Strassenbauforschung
des Eidgenössischen Departements des Innern

Beeinflussung des Feuchtigkeits- und Ionentransportes in Beton durch oberflächentechnologische Massnahmen

L'influence des technologies des surfaces sur le transport d'humidité et des ions dans le béton

Prof. Dr. F.H. Wittmann und Dipl.-Ing. P. Lunk
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Forschungsauftrag Nr. 81/88

Februar 1991

Vorwort

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken hängt ganz entscheidend vom Feuchtigkeitsgehalt und der zeitlich veränderlichen Feuchtigkeitsverteilung ab. Ueberspitzt und salopp ausgedrückt heisst das: das Wasser ist an allem Schuld oder Bautenschutz ist Feuchteschutz.

Wasser ist stets integraler Bestandteil des Betons. Beim Anmachen des Frischbetons werden pro m^3 etwa 150 l Wasser beigegeben. Ein Teil dieses Wassers reagiert mit dem Zement. Der Rest bleibt im Porensystem zurück. Je nach dem Feuchtigkeitsgehalt der Umgebung kann ein Teil des Ueberschusswassers durch Trocknen abgegeben werden oder aber Wasser wird zusätzlich absorbiert. Schwinden beziehungsweise Quellen sind die Folge.

Es ist ausserordentlich schwierig, die Feuchtigkeitstransportvorgänge im Beton quantitativ zu beschreiben. Dies hängt ganz wesentlich mit dem komplizierten Porensystem des Betons zusammen. Die feinsten Poren der Hydratationsprodukte des Zementsteins haben einen Durchmesser von etwa 2 bis 4 nm, die Kapillarporen liegen bei 1 µm, die künstlich eingebrachten Luftporen haben einen Durchmesser von etwa 100 µm und schliesslich gibt es noch Verdichtungsporen, die in der Grössenordnung von einigen mm liegen können. Wasser in den feinsten Gelporen verhält sich aber ganz anders als Wasser in Kapillarporen oder in groben Verdichtungsporen.

Da die Zusammenhänge nicht trivial und allgemein bekannt sind, haben wir versucht im vorliegenden Bericht eingangs die wichtigsten Parameter des porösen Gefüges und die dominierenden Mechanismen des Transportvorganges zu beschreiben. Damit sollte eine Basis für ein besseres Verständnis der Ergebnisse geschaffen werden.

Dankbar sei an dieser Stelle die konstruktive Rolle der begleitenden Kommision unter Vorsitz von Herrn Dr. P. Schmalz und mit den Mitgliedern H.P. Dobler, Prof. Dr. C. Menn und F. Nicolet erwähnt.

Zürich, April 1991 F.H. Wittmann

Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen wird massgebend durch den Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung beeinflusst. Praxisnahe Umweltbedingungen wurden durch zyklische Wechsellagerungen mit kapillarer Wasseraufnahme und anschliessendem Trocknen simuliert. Das Eindringen von Chloriden infolge einer kapillaren Flüssigkeitsaufnahme wurde untersucht und ein Filtereffekt festgestellt. Eine unterschiedliche Lage zwischen der Wasser- und der Salzfront wurde gemessen. Der Einfluss einer Hydrophobierung auf die kapillare Wasseraufnahme wurde untersucht. Die Ergebnisse bestätigen, dass die kapillare Wasseraufnahme merklich behindert und das Eindringen von Salzen unterbunden wurde, ohne dabei die Gasdiffusion zu beeinträchtigen.

Die Realkalisierung wurde an Bohrkernen aus einem karbonatisierten Betonbauteil durch Aufbringen eines hydraulisch gebunden Reparaturmörtels erfolgreich durchgeführt. Das Langzeitverhalten der realkalisierten Betonrandzone wurde untersucht. Entprechende oberflächentechnologische Massnahmen, wie das Aufbringen einer Dickbeschichtung oder eines Anstriches auf Acrylatbasis wurden getestet.

Résumé

La durabilité du béton armé est surtout influencée par l'échange d'humidité avec le milieu environnant. Des conditions climatiques proches de la réalité ont été simulées par l'alternance de périodes d'absorption capillaire d'eau et de périodes de séchage. La pénétration de chlorures à la suite de l'absorption capillaire de liquide a été étudiée et un effet filtrant a été remarqué. Un décalage entre le front de pénétration du sel et de l'eau a été constaté. On a également déterminé l'influence d'un hydrofuge sur l'absorption capillaire de l'eau. A ce propos on a remarqué que l'absorbtion capillaire de l'eau est gènée considérablement et que la pénétration de ions de clorures est annulée sans pour autant influencer la diffusion des gazes.

La réalcalisation a été effectuée sur des carottes tirés d'un élément en béton carbonaté en applicant un mortier hydraulique de réparation. On a edutié le comportement à long terme des zones superficielles réalcalisées et des mesures appropriées de traitement des surfaces tels que l'application d'enduits et de peintures à base d'acrylats ont été testées.

Riassunto

La durabilità del calcestruzzo è sopratutto influenzata dallo scambio di umidità con l'ambiente. Delle condizioni climatiche vicine alla realtà sono state create mediante l'alternarsi ciclico di periodi di assorbimento capillare di acqua e di periodi in ambiente secco. La penetrazione di cloruri dovuta all'assorbimento capillare di liquidi è stata studiata ed è stato notato un cosiddetto effetto filtrante. Un distacco tra il fronte di penetrazione del sale e quello dell'acqua è travato. E stata pure determinata l'influenza di una idrofobizzazione all'assorbimento capillare dell'acqua. A questo proposito si è notato che l'assorbimento capillare dell'acqua è notevolmente rallentato e che la penetrazione di ioni cloruri è addirittura annullata, questo senza effetto sulla diffusione dei gas.

La rialcalizzazione dei provini cilindrici di un elemento in calcestruzzo è stata effettuata applicando un mortaio idraulico di riparazione. E stato osservato il comportamento a lungo termine delle zone superficiali rialcalizzate. Misure appropiate di trattamento delle superfici quali l'applicazione di rivestimenti idraulici e a base di acrilati sono state tentate.

Summary

The durability of concrete is strongly influenced by the humidity exchange with the environment. Practical exposure conditions were simulated by a treatment of alternating wet and dry conditions by capillary rise and drying. The penetration of chlorides as a consequence of water absorption was investigated and a filter effect was found out. A different position of the water and the salt front was observed. The influence of hydrophobing agents on the capillary water transport was determined. The investigations confirms that the capillary water transport was hindered considerably and the penetration of salt-ions was stopped while the diffusion of gas remained unchanged. .

Realcalisation of cores taken from a carbonated concrete unit was caried out successfully by the application of a repair mortar. The long-term behaviour of the realcalised concrete zone was examined. Measures of surface technology such as the application of coatings based on hydraulic mortar and acrylat were tested.

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung 1

2. Feuchtigkeits- und Ionentransport im Beton sowie deren Beeinflussung durch oberflächentechnologische Massnahmen 3
2.1 Porosität und Porengrössenverteilung von Beton 3
2.2 Transportvorgänge im Beton 5
2.3 Oberflächentechnologische Massnahmen 7

3. Physikalische Grundlagen zum kapillaren Wassertransport 9

4. Experimentelle Untersuchungen 11
4.1 Baustoffe und Probekörper 11
4.2 Bestimmung der Porosität und Porengrössenverteilung 13
4.2.1 Porositätsbestimmung durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und Vakuum 13
4.2.2 Porengrössenverteilung durch Quecksilberdruckporosimetrie 15
4.3 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme 15
4.4 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung 17
4.5 Bestimmung der Eindringtiefe von Chloridionen 19
4.6 Bestimmung der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels 20
4.7 Bestimmung der Realkalisierung 22

5. Versuchsergebnisse 25
5.1 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von betontechnologischen Parametern 25
5.1.1 Einfluss der Betonzusammensetzung 25
5.1.2 Einfluss der Nachbehandlung 35
5.2.2 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen 38
5.2.1 Einfluss eines Konstant- und Wechselklimas 38
5.2.2 Einfluss der Art der Aufsauglösung 42

5.3 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von oberflächentechnologischen Massnahmen 49
5.3.1 Eindringtiefe vom Hydrophobierungsmittel 49
5.3.2 Einfluss eines Konstant- und Wechselklimas 51
5.3.3 Einfluss der Art der Aufsauglösung 55
5.4 Realkalisierung 60

6. Diskussion der Ergebnisse 63
6.1 Zusammenhang zwischen den Transporteigenschaften und der Porosität 63
6.2 Zusammenhang zwischen den Transporteigenschaften und der Einlagerung hygroskopischer Salze 67
6.3 Zusammenhang zwischen den Transporteigenschaften und einer Hydrophobierung 71
6.4 Realkalisierung 73

7. Folgerungen und offene Fragen 76

8. Literaturverzeichnis 79

9. Zusammenfassung 83

1. Einleitung

Die Dauerhaftigkeit von Betonkonstruktionen wird durch eine Vielzahl teilweise voneinander unabhängiger Einflussgrössen aus äusseren Einwirkungen und der inneren Widerstandsfähigkeit bestimmt. Von entscheidender Bedeutung sind in den meisten Fällen Transportvorgänge im Porensystem in Verbindung mit Wasser.

Transport- und Speichervorgänge von Wasser, Gasen und Ionen im Porensystem des Zementsteines beeinflussen vor allem die Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber der Frost- und Frost-Tausalzeinwirkung sowie die Korrosion und den Korrosionsschutz der Armierung.

Für die Korrosion der Bewehrung im Beton ist der Einfluss von Chloriden oder die Karbonatisierung der Betonüberdeckung bedeutsam. Der Schadstoffeintrag von Chloriden, z.B. durch eine defekte Abdichtung einer Brückenplatte, geht unter realen klimatischen Bedingungen immer mit einer Befeuchtung des Bauteiles einher. Kapillare Saugvorgänge als Transportmechanismen besitzen dementsprechend eine grössere Bedeutung als die meist wesentlich langsameren Diffusionsvorgänge /1/.

Zum Schutz der Betonoberfläche gegenüber der Infiltration wässriger Lösungen und von Gasen stehen neben einer geeigneten Betonzusammensetzung oberflächentechnologische Massnahmen - Imprägnierung, Versiegelung und Beschichtung - zur Verfügung. Die Oberflächensysteme finden unmittelbar bei der Herstellung des Bauwerkes (präventiv) oder bei der Instandsetzung von Schäden (sanierend) ihren Einsatz. Eine Hydrophobierung der Betonoberfläche kann bei Rissefreiheit das Eindringen von Chloriden über die flüssige Phase wirkungsvoll bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Gasdiffusion und der mechanischen Eigenschaften des Betons behindern.

Die Karbonatisierung reduziert die Alkalität des Betons und verhindert die Bildung der Passivierungsschicht auf der Oberfläche der Bewehrung. Die oberflächennahe oder durch Absprengungen freigelegte Armierung beginnt bei gleichzeitigem Feuchtigkeits- und Sauerstoffzutritt zu rosten. Der Korrosionsfortschritt kann bei Abwesenheit von Chloriden durch einen erneuten Aufbau des alkalischen Milieus - Realkalisierung - im karbonatisierten Bereich des Betons gestoppt werden. Durch Aufbringen eines hydraulisch gebundenen Reparaturmörtels können kosten-

intensive Sanierungsmassnahmen, wie das Freilegen und Entrosten der korrodierten Armierung, wesentlich eingeschränkt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollen zwei Aspekte zur Oberflächentechnologie näher untersucht werden:

a.) Der Einfluss einer Hydrophobierung auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport in den oberflächennahen Zonen des Betons unter besonderer Berücksichtigung einer Chloridionenwanderung.

b.) Die Realkalisierung eines bereits karbonatisierten Betonbauteiles durch Aufbringen einer Schicht aus einem hydraulisch gebundenen Reparaturmörtel

Entsprechend der skizzierten Aufgabenstelllung werden folgende Ziele verfolgt:

a.) Experimentelle Bestimmung der Transportparameter; Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von betontechnologischen Parametern, praxisnahen klimatischen Bedingungen und oberflächentechnologischen Massnahmen

b.) Herstellung eines Zusammenhanges zwischen Porengefüge, der Einlagerung hygroskopischer Salze und einer Hydrophobierung auf die Transporteigenschaften

c.) Experimentelle Bestimmung der Einflussgrössen auf die Realkalisierung eines karbonatisierten Betonbauteiles sowie Ueberprüfung des Langzeitverhaltens einer realkalisierten Oberfläche

2. Feuchtigkeits- und Ionentransport im Beton sowie deren Beeinflussung durch oberflächentechnologische Massnahmen

2.1 Porosität und Porengrössenverteilung von Beton

Beton ist ein Verbundwerkstoff aus Zuschlag, meist Kies und Sand, und Zementstein. Die Zuschläge von Normalbeton können als undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase angesehen werden, während der Zementstein eine Vielzahl von Poren verschiedener Grössenordnungen aufweist. Nach Grösse und Entstehung werden die Poren im Zementstein unter atmosphärischen Bedingungen in nicht wasser füllbare Poren - Verdichtungsporen und Luftporen -, sowie in wasser füllbare Poren - Kapillarporen und Gelporen - unterteilt.

Ueber die Grenzen der Grössenbereiche der einzelnen Porenarten besteht keine einheitliche Auffassung. Im folgenden wird die Poreneinteilung von Setzer /2/ übernommen, die i.w. auf der IUPAC-Klassifikation /3/ basiert (Bild 1).

Betontechnol. Maßnahmen	Poreneinteilung	
Verdichten	Grobporen	
Luftporenbildner	Makrokapillaren	10^{-3} m
w/z-Wert	Kapillaren	
	Mikrokapillaren	10^{-6} m
Hydratationsgrad	Mesoporen	
	Mikroporen	10^{-9} m = 1 nm

Bild 1: Poreneinteilung im Beton in Abhängigkeit vom Radius einer Zylinderkapillare r und betontechnologischen Massnahmen

Im Frischbeton sind noch keine Meso- und Mikroporen vorhanden, da eine Hydratation noch nicht stattgefunden hat. Mit fortschreitender Hydratation steigt der Gehalt an Meso- und Mikroporen an. Die Verteilung dieser Poren wird i.w. durch die Zementart bestimmt /4/ und die Menge wird vor allem durch den Hydratationsgrad beeinflusst, d.h. die Dauer der Nachbehandlung und das Alter.

Im Frischbeton bilden sich vor allem Kapillaren und Mikrokapillaren aus, die durch überschüssiges, noch nicht an der Hydratation teilgenommenes Wasser entstehen. Die Menge dieser Poren wird direkt durch den w/z-Wert bestimmt. Mit zunehmendem Hydratationsgrad nimmt die Menge der Kapillaren und Mikrokapillaren zugunsten der Meso- und Mikroporen ab.

Die Makrokapillaren werden i.w. durch künstlich eingeführte Luftporen bestimmt, während die groben Poren nach dem Verdichten des Betons übrig bleiben.

Das Porengefüge im Zementstein hängt vor allem vom w/z-Wert, der Zementart, der Nachbehandlung und dem Alter ab /5/. Die Porosität wird indirekt auch durch den Zuschlag beeinflusst. In der Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag entstehen gröbere Poren als in den anderen Bereichen der Zementsteinmatrix /6/. Die Sieblinie des Zuschlages, insbesondere im Feinstkornbereich, kann das System aus Kapillaren und Mikrokapillaren verändern /7/.

Die mechanischen Eigenschaften des Festbetons werden insbesondere durch die Meso- und Mikroporen bestimmt, während der Feuchtigkeits- und Ionentransport vornehmlich durch die Mikrokapillaren, Kapillaren und Makrokapillaren beeinflusst wird. Die Grobporen sind nur bei drückendem Wasser wasserführend.

2.2 Transportvorgänge im Beton

Poröse Werkstoffe, wie der Zementstein, erlauben einen Feuchtigkeitstransport in der Gasphase und einen Feuchtigkeits-, Ionen- und Molekültransport in der flüssigen Phase. Die Aufnahme aus der Gasphase kann durch Kondensation, Adsorption und Kapillarkondensation erfolgen. Die Bewegung von flüssigen Wasser im Zementstein kann durch mehrere z.T. gleichzeitig wirkende Kräfte - hydrostatischer Druck, Kapillarkräfte, Feuchtigkeitsunterschied, Konzentrationsgefälle, thermischer Gradient und evtl. elektrische Felder - verursacht werden. Das Zusammenspiel der unterschiedlichen Kräfte in den beteiligten Poren führt lokal zu unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten und zu einer Feuchtigkeitsverteilung im porösen Werkstoff.

Das Zusammenwirken verschiedener Transportmechanismen in einem Porensystem wird massgeblich vom Wassergehalt beeinflusst. Beim Eindringen von Wasser in poröse Werkstoffe können nach Rose /8/ sechs verschiedene Stadien unterschieden werden (Bild 2). Anhand dieses Schemas weist Grube /9/ den bei den unteren Transportarten angegebenen Sättigungsgraden (Punkt 3 - 6) eine besondere Bedeutung für die Dauerhaftigkeit der Betonoberfläche zu.

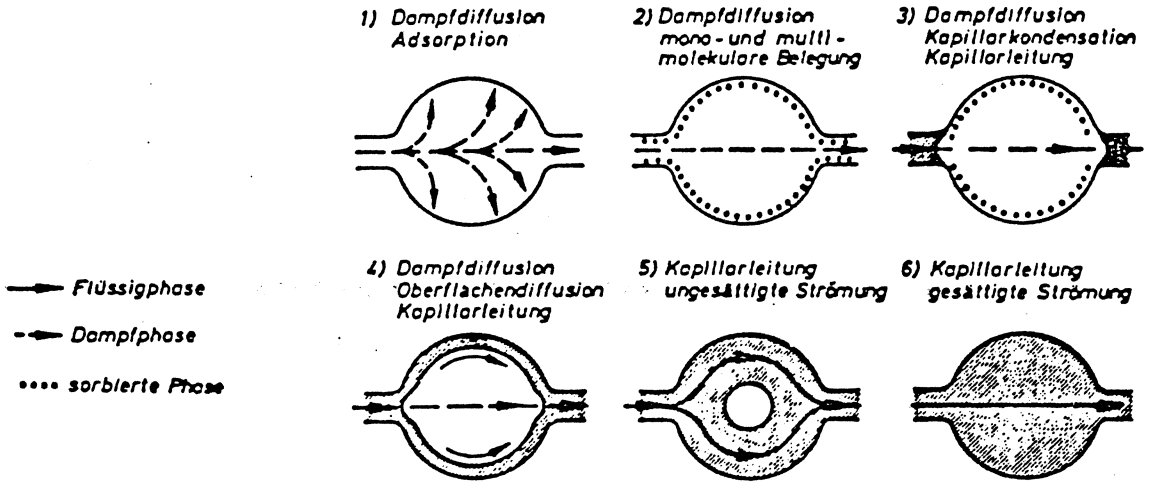

Bild 2: Wassertranportmechanismen in einem Porensystem bei steigendem Wassergehalt /9/ (schematisch)

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich deshalb nur auf den kapillaren Feuchtigkeits- und Ionentransport. Die Kapillarleitung stellt aufgrund hoher Transportraten an Wasser und darin gelöster Ionen und Moleküle (Huckepack-Transport) den dominierenden Transportmechanismus dar. In der Praxis tritt insbesondere bei frost-tausalzbeanspruchten Bauwerken eine kapillare Wasseraufnahme in Verbindung mit einem Huckepack-Transport von Chloriden auf.

2.3 Oberflächentechnologische Massnahmen

Wasser ist als Transportmittel für Schadstoffe und als Medium für schädigende physikalische und chemische Reaktionen die Ursache der meisten zerstörerischen Prozesse an Beton und Armierung. Ziel oberflächentechnologischer Schutzmassnahmen ist die Unterbindung der Wasseraufnahme und des Wassertransportes.

Zum Schutz der Betonoberfläche gegenüber der Infiltration wässriger Lösungen stehen drei Oberflächensysteme - Imprägnierung, Versiegelung und Beschichtung - zur Verfügung. Bild 3 zeigt den prinzipiellen Unterschied zwischen einer Imprägnierung und den anderen Beschichtungsarten.

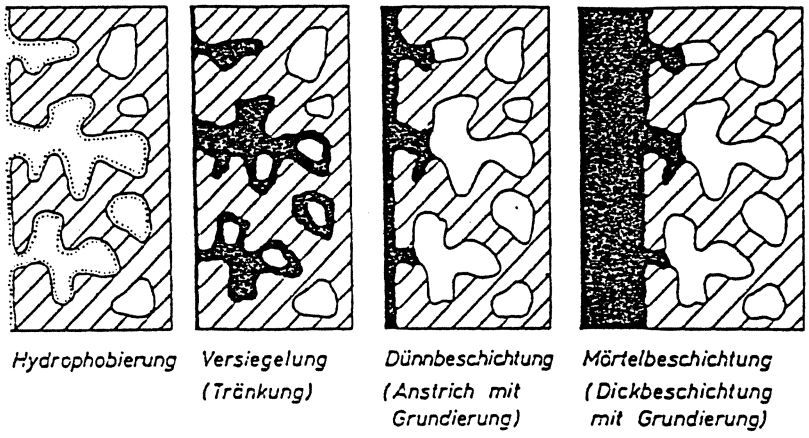

Bild 3: Definition der Oberflächenbehandlungen /10/

Von entscheidender Bedeutung für einen erfolgreichen Oberflächenschutz ist neben einer richtigen Materialwahl und einer sorgfältigen Applikation eine richtige Untergrundvorbehandlung.

Imprägnierungen sind Schutzbehandlungen für poröse Werkstoffe, die das Porensystem innerlich nicht verstopfen und keinen oberflächlichen Film bilden. Hydrophobierungen sind Imprägnierungen, die eine Benetzung der Werkstoffoberfläche mit Wasser durch Aufheben der kapillaren Saugkraft verhindern oder erschweren.

Die Imprägniermittel werden flutend auf die Betonoberfläche aufgebracht und dringen je nach Molekülgrösse einige Millimeter tief in die Oberfläche ein. Der aus speziellen organischen Substanzen bestehende Wirkstoff kleidet die Porenoberflächen mehr oder weniger aus und beeinträchtigt weder die Gasdiffusion noch die mechanischen Eigenschaften des Betons.

3. Physikalische Grundlagen zum kapillaren Wassertransport

Poröse Werkstoffe, wie Beton, besitzen die Fähigkeit, Wasser aufzusaugen, sofern sie mit diesem in ständigem Kontakt stehen. Im folgenden werden einige Gesetzmässigkeiten in vereinfachender Form dargestellt, die beim kapillaren Wassertransport von erheblicher Bedeutung sind. Detailliertere Angaben über die physikalischen Vorgänge beim kapillaren Wassertransport sind bei Schubert /11/ und Greenkorn /12/ zu finden.

