahme der Probekörper während des Versuchs gravimetrisch bestimmt. Dabei stellte sich heraus, daß die aus der Gewichtszunahme berechnete Eindringmenge zwischen 1 bis 4 ml größer sein kann als die abgelesene Eindringmenge. Durch kurzzeitige Belastung über einige Minuten konnte nach-

gewiesen werden, daß bereits während des Befüllens des Standrohres mit der entsprechenden Prüfflüssigkeit eine spontane Sofortaufnahme erfolgt. Dieser Effekt ist auch von der Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten mineralischer Stoffe her bekannt [14] und führt dazu, daß die Abhängigkeit der flächenbezogenen Wasseraufnahme im  $\sqrt{t}$ -Maßstab im Anfangsverlauf etwas von der Linearität abweicht. Da der Wasseraufnahmekoeffizient definitionsgemäß der Steigung der Geraden entspricht, wird im Prinzip bei der Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten eine Parallelverschiebung der Geraden durchgeführt, so daß diese durch den Nullpunkt verläuft.

Der gleiche Effekt läßt sich experimentell erreichen, wenn erst nach Beendigung der spontanen Sofortaufnahme mit der eigentlichen Messung begonnen wird. Kurzzeitbelastungen haben gezeigt, daß dies nach etwa zwei Minuten der Fall ist. Aus diesem Grund wurde bei allen Versuchen vor Beginn der eigentlichen Messung eine Belastung mit der entsprechenden Substanz über zwei Minuten vorgenommen und die spontane Sofortaufnahme dieses Materials gravimetrisch bestimmt. Bei der Angabe der vom Beton aufgenommenen Gesamtmenge der entsprechenden Prüfflüssigkeit muß also zu den abgelesenen Eindringmengen die spontane Sofortaufnahme hinzuaddiert werden. Bild 5 zeigt die abgelesenen Eindringmengen von Methylchlorid in verschiedenen zusammengesetzte Betone (siehe Tafel) während der Versuchsdauer. Die Bohrkerne lagerten vorher rd. zwei Monate im Klimaraum bei 20 °C/65 % r.F.

Bei Beton Nr. 2 mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,58$  beträgt die auf einer Fläche von 50 cm<sup>2</sup> nach 72 h eingedrungene Menge an Methylchlorid rd. 30 ml, zuzüglich der spontanen Sofortaufnahme entspricht dies rd. 6 l Methylchlorid/m<sup>2</sup>. Bei den Normalbetonen Nr. 1 (PZ 35 F) und Nr. 3 (HOZ 35 L) mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  reduziert sich die insgesamt eingedrungene Menge an Methylchlorid auf rd. 2 l/m<sup>2</sup>. Man erkennt, daß schon ein gezielt für derartige Beanspruchungen hergestellter Normalbeton gegenüber Methylchlorid einen hohen Eindringwiderstand aufweist. Dies wird besonders deutlich, wenn man bedenkt, daß der Verdunstungsverlust des leichtflüchtigen Lösungsmittels Methylchlorid bei freier Oberfläche über drei Tage leicht 100 l/m<sup>2</sup> betragen kann.

Die Eindringmenge läßt sich weiter reduzieren, wenn der Beton (Nr. 3) eine geringe Menge eines quellfähigen Kunststoffes, der dem Frischbeton als Dispersion zugegeben wurde, in feiner Verteilung enthält (Beton Nr. 4). Gäbe man von diesem Kunststoff eine etwas größere Menge zu, so ließe sich die gleiche Abdichtung erreichen wie beim Beton Nr. 5. Dieser Beton enthält bei gleichem Ausgangsbeton einen in Methylchlorid löslichen Kunststoff in einer Feststoffmenge, wie sie auch in der Dispersion enthalten war (2% des Zementgewichts). Hier beträgt die in 72 h insgesamt eingedrungene Menge an Methylchlorid rd. 1 l/m<sup>2</sup>.

