

Dichtigkeit von Rohrbeton gegenüber CKW-Durchtritt

Impermeability of pipe concrete to penetration by chlorinated hydrocarbons

Imperméabilité des tubes en béton à la pénétration d'hydrocarbures chlorés

Ulrich Neck und Gerhard Spanka, Düsseldorf*)

Übersicht

Sauberes Wasser gehört zu den elementaren Lebensbedürfnissen des Menschen. Daher zählt der Schutz von Grundwasser und Boden vor Schadstoffen zu einer der wichtigsten Aufgaben im Rahmen der Umweltvorsorge. Bei nicht ausreichend dichten Abwasserleitungen können durch im Abwasser enthaltene Schadstoffe, wie z.B. Chlorkohlenwasserstoff (CKW), Grundwasser- und Bodenverunreinigungen entstehen. Die zuständigen Betreiber sind gesetzlich verpflichtet, solche Gefährdungen zu vermeiden. Voraussetzung dazu sind langfristig dichte, d.h., im Rohrwandungs- und Rohrverbindungsbereich schadstellenfreie Abwasserleitungen.

Mit einer speziell entwickelten Zwei-Kammer-Prüfeinrichtung wurde im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, der CKW-Durchtritt an Proben aus werkmäßig hergestellten Betonrohren untersucht. Als Prüfflüssigkeit diente Methylenchlorid, weil es eine sehr schnell eindringende Substanz ist. Der Diffusionswiderstand gegenüber CKW liegt bei dichtem und feuchtem Beton, wie er bei erdverlegten Betonrohren gegeben ist, so hoch, daß selbst bei extrem überhöhter CKW-Belastung lediglich eine äußerst geringe Menge durchdiffundiert. Eine aufgrund der Versuchsergebnisse unter Berücksichtigung praxisrelevanter Bedingungen vorgenommene Überschlagsrechnung ergab, daß die aus Umweltschutzgründen zu stellenden Forderungen sicher erfüllt werden.

Abstract

Clean water is one of mankind's elementary necessities of life. The protection of ground water and soil from harmful substances therefore is one of the most important tasks of preventative environmental protection measures. If sewer pipes are not sufficiently impermeable the ground water and soil may become contaminated by harmful substances such as chlorinated hydrocarbons (CHCs) contained in the sewage. The plant operators responsible are under le-

*) Überarbeitete Fassung nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '91 des VDZ am 11./12. September 1991 in München

gal obligation to avoid such risks. This requires sewer pipes with long-term impermeability, i.e. free from damage in the pipe walls and at pipe connections.

The penetration of CHCs through samples of factory-produced concrete pipes was investigated at the Research Institute of the Cement Industry in Düsseldorf using a specially developed two-chamber test rig. Methylene dichloride was used as the test liquid because it has very rapid penetration properties. The diffusion resistance of impermeable and moist concrete, as in buried concrete pipes, to CHCs is so high that only an extremely small amount diffused through even with excessively high CHC loadings. A rough estimate based on the test results and taking practical conditions into account showed that the environmental protection requirements were met in full.

Abrégé

Une eau propre fait partie des besoins élémentaires de la vie de l'être humain. De ce fait, la protection des nappes phréatiques et des sols est l'une des tâches les plus importantes des mesures de protection de l'environnement préventive qui soit. Une imperméabilité insuffisante des conduites d'eaux usées peut provoquer la contamination du sol et de la nappe phréatique par des substances dangereuses telles que les hydrocarbures chlorés (CHCs) contenus dans les eaux usées. Les exploitants responsables sont légalement tenus d'éviter de tels risques. Ils ont à cet effet besoin de tubes d'évacuation des eaux usées qui soient étanches et imperméables à long terme, ou qui ne présentent pas, en d'autres termes, d'endommagements dans les parois ou des raccordements.

L'Institut de Recherche de l'Industrie du Ciment à Düsseldorf s'est penché sur la pénétration d'hydrocarbures chlorés sur des éprouvettes de tubes en béton de production en série sur la base d'un équipement d'essai à deux chambres spécialement développé à cet effet. Comme il présente la même propriété de pénétration rapide, le liquide de test utilisé a été du chlorure de méthylène. La résistance à la diffusion de CHC de bétons imperméables et humides telle qu'elle existe dans les tubes posés est tellement élevée qu'une quantité extrêmement faible a été diffusé, malgré des sollicitations aux CHC excessives. Une estimation grossière basée sur les résultats du test et tenant compte des conditions pratiques a montré que les exigences de la protection de l'environnement ont été entièrement respectées.

1 Einleitung

Mit steigendem Lebensstandard entsteht sowohl im kommunalen als auch im industriellen Bereich erfahrungsgemäß immer mehr Abwasser. Die wachsende Abwassermenge erhöht den Bedarf an Abwasserbeseitigungsanlagen, und das zunehmende Umweltbewußtsein steigert die Anforderungen an deren Leistungsfähigkeit. Sam-

meln und Behandeln von Abwasser gehören deshalb weiterhin zu den wichtigsten zivilen Techniken.

Der Abwassertransport ist ein wesentlicher Teilbereich der Abwasserbeseitigung. Für das weit verzweigte öffentliche Kanalnetz in Deutschland wird die Länge der Leitungen mit rd. 250 000 km angegeben. Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonrohre sowie Schächte und Formstücke aus Beton können aufgrund der variablen Form- und Dimensionierungsmöglichkeiten in vielfältiger Weise dafür eingesetzt werden. Durchmesser, Querschnittsform, Wanddicke und Länge sowie die Tragfähigkeit sind nahezu beliebig variierbar und die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit werden bei sachgerechten Betriebsbedingungen sicher erfüllt.

Die aus Sicht des Boden- und Grundwasserschutzes [1] an Abwasserleitungen gestellten Anforderungen betreffen vorwiegend die Dichtigkeit der Rohrleitung. Die Hauptursache für Boden- und Grundwassergefährdungen sind Lecks in der Abwasserleitung [2, 3], z. B. durch Risse, Brüche oder schadhafte Stöße und Dichtungen [4], weil dadurch Schadstoffe mit austretendem Abwasser mehr oder weniger unkontrolliert in den Untergrund übergehen können (Bild 1 links). Aus diesem Grund muß durch entsprechende Dimensionierung und Verlegung sichergestellt werden, daß Schadstellen während Einbau und Betrieb vermieden werden. Darüber hinaus ist zu untersuchen, inwieweit eine mögliche Schadstofffreisetzung durch Diffusion in gasförmiger oder flüssiger Phase durch die fehlerstellenfreie Rohrwand zu einer Belastung von Boden und Grundwasser führen kann (Bild 1 rechts). Die Frage nach der Dichtigkeit gegenüber einem Schadstoff-Durchtritt durch die Rohrwand erfährt deshalb in Fachkreisen zunehmende Aufmerksamkeit. Dabei wird vornehmlich nach der Dichtigkeit gegenüber Chlorkohlenwasserstoffen (CKW) gefragt [5]. Chlorierte Kohlenwasserstoffe zählen zu den umweltrelevanten Schadstoffen [1, 6]. Sie gelten als toxisch und werden gemäß Wasserhaushaltsgesetz im allgemeinen in die höchste Wassergefährdungsklasse „stark wassergefährdend“ (Klasse 3) eingestuft.