Die kapillare Wasseraufnahme wird häufig durch ein einfaches Modell einer zylindrischen Kapillare mit dem Innenradius r und dem Benetzungswinkel Θ erklärt. Der kapillare Unterdruck ist umgekehrt proportional zum Kapillarradius:

$$p = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cos \Theta \qquad (1)$$

Unter Vernachlässigung des Schwerkrafteinflusses gilt für die Eindringgeschwindigkeit v nach Hagen-Poiseuille:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \Theta}{4\eta \cdot x} \qquad (2)$$

mit:
η = Viskosität der Flüssigkeit [Ns/m^2]
σ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit [N/mm]
x = Eindringtiefe [mm]

Eine Integration über die Zeit führt zur bekannten Beziehung der kapillaren Wasseraufnahme - dem Wurzel-Zeitgesetz.

$$x = \sqrt{\frac{\sigma \cdot r \cdot \cos \Theta}{2\eta}} \cdot \sqrt{t} = B \cdot \sqrt{t} \qquad (3)$$

mit:
B = Wassereindringkoeffizient [kg/h$^{1/2}$]

Für die pro Flächeneinheit aufgenommene Wassermenge m_W gilt:

$$m_w = A \cdot \sqrt{t} \qquad (4)$$

mit:

m_W = Flächenbezogene Wasseraufnahmemenge [kg/m^2]
A = Wasseraufnahmekoeffzient [kg/m^{2}h$^{1/2}$]
t = Zeit [h]

Unter Annahme eines konstanten Feuchtigkeitsgehaltes in der feuchten Zone im Verlauf des Saugvorganges gilt der nachfolgende Zusammenhang
mit Ψ_k = Wasserkapazität [m^3/m^3]:

$$B = \frac{A}{\Psi_k \cdot \varphi_w} \qquad (5)$$

Die Koeffizienten A und B werden als spezifische Materialkennwerte in Versuchen ermittelt. Die Gesetzmässigkeiten zum Kapillardruck sind aufgrund von Kapillardruckhysterese bei Be- und Entfeuchtung sowie der Rauhigkeit des Feststoffes wesentlich komplexer als in dieser vereinfachenden Darstellung aufgeführt. Nur durch vereinfachende Annahmen können sie auf reale Materialien mit einem komplexen Porengefüge übertragen werden. Dullien /13/ unterscheidet die Modelle zum Kapillartransport in Geometrische Permeationsmodelle, Statistische Permeationsmodelle und Netzwerkmodelle.

4. Experimentelle Untersuchungen

4.1 Baustoffe und Probekörper

Die Untersuchungen wurden an verschiedenen Betonqualitäten mit Portlandzement als Bindemittel durchgeführt (Tab. 1). Die hergestellten Betone wiesen das gleiche Zementsteinvolumen und die gleiche Konsistenz auf. Der Grösstkorndurchmesser des Zuschlages der verschiedenen Betonmischungen wurde auf 16 mm begrenzt. Aus den unterschiedlichen Betonqualitäten wurden Balken von 100 x 15 x 15 cm in nichtsaugender Holzschalung hergestellt. In einem Zwangsmischer wurde der Zuschlag mit einem Teil des Anmachwassers 10 s vorgemischt und nach Zugabe von Zement und dem restlichen Wassers der Beton 120 s gemischt. Der Beton wurde auf einem Rütteltisch verdichtet, abgezogen und mit einer Holztraufel zugerieben. Die Balken wurden nach 2 Tagen ausgeschalt und - wenn nicht anders vermerkt - bis zum 7. Tag mit nassen Jutesäcken und Folien abgedeckt. Danach lagerten die Balken im Klima 20°C/70 % r.F., bevor sie in Scheiben von 15 x 15 x 3,5 cm geschnitten wurden. Die geschnitteten Probekörper lagerten dann bis zum 90. Tag wiederum im Klima 20°C/70 %r.F..

Mischungs-bezeichnung	w/z-Wert	Zement-gehalt	Wasser-gehalt	Zuschlags-gehalt	Sieblinie	Zusätze
[-]	[-]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[-]	[kg/m³]
NB 1	0,40	400	160	1885	0-4 mm 45% 4-8 mm 20% 8-16 mm 35%	Fliessmittel 1 Gew.-% v. PC
NB2	0,50	350	175	1887	0-4 mm 45% 4-8 mm 20% 8-16 mm 35%	
NB3	0,60	310	186	1892	0-4 mm 45% 4-8 mm 20% 8-16 mm 35%	60 (Quarzmehl)
NB4	0,50	400	200	1744	0-4 mm 50% 4-8 mm 50%	Fliessmittel 2 Gew.-% v. PC
NB5	0,50	300	150	1960	0-4 mm 30% 4-8 mm 20% 8-16 mm 15% 16-32mm 35%	
LB5	0,50	305	152,5	1892	0-4 mm 45% 4-8 mm 20% 8-16 mm 35%	Luftporen-bildner 1 Gew.-% v. PC

Tab. 1: Zusammensetzung der Versuchsbetone

Die Eigenschaften des Frischbetons sind in Tab. 2 angegeben. Aus jeder Mischung wurden 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm und 3 Zylinder mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm hergestellt und entsprechenden Probekörpern gelagert. Die Druckfestigkeit wurde an den Würfeln nach 28 Tagen und an den Zylindern nach 90 Tagen bestimmt (Tab. 3).

Mischungs-bezeichnung	Konsistenz Ausbreitmass	Verdichtungmass	Frischbeton-rohdichte	Luftporengehalt (Luftporentopf)
[-]	[cm]	[-]	[kg/m^3]	[Vol.-%]
NB1	36	1,23	2415	1,7
NB2	36	1,22	2395	1,6
NB3	38	1,16	2371	1,5
NB4	36	1,17	2326	1,9
NB5	38	1,16	2399	1,6
LB5	40	1,18	2340	4,9

Tab. 2: Frischbetoneigenschaften der Versuchsbetone

Mischungs-bezeichnung	Nachbehand-lungsart	Würfeldruckfestigkeit (28 Tage)*)		Zylinderdruckfestigkeit (90 Tage)*)	
		x_m	s	x_m	s
[-]	[-]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]	[N/mm^2]
NB1	B	52.1	1.7	57.4	1.5
NB2	A	35.7	0.6	45.6	0.8
NB2	B	39.1	1.0	48.5	1.2
NB2	C	39.5	0.6	49.2	0.6
NB3	B	31.8	1.0	38.5	0.8
NB4	B	35.8	0.6	44.9	0.6
NB5	B	45.2	0.6	56.3	0.6
LB5	B	35.7	0.8	38.3	0.6

*) Mittelwert aus jeweils 3 Einzelmessungen

Tab. 3: Festbetoneigenschaften der Versuchsbetone

Für die unmittelbare Probenvorbereitung wurden die Proben 2 Tage bei 50°C getrocknet und anschliessend 1 Woche im Klima 20°C/60 % r.F. gelagert. Danach wurden die vertikalen Mantelflächen mit einem zweimaligen Zwei-Komponenten-Epoxidanstrich beschichtet, um einen vorwiegend eindimensionalen Wassertransport zu gewährleisten und eine Verdunstung der wässrigen Lösung zu verhindern. Anschliessend wurden die Proben wiederum für 1 Woche im Klima 20°C/60 % r.F. konditioniert.

4.2 Bestimmung der Porosität und der Porengrössenverteilung

4.2.1 Bestimmung der Porosität durch Wassersättigung unter Atmosphärendruck und unter Vakuum /14/

Durch Wassersättigung der Proben konnte die Wasseraufnahme bei Sättigung der Proben unter atmosphärischen Bedingungen und unter Vakuum bestimmt werden. Aus dem Wassergehalt der Proben in den beiden Sättigungsgraden konnte auf die kapillar füllbare Porosität und die Gesamtporosität geschlossen werden. Die einzelnen Schritte der Versuchsdurchführung sind in Bild 4 dargestellt.

Die Bestimmung der Porosität wurde für die Betonrandzone an der Schalseite und der Abstrichseite, sowie für den Kernbeton durchgeführt. Die Untersuchungen der Porosität der Betonrandzone wurde an Proben mit einer Geometrie von 100 x 35 x 10 mm vorgenommen und die des Kernbetons an Proben mit einer Geometrie von 50 x 50 x 35 mm.

Zeit [Tage]	Behandlung, Lagerung	Messung	Messwerte
1	Im Ofen bei 50°C trocknen	wägen	M_A
2			
3	Im Ofen bei Raumtemperatur abkühlen		
4	Proben halb eingetaucht in Wasser von ca. 20°C, 95% rF.	wägen	M_{50}
5	Wasserlagerung (ca. 20°C)		
6			
7			
8			
9			
10		über und unter Wasser wägen	M_E, V_E
11	Mind. 22 h bei 50°C trocknen. Anschliessend 8 h evakuieren. Unter Vakuum fluten*		
12	Wasserlagerung (Im Evakuierungsgefäss)		
13			
14		über und unter Wasser wägen	M_{tot}, V_{tot}
15	Im Ofen trocknen bei 105°C		
16			
17	Im Exsikkator abkühlen	wägen	M_{105}

* Steiggeschwindigkeit 50 mm in ca. 10 Min.
Notwendiges Probenmaterial: 5 Bohrkerne 50/50 mm

Bild 4: Schema zur Bestimmung der Porosität /14/

Mit Hilfe der ermittelten Probengewichte konnten die folgenden Grössen bestimmt werden:

Volumen der Probe $$V = \frac{M_E - M_E'}{\rho_w} \quad (6)$$

mit: V = Probenvolumen [m^3]
ρ_w = Rohdichte des Wassers [kg/m^3]
M_E = Gewicht des Probekörpers in [kg] nach Sättigung unter Atmosphärendruck, gewogen unter und über Wasser

Trockenrohdichte der Probe $$\rho_{105} = \frac{M_{105}}{V} \quad (7)$$

mit: ρ_{105} = Trockenrohdichte der Probe [kg/m^3]
M_{105} = Trockengewicht der Probe [kg]

Gesamtporosität $$p = \frac{M_V - M_{105}}{\rho_w \cdot V} 100 \quad (8)$$

mit: p = Gesamtporosität [Vol.-%]
M_V = Gewicht der Probe in [kg] nach Vakuumsättigung, gewogen über Wasser

kapillar füllbare Poren $$p_k = \frac{M_E - M_{105}}{\rho_w \cdot V} 100 \quad (9)$$

mit: p_k = kapillar füllbare Porosität [Vol.-%]

nicht füllbare Poren $$p^* = p - p_k \quad (10)$$

mit: p^* = nicht füllbare Porosität [Vol.-%]

Mit dieser Methode konnten quantitative Angaben zur Geamtporosität und zur kapillar füllbaren Porosität gewonnen werden. Aussagen über die Grösse der Poren und die Porenform waren nicht möglich.

4.2.2 Porengrössenverteilung durch Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie ermöglicht neben der Bestimmung der Gesamporosität eine Charakterisierung des Porensystems in Form von Verteilungskurven über einen grösseren Porenbereich.

Die Proben für die Quecksilberdruckporosimetrie wurden aus den Probekörpern im Kernbeton herausgebrochen und wiesen eine Einwaage von 8 - 10 g auf. Die Proben wurden 24 Stunden nach dem D-drying Verfahren getrocknet.

Quecksilber als nicht benetzende Flüssigkeit ($\Theta > 90^\circ$) dringt nur unter einem äusseren Druck in die Poren eines Festkörpers ein. Der aufgebrachte Druck ist dem erfassbaren Porenradius umgekehrt proportional. Unter Voraussetzung einer zylindrischen Pore beschreibt die Washburn-Gleichung diesen Zusammenhang:

$$p = -\frac{2\sigma \cdot \cos\Theta}{r} \qquad (11)$$

Für eine anschauliche Darstellung der Messergebnisse wurden die differentiellen Porenradienverteilungen aus den direkt aufgenommenen integralen Messkurven berechnet.

4.3 Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme über 24 Stunden wurde gravimetrisch als Funktion der Zeit kontinuierlich bestimmt. Die Probekörper wurden 2 mm in Leitungswasser, wenn nicht anders vermerkt, eingetaucht. Vor jedem Messzeitpunkt wurde ein Verdrängungskörper durch einen Hubzylinder aus dem Probebehälter gezogen und das Gewicht über dem Wasserspiegel des Gefässes mit einer Präzisionswaage erfasst. Der Einfluss eines zeitlich veränderlichen Auftriebes ist somit ausgeschlossen. Nach Registrierung des Messwertes wurde der Verdrängungskörper abgesenkt. Der Probekörper stand wiederum in ständigem Kontakt mit dem flüssigen Medium. Der Versuchsaufbau wurde schematisch in Bild 5 dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Messtechnik wurde in /15/ gegeben.

Parallel zu den 24h-Aufsaugversuchen wurden auch Aufsaugversuche über längere Zeiträume unter standardisierten Bedingungen durchgeführt. Die Probekörper wurden 2 mm in die Lösung eingetaucht und vor jedem Wägen mit einem Schwamm abgetupft, bevor das Gewicht registriert wurde.

Die kapillare Wasseraufnahme wurde parallel an drei Probekörpern bestimmt und flächenbezogen angegeben. Dazu wurden die Aufsaugflächen der einzelnen Probekörper ermittelt. Die Aufsauglösungen wurden in regelmässigen Abständen erneuert. Der Aufsaugvorgang wurde über die ungeschliffenen Betonoberflächen durchgeführt, um den inhomogenen Aufbau der äusseren Betonschichten (Segregation) zu berücksichtigen.

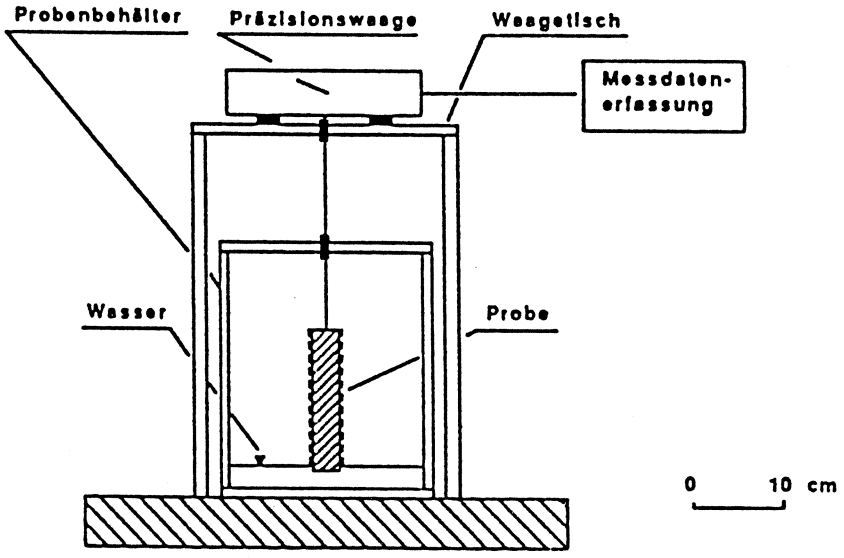

Bild 5: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wasseraufnahme

4.4 Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung

Die Bestimmung der Wassereindringtiefe erfolgte mit Hilfe der zerstörungsfreien Gammastrahlen-Absorptionsspektrometrie, die eine kontinuierliche Messung einer Wasserfront im Beton als Funktion der Zeit ermöglicht. Eine detaillierte Beschreibung der Messtechnik wurde in /15/ gegeben.

Das Messprinzip beruht auf der Absorption von Gammaquanten in Abhängigkeit der Dichte des zu durchstrahlenden Mediums. An feuchten Proben erhöht der Wassergehalt die Absorption der Strahlung. Die Zählrate N, d.h. die Anzahl gemessener Impulse pro Zeiteinheit, ist somit ein Mass für den Wassergehalt der Probe und folgt einem Exponentialgesetz.

$$N = N_0 . \exp(-\mu\, d_w) \qquad (12)$$

mit:

N = Zählrate [-]
N_0 = Zählrate im trockenen Zustand [-]
μ = Absorptionskoeffizient für Wasser, experimentell ermittelt zu 0.20 cm^{-1}
d_w = Wasserschichtdicke [cm]

Die Messanordnung bestand i. w. aus einer 300 mCi Am-241 Punktstrahlerquelle, einem NaJ(Ti)-Szintillationsdetektor und einem Strahlungsmessgerät BERTHOLD LB 2040 sowie Kollimatoren (Bild 6).

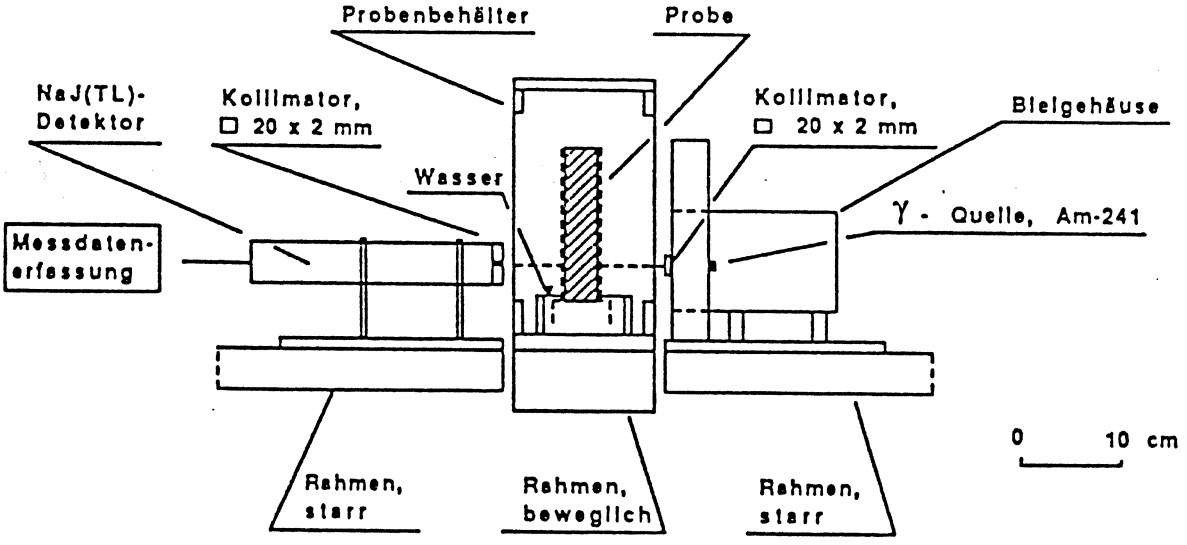

Bild 6: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wassereindringtiefe

Die Auswertung von Aufsaugversuchen durch Gammastrahlen-Absorption basiert auf der verstärkten Absorption in Gegenwart von aufgesogenem Wasser. Das Messvolumen wird durch die Kollimatoren definiert und entspricht einem Quader von 20 x 2 x 35 mm. Der Porenraum im Messvolumen wird von unten zunehmend mit Wasser gefüllt. Die Detektion erfolgt senkrecht zur Aufsaugrichtung und gibt einen mittleren Feuchtigkeitsgehalt an, der in eine absorptionsäquivalente Wasserschicht d_W umgerechnet werden kann.

Die graphische Darstellung der Versuchsergebnisse der Gammatrahlen-Detektion erfolgte in Form von Isochronen. Eine Kurve stellte den Verlauf der Wasserfront dar, d.h. des Wassergehaltes $\Delta w/m_0$ (m_0 = Trockengewicht) in Abhängigkeit vom Abstand von der Oberfläche der Probe nach bestimmten Zeitpunkten dar. Der S-förmige Kurvenverlauf ist für poröse Werkstoffe ein charakteristisches Merkmal und kann durch folgende empirische Funktion beschrieben werden:

$$\frac{\Delta w}{m_0} = C_4 - \frac{C_3}{1 + \left(\frac{1 - x}{1 - C_2}\right)^{C_1}} \qquad (13)$$

mit:	$C_1 \div C_4$	Parameter
	Δw	aufgenommene Wassermenge zum Zeitpunkt t_0 [kg]
	m_0	Trockengewicht der Probe [kg]

Aus dem S-förmigen Kurvenverlauf kann im Uebergangsbereich von feucht zu trocken durch Flächenvergleich, näherungsweise werden die Wendepunkte der Kurven zugrunde gelegt, die mittlere Wassereindringtiefe ermittelt werden (Bild 9).

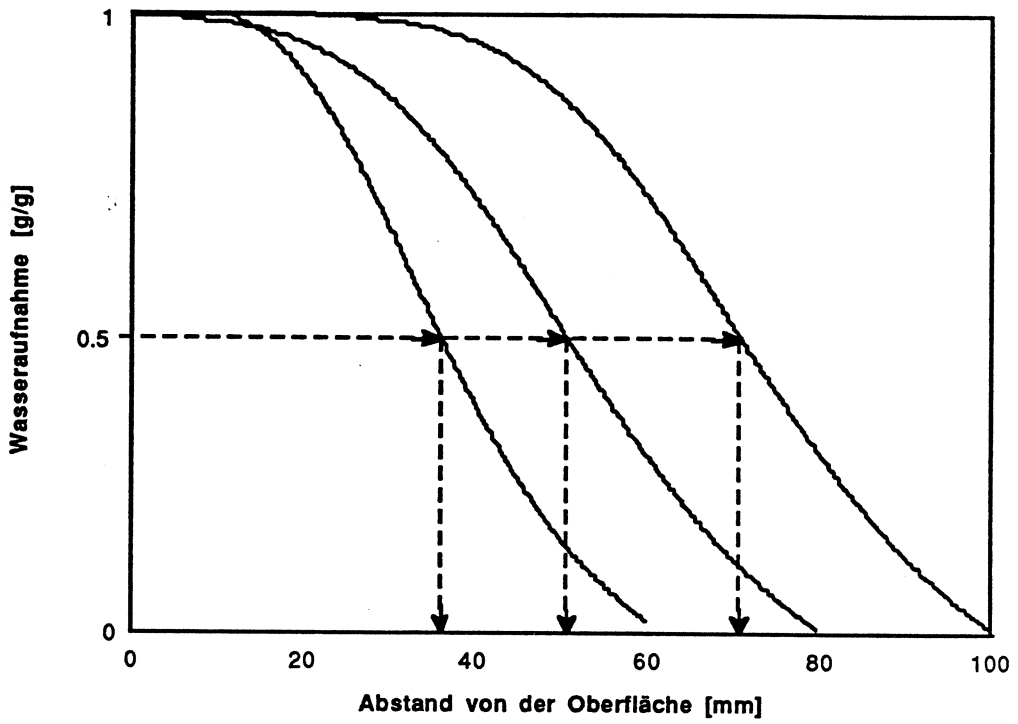

Bild 9: Bestimmung der Wassereindringtiefe

4.5 Bestimmung der Eindringtiefe von Chloridionen

Zur Präparation der Proben für die Chloridbestimmung wurde die Epoxidharzbeschichtung vollständig mechanisch entfernt. Von den Proben wurden jeweils 2 mm senkrecht zur Aufsaugfläche mit einer speziell entwickelten Betonfräse trocken abgefräst. Das Probengut wurde aufgefangen und durch ein Prüfsieb mit einer Maschenweite von 0.09 mm gegeben. Anschliessend wurde das Mehl bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Die Bestimmung des Chloridgehaltes erfolgte durch Direktpotentiometrie nach einer Extraktion mit einer kalten, 11%igen Salpetersäurelösung /16/. Die Aufschlusslösung bestand aus 125 ml Salpetersäure und wurde mit 875 ml bidestilliertem Wasser sowie 1 g Nickelsulfat und 1 ml Aminoxid verdünnt.