Die abdichtende Funktion des Baustoffs Beton gegenüber eindringenden Flüssigkeiten wird besonders deutlich, wenn die Eindringzeit auf der Abszisse im Wurzelmaßstab aufgetragen wird. Bei dieser Wahl des Maßstabes folgen die abgelesenen Eindringmengen

Abgelesene  
Eindringmenge  
Methylenchlorid [ml/50 cm<sup>2</sup>]

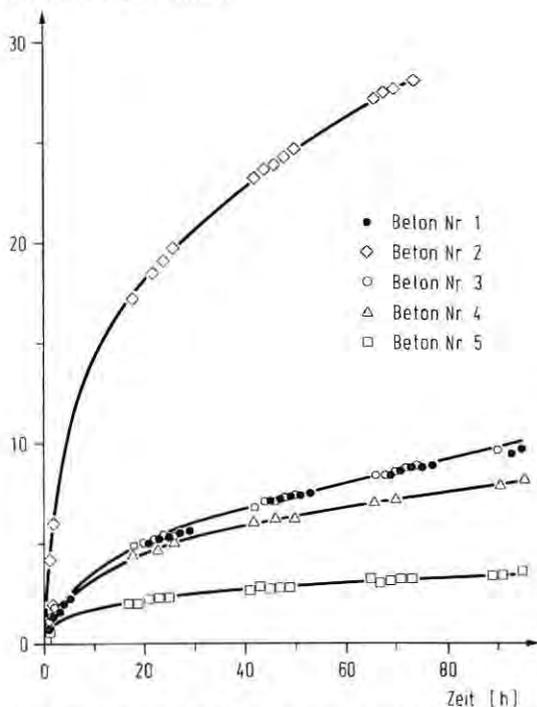


Bild 5 Auswirkungen des Wasserzementwerts und von Kunststoffzusätzen auf die eindringende Menge Methylenchlorid in die Betone Nr. 1 bis 5. Vorlagerung der Prüfkörper rd. zwei Monate im Klimaraum bei 20°C/65% r.F.

für alle fünf Betone im wesentlichen einer Geraden. Das bedeutet, daß man aus dem Eindringverhalten eines gegebenen Systems (eindringende Flüssigkeit/Beton) über die relativ kurze Zeit von drei Tagen die eindringenden Mengen auf wesentlich längere Einwirkungszeiten extrapolieren kann und daß die eindringenden Mengen einer Flüssigkeit und damit auch die Eindringtiefen mit zunehmender Zeit einen immer geringer werdenden Zuwachs erfahren. Zum Nachweis, daß das Eindringen von Methylenchlorid in Beton auch bei längeren Belastungen einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz gehorcht, wurden verschiedene Eindringversuche bis zu einer Zeit von 28 d ausgedehnt. Bild 6 zeigt das Eindringverhalten von Methylenchlorid in den Beton Nr. 7, mit einem erhöhten Gehalt von 10% des Zementgewichts an löslichem Kunststoff. Das Probenalter bei diesen Eindringversuchen betrug rd. drei Monate. Aus Bild 6 geht die gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und das günstige Verhalten bei Langzeitbelastungen ( $\sqrt{t}$ -Verhalten) hervor. Die Eindringmenge über 28 Tage beträgt einschließlich der spontanen Sofortaufnahme rd. 2 l/m<sup>2</sup>.

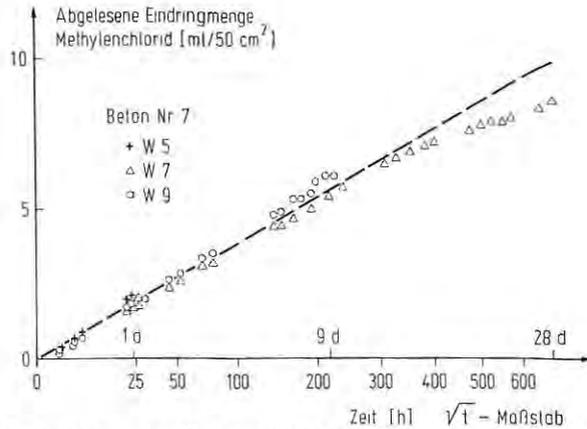


Bild 6 Eindringen von Methylchlorid in Beton Nr. 7 mit löslichem Kunststoffzusatz bei Dauerbeaufschlagung bis 28 Tage. Vorlagerung der Prüfkörper rd. drei Monate im Klimaraum bei 20°C/65% r.F.