Die für den Bau und den Betrieb der Abwasseranlagen zuständigen Fachkreise sind für die Dichtigkeit der Kanäle verantwortlich und müssen daher schon aus rechtlichen Gründen gewissenhaft sämtli-

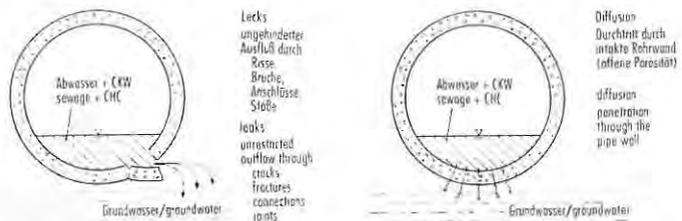


Bild 1 Möglichkeiten des Schadstoffaustritts aus dem Kanal in die Umwelt; links Ausfluß von Abwasser infolge von Lecks, rechts Durchtritt durch die Rohrwand infolge von Diffusion

Fig. 1 Possible ways for harmful substances to escape from the sewer pipe into the environment; left: outflow of sewage as a result of leaks; right: penetration through the pipe wall as a result of diffusion

che Ursachen für Undichtigkeiten vermeiden. Sofern Werkstoffe und Bauteile eingesetzt werden, die nachweislich nicht ausreichend dicht sind, kann es im Falle einer Boden- und Grundwasserverunreinigung durch den Austritt von Schadstoffen zu straf- und haftungsrechtlichen Konsequenzen kommen [7, 8]. Da für Rohrbeton bislang kein hinreichender Nachweis für die Höhe der Dichtigkeit gegenüber CKW vorlag, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, gezielt Untersuchungen zur Quantifizierung des CKW-Durchtritts beim Rohrbeton durchgeführt. Zudem wurden Zusammenhänge zwischen den technologischen Eigenschaften und der Porosität des Betons sowie dem Diffusionsverhalten geklärt.

2 Transportvorgänge beim CKW-Durchtritt durch Rohrwerkstoffe

Die verschiedenen für Abwasserleitungen üblicherweise verwendeten Rohrwerkstoffe haben aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichtigkeiten einen unterschiedlich großen Widerstand gegenüber einem Stoffdurchtritt, z. B. einer CKW-Diffusion. Keiner der Rohrwerkstoffe kann als „absolut dicht“ bezeichnet werden. Bei gleicher Wanddicke sind Metalle weniger durchlässig als beispielsweise Kunststoffe, und diese wiederum sind weniger durchlässig als Beton oder andere poröse anorganische Rohrwerkstoffe [9]. Durch die schichtweise Kombination von weniger dichten Werkstoffen mit dichteren kann erforderlichenfalls der Diffusionswiderstand von beispielsweise der Rohrwand auf das notwendige Maß erhöht werden [10]. Dabei hängt das Verbesserungsmaß neben der Beschichtungsart sehr wesentlich von der Schichtdicke und der Anzahl möglicher Fehlstellen ab.

2.1 Diffusion bei Rohrbeton

Bei einem strukturbedingt porösen Baustoff wie Beton bestimmen die Größe der Porosität und der Feuchtezustand in den Poren — luft- oder wassergefüllt — den Stofftransport. Flüssigkeiten und Gase werden im erhärteten Beton hoher Dichtigkeit in erster Linie in Poren mit Radien von rd. 50 nm bis etwa 5 μm transportiert. Dabei kann der Stofftransport, z. B. durch Stoffaufnahme in luftgefüllten Kapillaren (kapillare Saugfähigkeit), als Fließvorgang aufgrund äußerer Druckunterschiede (Sickerströmung, Konvektion) oder durch Diffusionsvorgänge aufgrund von örtlichen Konzentrationsunterschieden und der Molekularbewegung erfolgen. Im üblichen Betriebszustand einer Abwasserleitung sind die für solche Stofftransporte in Frage kommenden Poren eines Rohrbetons wassergefüllt und die Druckunterschiede von innen nach außen minimal. Deshalb kommen für einen Stoffdurchtritt von gelösten Stoffen hauptsächlich Diffusionsprozesse in Flüssig/Flüssig-Phase in Betracht [11]. Betone mit Poren, in denen unmittelbare Durchströmungen entstehen können, sind als Rohrbeton nicht geeignet.

Eine Diffusion von gelösten Stoffen in flüssigkeitsgefüllten Poren, z. B. eines Rohrbetons, läuft sehr langsam ab. Unter stationären Bedingungen erhält man bei einem konstanten Konzentrationsgefälle einen konstanten Diffusionsstrom, für den der Diffusionskoeffizient bestimmt werden kann. Er ist von der diffundierenden Substanz, dem durchdrungenen Material und der Temperatur abhängig.

2.2 CKW-Dauerbelastung in Abwasserleitungen

Bezieht man die grundsätzlichen Zusammenhänge auf den praktischen Fall des CKW-Durchtritts aus einer Abwasserleitung durch die Rohrwand, bei dem der Temperatureinfluß keine signifikante Rolle spielt, so ergibt sich, daß die Höhe der Konzentration der CKW im Rohr und die Dauer der CKW-Belastung entscheidend die Durchtrittsmenge bestimmen. Kurzfristig auftretende Belastungen können wegen der Zeitabhängigkeit der Diffusionstransporte keine nennenswerten Durchtrittsraten zur Folge haben. Die Rohrwandung wirkt als Puffer gegen temporär höhere CKW-Belastungen. Ausschlaggebend sind deshalb die Dauerbelastungen. Zur Zeit bestehen keine verbindlichen Angaben über die Dauerbelastung an Chlorkohlenwasserstoffen im kommunalen Abwasser. Die in den Einleitungsbedingungen der Abwassertechnischen Vereinigung (ATV-Arbeitsblatt A 115; [12]) festgelegte Maximalkonzentration von 5000 $\mu\text{g/l}$ Abwasser kann kein Maß für eine Dauerbelastung auf der gesamten Kanalstrecke sein. Bei einem zwar unerlaubten, aber kaum vermeidbaren Ausgießen konzentrierter Lösungen in die Kanalisation können sich örtlich und zeitlich begrenzt sehr hohe Konzentrationsspitzen ergeben, die aber je nach Betriebssituation verdünnt und schnell abgeleitet werden. Solche Zustände sind zahlenmäßig nicht erfassbar. Sie sind aber auch wegen ihrer Kurzzeitigkeit für einen Diffusionsvorgang, wie zuvor erläutert, unmaßgeblich. Bestimmend für die Diffusion durch den Beton ist die Höhe der Dauerbelastung. Bislang vorliegende Messungen am Einlauf von Kläranlagen haben als kontinuierliche Gehalte an CKW im Abwasserstrom etwa 50 bis 70 $\mu\text{g/l}$ Abwasser ergeben.