Zur Chloridanalyse wurde 1 g Betonmehl mit 50 ml Aufschlusslösung versetzt und 10 min gerührt. Nach Filtration der Suspension durch chloridfreies Weissbandfilter wurde die chloridionenselektive Elektrode in die Analysenlösung getaucht und je nach Chloridionenkonzentration der Lösung nach 1-3 min der Spannungswert am Voltmeter abgelesen. Mit der zuvor erstellten Kalibrierkurve wurde dann die Chloridionenkonzentration der Analysenlösung bestimmt. Mit dem verwendeten Aufschlussverfahren - kalte, 11%ige Salpetersäure - werden etwa 90 % der beim Heissaufschlussverfahren gelösten Chloridverbindungen des Beton in Lösung gebracht.

4.6 Bestimmung der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels

Die Wirksamkeit und die Haltbarkeit von Hydrophobierungen werden wesentlich von der bei der Imprägnierung erzielten Eindringtiefe des Imprägniermittels bestimmt.

Die konditionierten Probekörper (vgl. Kapitel 4.1) wurden mit einem alkalistabilen Silan in 20%iger Verdünnung (Alkohol) imprägniert. Die Imprägnierlösung wurde flutend 3 mal nass in nass aufgetragen (3 x 30 sec) (Tab. 4). Anschliessend wurden die hydrophobierten Proben 4 Wochen zum Ausreagieren im Klima 20°C/60 % r.F. gelagert.

Die Tiefenwirkung des Hydrophobierungsmittels wurde nach der Reaktion der siliziumorganischen Verbindungen durch 2 Verfahren überprüft.

Die Färbemethode ermöglichte eine optische Beurteilung der Imprägniertiefe. In die Probekörper wurde parallel zur Aufsaugrichtung in der Längsachse eine etwa 10 mm tiefe Nut trocken eingesägt. Die Proben wurden gespalten und die Bruchflächen wurden mit Wasser besprüht. Die wasserabweisende Betonrandzone zeichnete sich als heller als die wassersaugende Zone ab. Dieser Effekt konnte durch die Verwendung von gefärbten Wasser optisch verstärkt werden. Die sich abzeichnende Imprägniertiefe wurde mit einer Tiefenmesslehre bestimmt.

Ein quantitativer Aufschluss über die erzielte Tiefenwirkung des verwendeten Hydrophobierungsmittels und über das daraus resultierende Aufsaugverhalten konnte durch Aufsaugtests gegeben werden. Die kapillare Wasseraufnahme der hydrophobierten Proben wurde über 24 h gravimetrisch bestimmt (vgl. Kapitel 4.3).

Nach einem 24h-Aufsaugtest wurde von den Proben senkrecht zur Aufrichtung 1 mm trocken abgefräst. Die Proben wurden anschliessend für einige Tage im Klima 20°C gelagert, ehe sie einem zweiten 24h-Aufsaugversuch ausgesetzt wurden. Der Versuch wurde solange wiederholt, bis sich das Aufsaugverhalten der hydrophobierten Proben dem nicht hydrophobierter Proben angepasst hatte.

Mischungs-bezeichnung	Oberflächen-beschaffenheit	Imprägniermittelaufnahme *) Tauchzeit 3*30 sec	
		x_m	s
[-]	[-]	[g/m²]	[g/m²]
NB1	Schalseite	142	10.7
NB2	Schalseite	183	18.4
NB2	Abstrichseite	239	23.2

*) Mittelwert aus jeweils 15 Einzelmessungen

Tab. 4: Aufnahmemengen des Hydrophobierungsmittels nach 3 Tränkungen

4.7 Bestimmung der Realkalisierung

Die Untersuchungen zur Realkalisierung wurden in 2 Etappen durchgeführt. An im Labor hergestellten und künstlich karbonatisierten Proben wurden die Möglichkeiten einer Realkalisierung untersucht. Bohrkerne aus einem Brückenpfeiler sollten Aufschluss über die Anwendbarkeit in der Praxis und das Langzeitverhalten einer Realkalisierung geben.

Für die Laborversuche wurde ein Beton mit einer hohen Porosität hergestellt (w/z 0.60 und d_{max}= 8 mm) und in Schalungen von 20 x 10 x 5 cm eingebracht (Tab. 5). Nach 1 Tag wurden die Proben entschalt, bis zum 2. Tag unter Wasser gelagert und anschliessend bis zum 14. Tag im Klima 20°C/70 % r.F. konditioniert. Die Mantelflächen der Proben wurden mit einem Epoxidharz beschichtet.

Die Probekörper wurden danach in einer Atmosphäre von ca. 7 % CO_2 im Raumklima (20°C/50 % r. F.) künstlich karbonatisiert, bis die Dicke der karbonatisierten Schicht ca. 10 mm erreicht hatte. Der Untergrundbeton wurde in einem Fall gesättigt, bevor verschieden zusammengesetzte Reparaturmörtel in einer Dicke von 1 cm auf die karbonatisierten Probekörper aufgebracht wurden (Tab. 5):

Serie I	Zementmörtel
Serie II	Zement-Kalkmörtel
Serie III	Kalkmörtel

Mischungs-bezeichnung	w/z-Wert	Zement-gehalt	Kalk-gehalt	Wasser-gehalt	Zuschlag-gehalt	Sieblinie
[-]	[-]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[-]
UB1	0.60	400	-	240	1600	0-4 mm 50% 4-8 mm 50%
RM1	0.60	550	-	330	1230	0-4 mm
RM2	0.60	300	250	330	1230	0-4 mm
RM3	0.60	150	400	330	1230	0-4 mm

Tab. 5: Zusammensetzung des Laborbetons für die Realkalisierungsversuche und der Reparaturmörtel

Probekörper jeder Serie wurden jeweils unter Wasser und im Klima 20°C/70 % r.F. gelagert. Zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe wurden die Proben gespalten und die Bruchflächen mit einer 1%igen Phenolphthlein-Lösung besprüht. Nach einer Standzeit von 24 Stunden wurde an 11 Stellen die Tiefe gemessen und als Messergebnis der Mittelwert und der Maximalwert angegeben . Die Bohrungen für die Entnahme der Bohrkerne, d = 60 mm, wurden im Bereich der grössten zu erwartenden Karbonatisierungstiefen gemäss Potentialfeldmessungen vorgenommen. Die Karbonatisierungstiefe der einzelnen Bohrkerne wurde durch den Phenolphthalein-Test bestimmt (Tab. 6).

Bohrkern Nr.	Karbonatisierungstiefe d_c*)		Bemerkungen
	x_m	s	
[-]	[mm]	[mm]	[-]
1	5.5	2.0	
2	7.0	3.1	offene Poren
3	5.5	0.5	
4	4.1	0.8	offene Poren
5	8.2	2.1	
6	12.3	3.5	offene Poren
7	4.5	1.0	
8	5.6	4.2	Kiesnest
9	6.5	2.9	
10	11.8	3.5	
11	8.3	1.3	
12	4.5	2.5	
Maximalwert	12.3		
x_m	7.0		
s	2.7		

*) Mittelwert aus jeweils 3 Einzelmessungen

Tab. 6: Ergebnis zur Messung der Karbonatisierungstiefe an einem Pfeilerbeton

Zur Probenvorbereitung wurden die Mantelflächen der Proben mit einem Epoxidharzkleber und einer Kupferfolie beschichtet. Die Oberfläche der Proben wurde anschliessend über 2 Tage bei 50°C getrocknet. Danach wurde ein Zementmörtel (Tab. 7) in einer Dicke von 2 cm ohne Verwendung einer Haftbrücke aufgebracht. Die Proben wurden nach 1 Tag ausgeschalt und wie folgt konditioniert:

Serie I	in ein Wasserbad gestellt
Serie II	unter feuchten Tüchern

Mischungs-bezeichnung	w/z-Wert	Zement-gehalt	Wasser-gehalt	Zuschlags-gehalt	Sieblinie
[-]	[-]	[kg/m3]	[kg/m3]	[kg/m3]	[-]
R 4	0.50	500	250	150	0-0.25mm 21% 0.25-0.50mm 11% 0.50-1.0 mm 37% 1.0-2.0 mm 31%

Tab. 7: Zusammensetzung des Reparaturmörtels für den Pfeilerbeton

Nach erfolgter Realkalisierung wurde eine Ueberprüfung des Langzeitverhaltens der realkalisierten Proben, d.h. der Rekarbonatisierung, vorgenommen. Die Proben der Serie I und II wurden dabei wie folgt behandelt:

Serie III	Reparaturmörtel abgeschlagen
Serie IV	Proben mit Reparaturmörtel belassen
Serie V	Reparaturmörtel abgeschlagen und Karbonatisierungsbremse aufgebracht verbrauchte Menge: 0,4 kg/m2

Die Proben wurden im Klima 20°C/60 % r.F. gelagert und nach bestimmten Zeitabständen wurde die Karbonatisierungstiefe mittels Phenolphthalein-Test bestimmt. Aufgrund der geringen Anzahl an Bohrkernen wurden jeweils Stücke aus den Proben trocken abgesägt und die Schnittflächen mit einer 1%ige Phenolphthaleinlösung besprüht. Nach einer 24stündigen Standzeit wurde an 4 Stellen die Tiefe gemessen und als Messergebnis der Mittelwert und der Maximalwert registriert. Anschliessend wurden die Schnittflächen mit einem Epoxidharz beschichtet und im Kontionierungsklima gelagert.

5. Versuchsergebnisse

5.1 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von betontechnologischen Parametern

5.1.1 Einfluss der Betonzusammensetzung

Der Einfluss der folgenden Parameter der Betonzusammensetzung wurde untersucht:

- w/z-Wert
- Zementgehalt
- Grösstkorn des Zuschlages
- Luftporengehalt

Auf den Einfluss der aus verarbeitungstechnischen Gründen erforderlichen mischungsabhängigen Quarzmehlzugabe wurde nicht weiter eingegangen.

Die Bedingung eines gleichen Zementsteinvolumens und einer vergleichbaren Verarbeitbarkeit für alle Betonmischungen führte dazu, dass einzelne Parameter gleichzeitig variiert wurden. Eine Erhöhung des w/z-Wertes bzw. des Luftporengehaltes war mit einer Abnahme des Zementgehaltes verbunden. Die Versuchsergebnisse gaben somit die gemeinsame Wirkung der Einflussgrössen wieder. Für die Betonmischungen NB2, NB3 und NB4 mit einem unterschiedlichen Zementsteinvolumen wurde eine Korrektur vorgenommen, um einen Vergleich der einzelnen Betonqualitäten durchführen zu können.

Neben dem Einfluss der Betonzusammensetzung auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport wurde bei einigen Versuchen der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit an folgenden Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS, m.)
- Schalseite, ohne Schalöl (SS,o.)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden wurden jeweils für die einzelnen Parameter die Versuchsergebnisse zur Porosität und Porengrössenverteilung, zur kapillaren Wasseraufnahme und zur Eindringtiefe dargestellt.

Einfluss des w/z-Wertes auf die Porosität und die Porengrössenverteilung (Tab. 8 und Bild 10)

Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 bzw. 0,60 führte zu einer Zunahme der durch Wasserlagerung unter Atmosphärendruck füllbaren Porosität im Kernbeton von 11,8 Vol.-% auf 13,5 Vol.-% bzw. 14,4. Vol.-% und der durch Wasserlagerung im Vakuum ermittelten Gesamtporosität von 13,0 Vol.-% auf 14,5 Vol.-% bzw. 16,2 Vol.-%. Die füllbare Porosität und die Gesamtporosität der Abstrichseite waren bei allen untersuchten w/z-Werten um etwa 10 % grösser und die Porositäten der Schalseite um etwa 5 % grösser gegenüber den Porositäten des Kernbetons. Mit zunehmendem w/z-Wert konnte in der Porengrössenverteilung eine Verschiebung zu grösseren Poren mit einem Durchmesser von 0,4 µm sowie eine Erhöhung des dortigen Maximums beobachtet werden.

Misch.-bezeich.	Nachbe.-art	Schalseite *)				Abstrichseite *)				Kernbeton*)			
		p_k		p		p_k		p		p_k		p	
		x_m	s	x_m	s	x_m	s	x_m	s	x_m	s	x_m	s
[-]	[-]	[Vol.-%]				[Vol.-%]				[Vol.-%]			
NB1	B	12,4	0,3	13,5	0,5	13,0	0,4	14,5	0,3	11,8	0,2	13,0	0,4
NB2	A	14,9	0,8	14,4	1,0	15,8	1,0	17,9	0,8	17,9	0,8	14,4	0,6
NB2	B	13,9	0,4	15,1	0,5	14,2	0,4	15,7	0,4	13,5	0,4	14,5	0,7
NB2	C	12,7	0,7	14,3	0,6	13,5	0,4	14,9	0,5	14,0	0,6	15,1	0,6
NB3	B	15,0	0,4	16,4	0,4	16,1	0,6	18,1	0,8	14,4	0,5	16,2	0,2
NB4	B	15,0	0,3	16,7	0,8	15,4	0,4	18,2	0,4	14,9	0,2	17,1	0,6
NB5	B	13,1	0,8	14,6	0,6	15,1	1,0	17,9	0,8	12,3	0,5	13,3	0,4
LB5	B	11,9	0,8	15,7	0,7	11,3	0,4	17,0	1,0	10,4	0,3	14,3	0,3

p_k = füllbare Porosität unter Atmosphärendruck p = Gesamtporosität

*) Mittelwert aus jeweils 3 Einzelmessungen

Tab. 9: Ergebnisse zur Porositätsmessung

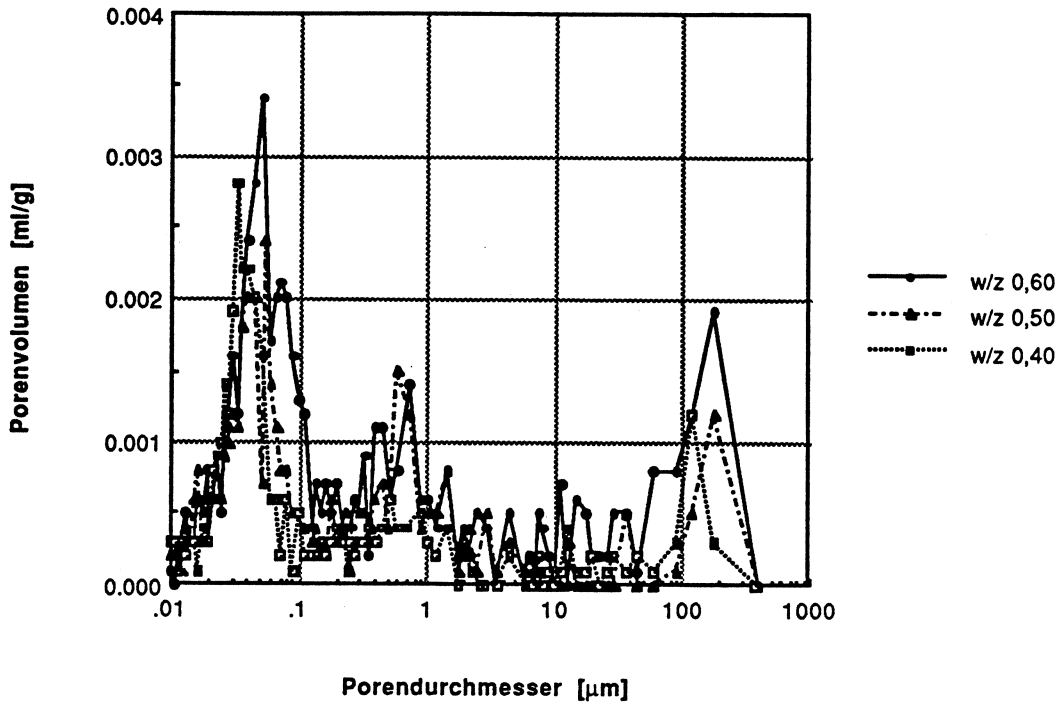

Bild 10: Porengrössenverteilung für verscheidene Betonqualitäten

Einfluss des w/z-Wertes auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 11 - Bild 12)

Der Einfluss des w/z-Wertes auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 bzw. 0,60 führte zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w24} von 0.098 g/cm^2 auf 0.226 g/cm^2 bzw. 0.297 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite war bei den untersuchten w/z-Werten nach 24 Stunden um 21 - 45 % grösser als die kapillare Wasseraufnahme der Schalungsseite. Die Schalseiten ohne Schalöl nahmen unwesentlich mehr Wasser auf als die entsprechenden Schalungsseiten mit Schalöl. Die Unterschiede der einzelnen Werte lagen im Bereich der Streubreite s = 0.005 - 0.008 g/cm^2). Die Werte der Abstrichseite wiesen bei allen untersuchten w/z-Werten höhere Standardabweichungen (s = 0.021 - 0.052 kg/cm^2) auf als die Werte der Schalseite.

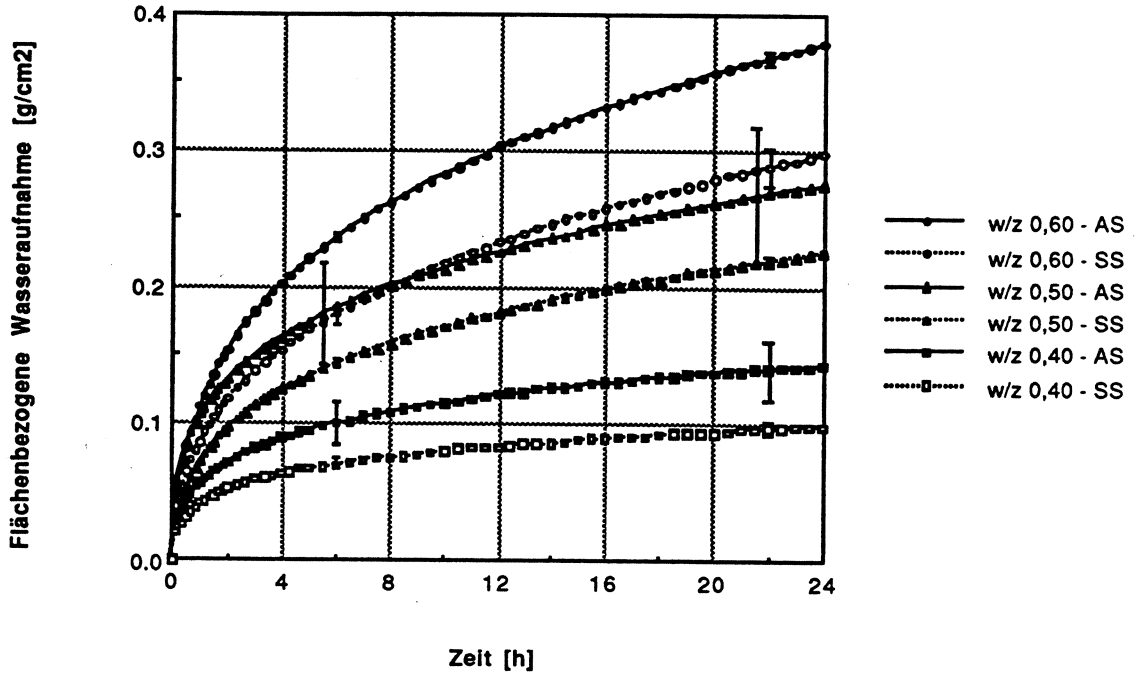

Bild 11: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

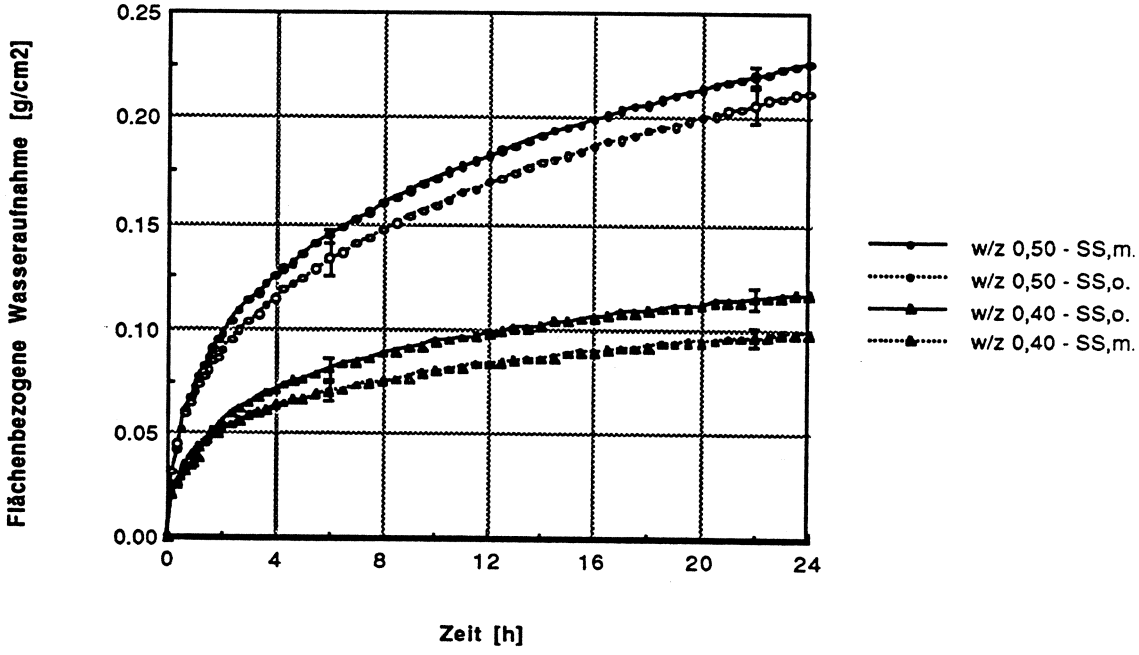

Bild 12: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberfläche der Schalseite

Einfluss des w/z-Wertes auf den Wasseraufnahmekoeffizienten A (Bild 13)

Der Einfluss des w/z-Wertes auf den Wasseraufnahmekoeffizienten A wird durch die Auftragung der kapillaren Wasseraufnahme als Funktion der Zeit im Wurzelmassstab dargestellt. In der graphischen Darstellung ist der Wasseraufnahmekoeffizient die Steigung der Geraden. Für alle untersuchten Betonqualitäten stellt der Wasseraufnahmekoeffizient A keine geeignete Werkstoffkenngrösse dar, um die kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit der Zeit zu beschreiben. Im folgenden wird deshalb auf eine weitere Betrachtung des Wasseraufnahmekoeffzienten verzichtet.