In Bild 7 sind die maximalen flüssigen Eindringtiefen von Methylchlorid für die Betone Nr. 1 bis 5 und Nr. 7, die sich bei den in den Bildern 5 und 6 bereits geschilderten Eindringversuchen ergaben, zusammengefaßt. Zur Ermittlung der Eindringtiefen wurden die einzelnen Probekörper nach Beendigung der Beaufschlagung aus der Prüfapparatur entnommen und gespalten. Die Eindringtiefen von Methylchlorid zeigen den gleichen Zusammenhang mit der Betonzusammensetzung wie die Eindringmengen. Aus dem Langzeitversuch am kunststoffmodifizierten Beton Nr. 7, bei dem die Probekörper nach 1-, 9- und 28tägiger Beaufschlagung mit Methylchlorid gespalten wurden, geht hervor, daß die Eindringtiefen der Prüfflüssigkeit ebenso wie die Eindringmengen einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz

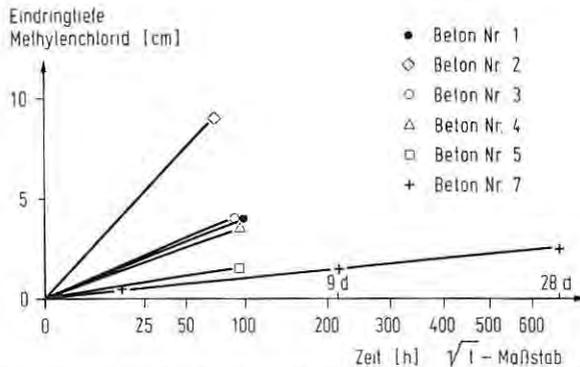


Bild 7 Flüssige Eindringtiefen von Methylchlorid für die Betone Nr. 1 bis 5 und Nr. 7 bei unterschiedlichen Beaufschlagungszeiträumen. Vorlagerung der Prüfkörper zwei bis drei Monate im Klimaraum bei 20°C/65% r.F.

folgen. Nach 28 Tagen betrug die flüssige Eindringtiefe an Methylchlorid für diesen Beton lediglich rd. 2,5 cm.

Bei Parallelversuchen, bei denen als Prüfflüssigkeiten Methylchlorid und Wasser eingesetzt wurden, wird die Wirkung der Kunststoffzusätze besonders deutlich (Bild 8). Während für die Normalbetone Nr. 2 und Nr. 3 das Verhältnis der Eindringmengen von Methylchlorid zu Wasser rd. 2 : 1 beträgt, erfolgt bei den kunststoffmodifizierten Betonen (10% Kunststoff, Probenalter und Lagerung bei 20°C/65% r.F. rd. ½ a) eine Umkehr dieses Verhältnisses bis zu rd. 0,5 : 1 (Beton Nr. 7). Aus Bild 8 ist weiterhin zu entnehmen, daß sich bei diesen Kunststoffgehalten die Betone Nr. 6 und Nr. 7 gegenüber Methylchlorid etwa gleich verhalten, während gegenüber Wasser nur das quellfähige Material (Beton Nr. 6) eine zusätzliche Abdichtung bewirkt.

Um zu überprüfen, ob die kunststoffmodifizierten Betone auch bei gerissenen Betonproben eine günstige Wirkung haben, wurden an leichtbewehrten Balken (mit 15x15 cm<sup>2</sup> Querschnitt) in einem Biegezugversuch gezielt an der Betonieroberseite Risse erzeugt, wobei unten eine Druckzone von rd. 3 cm Höhe erhalten blieb. Die Bewehrung wurde so im Balken angeordnet, daß sie den erzeugten Riß im Bohrkern aufrechterhielt. Die Lage der Bohrkern wurde so gewählt, daß der Riß parallel zur Bohrkernachse verlief. Die Rißweiten betragen unter Last rd. 0,3 mm und nach dem Entlasten im allgemeinen zwischen 0,1 und 0,05 mm. Untersucht wurden die Betone Nr. 3, 6 und 7 mit einem Wasserzementwert von w/z ≈ 0,50. Das Probenalter betrug rd. einen Monat.