2.3 CKW-Dauerbelastung im Versuch

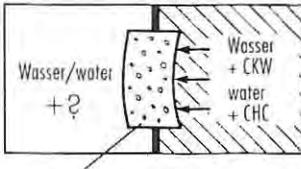
Bei der Durchführung der Untersuchungen zur Bestimmung der Diffusion bei Rohrbetonen mußte aus versuchstechnischen Gründen eine wesentlich höhere Belastungskonzentration gewählt werden, um in überschaubarer Versuchsdauer aussagefähige und reproduzierbare Meßergebnisse zu erzielen. Bei den Versuchen wurde als Dauerbelastung eine Konzentration von 1 000 000 $\mu\text{g/l}$ gewählt, die über Wochen auf den Beton einwirkte. Diese Konzentration lag um den Faktor 200 über dem Richtwert der Einleitungsbedingungen und um den Faktor 10 000 bis 20 000 über der realen Dauerbelastung.

3 Prüfung der Diffusion von Chlorkohlenwasserstoffen durch Rohrbeton

Das Diffusionsverhalten von Chlorkohlenwasserstoffen durch Rohrbeton wurde im Labor ermittelt; dabei kamen praxisgerechte Betone, d. h. Proben aus werkmäßig hergestellten Betonrohren, zur Anwendung.

3.1 Versuchsprinzip

Entsprechend den im Bild 1 gezeigten praktischen Verhältnissen lag den Versuchen die in Bild 2 dargestellte Versuchsanordnung zugrunde. Eine Betonrohrprobe, in Form einer Scheibe mit 150 mm



Betonrohr - Probe / concrete pipe sample

Bild 2
Prinzip der Versuchsanordnung
Fig. 2
Basic principle of the test
arrangement

Durchmesser und rd. 50 mm Dicke, die aus einem Bohrkern durch Sägen gewonnen wurde, wird in die Trennwand einer Zwei-Kammer-Versuchseinrichtung eingebaut. Beide Kammern sind mit Wasser gefüllt. Das Wasser in einer Kammer — belastete Seite — ist mit CKW in der bereits erwähnten Konzentration von 1 g/l angereichert. Durch Messen der sich einstellenden Konzentration auf der anfänglich unbelasteten Seite wird die Diffusionsmenge in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt.

3.2 Versuchseinrichtung

Bild 3 zeigt einen Schnitt des speziell für diese Untersuchungen gebauten Zwei-Kammer-Gefäßes aus nichtrostendem Stahl. Im Bild 4 ist die Versuchseinrichtung im geöffneten Zustand mit eingebauter Probenhalterung dargestellt. Die Kammern haben jeweils ein Volumen von etwa 20 Litern. Sie werden mit Deckeln verschlossen, in die ein Standrohr und eine Abzapfvorrichtung für die Entnahme von Lösungsproben eingebaut sind. Um Konzentrationsgradienten innerhalb der Kammern zu vermeiden, wird je Kammer ein Rührwerk eingesetzt. Die Trennwand und die Probenhalterung sind so konstruiert, daß bei eingeklebter Probe die Kammern als völlig getrennt anzusehen sind. Die elastischen Dichtungen für die Deckel und für

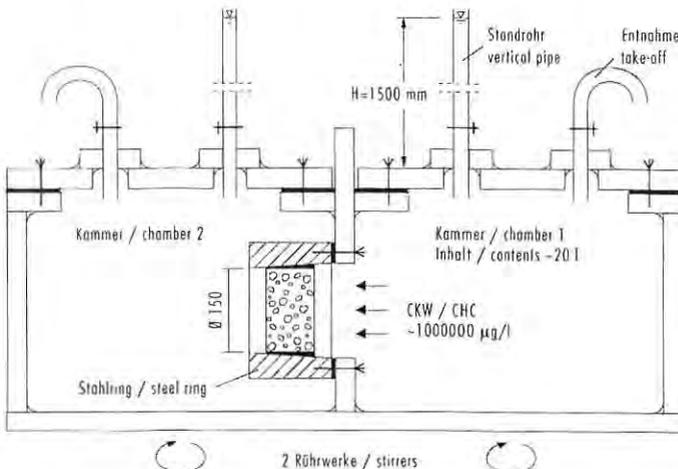


Bild 3 Schnitt durch die Zwei-Kammer-Versuchseinrichtung
Fig. 3 Section through the two-chamber test rig

Bild 4
Zwei-Kammer-Versuchseinrichtung mit eingebauter Betonprobe

Fig. 4
Two-chamber test rig
with concrete sample in place



die Anflanschung der rohrförmigen Probenhalterung sind CKW-beständig und wurden jeweils aus einem Stück gefertigt. Für das Einkleben der Probe in den innen konisch geformten Probenhalter wird ein gegenüber CKW beständiges Zweikomponenten-Kunstharz verwendet.

3.3 Versuchsdurchführung

Die Probe wird nach einer mindestens achtwöchigen Lagerung im Klima 20°C/65% r. F. in die Probenhalterung eingeklebt und anschließend zur Erzielung eines praxisgerechten Feuchtezustands unter Wasser gelagert. Art und Dauer der Wasserlagerung können unterschiedlich gewählt werden, wobei die Lagerung entweder in der Versuchseinrichtung oder außerhalb erfolgen kann. Die nachfolgend wiedergegebenen Untersuchungsergebnisse wurden an Probekörpern ermittelt, die vor Versuchsbeginn bis zu 72 Stunden in der Versuchseinrichtung unter Wasser vorgelagert waren.