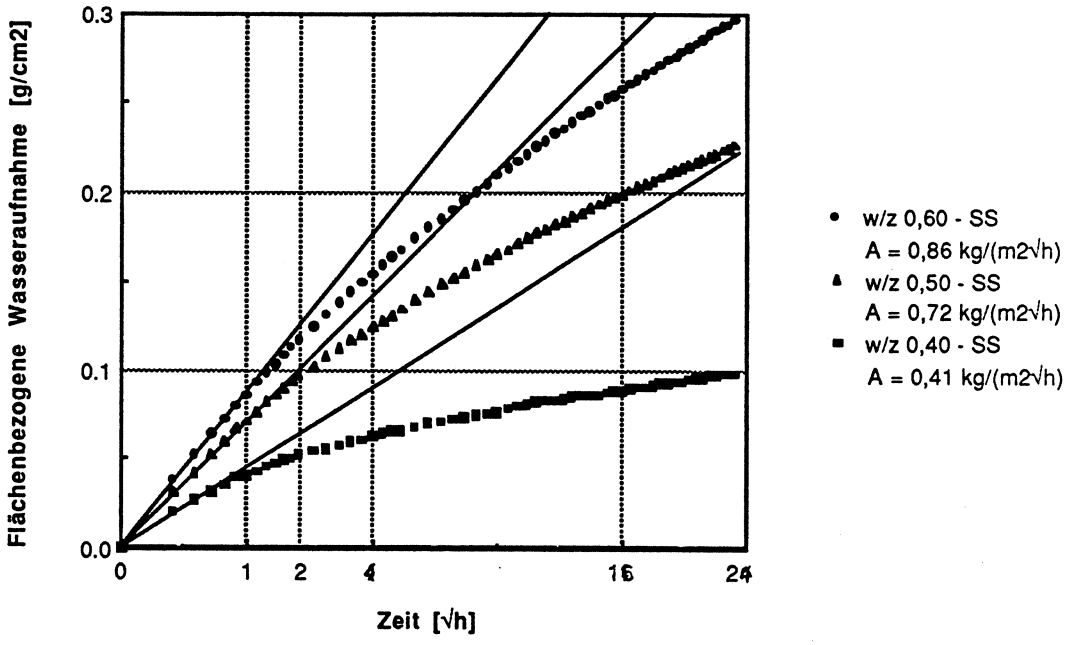

Bild 13: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit (Wurzelmassstab)

Einfluss des w/z-Wertes auf die Eindringtiefe (Tab. A10)

Der Einfluss des w/z-Wertes auf die Eindringtiefe wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 bzw. 0,60 führte zu einer Zunahme der Eindringtiefe x_{24} von 25 mm auf 31 mm bzw. 40 mm. Die Eindringtiefe bei Aufsaugversuchen über die Abstrichseite war bei allen untersuchten w/z-Werten nach 24 Stunden um 5-10 % grösser als über die Schalseite.

Mischungs-bezeichnung	w/z-Wert	Nachbehand-lungsart	Eindringtiefe x_{24} Schalseite	Abstrichseite
[-]	[-]	[-]	[mm]	
NB1	0,40	B	25	26
NB2	0,50	A	49	58
NB2	0,50	B	31	35
NB2	0,50	C	32	34
NB3	0,60	B	40	43
NB4	0,50	B	46	49
NB5	0,50	B	32	34
LB5	0,50	B	19	22

Tab. 10: Ergebnisse zur Messung der Wassereindringtiefe nach 24 Stunden

Einfluss des w/z-Wertes auf den Wassereindringkoeffzienten B (Bild 14)

Der Einfluss des w/z-Wertes auf den Wasseraufnahmekoeffizienten B wird durch die Auftragung der mittleren Eindringtiefen als Funktion der Zeit im Wurzelmassstab dargestellt. In der graphischen Darstellung ist der Wassereindringkoeffzient die Steigung der Geraden. Für alle untersuchten Betonqualitäten stellt der Wassereindringkoeffizient B keine geeignete Werkstoffkenngrösse dar., um die Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme zu beschreiben. Im folgenden wird deshalb auf eine weitere Betrachtung des Wassereindringkoeffzienten verzichtet.

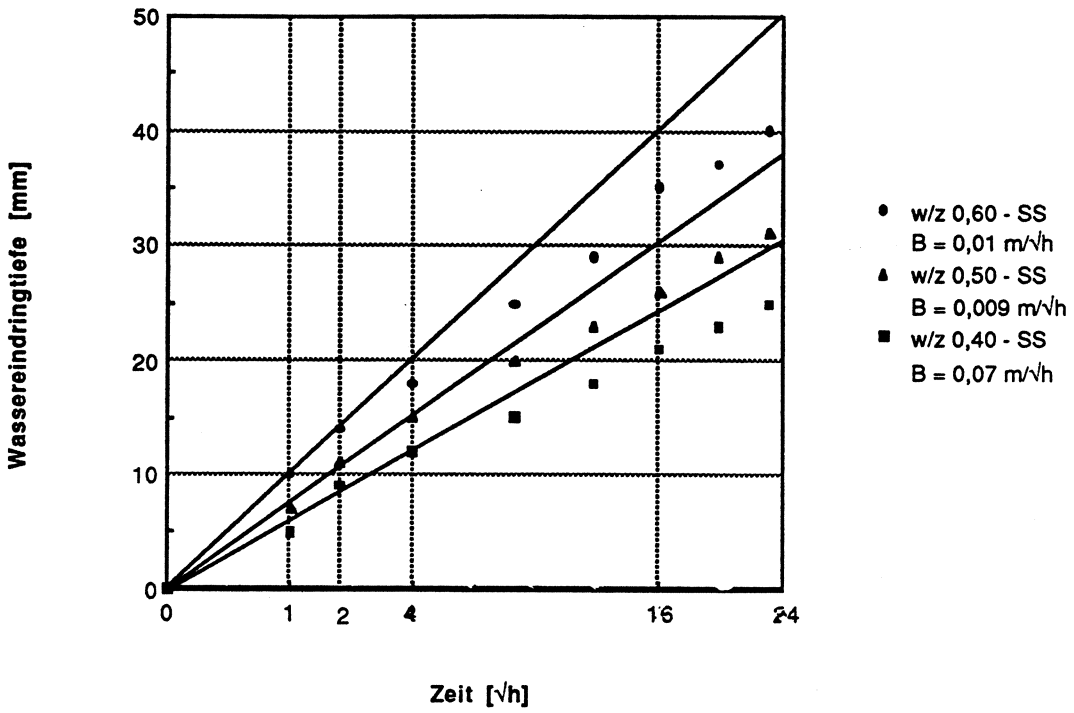

Bild 14: Eindringtiefe in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit (Wurzelmassstab)

Einfluss des Grösstkornes vom Zuschlag auf die Porosität (Tab. 9)

Eine Erhöhung des Grösstkornes vom Zuschlag von 8 mm auf 16 mm bzw. 32 mm bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50 führte zu einer Abnahme der durch Wasserlagerung unter Atmosphärendruck füllbaren Porosität des Kernbetons von 14.9 Vol.-% auf 13.5 Vol.-% bzw. 12.3 Vol.-% und der durch Wasserlagerung im Vakuum ermittelten Gesamtporosität von 17.1 Vol.-% auf 14.5 Vol.-% bzw. 13.3 Vol.-%. Die füllbare Porosität und die Gesamtporosität der Abstrichseite waren bei allen untersuchten Grösstkorndurchmessern um etwa 4 % grösser und die Porositäten der Schalseite um etwa 6 % grösser gegenüber den Porositäten des Kernbetons.

Einfluss des Grösstkornes vom Zuschlag auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 15)

Der Einfluss des Grösstkornes vom Zuschlag auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des Grösstkornes von 8 mm auf 16 mm bzw. 32 mm führte zu einer Abnahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w24} von 0.271 g/cm^2 auf 0.226 g/cm^2 bzw. 0.219 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite war bei den untersuchten Grösstkorndurchmessern nach 24 Stunden um 5 - 21 % grösser als die kapillare Wasseraufnahme der Schalseite. Die Werte der Abstrichseite und der Schalseite lagen bei einem Grösstkorndurchmesser von 8 mm im Bereich der Streubreite.

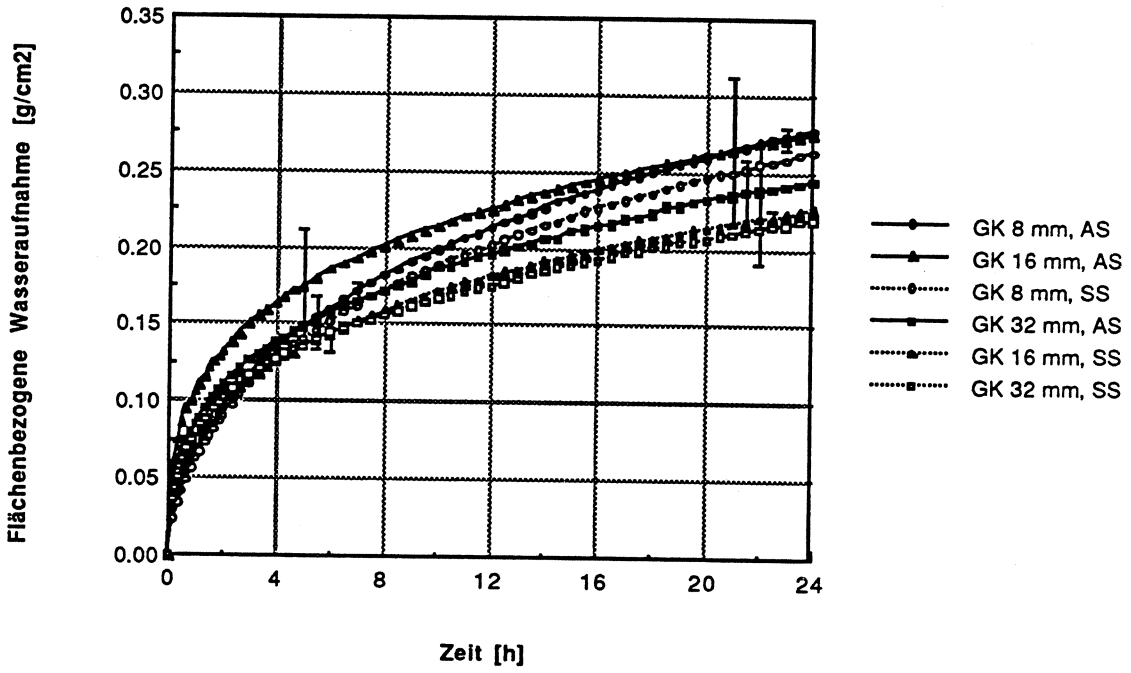

Bild 15: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert und dem Grösstkorn des Zuschlages

Einfluss des Grösstkornes vom Zuschlag auf die Eindringtiefe (Tab. 10)

Der Einfluss des Grösstkornes vom Zuschlag auf die Eindringtiefe wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des Grösstkornes von 8 mm auf 16 mm, bzw. 32 mm führte zu einer Abnahme der Eindringtiefe x_{24}

von 38 mm auf 31 mm bzw. 32 mm. Die Eindringtiefe bei Aufsaugversuchen über die Abstrichseite war bei allen untersuchten Grösstkorndurchmessern nach 24 Stunden um 5-10 % grösser als über die Schalseite.

Einfluss des Luftporengehaltes auf die Porosität und die Porengrössenverteilung (Tab. 9 und Bild 16)

Eine Erhöhung des Luftporengehaltes von 2 Vol.-% Verdichtungsporen auf 5 Vol.-% Verdichtungs- und künstlich eingeführter Luftporen bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50 führte zu einer Abnahme der durch Wasserlagerung unter Atmosphärendruck füllbaren Porosität des Kernbetons von 13.5 Vol.-% auf 10.4 Vol.-% und der durch Wasserlagerung im Vakuum ermittelten Gesamtporosität von 14.5 Vol.-% auf 14.3 Vol.-%. Die füllbare Porosität und die Gesamtporosität der Abstrichseite waren mit zunehmendem Luftporengehalt um etwa 3 % grösser und die Porositäten der Schalseite um 5 % grösser gegenüber den Porositäten des Kernbetons. Mit zunehmendem Luftporengehalt konnte in der Porengrössenverteilung eine Verschiebung zu grösseren Poren mit einem Durchmesser von 100 µm sowie eine Erhöhung des dortigen Maximums beobachtet werden.

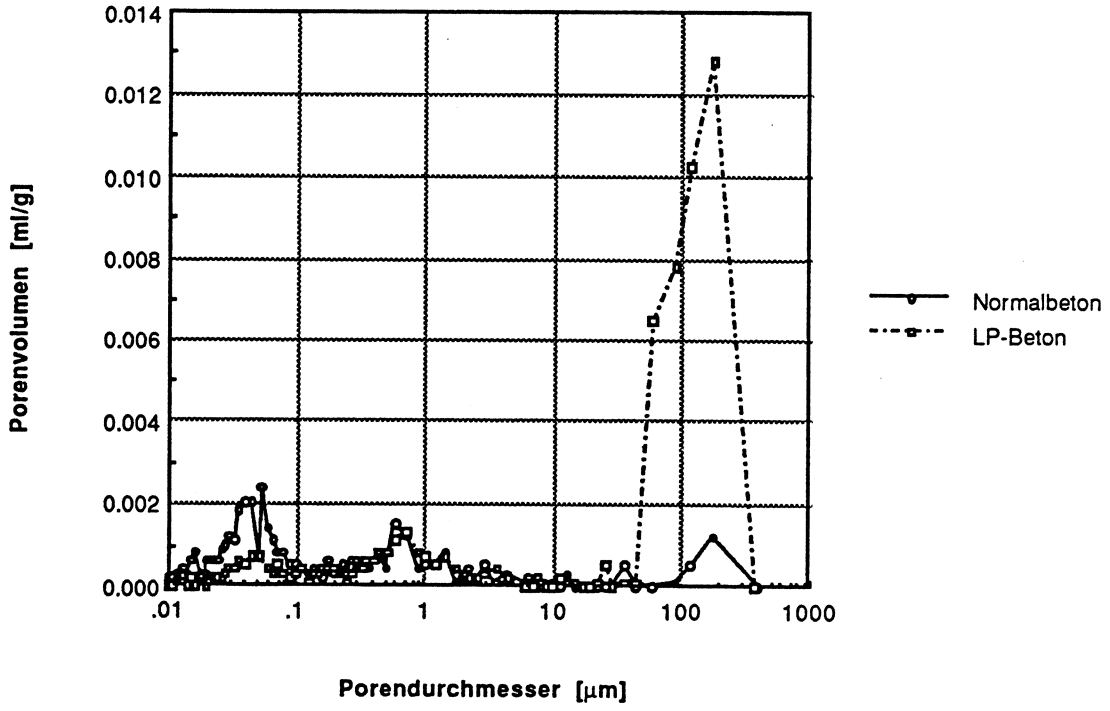

Bild 16: Porengrössenverteilung für einen Normalbeton und einen Luftporenbeton

Einfluss des Luftporengehaltes auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 17)

Der Einfluss des Luftporengehaltes auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des Luftporengehaltes von 2 Vol.-% Verdichtungsporen auf 5 Vol.-% Verdichtungs- und künstlich eingeführte Luftporen bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50 führte zu einer Abnahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w24} von 0.226 g/cm^2 auf 0.116 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite war bei den untersuchten Luftporengehalten nach 24 Stunden um 21 - 30 % grösser als die kapillare Wasseraufnahme der Schalseite.

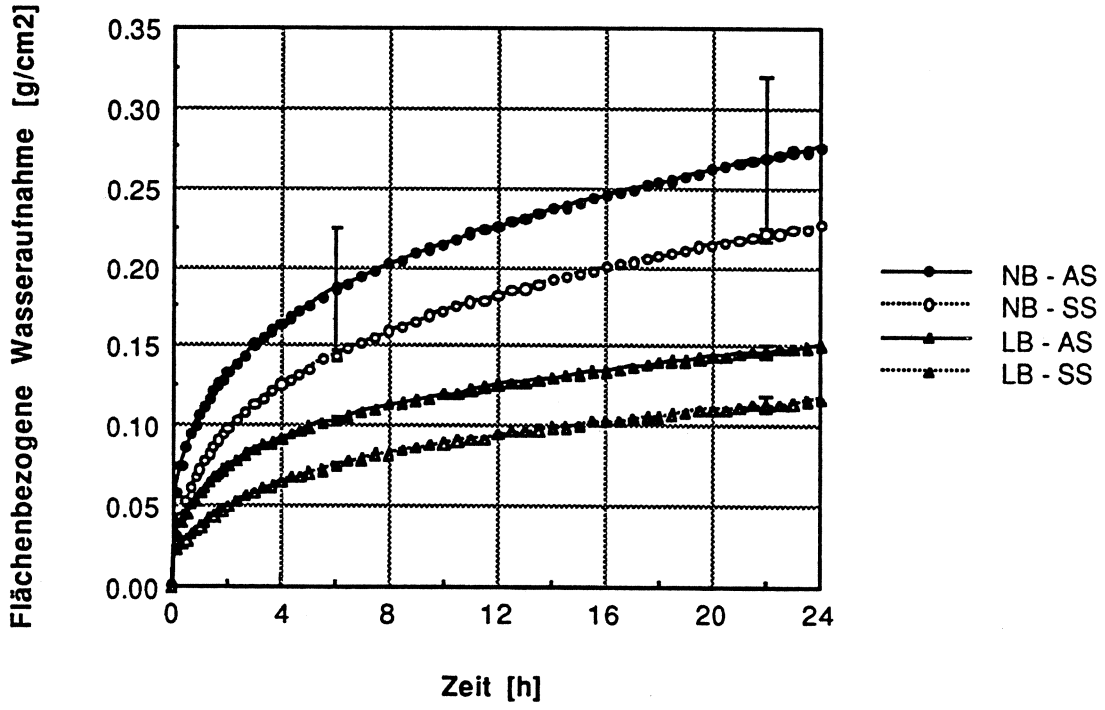

Bild 17: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom Luftporengehalt und der Oberflächenbeschaffenheit

Einfluss des Luftporengehaltes auf die Eindringtiefe (Tab. 10)

Der Einfluss des Luftporengehaltes auf die Eindringtiefe wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Erhöhung des Luftporengehaltes von 2 Vol.-% Verdichtungsporen auf 5 Vol.-% Verdichtungs- und künstlich eingeführte Luftporen bei einem konstanten w/z-Wert von 0,50 führte zu einer Abnahme der Eindringtiefe x_{24} von 31 mm auf 19 mm. Die Eindringtiefe bei Aufsaugversuchen über die Abstrichseite war bei allen untersuchten Luftporengehalten nach 24 Stunden um 5 % grösser als über die Schalseite.

5.1.2 Einfluss der Nachbehandlung

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von der Ausführung einer Nachbehandlung wurde an einem Beton mit einem konstanten w/z-Wert von 0,50 untersucht. Dabei wurden die folgenden Nachbehandlungsarten variiert:

A: nach 2 Tagen ausgeschalt
keine weitere Nachbehandlung
Lagerung im Klima 20°C/70 % r.F.

B: nach 2 Tagen ausgeschalt
bis zum 7. Tag unter feuchten Tüchern und Folie
Lagerung im Klima 20°C/70 % r.F.

C: nach 2 Tagen ausgeschalt
bis zum 14.Tag unter Wasser
Lagerung im Klima 20°C/70 % r.F.

Neben dem Einfluss der Nachbehandlung auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport wurde der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit an folgenden Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden wurden jeweils für die einzelnen Nachbehandlungsarten die Versuchsergebnisse zur Porosität und Porengrössenverteilung, zur kapillaren Wasseraufnahme und zur Eindringtiefe dargestellt.

Einfluss der Nachbehandlung auf die Porosität und Porengrössenverteilung (Tab. 9 und Bild 18)

Eine Veränderung der Nachbehandlungsart von A auf B bzw. C führte zu einer Abnahme der durch Wasserlagerung unter Atmosphärendruck füllbaren Porosität der Schalseite von 14.9 Vol.-% auf 13.9 Vol.-% bzw. 12.7. Vol.-% und der durch Wasserlagerung im Vakuum ermittelten Gesamtporosität von 16.4 Vol.-% auf 15.1 Vol.-% bzw. 14.3 Vol.-%. Die füllbare Porosität und die Gesamtporosität der Abstrichseite waren um etwa 3-14 % grösser als die Porositäten des Kernbetons. Die Porositäten des Kernbetons waren bei allen untersuchten Nachbehandlungsarten annähernd gleich. Die Veränderung der Nachbehandlungsart führte zu keiner signifikanten Veränderung in der Porengrössenverteilung .

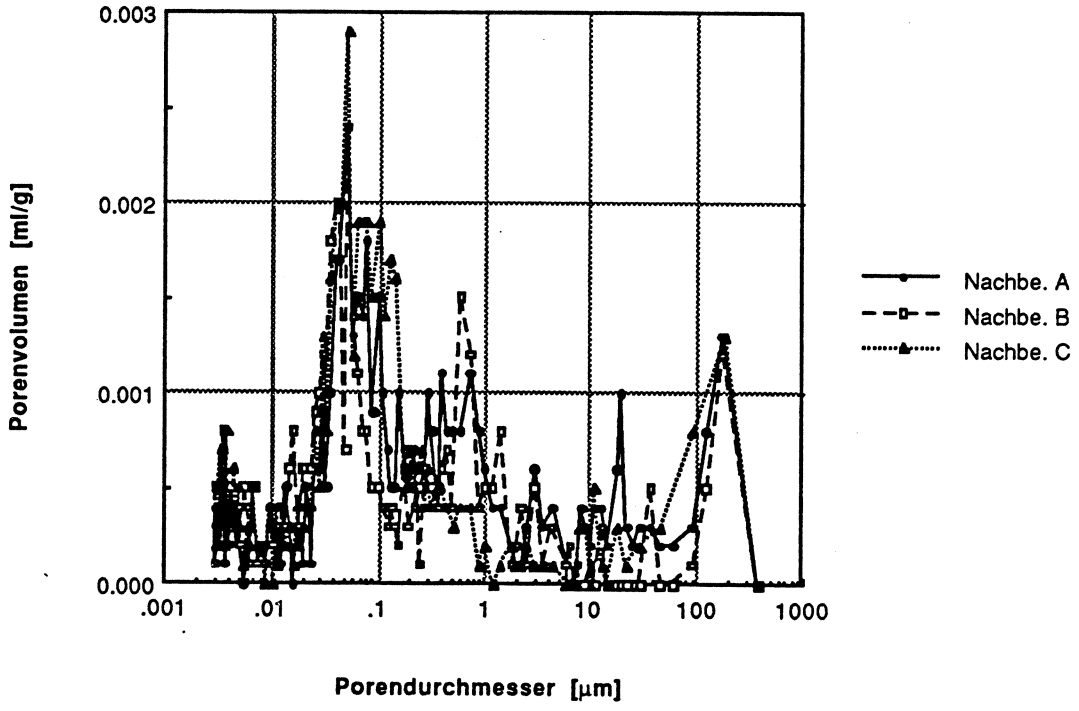

Bild 18: Porengrössenverteilung für einen Normalbeton bei verschiedenen Nachbehandlungsarten

Einfluss der Nachbehandlung auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 19)

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Veränderung der Nachbehandlungsart von A auf B bzw. C führte zu einer Abnahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w24} von 0.376 g/cm^2 auf 0.226 g/cm^2 bzw. 0.256 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme mit der Nachbehandlungsart B war geringer als mit der Nachbehandlungsart C. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite war bei den untersuchten Nachbehandlungsarten nach 24 Stunden um 7 - 23 % grösser als die kapillare Wasseraufnahme der Schalseite. Bei der Nachbehandlungsart C waren die Werte zwischen der Schal- und der Abstrichseite im Bereich der Streubreite.