Da sich durch den Riß die dem Lösungsmittel maximal zugängliche Oberfläche bei 12 cm Rißtiefe und 8 cm Rißbreite (Durchmesser der Bohrkern) von 50 cm<sup>2</sup> auf rd. 250 cm<sup>2</sup> erhöht, wurde erwartet, daß sich dieses Verhältnis auch in den abgelesenen Eindringmengen der Proben mit und ohne Riß widerspiegelt. Bei dem Nullbeton ohne Kunststoffzusatz wird dieses Verhältnis tatsächlich in etwa beobach-

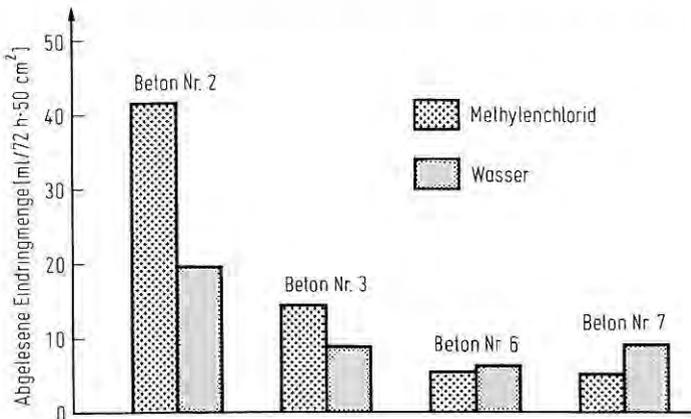


Bild 8 Auswirkungen des Wasserzementwerts und von Kunststoffzusätzen auf die eindringenden Mengen an Methylchlorid und Wasser. Vorlagerung der Prüfkörper rd. sechs Monate im Klimaraum bei 20°C/65% r.F.

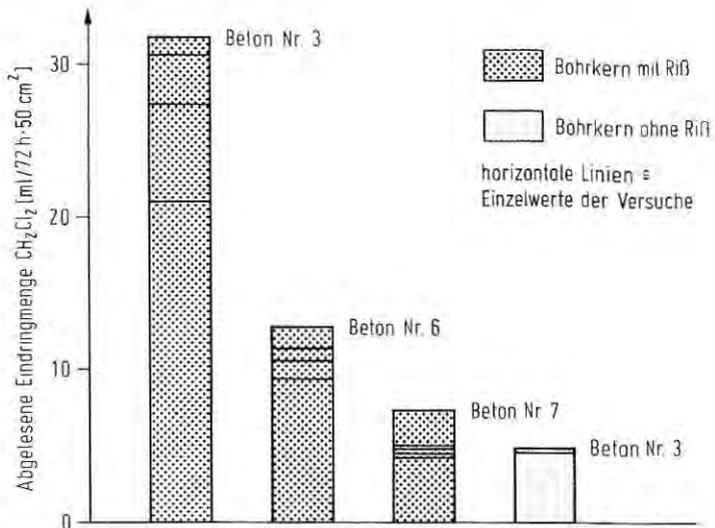


Bild 9 Eindringverhalten von Methylchlorid in gerissene Betonproben mit und ohne Zusatz von Kunststoffen. Vorlagerung der Prüfkörper rd. einen Monat im Klimaraum bei 20°C/65% r.F.

tet (Bild 9). Die Kunststoffzusätze bewirken eine deutliche Abnahme der insgesamt aufgenommenen Menge. So erreichte der Beton mit Riß, der einen löslichen Kunststoff enthielt (Beton Nr. 7), fast die gleiche geringe Eindringmenge an Methylchlorid wie der Nullbeton ohne Riß. Bei den Betonproben mit Riß wurden jeweils vier bis fünf Einzelmessungen durchgeführt, deren Ergebnisse durch die eingezeichneten Querlinien in Bild 9 gezeigt werden. Bei der Probe ohne Riß wurde aufgrund der bereits festgestellten guten Reproduzierbarkeit lediglich eine Doppelbestimmung vorgenommen.