Für die Prüfung des CKW-Durchgangs werden beide Kammern im offenen Zustand zu gut 3/4 mit deionisiertem Wasser gefüllt, dann verschlossen und mit den Standrohren versehen. Auf der unbelasteten Seite werden die Kammer und das Standrohr bis zu einer Spiegelhöhe im Standrohr von 1,5 m mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und das Standrohr mit einem Glasstopfen verschlossen. Anschließend werden auf der Belastungsseite 20 g Methylenchlorid gelöst in 2 l Wasser zugegeben und die Kammer sowie das Standrohr ebenfalls bis zu einer Spiegelhöhe von 1,5 m mit deionisiertem Wasser aufgefüllt und dann verschlossen. Durch den erhöhten Druck können ohne Unterbrechung des Versuchs Proben der Lösungen entnommen werden.

Als Prüflüssigkeit wurde bei den hier vorgestellten Untersuchungen eine wässrige Lösung des organischen Lösungsmittels Methylenchlorid verwendet. Dieser Stoff ist der molekular kleinste flüssige Vertreter der Substanzklasse der Chlorkohlenwasserstoffe — er ist zu rd. 2% wasserlöslich und hat sich bei Eindringversuchen an

porösen Werkstoffen als eine äußerst schnell eindringende Substanz erwiesen [13].

3.4 Versuchsdauer

Im Prinzip sind die Versuche nicht an eine bestimmte Versuchsdauer gebunden und können daher in Abhängigkeit von der Art und Beschaffenheit der Probe und des Prüfmediums gewählt werden.

Bei den hier geschilderten Versuchen mit Betonproben von 150 mm Durchmesser und 50 mm Dicke betrug die Versuchsdauer in der Regel 8 Wochen, wobei bereits nach 4 Wochen für eine Zwischenprüfung eine Probe der Flüssigkeiten in den beiden Kammern entnommen wurde.

4 Eigenschaften der untersuchten Rohrbetone

Da der Stofftransport durch Diffusion von der Dichtigkeit des Betons und diese wiederum von seiner Zusammensetzung und Verarbeitung abhängt, ist die Kenntnis der betontechnologischen Kennwerte der untersuchten Rohrbetone zum Verständnis der gefundenen Zusammenhänge und der Diffusionsergebnisse von Bedeutung. Die Festbetoneigenschaften wurden an Betonproben ermittelt, die über ein halbes Jahr alt waren.

4.1 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Für die Untersuchungen des CKW-Durchgangs wurden Betone von drei werkmäßig hergestellten Betonrohren nach DIN 4032 mit Nenn-durchmesser 600 bzw. 500 mm aus drei verschiedenen Rohrfertigungen verwendet. Entsprechend der heute für solche Rohre überwiegend üblichen Produktionsweise des Sofortentformens werden zur Erzielung der notwendigen Grünstandfestigkeit erdfeuchte Betone eingesetzt, die — je nach Art der übrigen Mischungsbestandteile und des Herstellverfahrens — relativ niedrige Wasserzementwerte im Bereich von 0,36 bis 0,38 aufweisen. Der Zementgehalt für solche Rohrbetone beträgt üblicherweise rund 350 kg/m³. Die Frischbetonrohddichten liegen zwischen 2,34 und 2,48 kg/dm³, wobei die hohen Rohddichten durch die Verwendung von Zuschlag mit hoher Reindichte, wie z.B. Basaltsplitt, entstehen. In Tafel 1 sind die Betoneigenschaften aufgeführt, die an aus den Rohren gewonnenen Proben ermittelt wurden.

Bei sachgerechter Verarbeitung, d.h. bei konstantem Einbringen des Betons in die Form und einer intensiven, gleichmäßigen und zeitlich ausreichenden Verdichtung sowie günstigen Erhärtungsbedingungen, z.B. durch längeres Belassen in der Form, entstehen in der Regel sehr dichte Betone. Aufgrund des niedrigen Wasserzementwerts bildet sich ein dichtes Zementsteingefüge mit relativ geringem Kapillarporenvolumen bzw. kleinen Kapillarporendurchmessern [14]. Solche Betone besitzen im allgemeinen einen hohen Widerstand gegenüber Diffusionsvorgängen.

4.2 Wasseraufnahme

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert ist, hängt das Diffusionsverhalten in erheblichem Maß von der Höhe des Wassergehalts des Betons ab.

Tafel 1 Betoneigenschaften und Wasseraufnahmeverhalten der untersuchten Rohrbetone

Table 1 Concrete properties and water absorption behaviour of the pipe concretes under investigation

Rohrbeton/Pipe concrete		A	B	C
Druckfestigkeit ¹⁾ (N/mm ²) compressive strength ¹⁾ (N/mm ²)		63	68	54
Trockenröhdichte (kg/dm ³); 7 d bei 110 °C getrocknet Dry bulk density (kg/dm ³); dried for 7 days at 110 °C		2,33	2,36	2,47 ²⁾
Wassergehalt ³⁾ Vol.-% Water content ³⁾ in vol. %	2 Jahre im Klima 20 °C/ 65% r.F. 2 years in 20 °C/65% r.h climatic chamber	4,3	5,4	5,7
	14 Tage in feuchtem Sand; 8 Gew.-% Feuchte 14 days in moist sand; 8 wt. % moisture	9,4	8,3	9,9
	7 Tage unter Wasser 7 days under water	9,4	8,6	10

¹⁾ ermittelt an Würfeln mit 60 bzw. 70 mm Kantenlänge

²⁾ Beton mit Basallsplitt-Zuschlag

³⁾ bezogen auf das Gewicht nach 7tägiger Trocknung bei 110 °C

¹⁾ measured on cubes with edge lengths of 60 or 70 mm

²⁾ concrete with basall chippings as aggregate

³⁾ relative to the weight after 7 days' drying at 110 °C

Die in Abhängigkeit von drei verschiedenen Feuchtigkeitsbedingungen erfolgende jeweilige Wasseraufnahme wurde für die untersuchten Rohrbetone bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tafel 1 aufgeführt. Da das hier untersuchte Betonverhalten einen direkten Bezug zur Größe des Porenvolumens aufweist und um die Unterschiede in der Betonröhdichte zu eliminieren, sind die Wassergehalte volumenbezogen angegeben. Anhand der Wassergehalte läßt sich die Größe der zugänglichen Porenräume ermessen, die für die Höhe der Diffusion ausschlaggebend sind.