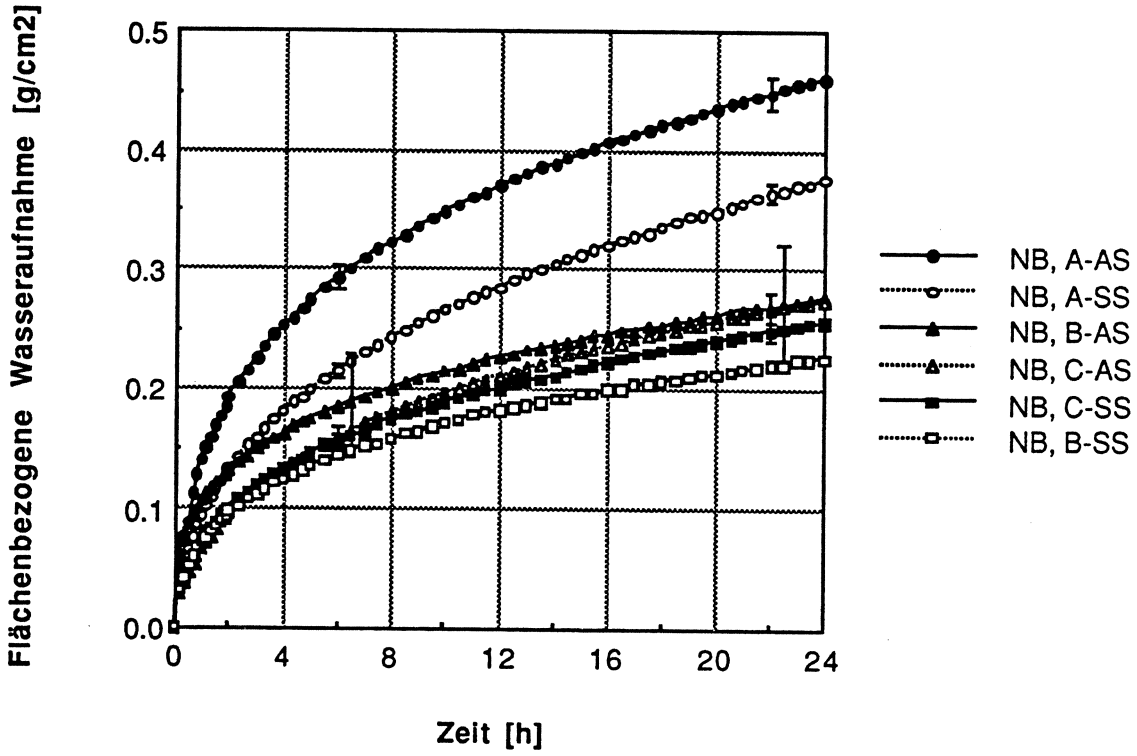

Bild 19: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Art der Nachbehandlung und der Oberflächenbeschaffenheit

Einfluss der Nachbehandlung auf die Eindringtiefe (Tab. 10)

Der Einfluss der Nachbehandlung auf die Eindringtiefe wurde mit Aufsaugversuchen über 24 Stunden untersucht. Eine Veränderung der Nachbehandlungsart von A auf B bzw. C führte zu einer Abnahme der Eindringtiefe x_{24} von 49 mm auf 31 mm bzw. 32 mm. Die Eindringtiefe bei Aufsaugversuchen über die Abstrichseite war bei allen untersuchten Nachbehandlungsarten nach 24 Stunden um 5-10 % grösser als über die Schalseite.

5.2 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen

5.2.1 Einfluss eines Konstant- und Wechselklimas

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von praxisnahen klimatischen Bedingungen wurde an verschiedenen Betonqualitäten mit w/z-Werten von 0,40 und 0,50 untersucht. Dabei wurden die folgenden Klimata variiert:

A: Konstantklima
Aufsaugen bis zum 28.Tag

B: Wechselklima (Kurzzeitzyklus)
6 Stunden Aufsaugen
18 Stunden Trocknen bei 20°C/60 % r.F

C: Wechselklima (Langzeitzyklus)
1 Tag Aufsaugen
6 Tage Trocknen bei 20°C/60 % r.F.

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport wurde an einem Beton mit dem w/z-Wert von 0,50 für folgende Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden werden jeweils für die einzelnen Klimata die Versuchsergebnisse zur Befeuchtung infolge kapillarer Wasseraufnahme und ggf. Entfeuchtung durch Trocknung dargestellt.

Einfluss eines Konstantklimas auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 20)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen über 28 Tage untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w28} von 0.267 g/cm^2 auf 0.681 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite war für die untersuchten w/z-Werte nach 28 Tagen um 3 - 10 % grösser als die kapillare Wasseraufnahme der Schalseite. Die Werte beim w/z-Wert von 0,50 wiesen sowohl für die Schalseite als auch für die Abstrichseite höhere Standardabweichungen (s = 0,067 - 0.079 g/cm^2) auf als die Werte für den w/z-Wert von 0,40. Die kapillare Wasseraufnahme der untersuchten Betone nach 28 Tagen war bei den Schalseiten um den Faktor 2,7 bzw. 3,0 grösser und bei den Abstrichseiten um den Faktor 1,9 bzw. 2,7 grösser gegenüber der kapillaren Wasseraufnahme der entsprechenden Betonqualitäten nach 24 Stunden.

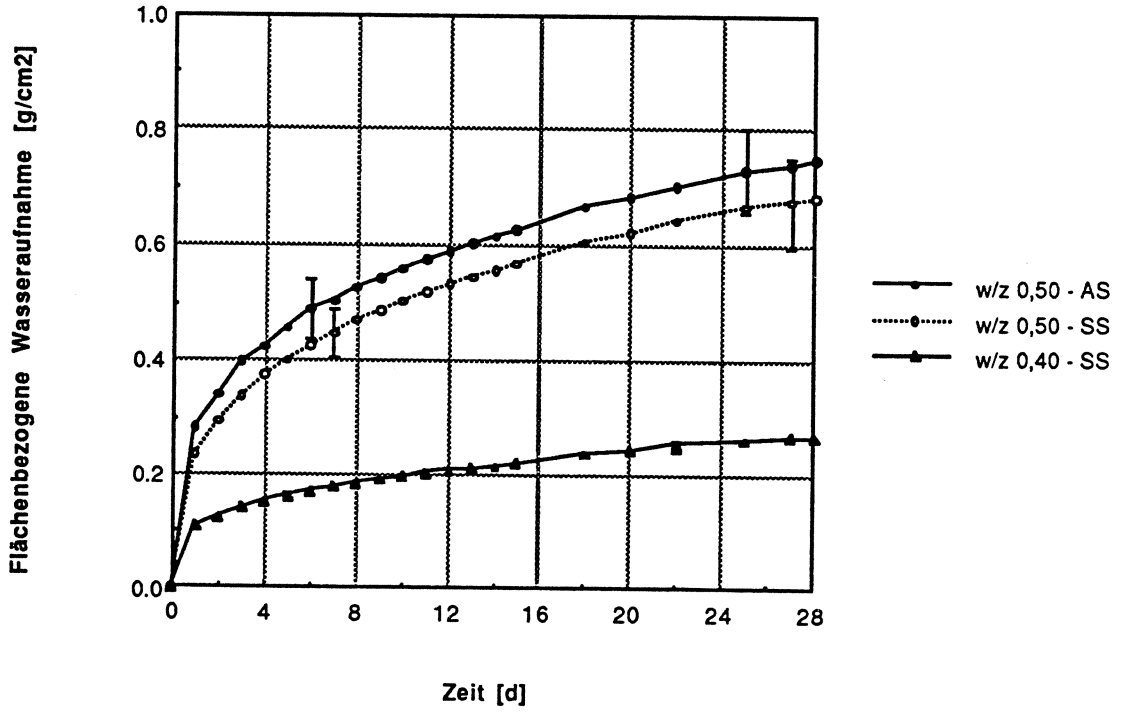

Bild 20: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit (Konstantklima)

Einfluss eines Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung (Bild 21)

Der Einfluss des Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 28 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 28 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,136 g/cm^2 auf 0,278 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite war nach 28 Zyklen um 23 % grösser als die entsprechenden Werte für die Schalseite. Der Wert der Abstrichseite wies eine höhere Standardabweichung (s = 0,079 g/cm^2) auf als der Wert der Schalseite.

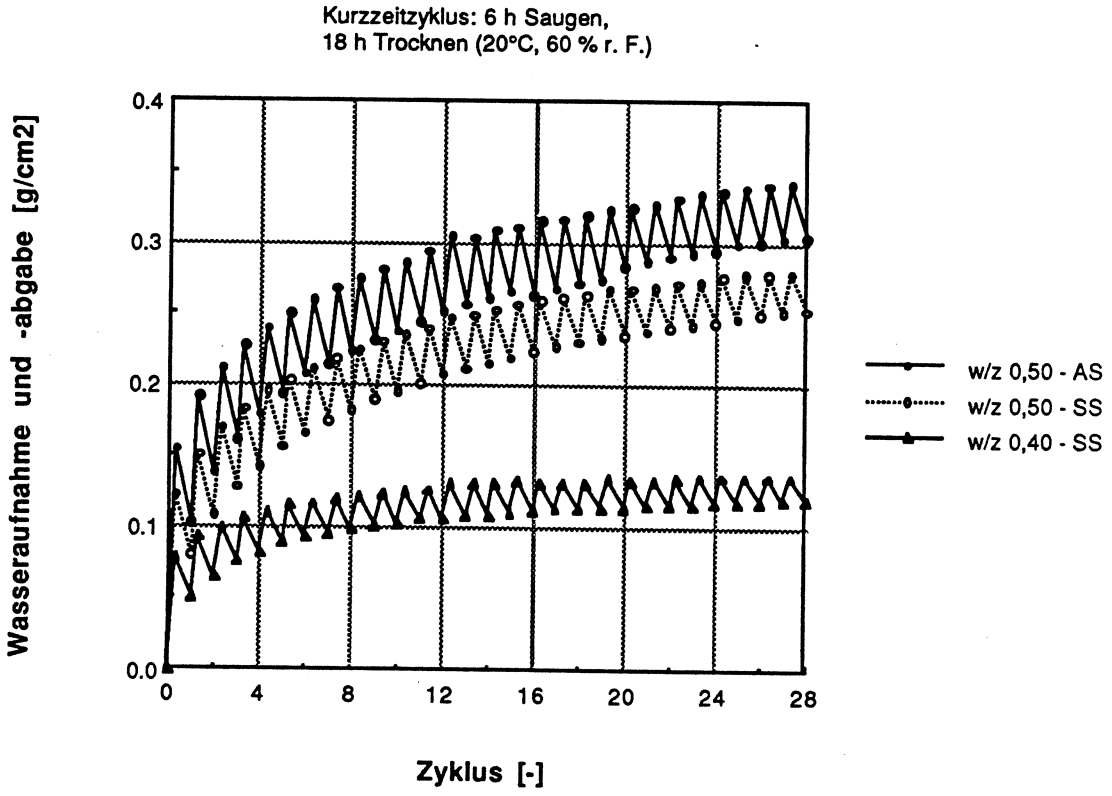

Bild 21: Zyklische Wasseraufnahme und -abgabe in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

Einfluss eines Wechselklimas (Langzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung (Bild 22)

Der Einfluss des Wechselklimas (Langzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 14 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 14 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,107 g/cm^2 auf 0,288 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite war nach 14 Zyklen um 22 % grösser als die entsprechenden Werte für die Schalseite. Der Wert der Abstrichseite wies eine höhere Standardabweichung (s = 0,076 g/cm^2) auf als der Wert der Schalseite. Der Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten Betone nach 14 Zyklen Be- und Entfeuchtung lag im Bereich der Be- und Entfeuchtung der entsprechenden Betonqualitäten im Wechselklima (Kurzzeitzyklus) nach 28 Zyklen.

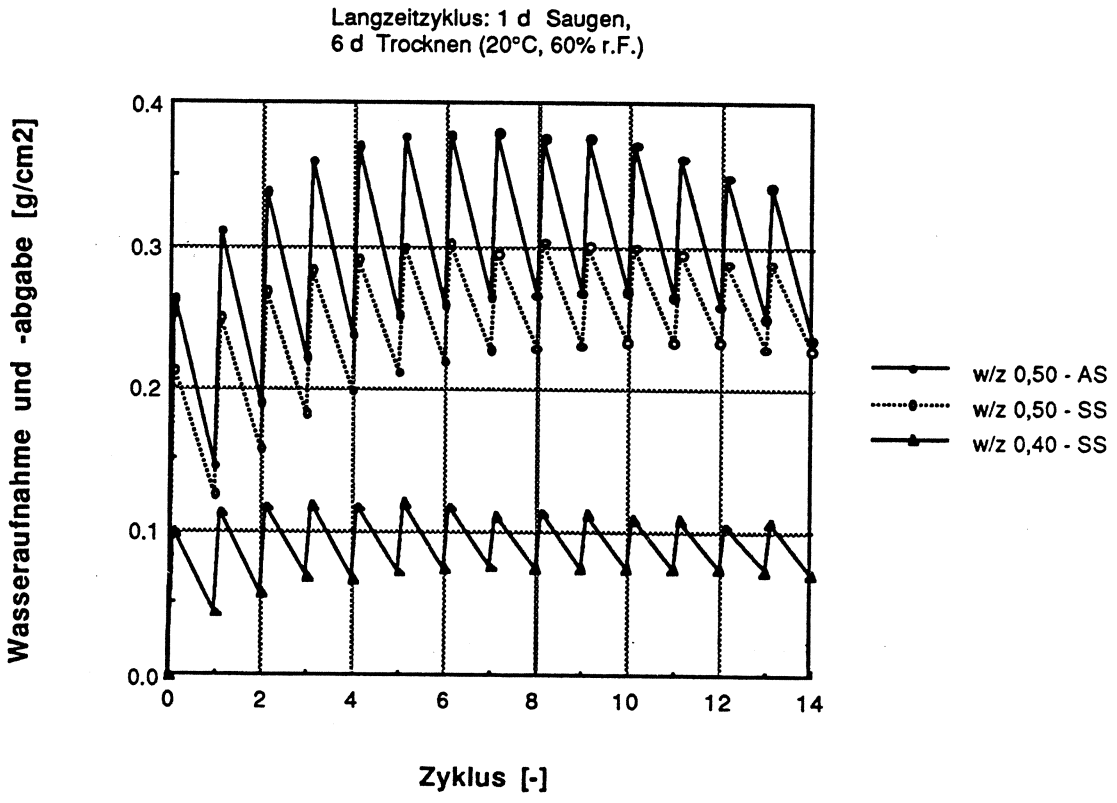

Bild 22: Zyklische Wasseraufnahme und -abgabe in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

5.2.2 Einfluss der Art der Aufsauglösung

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von praxisnahen klimatischen Bedingungen und einer 3%igen Natriumchloridlösung wurde an verschiedenen Betonqualitäten mit w/z-Werten von 0,40 und 0,50 untersucht. Dabei wurden die folgenden Klimata variiert:

A: Konstantklima
Aufsaugen einer 3% NaCl-Lösung bis zum 28.Tag

B: Wechselklima (Kurzzeitzyklus)
6 Stunden Aufsaugen einer 3% NaCl-Lösung
18 Stunden Trocknen bei 20°C/60 % r.F

C: Wechselklima (Langzeitzyklus)
1 Tag Aufsaugen einer 3% NaCl-Lösung
6 Tage Trocknen bei 20°C/60 % r.F.

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport wurde an einem Beton mit dem w/z-Wert von 0,50 für folgende Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden werden jeweils für die einzelnen Klimata die Versuchsergebnisse zur Befeuchtung infolge kapillarer Aufnahme einer Natriumchloridlösung und ggf. Entfeuchtung durch Trocknung dargestellt.

Einfluss eines Konstantklimas auf die kapillare Aufnahme einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 23 - Bild 24)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die kapillare Wasseraufnahme wurde mit Aufsaugversuchen bis 28 Tage untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme über 24 Stunden m_{w24} von 0.107 g/cm^2 auf 0,228 g/cm^2. Bei Aufsaugversuchen bis 28 Tage konnte durch die Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 eine

Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w28} von 0,266 g/cm^2 auf 0,570 g/cm^2 festgestellt werden. Der Wert der Abstrichseite wies beim 28 Tage Ausaugversuch eine wesentlich höhere Standardabweichung (s = 0,080 g/cm^2) auf als die Werte der Schalseite. Die kapillare Aufnahme einer Salzlösung war nach 28 Tagen mit Ausnahme des Betons mit dem w/z-Wert von 0,40 um 5 - 25 % kleiner gegenüber der kapillaren Wasseraufnahme der entsprechenden Betonqualitäten nach 28 Tagen.

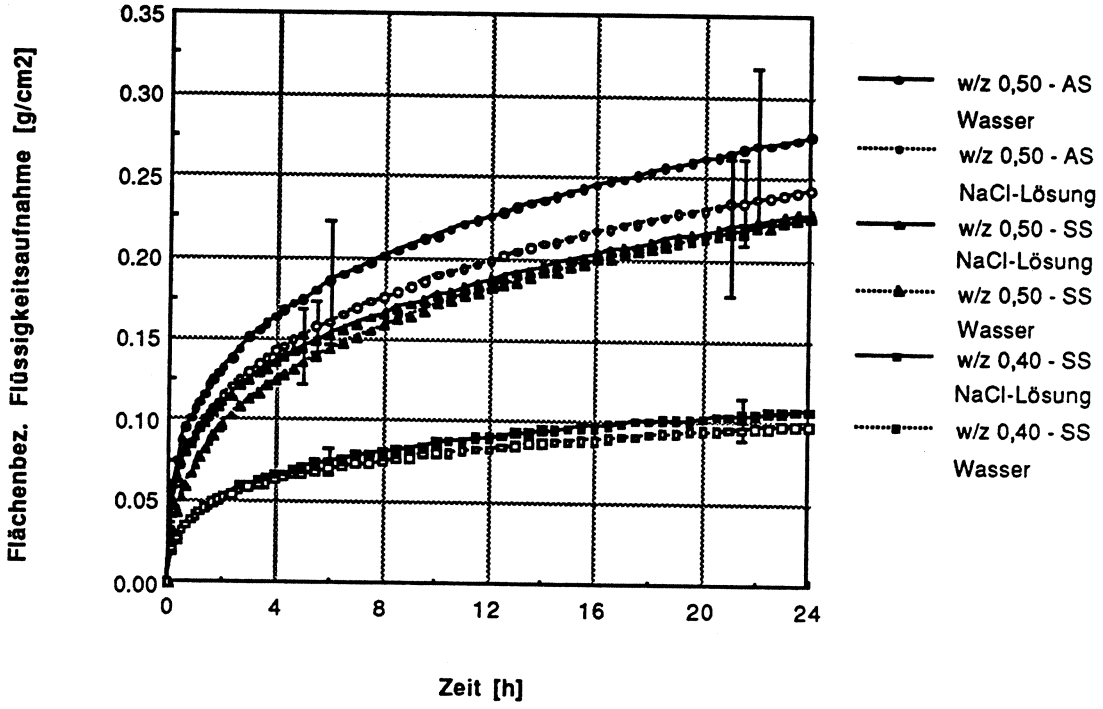

Bild 23: Kapillare Aufnahme von Wasser und einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

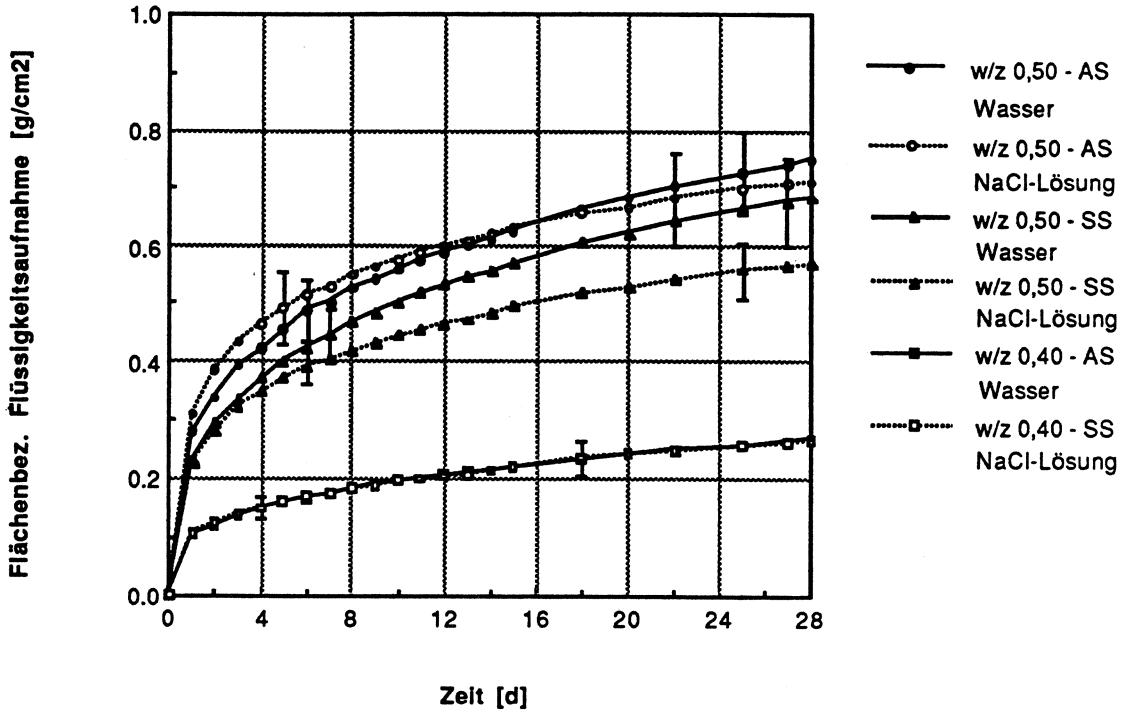

Bild 24: Kapillare Aufnahme von Wasser und einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit (Konstantklima)

Einfluss eines Konstantklimas auf die Eindringtiefe einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 25 - Bild 26)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die Eindringtiefe wurde nach 24 Stunden und nach 28 Tagen untersucht. Nach 24 Stunden konnte für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0,40 eine mittlere Eindringtiefe des Lösungsmittels Wassers von 27 mm festgestellt werden. Chloridionen von 0,4 Gew.-% Cl_Z (Richartz-Kriterium) konnten bis zu einer Tiefe von 11 mm nachgewiesen werden. Nach 28 Tagen war eine mittlere Eindringtiefe des Lösungsmittels Wassers von 72 mm festgestellt worden. Chloridionen von 0,4 Gew.-% Cl_Z konnten bis zu einer Tiefe von 16 mm nachgewiesen werden. Der maximale Chloridgehalt in der Betonrandzone (bis 5 mm) nahm mit zunehmener Aufsaugzeit von 0,75 Gew.-% Cl_Z auf 2,4 Gew.-% Cl_Z zu.