### 3.5.2 Bestimmung der Eindringtiefen

Die Eindringtiefe eines hochflüchtigen organischen Lösungsmittels läßt sich bei den hier verwendeten dichten Betonen in der Regel nicht visuell anhand einer dunkel gefärbten Bruchfläche ermitteln, wie es z. B. bei der Prüfung von wasserundurchlässigem Beton mit Druckwasser möglich ist. Deshalb mußten neue Verfahren entwickelt werden, die eine genaue Bestimmung der Eindringtiefe organischer Lösungsmittel gestatten.

Einen ersten Hinweis über die Eindringtiefe, z. B. von Methylchlorid, erhält man schon vor dem Spalten der Bohrkerns. Diese Substanz löst das zur Abdichtung verwendete Epoxidharz etwas an und führt zu einem Aufquellen dieses Materials. Die aufgequollenen Bereiche können visuell deutlich von nicht angelösten Bereichen unterschieden werden. Die so bestimmten Eindringtiefen stellen einen maximalen Wert dar, denn das Eindringen des organischen Materials erfolgt am Außenrand des Bohrkerns, sei es durch einen erhöhten Austrocknungsgrad oder durch eine Unterwanderung an der

Grenzschicht Beton/Epoxidharz in der Regel etwas schneller als zur Bohrkernmitte hin.

Der Verlauf der flüssigen Eindringfront kann an gespaltenen Bohrkernen durch den Einsatz fluoreszierender Farbstoffe, die mit dem entsprechenden Lösungsmittel in den Beton eindringen, auf den Bruchflächen nach speziellen Entwicklungsmethoden sichtbar gemacht werden. Bei diesen Prüfmethoden wird der Effekt ausgenutzt, daß die Farbstoffe ihre intensive Fluoreszenz nur in gelöster Form aufweisen und daß sie sich in den hier verwendeten Kunststoffen lösen. Am einfachsten gelingt die Bestimmung der Eindringtiefe bei Betonen, die einen abdichtend wirkenden löslichen Kunststoff enthalten. Die Kornstruktur des Kunststoffs wird durch das Lösungsmittel erwartungsgemäß zerstört, die hochviskose Lösung verteilt sich flächig und durchzieht den Bohrkern wie ein Band. Unter UV-Bestrahlung zeigt dieses Band eine mehr oder weniger intensive Fluoreszenz, die auch mit dem bloßen Auge gut sichtbar ist (siehe Bild 10, oberer Teil).

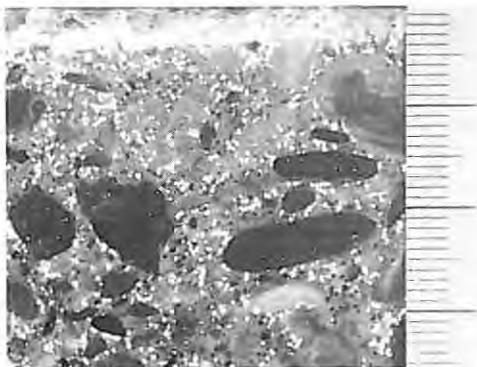
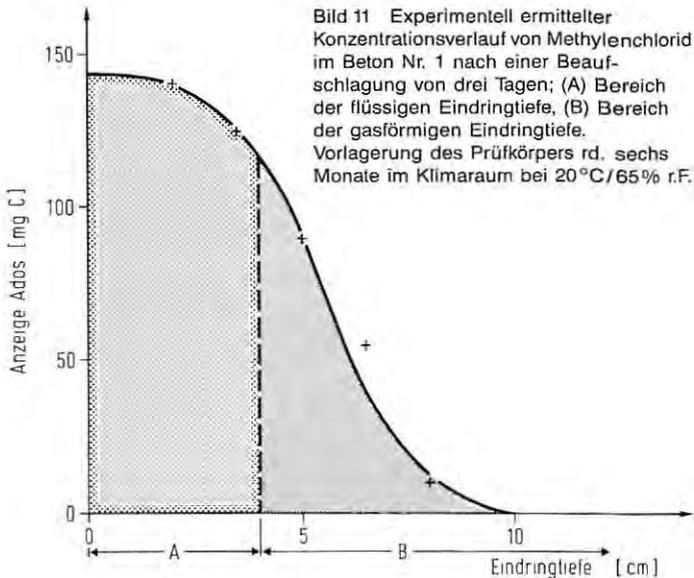