Die sich bei einer langfristigen Lagerung von etwa zwei Jahren im Klima bei 20°C/65% r.F. einstellende Ausgleichsfeuchte betrug bei den Rohrbetonen 4 bis 6 Vol.-%. Bei Unterwasserlagerung stieg der Feuchtegehalt um rd. 3 bis 5 Vol.-% an. Allerdings wird diese Feuchtigkeitsaufnahme auch schon bei einer Lagerung in Sand mit 8 Gew.-% Feuchte erreicht. Diese Beobachtung verdeutlicht, daß bei einem unter üblichen Betriebsbedingungen eines Abwasserkanals im Erdreich liegenden Betonrohr ein praktisch wassergesättigter Zustand eintritt. Hinsichtlich der Diffusion bedeutet dies, daß von einer Flüssig/Flüssig-Diffusion auszugehen ist. Deshalb entspricht die Prüfung des CKW-Durchgangs im untergetauchten Zustand, wie sie in der Zwei-Kammer-Versuchseinrichtung erfolgte, den praktischen Verhältnissen.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Gasdurchlässigkeit

Als Kennwerte für die Quantifizierung der Strukturdichtigkeit von Beton können nach H. Gräf und H. Grube [15] zum einen die Sauerstoff-Permeabilität und zum anderen die Sauerstoff-Diffusion herangezogen werden. Die entsprechenden Koeffizienten sind Kenngrößen für die offene Porosität des Betons, in der die Stofftransportvorgänge wie die Diffusion ablaufen.

Im Bild 5 sind für die drei Rohrbetone in zwei Feuchtigkeitszuständen (siehe Tafel 1), d.h. nach zweijähriger Klimaraumlagerung (offene Symbole) und 14tägiger Lagerung in feuchtem Sand (gefüllte Symbole), die O_2 -Permeabilitäts- und -Diffusionskoeffizienten aufgetragen. Mit dem Anstieg der Feuchte um bis zu 5 Vol.-% und der damit verbundenen Wasserfüllung des Porenraums nahm die Dichtigkeit um 1 bis 1,5 Zehnerpotenzen zu. Durch die anschließende Wasserlagerung, die praktisch keinen Anstieg in der Wasseraufnahme brachte, konnte auch keine weitere Abnahme der Gasdurchlässigkeit gemessen werden. Die Beziehung zwischen Feuchtegehalt und Gasdurchlässigkeit verläuft erfahrungsgemäß in einer gewissen Bandbreite linear, was durch den Sektor gekennzeichnet ist. Anzumerken ist, daß nach einer anschließenden 7tägigen Trocknung der Probe bei $110^\circ C$ die Gasdurchlässigkeit etwa um eine halbe Zehnerpotenz gegenüber dem Klimaraum-Zustand ansteigt.

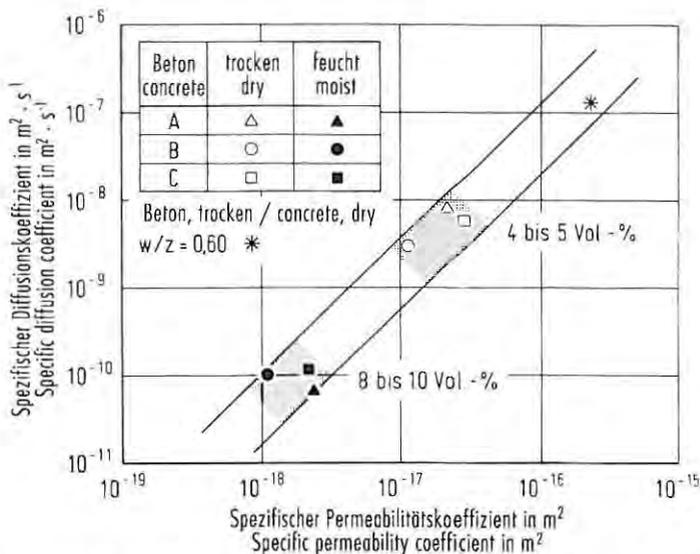


Bild 5 Sauerstoff-Permeabilitäts- und Sauerstoff-Diffusionskoeffizienten für drei Rohrbetone und einem Beton mit $w/z = 0,60$ in Abhängigkeit vom Feuchtzustand

Fig. 5 Oxygen permeability coefficients in m^2 and oxygen diffusion coefficients in $m^2 \cdot s^{-1}$ for three pipe concretes and one concrete with $w/c = 0.60$ as function of the moisture conditions

Da die Dichtigkeit des Betons deutlich vom Wasserzementwert bestimmt wird, wurde zu Vergleichszwecken ein Beton mit $w/z = 0,60$ und einer ungünstigen Nachbehandlung in die Versuche einbezogen. Ein solcher Beton besitzt erfahrungsgemäß aufgrund eines größeren Kapillarporenvolumens [10, 14] eine eindeutig höhere Gasdurchlässigkeit. Die größere Porosität und damit die höhere Durchlässigkeit beim Stofftransport beim Vergleichsbeton kommt im Bild 6 zum Ausdruck, das die Porenverteilung für die drei Rohrbetone und den Vergleichsbeton zeigt. Die Rohrbetone weisen im Gegensatz zum Vergleichsbeton einen deutlich geringeren Porenanteil mit Porenradien oberhalb von 10^2 nm auf. Die Gasdurchlässigkeit liegt beim Vergleichsbeton für den labortrockenen Zustand, in dem dieser einen Feuchtegehalt von 11 Vol.-% aufwies, rund eine Zehnerpotenz über der der Rohrbetone. Im durchfeuchteten Zustand, in dem ein Feuchtegehalt von 17 Vol.-% für diesen Beton ermittelt wurde, war für die Gasdurchlässigkeit im Vergleich zu den Rohrbetonen kein Unterschied meßbar, weil durch die Wasserfüllung der Poren ein Dichtigkeitszustand herbeigeführt wurde, bei dem die Gasdurchlässigkeitsmeßverfahren nicht mehr differenzieren können.

5.2 CKW-Durchtritt

Bei der Dauerbelastung von $1000000 \mu\text{g}$ Methylenchlorid je Liter wurde nach 8 bis 12 Wochen Prüfdauer im anfangs CKW-freien Wasser auf der Prüfseite mit einem Kammervolumen von rd. 20 Litern CKW-Konzentrationen in der Lösung zwischen 20 und $35 \mu\text{g/l}$ für die Rohrbetone festgestellt. Bezogen auf 1 dm^2 Fläche der ein-