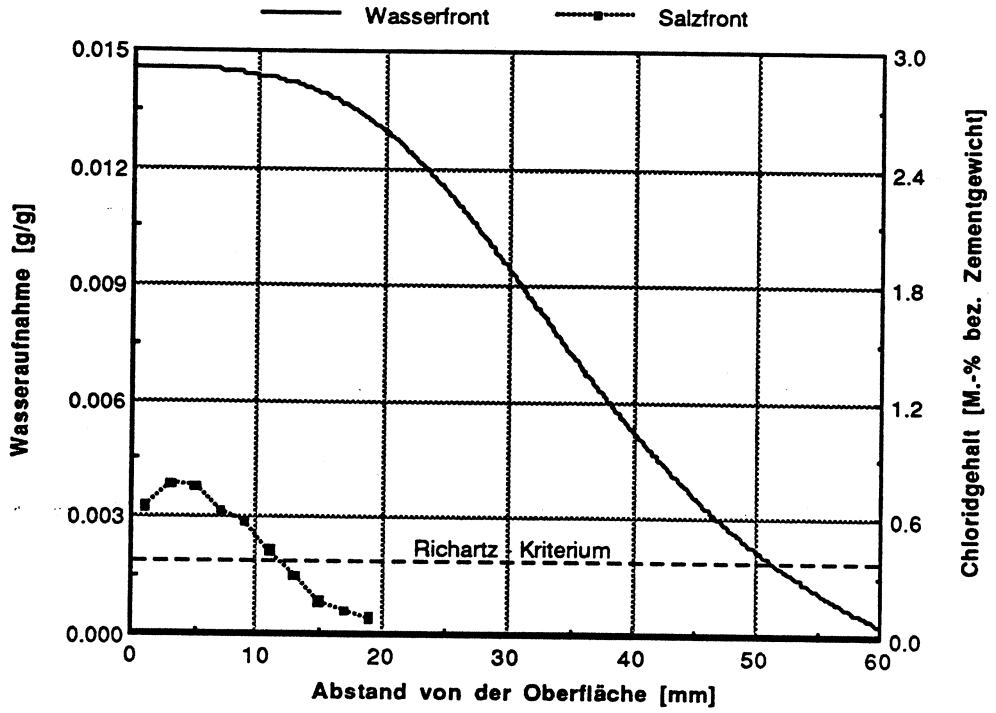

Bild 25: Kapillare Aufnahme einer Natriumchloridlösung nach 1 Tag für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0.40

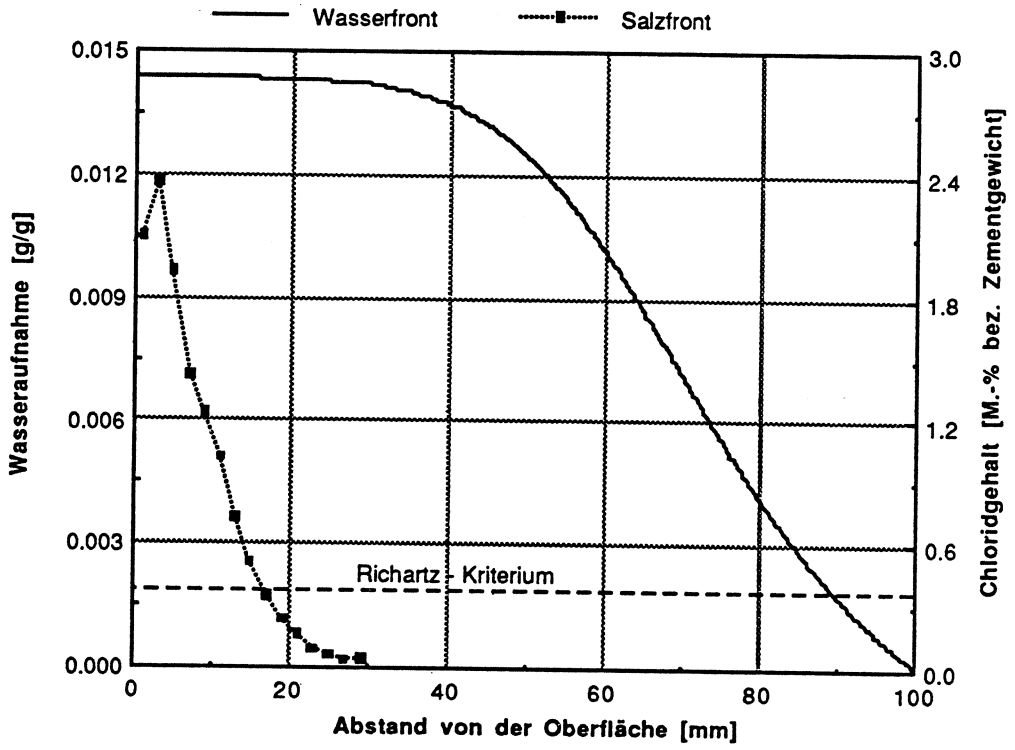

Bild 26: Kapillare Aufnahme einer Natriumchloridlösung nach 28 Tagen für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0.40

Einfluss eines Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 27 und Bild 28)

Der Einfluss des Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 28 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 28 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,137 g/cm^2 auf 0,374 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite war nach 28 Zyklen um 35 % grösser als die entsprechenden Werte für die Schalseite. Der Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten Betone nach 28 Zyklen Be- und Entfeuchtung mit einer Salzlösung war mit Ausnahme des Beton mit einem w/z-Wert von 0,40 um 35 - 48 % grösser gegenüber dem Feuchtigkeitsgehalt nach 28 Zyklen Be- und Entfeuchtung mit Wasser.

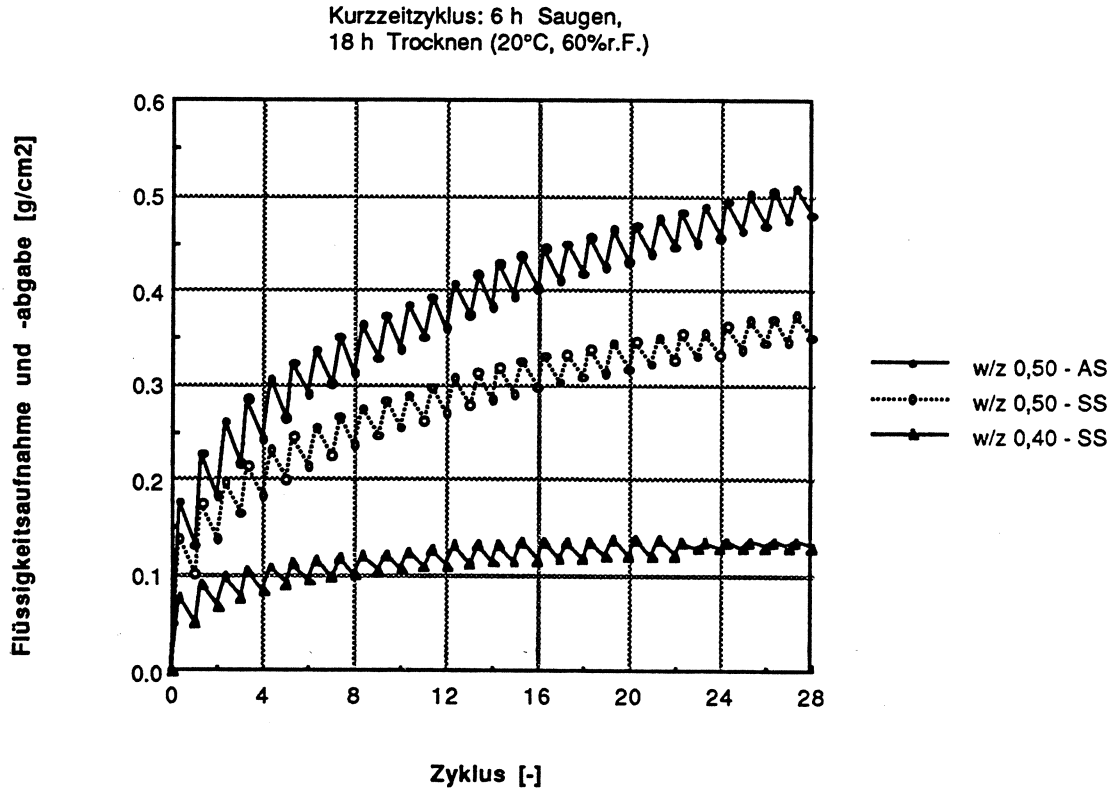

Bild 27: Zyklische Aufnahme und Abgabe einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

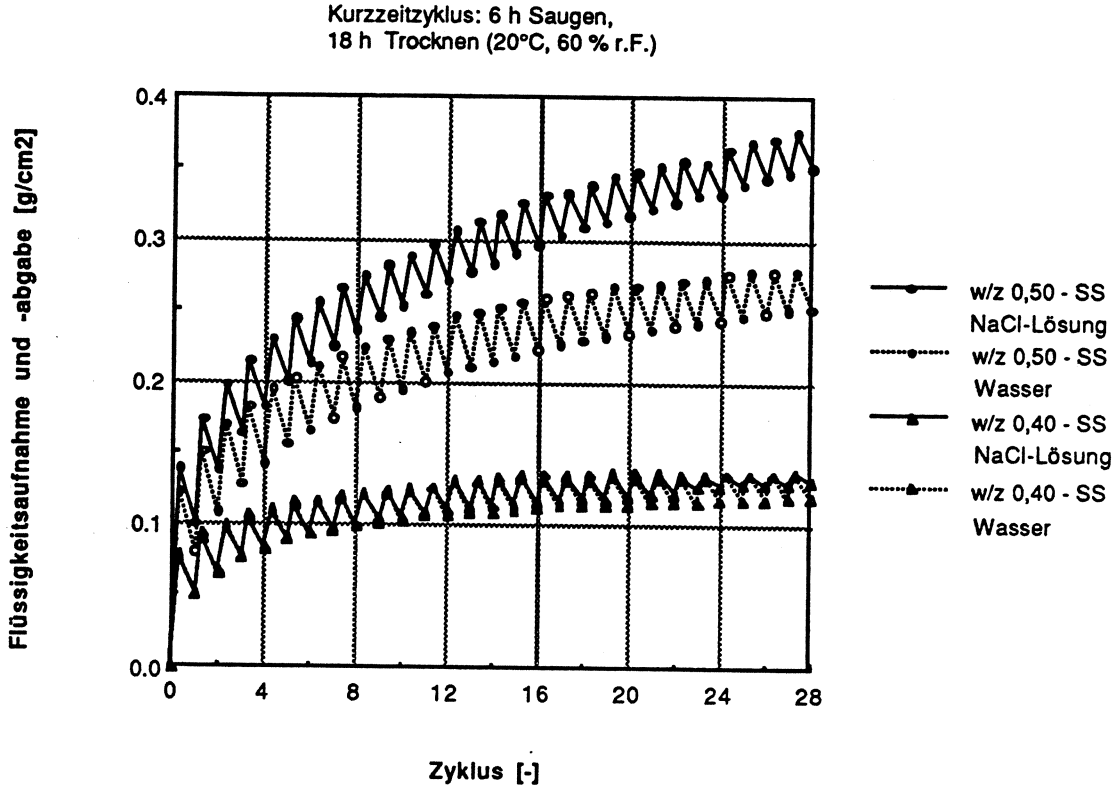

Bild 28: Zyklische Aufnahme und Abgabe einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

Einfluss eines Wechselklimas (Langzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 29 - Bild 30)

Der Einfluss des Wechselklimas (Langzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 14 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 14 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,148 g/cm^2 auf 0,364 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite war nach 14 Zyklen um 15 % grösser als die entsprechenden Werte für die Schalseite. Der Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten Betone nach 14 Zyklen Be- und Entfeuchtung mit einer Salzlösung war bei allen untersuchten Betonqualitäten und Oberflächenbeschaffenheiten 23 - 38 % grösser gegenüber dem Feuchtigkeitsgehalt nach 14 Zyklen Be- und Entfeuchtung mit Wasser.

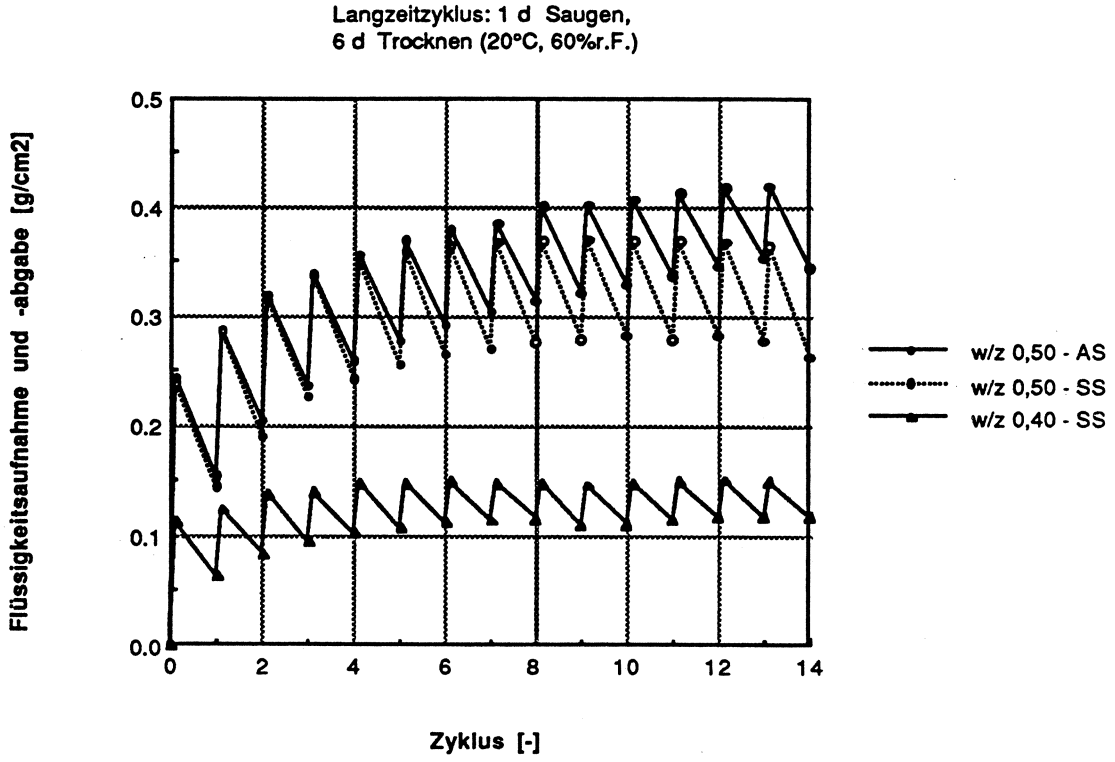

Bild 29: Zyklische Aufnahme und Abgabe einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Oberflächenbeschaffenheit

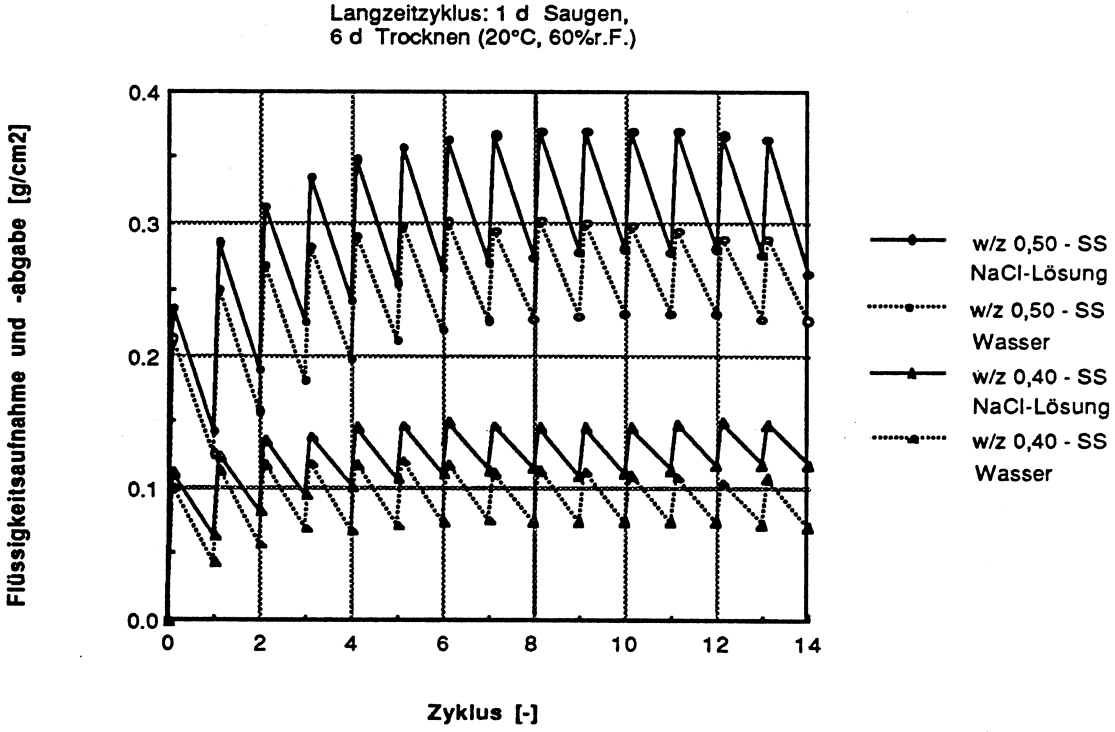

Bild 30: Zyklische Aufnahme und Abgabe von Wasser und einer Salzlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert

5.3 Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von oberflächentechnologischen Massnahmen

5.3.1 Eindringtiefe von Hydrophobierungsmittel

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von oberflächentechnologischen Massnahmen - in diesem Fall eine Hydrophobierung - wurde an verschiedenen Betonqualitäten mit w/z-Werten von 0,40 und 0,50 untersucht. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit wurde an einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 für folgende Oberflächen geprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Die Wirksamkeit und die Haltbarkeit von Hydrophobierungen werden wesentlich von der bei der Imprägnierung erzielten Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels bestimmt. Als Hydrophobierungsmittel wurde ein Silan in 20%iger Verdünnung (Alkohol) gewählt.

Im folgenden werden die einzelnen Versuchsergebnisse zur Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels durch die Färbemethode und durch 24h-Aufsaugversuche in Verbindung mit schichtweisem Abfräsen der Betonoberfläche dargestellt.

Färbemethode:
Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels wurde an den entsprechenden Betonen 4 Wochen nach erfolgter Applikation untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte zu einer Zunahme der Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels, im Mittel von 2,0 mm auf 2,5 mm, bei Standardabweichungen von 0,35 mm und 0,5 mm. Die Eindringtiefe über die Abstrichseite bei einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 betrug, im Mittel 3,5 mm, bei einer Standardabweichung von 0,63 mm.

24h-Aufsaugversuche in Verbindung mit schichtweisem Abfräsen der Betonoberfläche (Bild 31 - Bild 32):

Die Tiefenwirkung des Hydrophobierungsmittels wurde durch die kapillare Wasseraufnahme in Verbindung mit einem schichtweisen Abfräsen der Betonoberfläche jeweils um 1 mm an den entsprechenden Betonen 4 Wochen nach erfolgter Applikation untersucht. Das Abfräsen der Oberfläche jeweils um 1 mm führte bei einem w/z-Wert von 0,40 zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w24} von 0.013 g/cm^2 bei intakter Oberfläche, auf 0.068 g/cm^2 bei 1 mm und auf 0.085 g/cm^2 bei 2 mm Abfräsen. Die entsprechenden Werte für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 betrugen für die kapillare Wasseraufnahme m_{w24} 0,013 g/cm^2 bei intakter Oberfläche, 0157 g/cm^2 bei 1 mm und 0,166 g/cm^2 bei 2 mm Abfräsen. Für die über die Abstrichseite kapillar aufgenommene Wassermenge an einen Beton mit einem w/z-Wert 0,50 wurden 0,027 g/cm^2 bei intakter Oberfläche, 0,118 g/cm^2 bei 1 mm und 0.224 g/cm^2 bei 2 mm Abfräsen gemessen.

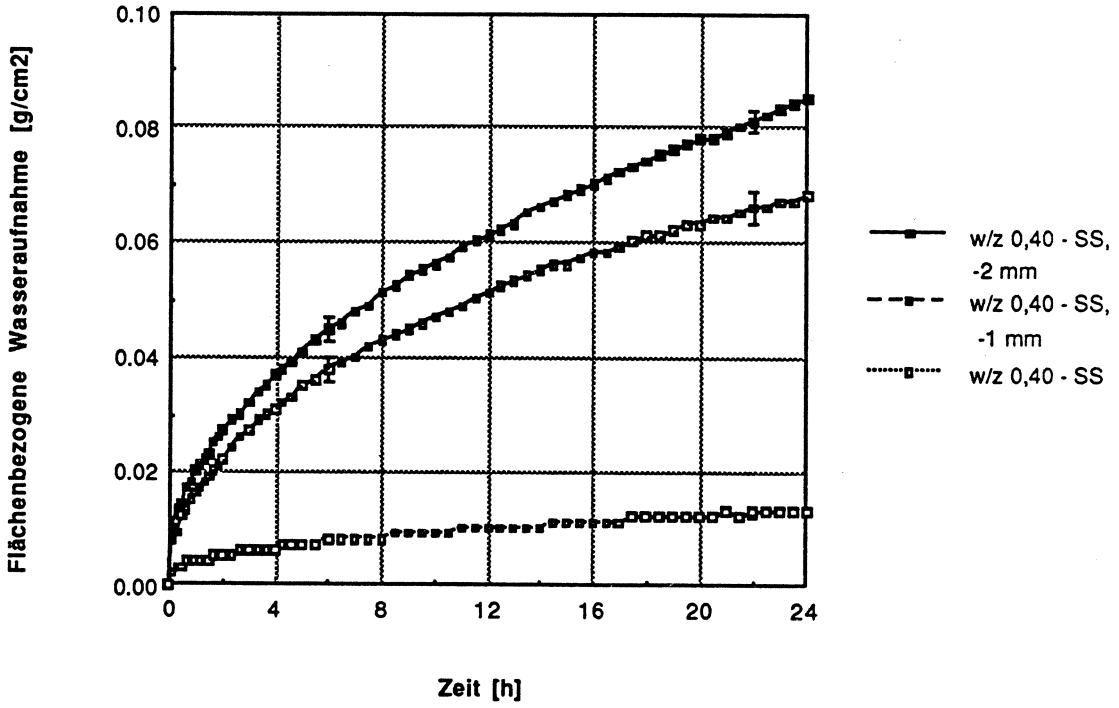

Bild 31: Kapillare Wasseraufnahme hydrophobierter Oberflächen in Verbindung mit einem schichtweisen Abfräsen

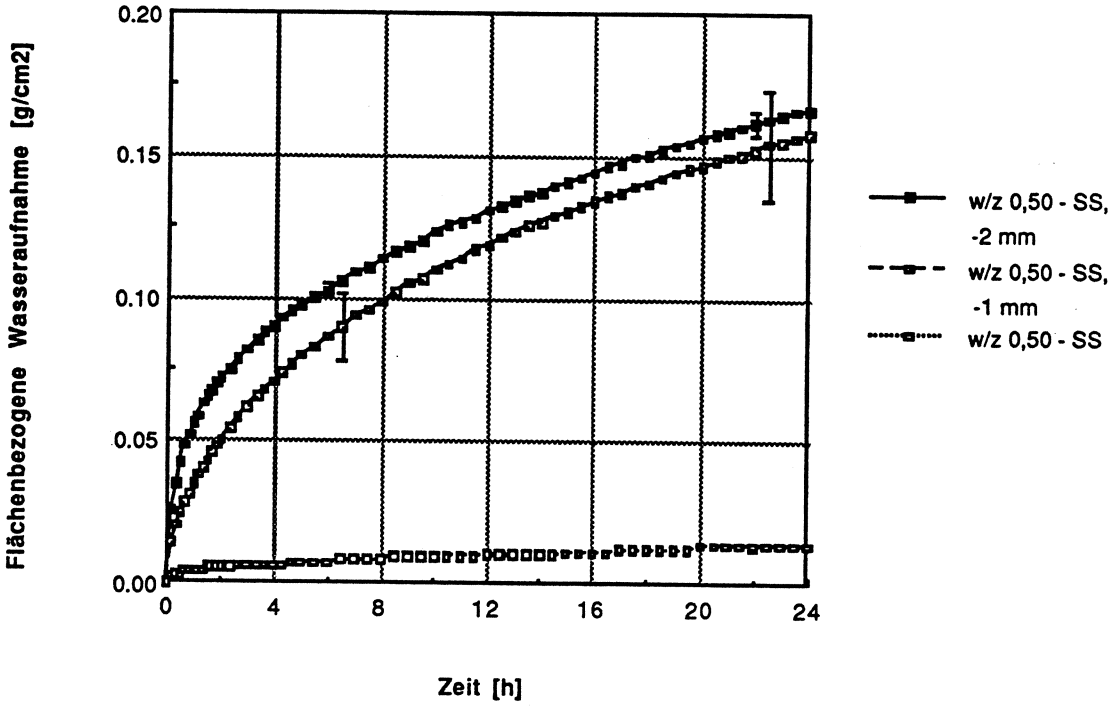

Bild 32: Kapillare Wasseraufnahme hydrophobierter Oberflächen in Verbindung mit einem schichtweisen Abfräsen

5.3.2 Einfluss eines Konstant- und Wechselklimas

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von praxisnahen klimatischen Bedingungen wurde an verschiedenen, hydrophobierten Betonqualitäten mit w/z-Werten von 0,40 und 0,50 untersucht. Dabei wurden die folgenden Klimata variiert:

A: Konstantklima
Aufsaugen bis zum 28.Tag

B: Wechselklima (Kurzzeitzyklus)
6 Stunden Aufsaugen
18 Stunden Trocknen bei 20°C/60 % r.F

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Feuchtigkeits- und Ionenransport wurde an einem hydrophobierten Beton mit dem w/z-Wert von 0,50 für folgende Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden werden jeweils für die einzelnen Klimata die Versuchsergebnisse zur Befeuchtung infolge kapillarer Wasseraufnahme und ggf. Entfeuchtung durch Trocknung dargestellt.