Bild 10 Nachweis der flüssigen Eindringtiefe an gespaltenen Betonproben mit löslichem Kunststoffzusatz durch fluoreszierende Farbstoffe

Der Nachweis, daß die so bestimmte Eindringtiefe der tatsächlichen Eindringtiefe entspricht, und daß während des Eindringvorganges keine Ausfilterung des Fluoreszenzfarbstoffes erfolgt, kann bei derartigen Betonen folgendermaßen geführt werden: Die Grenze der zusammengeflossenen und der vom flüssigen Lösungsmittel nicht erreichten unbeeinträchtigten Kunststoffpartikel läßt sich deutlich im Lichtmikroskop unterscheiden. Für das bloße Auge werden die unbeeinträchtigten Kunststoffpartikel im UV-Licht sichtbar, wenn man sie nachträglich anfärbt (s. Bild 10, unterer Teil). Dabei wird für den Fluoreszenzfarbstoff ein Lösungsmittel verwendet, das von den Kunststoffteilchen nur oberflächlich aufgenommen wird. Stimmt die Grenze des ursprünglich durch das eindringende Lösungsmittel angefärbten Bereichs des Bohrkerns mit der Grenze der völlig erhaltenen, nachträglich eingefärbten Kunststoffpartikel überein, ist nachgewiesen, daß der Farbstoff im Eindringversuch nicht ausgefiltert wurde. Bei den Versuchen wurden keine Ausfilterungseffekte festgestellt.

Außer den Untersuchungen über das Eindringen leichtflüchtiger organischer Lösungsmittel in der flüssigen Phase wurde auch das



gasförmige Eindringen dieser Substanzen durch Diffusionsprozesse experimentell bestimmt. Dazu wurden die Bohrkern nach der Entnahme aus der Versuchsanlage und dem Entfernen des Gummibandes von außen in Abständen von ca. 1,5 cm von oben nach unten bis zu einer Tiefe von rd. 10 mm angebohrt und die aus diesen Bohrlöchern ( $\varnothing = 5$  mm) austretenden Mengen an Methylenchlorid mit einem Gesamtkohlenwasserstoff-Analysator bestimmt. Bild 11 zeigt eine typische Kurve für den so bestimmten Konzentrationsverlauf mit der Eindringtiefe an dem Beton Nr. 1. Das Probenalter betrug rd. sechs Monate. Aus Bild 11 geht hervor, daß dem über eine Strecke von etwa 4 cm als Flüssigkeit eindringenden Methylenchlorid eine gasförmige Eindringfront von rd. 6 cm vorausläuft. Die experimentell ermittelte Konzentrationsverteilung in der Gasphase entspricht dabei der Konzentrationsverteilung, die sich anhand theoretischer Ableitungen für die eindimensionale instationäre Diffusion ergibt, siehe [15, Bild 8]. Dies zeigt, daß der Transport von gasförmigem Methylenchlorid durch Betone bekannten Diffusionsgesetzen folgt.

#### 4 Zusammenfassung und Schlußfolgerung

4.1 In Betrieben, die umweltrelevante Substanzen herstellen, bearbeiten oder lagern, müssen zum Schutz der Umwelt hohe Anforderungen an die Dichtigkeit von baulichen Anlagen, wie Produktions- und Lagerflächen, Auffangtassen usw., gestellt werden. Um die Dichtigkeitseigenschaften des Konstruktionswerkstoffes Beton zu ermitteln, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Transport von Flüssigkeiten und Gasen im Beton durchgeführt. Ei-

nen Schwerpunkt bildete dabei die Untersuchung des Eindringverhaltens von Methylenchlorid in Beton.