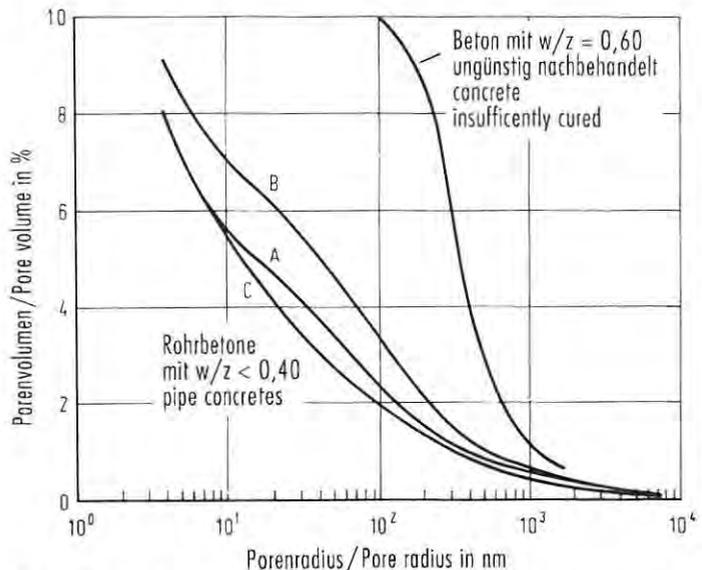


Bild 6 Porenverteilung von drei Rohrbetonen und einem ungünstig nachbehandelten Beton mit $w/z = 0,60$

Fig. 6 Pore distribution for three pipe concretes and one insufficiently cured concrete with $w/c = 0.60$

gesetzten Betonprobe von 50 mm Dicke errechnet sich daraus ein spezifischer CKW-Durchtritt von rd. 11 bis 20 μg pro Liter Kammerinhalt. Die gemessenen Konzentrationen für die 3 Rohrbetone sowie für den Vergleichsbeton sind in Abhängigkeit von der Prüfzeit im Bild 7 aufgetragen.

Bei der Prüfung nach vier Wochen lag die Methylenchlorid-Konzentration noch unter der Bestimmungsgrenze, die zu Beginn der Versuche 10 $\mu\text{g/l}$ und später aufgrund von technischen Verbesserungen am Analysengerät bei 5 $\mu\text{g/l}$ lag. Der Verlauf des Konzentrationsanstiegs bei der Probe A, der bis zu einer Prüfdauer von 12 Wochen ermittelt wurde, zeigt, daß sich nach etwa 4 bis 6 Wochen ein gleichmäßiger Diffusionsstrom einstellt. Die geringen Unterschiede zwischen den für die drei Betone gemessenen CKW-Durchtrittswerten sind bei den in Relation zur extrem hohen Dauerbelastung geringen absoluten Werten ohne Bedeutung für die daraus abzuleitenden Schlußfolgerungen. Die Meßwerte liegen dicht zusammen, ließen sich reproduzieren und kennzeichnen somit zutreffend die Größenordnung der CKW-Diffusion bei entsprechenden Rohrbetonen.

Anhand der Prüfung des Vergleichsbetons mit einem Wasserzementwert von 0,60 (siehe Bild 7) konnte die Abhängigkeit des Diffusionswiderstandes gegenüber CKW von der Zementsteindichtigkeit nachgewiesen werden. Dieser Beton, dessen Gasdurchlässigkeit um eine Zehnerpotenz größer war als die der Rohrbetone mit $w/z = 0,40$, erreichte hinsichtlich des Diffusionsverhaltens mit einem absoluten Konzentrationswert nach 8 Wochen von 260 $\mu\text{g/l}$ bzw. einer auf 1 dm^2 Probenfläche bezogenen Konzentration von etwa 150 $\mu\text{g/l}$

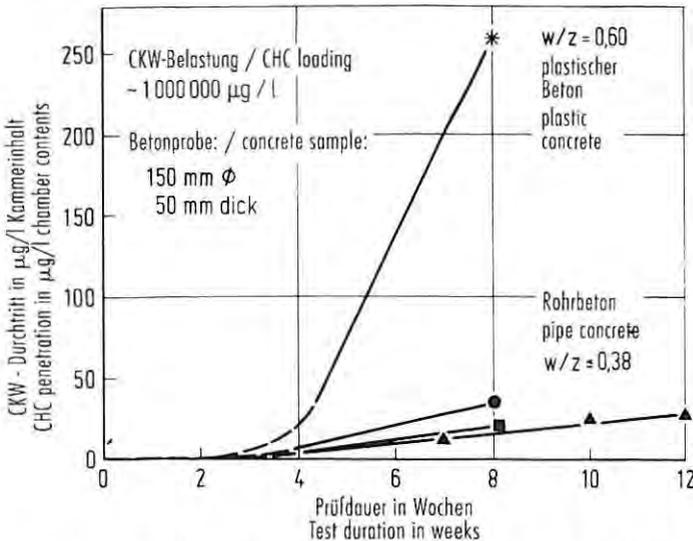


Bild 7 CKW-Durchtrittsmengen bei drei Rohrbetonen und einem Beton mit $w/z = 0,60$ in Abhängigkeit von der Prüfdauer, ermittelt in der Zwei-Kammer-Prüfeinrichtung

Fig. 7 CHC penetration quantities in $\mu\text{g/l}$ chamber content for three pipe concretes with $w/c \leq 0,38$ and one concrete with $w/c = 0,60$ functions of the test duration, measured in the two-chamber test rig

eine im Vergleich zum Mittel der drei Rohrbetone etwa 10fach höhere Diffusionsmenge. Diese Relation verdeutlicht zum einen prüftechnisch die Aussagekraft der angestellten Messungen, weil sich sowohl bei der Gasdurchlässigkeit von Proben mit Ausgleichsfeuchte als auch beim CKW-Durchtritt an feuchtesättigten Proben gleich große Unterschiede ergaben. Zum anderen zeigt diese Relation in technologischer Hinsicht, daß die Leistungsfähigkeit von Beton gegenüber einer Schadstoffdiffusion von der Betonqualität bzw. der Zementsteindichtigkeit, die wiederum vom Wasserzementwert beeinflußt wird, abhängt. Mit steigendem w/z-Wert verringert sich der Diffusionswiderstand. Der dichtere Beton, wie er beispielsweise bei sachgerechter Rohrproduktion entsteht, bedeutet eine höhere Barriere gegenüber einer Schadstoffemission.

6 Folgerungen aus den Versuchsergebnissen

Die gewonnenen Versuchsergebnisse ermöglichen zwei wesentliche Feststellungen für die praktische Anwendung.

6.1 Abschätzung des CKW-Durchtritts

Aus den experimentellen Versuchsdaten in der Zwei-Kammer-Versuchseinrichtung können, unter der Annahme, daß sich nach einer Versuchszeit von rd. 8 Wochen ein gleichmäßiger Diffusionsstrom eingestellt hat (siehe Bild 7), Diffusionskoeffizienten für Methylenchlorid für die verwendeten Betone berechnet werden. Eventuelle chemische Reaktionen von Methylenchlorid mit den Betonen, die die Diffusionsvorgänge beeinflussen können, sind dabei in den berechneten Diffusionskoeffizienten enthalten. Für den Beton mit $w/z = 0,60$ ergibt sich ein Wert von rd. $5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ während sich für die hochwertigen Rohrbetone etwa um den Faktor 10 geringere Diffusionskoeffizienten von 4 bis $7 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$ ergeben. Damit weisen diese Diffusionskoeffizienten eine Größenordnung auf, die von anderen Autoren [16, 17, 18, 19] für die Diffusion von Propan-2-ol oder von Ionen wie Na^+ , Cl^- , I^- usw. in Betonen oder Zementsteinen gefunden wurden.