Einfluss eines Konstantklimas auf die kapillare Wasseraufnahme (Bild 33 - Bild 34)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die kapillare Wasseraufnahme hydrophobierter Betonoberflächen wurde mit Aufsaugversuchen über 28 Tage untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w28} von 0,079 g/cm^2 auf 0,082 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme über die Abstrichseite betrug für den w/z-Wert von 0,50 nach 28 Tagen m_{w28} von 0,088 g/cm^2. Die kapillare Wasseraufnahme der nicht hydrophobierten Betone nach 28 Tagen war beim einem w/z-Wert von 0,40 um den Faktor 3,4 grösser und bei einem w/z-Wert von 0,50 für die Schalseite um den Faktor 8,30 grösser und für die Abstrichseite um den Faktor 8,5 grösser gegenüber der kapillaren Wasseraufnahme der hydrophobierter Betonqualitäten nach 28 Tagen.

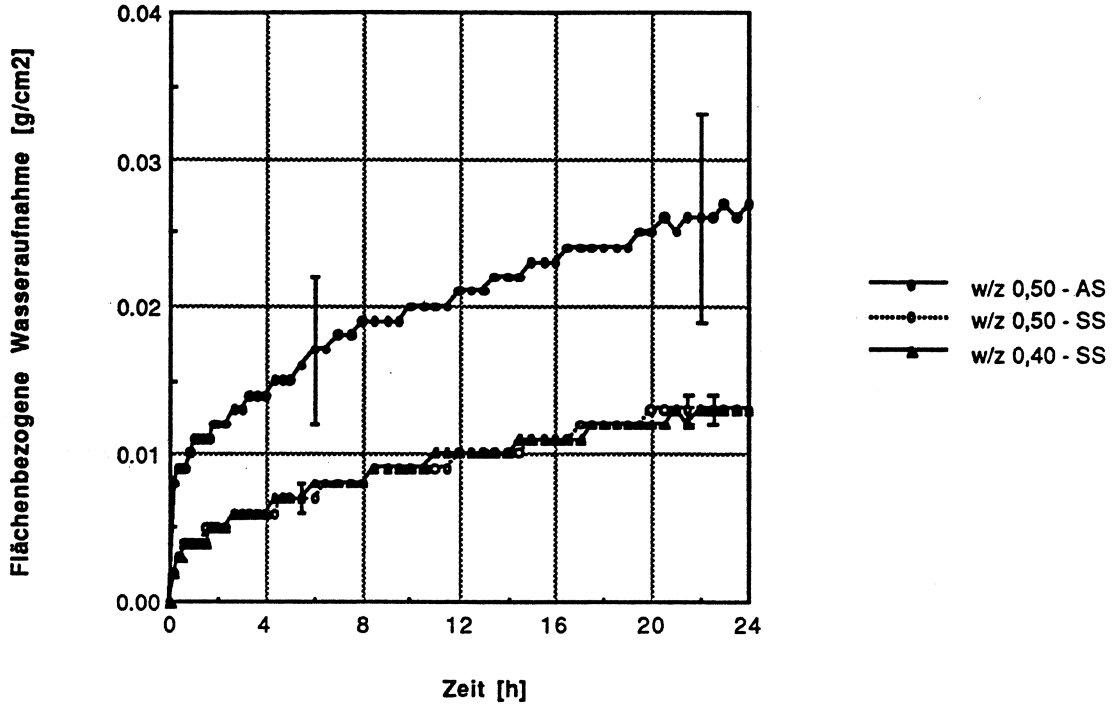

Bild 33: Kapillare Wasseraufnahme hydrophobierter Oberflächen

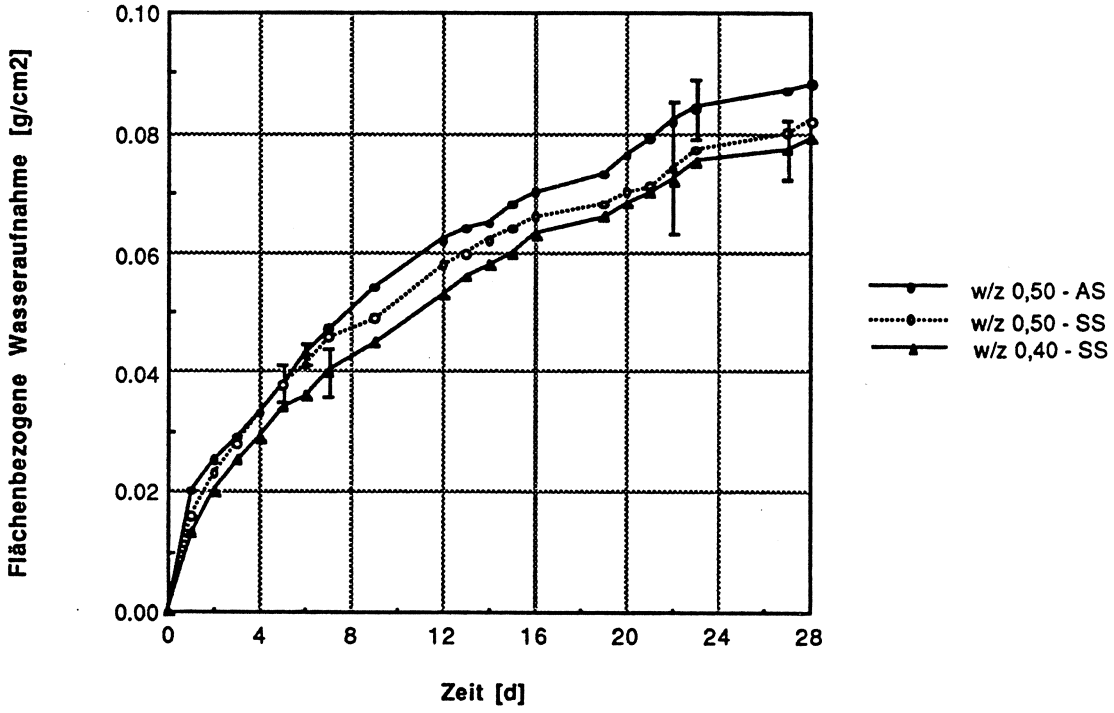

Bild 34: Kapillare Wasseraufnahme hydrophobierter Oberflächen (Konstantklima)

Einfluss eines Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung (Bild 35 - Bild 36)

Der Einfluss des Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 28 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 28 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,015 g/cm^2 auf 0,019 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite war nach 28 Zyklen unwesentlich höher als die entsprechenden Werte für die Schalseite. Der Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten nicht hydrophobierten Betone nach 28 Zyklen Be- und Entfeuchtung war beim einem w/z-Wert von 0,40 um den Faktor 9,0 grösser und bei einem w/z-Wert von 0,50 für die Schalseite um den Faktor 14,6 grösser und für die Abstrichseite um den Faktor 14,8 grösser gegenüber der Be- und Entfeuchtung hydrophobierter Betonqualitäten nach 28 Zyklen.

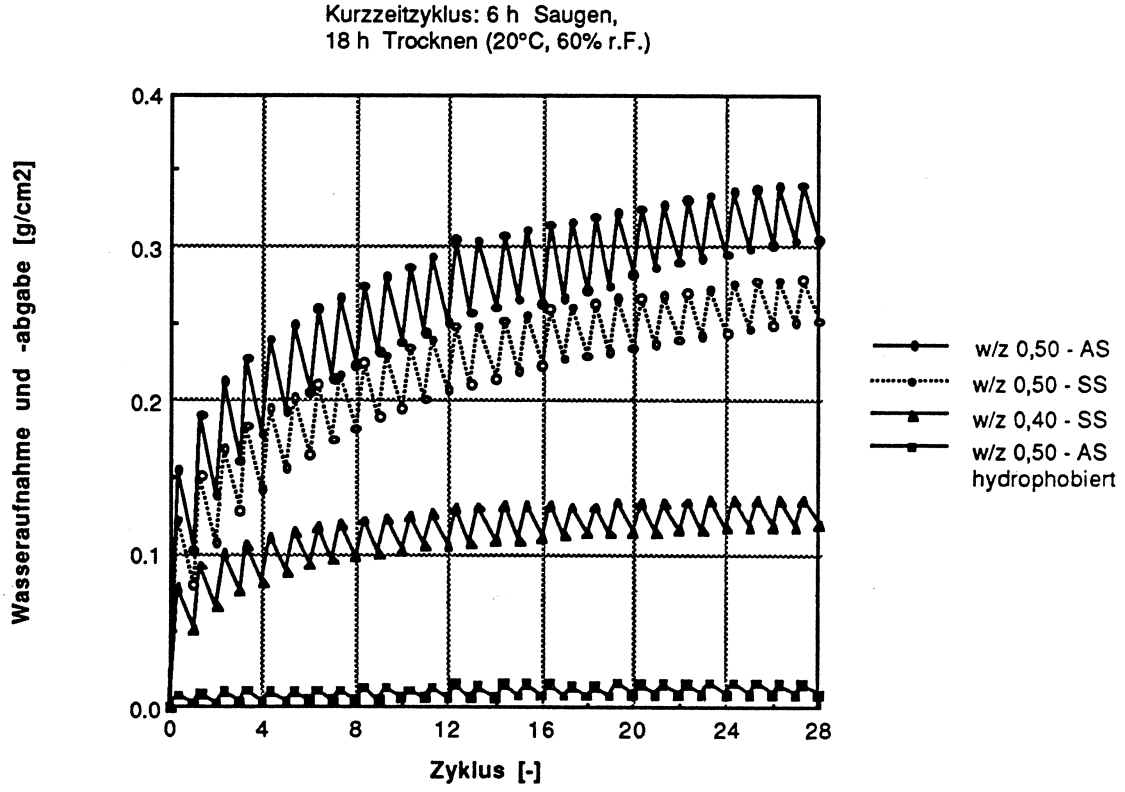

Bild 35: Zyklische Wasseraufnahme und -abgabe von hydrophobierten Oberflächen

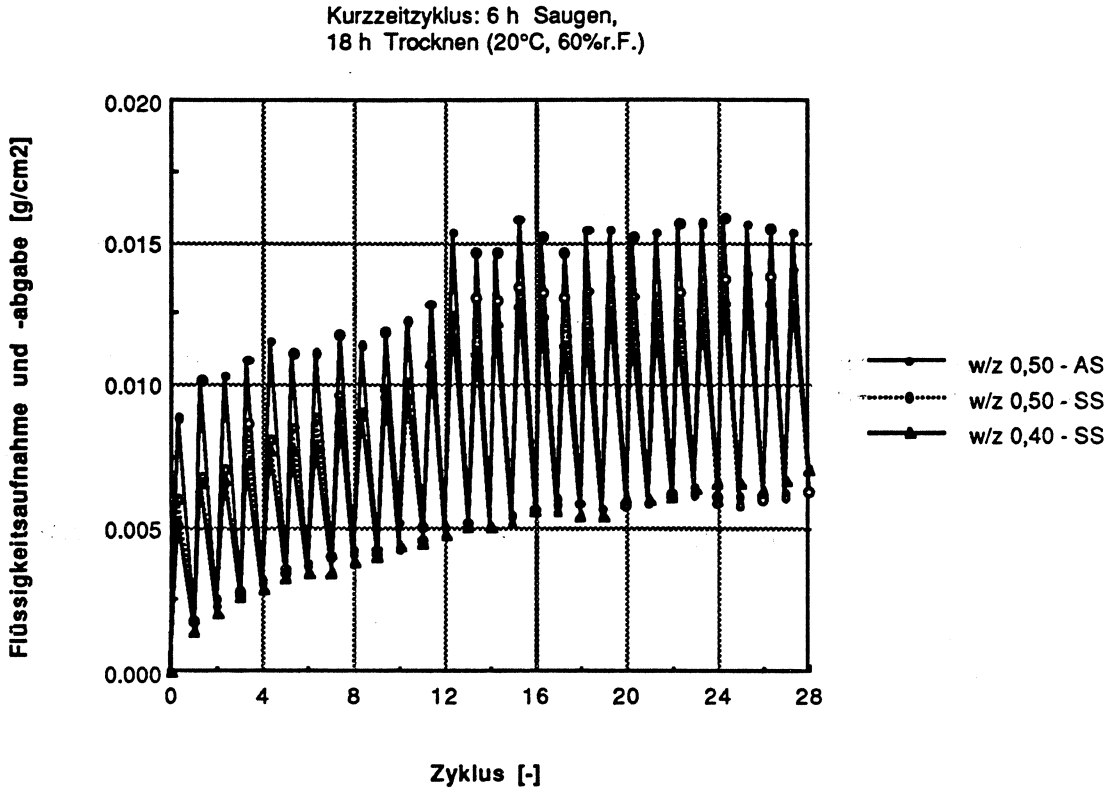

Bild 36: Zyklische Wasseraufnahme und -abgabe von hydrophobierten Oberflächen

5.3.3 Einfluss der Art der Aufsauglösung

Die Abhängigkeit des Feuchtigkeits- und Ionentransportes von praxisnahen klimatischen Bedingungen und einer 3%igen Natriumchloridlösung wurde an verschiedenen hydrophobierten Betonqualitäten mit w/z-Werten von 0,40 und 0,50 untersucht. Dabei wurden die folgenden Klimata variiert:

A: Konstantklima
Aufsaugen einer 3% NaCl-Lösung bis zum 28.Tag

B: Wechselklima (Kurzzeitzyklus)
6 Stunden Aufsaugen einer 3% NaCl-Lösung
18 Stunden Trocknen bei 20°C/60 % r.F

Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport wurde an einem Beton mit dem w/z-Wert von 0,50 für folgende Oberflächen überprüft:

- Schalseite, mit Schalöl (SS)
- Abstrichseite (AS)

Im folgenden wurden jeweils für die einzelnen Klimata die Versuchsergebnisse zur Befeuchtung infolge kapillarer Aufnahme der Natriumchloridlösung und ggf. Entfeuchtung durch Trocknung dargestellt.

Einfluss eines Konstantklimas auf die kapillare Aufnahme einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 37 - Bild 38)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die kapillare Aufnahme der Salzlösung wurde mit Aufsaugversuchen über 28 Tage untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte zu einer Zunahme der kapillaren Wasseraufnahme m_{w28} von 0,071 g/cm^2 auf 0,075 g/cm^2. Die kapillare Aufnahme der Salzlösung betrug für die Abstrichseite des Betons mit dem w/z-Wert von 0,50 nach 28 Tagen m_{w28} von 0,072 g/cm^2. Die kapillare Aufnahme der Salzlösung der nicht hydrophobierten Betone nach 28 Tagen war bei einem w/z-Wert von 0,40 um den Faktor 3,7 grösser und bei einem w/z-Wert von 0,50 für die Schalseite um den Faktor 7,5 grösser und für die Abstrichseite um den Faktor 9,9 grösser gegenüber der kapillaren Aufnahme der Salzlösung der hydrophobierter Betonqualitäten nach 28 Tagen.

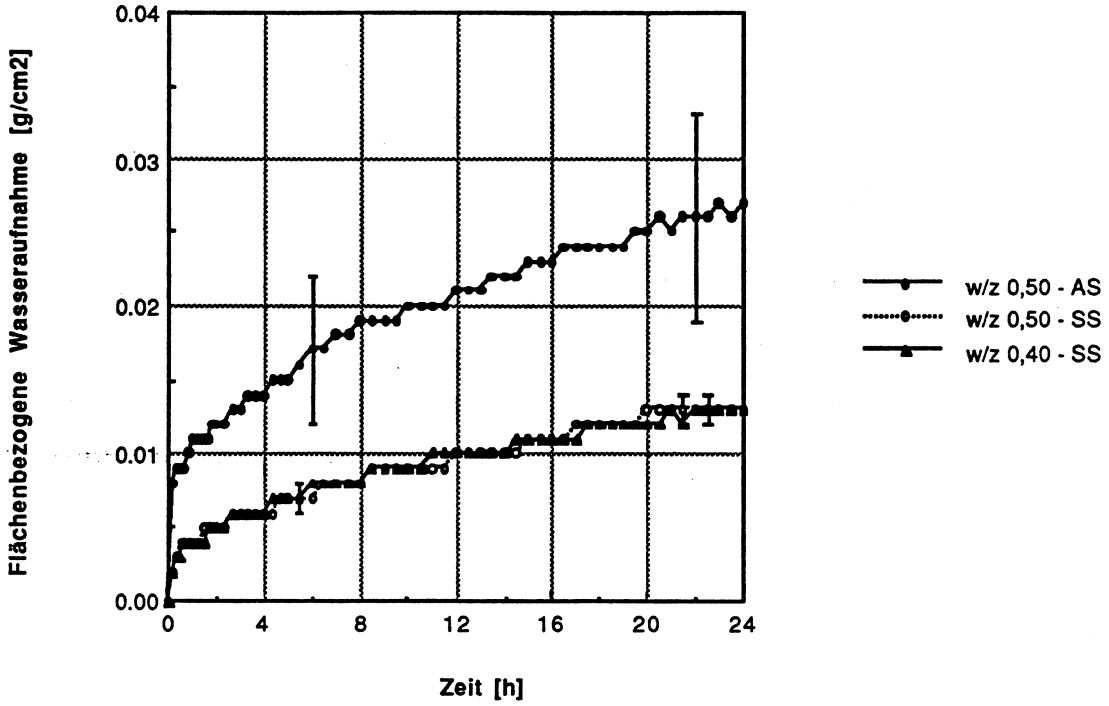

Bild 37: Kapillare Aufnahme einer Salzlösung von hydrophobierten Oberflächen

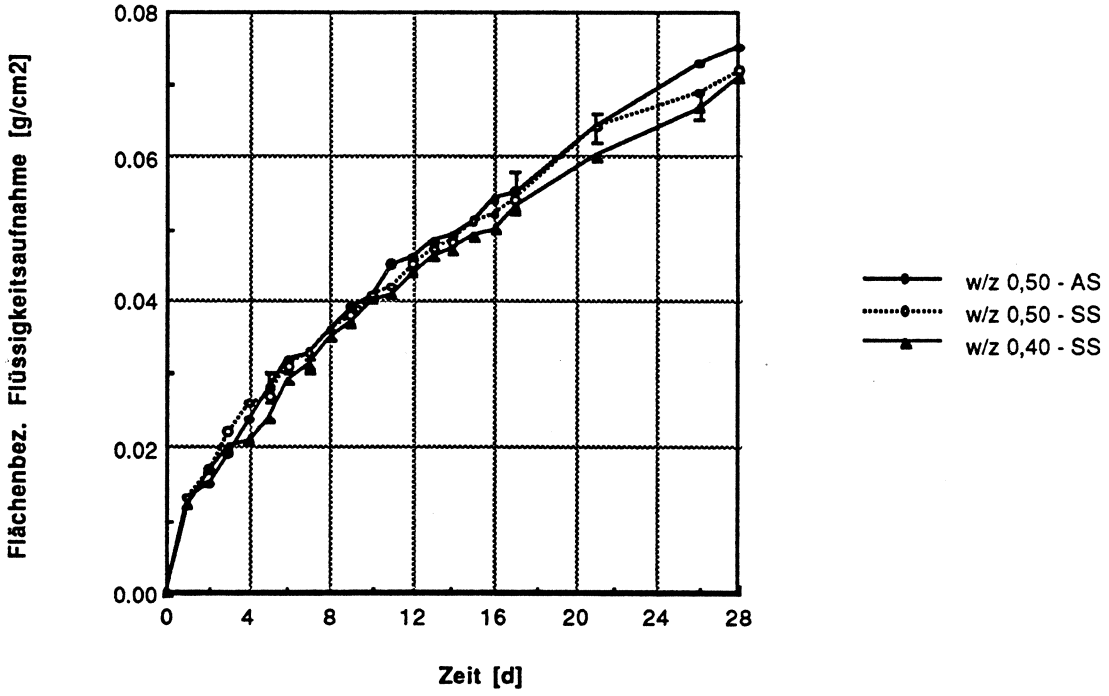

Bild 38: Kapillare Aufnahme einer Salzlösung von hydrophobierten Oberflächen (Konstantklima)

Einfluss eines Konstantklimas auf die Eindringtiefe einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 39)

Der Einfluss des Konstantklimas auf die Eindringtiefe wurde nach 28 Tagen untersucht. Eine mittlere Eindringtiefe des Lösungsmittels Wassers von 25 mm in einem Beton mit einem w/z-Wert von 0,40 konnte festgestellt werden. Chloridionen konnten in nennenswertem Umfang nur in der 1. Schicht von 0 - 2 mm nachgewiesen werden.