4.2 Beton ist aufgrund der Struktur des Zementsteins ein poröser anorganischer Feststoff. Um die Dichtigkeit des Betons gegenüber Flüssigkeiten und Gasen zu erhöhen, muß der Anteil durchgehender Kapillarporen gering gehalten werden. Dies kann durch einen niedrigen Wasserzementwert und einen hohen Hydratationsgrad erreicht werden. Außerdem läßt sich die Dichtigkeit des Betons durch eine weitgehende Hohlräumfüllung mit dichten, festen Zuschlägen steigern.

4.3 Die Versuchsergebnisse zeigen, daß sachgerecht hergestellte Normalbetone mit Wasserzementwerten von  $w/z \leq 0,50$  gegenüber Methylenchlorid einen hohen Eindringwiderstand aufweisen. Die über 72 Stunden aufgenommene Menge Methylenchlorid beträgt nur rd.  $2 \text{ l/m}^2$ . Eine weitere Steigerung der Dichtigkeit läßt sich durch Kunststoffzusätze erreichen, die mit dem eindringenden Lösungsmittel aufquellen oder eine hochviskose Lösung ergeben.

4.4 Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Eindringversuche wurden entsprechend den geltenden Grundsätzen für Auffangwannen bei einer Druckhöhe der entsprechenden Substanzen von 1,40 m in einer hier entwickelten Versuchsapparatur durchgeführt. Diese Versuchsapparatur erlaubt ein einaxiales Eindringen der jeweiligen Prüfflüssigkeit und gestattet außerdem, die bereits eingedrungene Menge der Prüfflüssigkeit jederzeit abzulesen.

4.5 Das Eindringen organischer Flüssigkeiten in Beton folgt ebenso wie das Eindringen von Wasser einem  $\sqrt{t}$ -Gesetz. Dies wurde bei Langzeitversuchen an kunststoffmodifizierten Betonen, die über einen Zeitraum von 28 Tagen mit Methylenchlorid belastet wurden, bestätigt.

4.6 Die flüssige Eindringtiefe von Methylenchlorid läßt sich bei Normalbeton mit  $w/z = 0,50$  auf weniger als 4 cm, bei kunststoffmodifiziertem Beton auf weniger als 1,5 cm innerhalb 72 h begrenzen.

4.7 Parallelversuche, die mit Methylenchlorid und Wasser als Prüfflüssigkeiten durchgeführt wurden, haben ergeben, daß Methylenchlorid in trockenen Normalbeton um den Faktor rd. 2 schneller eindringt als Wasser, daß jedoch durch lösliche Kunststoffzusätze das Eindringen des organischen Lösungsmittels derart verzögert werden kann, daß in diesem Fall das Wasser um den Faktor rd. 2 schneller in den Beton eindringt.

4.8 An Betonen mit feinen Biegerissen bis 0,1 mm Rißweite konnte beobachtet werden, daß die löslichen Kunststoffzusätze zu einer bemerkenswerten Abdichten des Rißbereiches führen, sofern eine wenige cm dicke ungerissene Druckzone im Bauteil enthalten bleibt.

4.9 Zur Bestimmung der Eindringtiefe leichtflüchtiger Substanzen im Beton, die nach dem Spalten der Probekörper nicht visuell anhand einer unterschiedlichen Färbung des „trockenen“ bzw. mit der Prüfflüssigkeit belasteten Betons bestimmt werden kann, wurde ein Nachweisverfahren durch Fluoreszenzdetektion eines Fluoreszenzindikators entwickelt, der mit der entsprechenden Flüssigkeit in den Beton eindringt.

4.10 Anhand von Konzentrationsmessungen mit einem Gesamtkohlenwasserstoffanalysator konnte gezeigt werden, daß der Transport von gasförmigem Methylenchlorid durch Beton bekannten Diffusionsgesetzen folgt.