Mit dem ermittelten Diffusionskoeffizienten kann die bislang offene Frage nach der Größe des CKW-Durchtrittes bei Betonrohren im Kanalbetrieb mittels einer Überschlagsrechnung beantwortet werden. Bei normaler CKW-Dauerbelastung in der Abwasserleitung von etwa $50 \mu\text{g/l}$ Abwasser würde die an der Außenseite des Rohres anliegende Bodenschicht bei einer Rohrwanddicke von 5 cm mit einem CKW-Eintrag von nur $0,05 \mu\text{g}$ je m^2 und Tag belastet.

Selbst bei einem sehr wenig durchlässigen Boden (Schluff) mit einem Wassergehalt von 20% beträgt die Durchlässigkeit bei einem hydraulischen Gefälle von 1 mindestens 10 cm/Tag ; bei Sanden und Kiesen ist sie um mehrere Zehnerpotenzen größer [20].

Eine 1 m^2 große Bodenschicht (Schluff) von 5 cm Dicke enthält bei Wassersättigung 10 l/m^2 Wasser, von denen sich bei einer Grundwassergeschwindigkeit entsprechend der Durchlässigkeit $1 \text{ l/m}^2 \cdot \text{Tag}$ erneuern. Nimmt man ungünstigerweise an, daß sich die durchdiffundierte CKW-Menge von $0,05 \mu\text{g/m}^2 \cdot \text{Tag}$ nur auf diese 5 cm dicke Bodenschicht verteilt, dann beträgt die CKW-Konzentration

$0,05 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag}$ je $1 \text{ l}/\text{m}^2 \cdot \text{Tag} = 0,05 \mu\text{g}/\text{l}$. Gemäß der Trinkwasser-verordnung [21] beträgt der Grenzwert für den CKW-Gehalt $10 \mu\text{g}/\text{l}$. Zieht man diesen Grenzwert als Maßstab heran, dann ergibt die durchdiffundierte Menge unter den vorgenannten Bedingungen eine CKW-Konzentration, die höchstens 0,5% des TVO-Grenzwertes ausmacht. Da sich mit der Wassererneuerung die durchdiffundierte Menge nicht nur auf eine 5 cm dicke, sondern auf eine erheblich dickere Bodenschicht verteilt, dürfte die Konzentration in der Praxis in der Regel 0,5% des TVO-Grenzwertes kaum erreichen, selbst wenn die Grundwassergeschwindigkeit kleiner als angenommen sein sollte.

Dieses Ergebnis verdeutlicht, daß ein Umweltrisiko für Boden und Grundwasser infolge der CKW-Diffusion durch eine Rohrwand aus Beton der Qualität der geprüften Rohrbetone nicht eintreten kann.

6.2 Prüfmöglichkeit

In der Praxis besteht das Bedürfnis nach einer technischen Nachweismöglichkeit für die notwendigen Eigenschaften eines Produktes (Performance-Prinzip). Im Hinblick auf das Tragverhalten dient hierfür beispielsweise die Festigkeitsprüfung. Für die Dichtigkeit liegen entsprechende Prüf- und Bewertungskriterien noch nicht vor. Aufgrund der Versuchsergebnisse zeichnet sich jedoch für die Prüfung und Beurteilung der Dichtigkeit von Rohrbeton ein Verfahren ab, wie sich ein aussagefähiger Materialkennwert ermitteln läßt.

Die Versuche ergaben eine günstige Korrelation zwischen dem CKW-Durchgang und den im labortrockenen Zustand ermittelten Sauerstoff-Permeabilitäts- bzw. -Diffusionskoeffizienten. Diese Gasdurchlässigkeitsprüfungen sind relativ einfache und kurzfristig durchführbare Prüfverfahren. Für die Permeabilitätsprüfungen stehen die Geräte bereits in standardisierter Ausführung zur Verfügung. Damit bietet sich grundsätzlich ein unkomplizierter Nachweis für die Leistungsfähigkeit von Rohrbeton gegenüber einer CKW-Diffusion an. Zur Festlegung der genauen Prüfbedingungen müßten allerdings noch weitergehende Vergleichsversuche durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an praxisingerechten Betonen für Abwasserrohre nach DIN 4032 lassen sich wie folgt zusammenfassen.

7.1 In der speziell entwickelten Zwei-Kammer-Prüfeinrichtung konnte der CKW-Durchtritt durch Rohrbetone verläßlich geprüft werden, so daß sich Rohranwender, die für die Dichtigkeit der Kanäle verantwortlich sind, über die Leistungsfähigkeit des Rohrbetons vergewissern können.

7.2 Geprüft wurden Rohrbetone anhand von Proben, die aus werkmäßig hergestellten Betonrohren entnommen waren. Die ermittelten Betoneigenschaften, wie hohe Druckfestigkeit und Rohdichte sowie geringe Wasseraufnahme, wiesen die Betone als qualitativ hochwertig aus.

7.3 Bei einer einseitigen Belastung des Betons mit dem organischen Lösungsmittel Methylenchlorid in einer prüftechnisch begründeten

Konzentration von rd. 1 000 000 $\mu\text{g/l}$ über einen Zeitraum von 8 bis 12 Wochen wurde bei Proben mit 150 mm Durchmesser und 50 mm Dicke ein Durchtritt an CKW bis zu einer Konzentration von 20 bis 35 μg je Liter des Kammerinhalts von 20 Litern nachgewiesen.

7.4 Der Durchtritt von CKW durch eine fehlerstellenfreie Betonrohrwand erfolgt durch Diffusion in gelöster Form durch ein wassergesättigtes Porengefüge, da der Beton eines in Betrieb befindlichen Kanals praktisch wassergesättigt ist. Eine solche Flüssig/Flüssig-Diffusion läuft sehr langsam ab. Kurzfristige starke Belastungen durch hohe Konzentrationen, die nur örtlich auf den Einleitungsbe-
reich begrenzt anstehen, sind wegen der Zeitabhängigkeit von Transportvorgängen belanglos. Ausschlaggebend ist die Dauerbelastung.