4.11 Die im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführten Untersuchungen zum Eindringen von Methylenchlorid in Beton zeigen, daß Bauteile aus Beton als Barriere zur Vermeidung von Boden- oder Grundwasserkontaminationen mit umweltrelevanten Chemikalien besonders geeignet sind. Denn sie können sowohl die tragende als auch im Bedarfsfall kurzzeitig die abdichtende Funktion übernehmen und weisen außerdem einen hohen Widerstand gegen mechanische Beanspruchungen und Feuereinwirkung auf. Mehrere Pilotprojekte unter Verwendung des kunststoffmodifizierten Betons sind bereits ausgeführt oder in Bearbeitung.

4.12 Das gesamte Sicherheitskonzept für die Planung und Genehmigung dieser Bauwerke muß neben der grundsätzlichen Eignung des Baustoffs auch konstruktive Maßnahmen, wie z.B. die Ausbildung dichter Fugen und die Vermeidung durchgehender Risse durch Begrenzung von Zwangsbeanspruchungen, umfassen.

#### SCHRIFTTUM

- [1] Skalicky, H.: Anforderungen aus der Sicht der chemischen Industrie — Schutz des Grundwassers — Brandschutz — Löschwasserrückhaltung. VDI-Berichte Nr. 726, 1989, S. 23/33
- [2] Moll, R.: Neubau- und Sanierungskonzepte für die Lagerung von Chemikalien. VDI-Berichte Nr. 726, 1989, S. 209/234
- [3] Mängel, S.: Behälter, Auffangflächen und Auffangräume — bauliche Grundlagen und Anforderungen. VDI-Berichte Nr. 726, 1989, S. 235/256
- [4] DIN 1045, Beton und Stahlbeton (1988)
- [5] Wischers, G., und W. Richartz: Einfluß der Bestandteile und der Granulometrie des Zements auf das Gefüge des Zementsteins. beton 32 (1982) H. 9, S. 337/341 und H. 10, S. 379/386; ebenso Betontechnische Berichte 1982/83, Beton-Verlag, Düsseldorf 1984, S. 61/93
- [6] Locher, F. W.: Chemie des Zements und der Hydratationsprodukte. Zement-Taschenbuch, 48. Ausgabe (1984), Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1984, S. 49/72
- [7] Locher, F. W., und G. Wischers: Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins. Zement-Taschenbuch, 48. Ausgabe (1984), Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1984, S. 73/88
- [8] Richartz, W., und F. W. Locher: Ein Beitrag zur Morphologie und Wasserbindung von Calciumsilikathydraten und zum Gefüge des Zementsteins. Zement-Kalk-Gips 18 (1965), H. 9, S. 449/459
- [9] Walz, K., und G. Wischers: Über Aufgaben und Stand der Betontechnologie. beton 25 (1975), H. 10, S. 403/408, und H. 11, S. 442/444; ebenso Betontechnische Berichte 1976, Beton-Verlag, Düsseldorf 1977, S. 135/169
- [10] Krus, M.: NMR-Messung des Eindringverhaltens von Hydrophobierungsmitteln in Natursandstein und deren Einflüsse auf den kapillaren Feuchtetransport. Arbeitshefte des Sonderforschungsbereiches 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Baugefüge — Konstruktionen — Werkstoffe“, Sonderheft 1988, Universität Karlsruhe, S. 37/40

- [11] Grube, H.: Leistungsfähigkeit von Beton bezüglich Undurchlässigkeit und Widerstand gegen äußere Angriffe. VDI-Berichte 726, 1989, S. 281/290
- [12] Grube, H.: Verbesserung der Undurchlässigkeit von Beton durch moderne Belontechnologie. Darmstädter Massivbau-Seminar, Band 2, Darmstadt 1989, VI, S. 1/10
- [13] Wittke, B.: Lager- und Abfüllanlagen für Gefahrstoffe. VDI-Berichte 726, 1989, S. 345/375
- [14] DIN 52 617, Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen (1987)
- [15] Gräf, H., und H. Grube: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. beton 36 (1986), H. 5, S. 184/187, und H. 6, S. 222/226; ebenso Betontechnische Berichte 1986—88, Beton-Verlag, Düsseldorf 1989, S. 35/65