7.5 Die Prüfungen haben gezeigt, daß sachgerecht hergestellte Rohrbetone gegenüber einer dauernden CKW-Belastung sehr dicht sind. Mit dem daraus ableitbaren geringen Diffusionskoeffizienten läßt sich die in der Praxis je m^2 austretende CKW-Menge errechnen. Bezieht man diese sehr geringe CKW-Menge auf eine dünne, langsam vorbeifließende Grundwasserschicht, dann errechnet sich daraus eine CKW-Grundwasserkonzentration, die deutlich unter 1% der zulässigen CKW-Konzentration in Trinkwasser liegt. Eine solche CKW-Diffusion durch Betonrohre kann keine Umweltgefährdung hervorrufen.

7.6 Das Umweltrisiko durch Schadstoffe, die infolge Lecks im Kanal in Boden und Grundwasser eindringen, ist um ein Vielfaches größer als das Risiko durch die Schadstoffe, die infolge von Diffusion freigesetzt werden. Dem CKW-Problem muß man daher durch ein Verhindern von Lecks begegnen.

7 Summary

The investigations carried out on concretes as used in practice for sewer pipes as specified in DIN 4032 can be summarized as follows.

7.1 In the specially developed two-chamber test rig it was possible to carry out reliable tests of the CHC penetration through pipe concretes, with the result that pipe users who are responsible for the impermeability of sewer systems are able to satisfy themselves about the effectiveness of the pipe concrete.

7.2 Pipe concretes were tested using samples taken from factory-produced concrete pipes. The concrete properties measured, such as high compressive strength and bulk density and low water absorption, indicate that qualitatively they are high grade concretes.

7.3 During a one-sided exposure of the concrete to the organic solvent methylene dichloride at a concentration (selected for test procedural reasons) of about 1 000 000 $\mu\text{g/l}$ over a period of 8 to 12 weeks, samples of 150 mm diameter and 50 mm thickness gave CHC penetrations of up to a concentration of 20 to 35 μg per litre of the chamber content of 20 litres.

7.4 The concrete of a sewer pipe in operation is practically saturated with water, so the penetration of CHC through a defect-free concrete pipe wall takes place by diffusion in solution through a water-saturated pore structure. This type of liquid/liquid diffusion takes

place very slowly. Severe short-term exposures by high concentrations which are limited locally to the inlet region are unimportant because of the time-dependence of transport processes. Continuous exposure is the decisive factor.

7.5 The tests have shown that correctly manufactured pipe concretes are very impermeable to continuous CHC exposure. With the low diffusion coefficients derived from the tests it is possible to calculate the quantities of CHCs which escape per m² in practice. If this very small quantity of CHC is related to a thin layer of groundwater flowing slowly past then this gives a CHC groundwater concentration which lies significantly under 1% of the CHC concentration allowed in drinking water. This type of CHC diffusion through concrete pipes cannot cause any threat to the environment.

7.6 The risk to the environment through harmful substances which penetrate into the soil and groundwater as a result of leaks in the sewer pipes is many times greater than the risk from harmful substances released as result of diffusion. The CHC problem must therefore be countered by preventing leaks.

SCHRIFTTUM / LITERATURE

- [1] Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz — WHG) in der Fassung vom 23. September 1986, Bundesgesetzblatt 1986, S. 1529.
- [2] Stellungnahme der ATV zur Grundwassergefährdung durch undichte Abwasserkanäle und -leitungen. Korrespondenz Abwasser, 33 (1986), H. 10, S. 874.
- [3] Abwasserwirtschaft heute. Tagungsbericht aus Tiefbau-Industriebau-Straßenbau, 30 (1988), H. 8, S. 420/446.
- [4] Keding, M., S. v. Riesen und B. Esch: Zustand der öffentlichen Kanalisation in der Bundesrepublik Deutschland — ATV Umfrage 1990. Korrespondenz Abwasser 37 (1990), H. 10, S. 1148/1153.
- [5] Haendel, H.: Diffusionsverhalten von chlorierten Kohlenwasserstoffen gegenüber Kanalrohrwandungen. Korrespondenz Abwasser, 34, (1987), H. 10, S. 1040/1046.
- [6] Kommentar zum Parameter Organische Lösemittel des ATV-Arbeitsblattes A 115. Korrespondenz Abwasser 35 (1988), H. 6, S. 597/603.
- [7] Salzwedel, J.: Haftungsrechtliche Fragen undichter Kanäle. Zeitschrift für Angewandte Umweltforschung (ZAU), Sonderheft 1: Instandhaltung von Kanalisationen. Analytica Verlag, Berlin 1988.
- [8] Apel, H.-D.: Strafbarkeit von Grundwasserverunreinigungen durch undichte Abwasserkanäle. Korrespondenz Abwasser 37 (1990), H. 6, S. 669/673.
- [9] Grube, H., und G. Spanka: Leistungsfähigkeit von Beton. (Statusbericht). VDI-Berichte Nr. 869, S. 247/259, Düsseldorf 1991.
- [10] Grube, H., E. Kern und H.-D. Quittmann: Instandhaltung von Betonbauwerken. Beton-Kalender 1990. Ernst und Sohn Verlag, Berlin 1990, S. 681/720.
- [11] Manegold, E.: Kapillarsysteme. Band 2 Straßenbau (1960), Chemie und Technik Verlagsgesellschaft, Heidelberg.

- [12] Hinweise für das Einleiten von Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage. ATV-Arbeitsblatt A 115, St. Augustin, 1983.
- [13] 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; ebenso Betontechnische Berichte 1989—91, Beton-Verlag, Düsseldorf 1992, S. 107/126.
- [14] Gräf, H.: Über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluß auf Gebrauchseigenschaften von Beton. Dissertation, GH Essen, 1988.
- [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.
- [16] Feldmann, R. F.: Diffusion measurements in cement paste by water replacement using Propan-2-ol. Cement and Concrete Research, Vol. 17, 1987, S. 602/612.
- [17] Smolczyk, H.-G.: Stand der Kenntnis über Chloriddiffusion in Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 50 (1984), H. 12, S. 837/843.
- [18] Frey, R.: Untersuchung des Wanderungsmechanismus und Ermittlung der Kenngrößen von Streusalz-Chlorid in Betonen. TIZ International Powder & Bulk Magazine, Vol. 115, No. 10, 1991, S. 405/414.
- [19] Volkwein, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton. Berichte aus dem Baustoffinstitut, TU München, H. 1, 1991.
- [20] Petermann, H.: Bodenmechanik. Taschenbuch für Bauingenieure, Teil II, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1955, S. 1/49.
- [21] Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe (Trinkwasserverordnung) vom 5.12.1990. Bundesgesetzblatt, Teil 1, Nr. 66, S. 2612/2629.