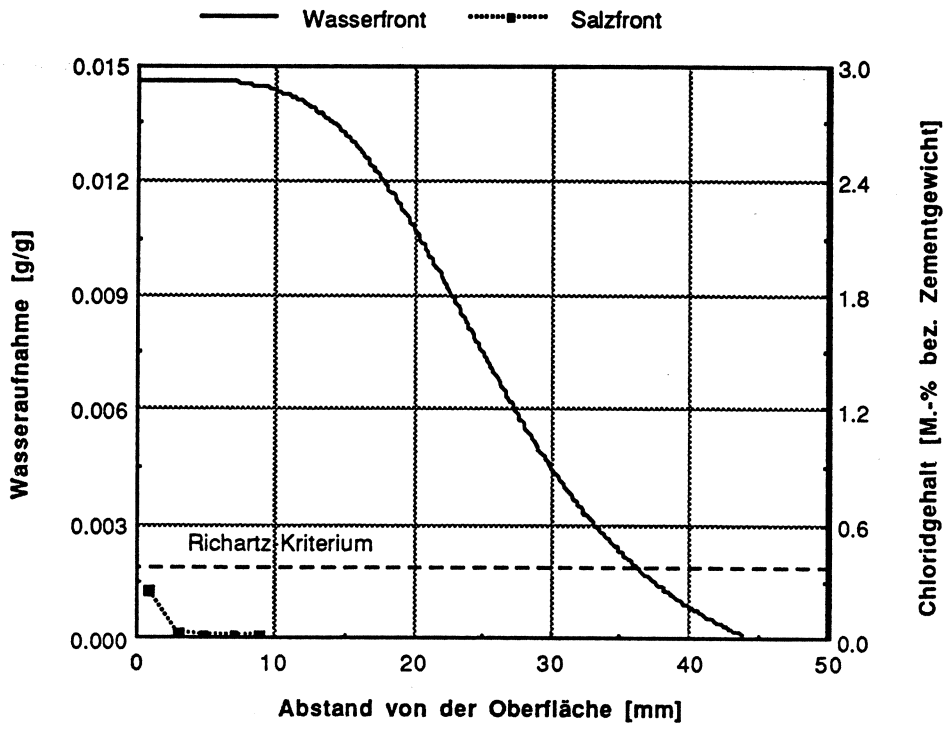

Bild 39: Kapillare Aufnahme einer Natriumchloridlösung nach 28 Tagen bei einer hydrophobierten Oberfläche und einem Beton mit einem w/z-Wert von 0.40

Einfluss eines Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Be- und Entfeuchtung einer 3 %igen Natriumchloridlösung (Bild 40)

Der Einfluss des Wechselklimas (Kurzzeitzyklus) auf die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und die Entfeuchtung durch Trocknung wurde für 28 Zyklen untersucht. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,40 auf 0,50 führte nach 28 Zyklen zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes von 0,013 g/cm^2 auf 0,014 g/cm^2. Die Be- und Entfeuchtung über die Abstrichseite betrug nach 28 Zyklen 0,015 g/cm^2. Der Feuchtigkeitsgehalt der untersuchten nicht hydrophobierten Betone nach 28 Zyklen Be- und Entfeuchtung war beim einem w/z-Wert von 0,40 um den Faktor 10,5 grösser und bei einem w/z-Wert von 0,50 für die Schalseite um den Faktor 26 grösser und für die Abstrichseite um den Faktor 27,9 grösser gegenüber der Be- und Entfeuchtung hydrophobierter Betonqualitäten nach 28 Zyklen.

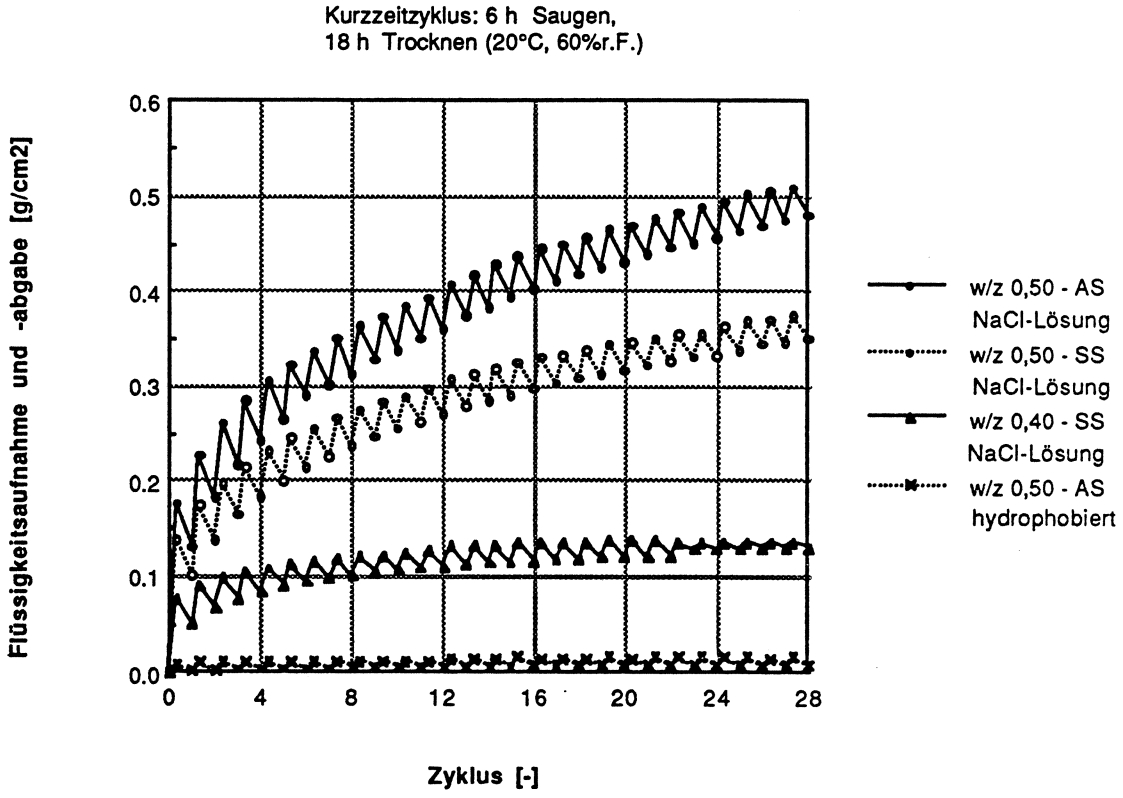

Bild 40: Zyklische Aufnahme und Abgabe einer Natriumchloridlösung in Abhängigkeit vom w/z-Wert, der Oberflächenbeschaffenheit und einer hydrophobierten Oberfläche

5.4 Realkalisierung

Die Untersuchungen zur Realkalisierung wurden an im Labor hergestellten und künstlich karbonatisierten Proben und an Bohrkernen aus einem Brückenpfeiler durchgeführt. Der Laborbeton wies einen w/z-Wert von 0,60 auf und wurde in einer 7%igen CO_2-Atmosphäre künstlich karbonatisiert, bis die Dicke der karbonatisierten Schicht ca. 10 mm erreicht hatte.

Der Einfluss der folgenden Untergrundvorbehandlung auf die Realkalisierung karbonatisierter Betonbauteile wurde untersucht:

- luftgetrocknet im Klima (20°C/70 % r.F.)
- wassergesättigt

Der Einfluss folgender Reparaturmörtel auf die Realkalisierung karbonatisierter Betonrandschichten wurde untersucht:

- Zementmörtel
- Zement-Kalkmörtel
- Kalkmörtel

Neben dem Einfluss des Reparaturmörtels auf eine Realkalisierung wurde der Einfluss der Lagerungsbedingungen für die folgenden Lagerungen überprüft:

- unter Wasser
- im Klima 20°C/70 % r.F.

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse für beide Parameter zusammen dargestellt:

Unabhängig von der Art des Reparaturmörtel konnte eine Realkalisierung bei einer Untergrundvorbehandlung bei Wassersättigung innerhalb von 3 Wochen nicht festgestellt werden. Eine Lufttrocknung im Klima von 20°C/70 % r.F und eine künstliche Trocknung über 2 Tage bei 50°C führte bei allen untersuchten Reparaturmörteln zu einer Realkalisierung der karbonatisierten Betonrandzone nach 2-3 Wochen.

Unabhängig von der Art des Reparaturmörtel konnte eine Realkalisierung bei einer Lagerung im Klima 20°C/70 % r.F. nicht festgestellt werden. Eine Wasserlagerung führte bei allen untersuchten Reparaturmörteln zu einer Realkalisierung der karbonatisierten Betonrandzone nach 2-3 Wochen.

Die Bohrkerne aus dem Brückenpfeiler wiesen, im Mittel, eine Karbonatisierungstiefe von 7,0 mm bei einer Standardabweichung von 2,7 mm und einen Maximalwert von 12,3 mm auf. Nach erfolgter Konditionierung (vgl. Kapitel 4.7) wurde ein Zementmörtel in einer Dicke von 2 cm ohne Verwendung einer Haftbrücke aufgebracht.

Der Einfluss folgender Lagerungsbedingungen auf die Realkalisierung karbonatisierter Betonbauteile wurde untersucht:

- in ein Wasserbad gestellt
- unter feuchten Tüchern

Eine Ueberprüfung des Langzeitverhaltens der realkalisierten Proben, d.h. der Karbonatisierung, wurde bei konstanten Lagerungsbedingungen (20°C/60 % r.F.) für nachfolgende Massnahmen vorgenommen.

- Reparaturmörtel abgeschlagen
- Proben mit Reparaturmörtel belassen
- Reparaturmörtel abgeschlagen und Karbonatisierungsbremse aufgebracht verbrauchte Menge: 0,4 kg/m^2

Im folgenden werden die Versuchsergebnisse zu den Lagerungsbedingungen für eine Realkalisierung und für die Ueberprüfung des Langzeitverhaltens der realkalisierten Proben dargestellt.

Einfluss der Lagerungsbedingungen auf die Realkalisierung:

Bei Wasserbadlagerung erfolgte eine Realkalisierung der karbonatisierten Betonrandzone innerhalb von 2 Wochen, während die Lagerung unter feuchten Tüchern zu einer Realkalisierung nach 3 Wochen führte.

Ueberprüfung des Langzeitverhaltens, d.h. der Rekarbonatisierung (Bild 41):

Eine Rekarbonatisierung erfolgte bei allen untersuchten Proben, bei denen der Reparaturmörtel nach erfolgter Realkalisierung abgeschlagen wurde. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Proben, die während der Realkalisierung unter feuchten Tüchern lagerten, war um 20 % grösser gegenüber den Proben, die in ein Wasserbad gestellt wurden. Bei allen untersuchten Proben, bei denen der Reparaturmörtel über die Zeit der Realkalisierung belassen wurde und bei denen, die mit einer Karbonatisierungsbremse beaufschlagt wurden, konnte nach 180 Tagen keine Rekarbonatisierung festgestellt werden.

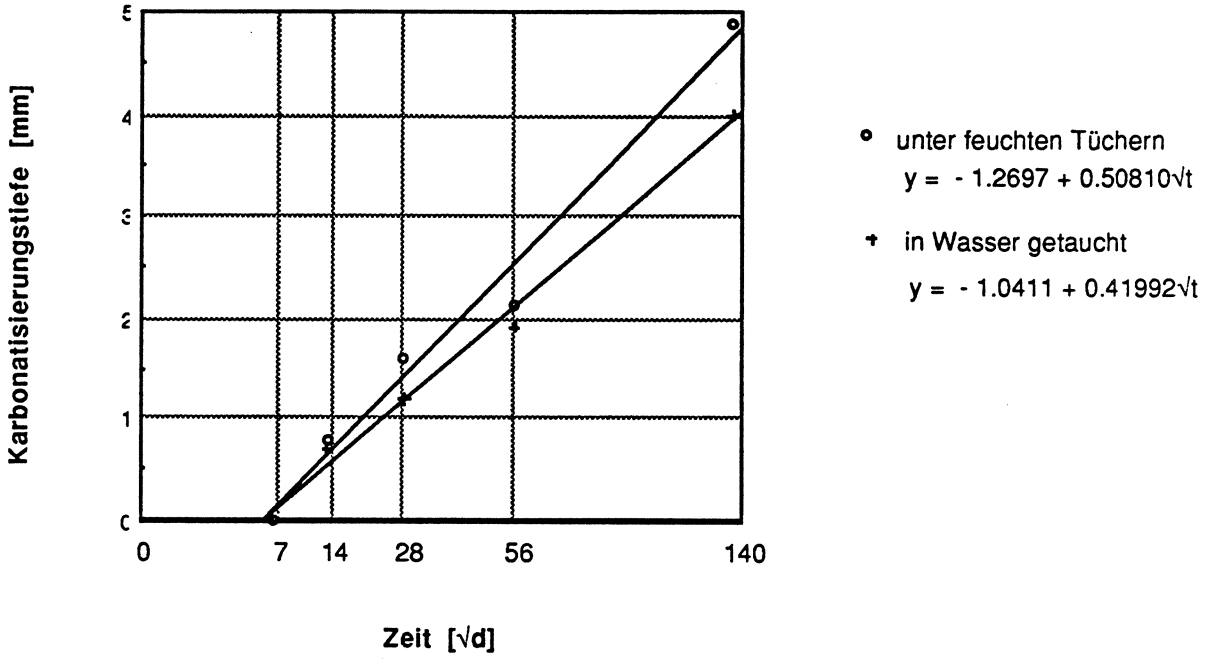

Bild 41: Rekarbonatisierung von realkalisierten Betonbauteilen in Abhängigkeit von der Zeit

6. Diskussion der Ergebnisse

6.1 Zusammenhang zwischen den Transporteigenschaften und der Porosität

Aus den Ergebnissen von 24h-Aufsaugversuchen folgte, dass der kapillare Wassertransport in Beton nicht mit einem $\sqrt{t}$-Gesetz beschrieben werden konnte. Dieses Ergebnis widerspricht den Untersuchungen von Yang /17/, der dem $\sqrt{t}$-Gesetz für die Anfangsphase der Aufsaugversuche eine Gültigkeit zuspricht. Die werkstoffspezifischen Kenngrössen - Wasseraufnahmekoeffizient A und Wassereindringkoeffizient B - stellen somit keine geeigneten Kennwerte zur Charakterisierung der kapillaren Wasseraufnahme und der Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme dar.

Eine halbempirische Beschreibung der kapillaren Wasseraufnahme konnte mit nachfolgender Gleichung erreicht werden:

$$y = \frac{a \cdot t}{b+t} + \frac{c \cdot t}{d+t} \qquad (14)$$

mit: a,b,c,d, Parameter
t Zeit

Gl. 14 besitzt für alle untersuchten Betonqualitäten eine gute Korrelation mit den Versuchsergebnissen (Bild 42). Im Gegensatz zum $\sqrt{t}$-Gesetz strebt die gewählte Funktion einem Endwert entgegen und umfasst 4 Parameter in 2 Termen. Der 1. Term beschreibt das schnelle Saugen der grösseren Poren im Anfangsstadium des Saugvorganges, während der 2. Term das Saugen der kleineren Poren aus den grösseren Poren im späteren Stadium des Saugvorganges charakterisiert. Die Parameter a und c beschreiben den Endwert der kapillaren Wasseraufnahme im Anfangs- und Endstadium. Die Parameter b und d charakterisieren die Geschwindigkeiten der kapillaren Wasseraufnahme in den entsprechenden Stadien . Mit der gefundenen Gleichung lassen sich die unterschiedliche kapillare Wasseraufnahme und die unterschiedliche Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme vom Randbeton und vom Kernbeton erklären.

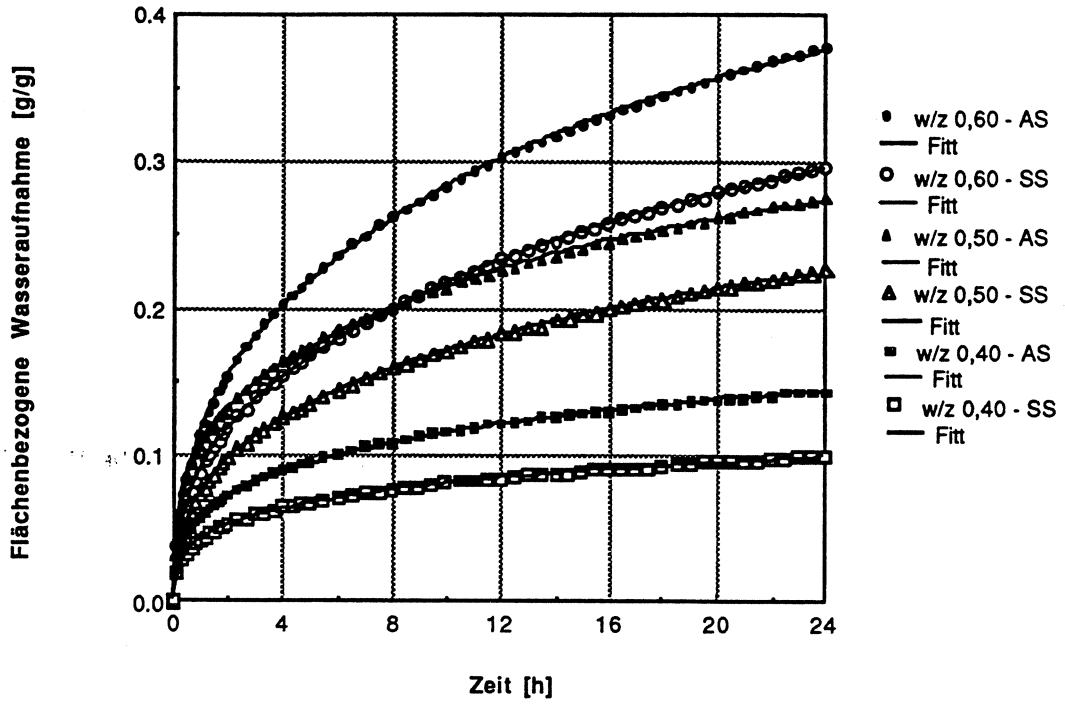

Bild 42: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit vom w/z-Wert.
und der Oberflächenbeschaffenheit

Die Porosität des Betons wurde durch eine Variation von betontechnologischen Parametern verändert und hinsichtlich der Transporteigenschaften untersucht.

Die Betonzusammensetzung - insbesondere der w/z-Wert - übte erwartungsgemäss den grössten Einfluss auf den kapillaren Flüssigkeitstransport aus. Nach Powers /18/ hängt die Wasserdurchlässigkeit von Zementstein ausschliesslich von der Kapillarporosität ab, die ihrerseits i.w. vom w/z-Wert und vom Hydratationsgrad bestimmt wird. Der Einfluss des w/z-Wertes auf die füllbare Porosität und Gesamtporosität fiel weniger ausgeprägt aus. In der Porengrössenverteilung war mit zunehmendem w/z-Wert eine Verschiebung des Porenspektrums und der Maxima zu grösseren Poren mit einem Durchmesser von 0,4 µm zu verzeichnen. Diese Kapillarporen sind vor allem in der Anfangsphase der kapillaren Wasseraufnahme sehr aktiv und besitzen eine hohe Transportleistung.

In der experimentellen Variation des Grösstkornes wurde aus verarbeitungstechnischen Gründen ein unterschiedlicher Zementgehalt bzw. ein unterschiedliches Zementsteinvolumen gewählt, so dass der Einfluss des Grösstkornes für die kapillare Wasseraufnahme entsprechend korrigiert wurde. Die Durchlässigkeit von Beton ist grösser als die des vollhydratisierten Zementsteines mit einem niedrigen w/z-Wert. Neben den Kapillarporen enthält Beton eine Reihe von strukturellen Fehlstellen, wie Mikrorisse, Verbundrisse, u.a. die durch Unterschiede im mechanischen, thermischen und hygrischen Verhalten (Inkompatibilitäten) von Zuschlag und Zementstein bestimmt werden. Die Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein weist eine höhere Porosität auf und bewirkt eine grössere Durchlässigkeit.

Künstlich eingebrachte Luftporen konnten eine Verringerung sowohl der kapillaren Wasseraufnahme als auch der Geschwindigkeit des kapillaren Wassertransportes gegenüber einem Beton ohne Luftporen herbeiführen. Die Differenz zwischen füllbarer Porosität und Gesamtporosität war grösser als bei einem Vergleichbeton ohne Luftporen. Die Porengrössenverteilung wies ein Maximum des Durchmessers bei 100 µm auf, das auf künstlich eingebrachte Luftporen schliessen lässt. Bitterli, Yang und Peter /19/ haben eine verzögernde Wirkung von künstlich eingebrachten Luftporen hinsichtlich des kapillaren Wassertransportes im Rahmen der Frostbeständigkeit von Beton festgestellt. Künstlich in das Kapillarsystem eines Betons eingebrachte Luftporen wirken kapillarbrechend. Die kapillare Steighöhe ist proportional zum Radius der Kapillare. Ab einem Durchmesser von ca. 10 µm der Kapillare ist die Geschwindigkeit des kapillaren Feuchtigkeitstransport sehr gering. Feuchtigkeit wird i.w. nur noch über Kapillarkondensation transportiert. Dieser Transportmechanismus hat eine wesentlich geringere Transportleistung als die Kapillarleitung.

Die Oberflächenbeschaffenheit übte einen Einfluss auf die Porosität und somit auf die Transporteigenschaften aus. Schalseiten, mit und ohne Verwendung von Schalöl, wiesen unabhängig von der Betonqualität eine kleinere füllbare Porosität und Gesamt-porosität in der Betonrandzone auf als Abstrichseiten. Entsprechendes gilt für den kapillaren Feuchtigkeitstransport. Dieses Ergebnis bestätigt die Untersuchungen von Adam /20/ bezüglich der kapillaren Wasseraufnahme von beschichtetem Beton. Herstellungsbedingt tritt an der Betonieroberseite eine Anreicherung von Feinmörtel mit einem höheren effektiven w/z-Wert auf. An den geschalten Seitenflächen ist ebenfalls diese Feinmörtelschicht vorhanden, die aber

im Vergleich zur Oberseite viel dünner ist. Die Anreicherung von Feinstteilen (Zement und Feinstsand) und Wasser birgt die Gefahr der Mikrorissbildung infolge Schwinden in sich und ist für die Dauerhaftigkeit von Nachteil /21/.

Ein Unterschied in der kapillaren Wasseraufnahme zwischen Schalseiten mit und ohne Verwendung von Schalöl konnte nicht festgestellt werden. Eine hydrophobierende Wirkung des verwendeten Schalöls kann somit ausgeschlossen werden.

Die Art der Nachbehandlung bestimmt die füllbare Porosität und die Transporteigenschaften nachhaltig, während ein Einfluss auf die Gesamtporosität nicht erkennbar ist. Die Einwirkungstiefe einer Nachbehandlung ist begrenzt. Keine Nachbehandlung führt grundsätzlich zu einer grösseren Flüssigkeitsaufnahme. Betone mit einer Nachbehandlung von 7 Tagen unter feuchten Tüchern und Folie bzw. mit einer Nachbehandlung von 14 Tagen unter Wasserlagerung wiesen im Prüfalter von 90 Tagen keinen signifikanten Unterschied im Aufsaugverhalten auf. Eine Nachbehandlung ist bei der Verwendung von Portlandzement hinsichtlich der Transporteigenschaften unter normalen klimatischen Bedingungen bis zum 7. Tag bei entsprechenden Massnahmen, z.B. feucht halten und Folien, hinreichend. Mit längerer Nachbehandlung besitzen die Ergebnisse eine geringere Streubreite und das unterschiedliche Aufsaugverhalten von Schalseite und Abstrichseite nähert sich an. Die Ergebnisse zur Nachbehandlung werden von Rostasy und Bunte /22/ in einer Untersuchung zur Dichtigkeitsprüfung an Bauwerksbeton bestätigt.

Grundsätzlich gilt für den Zusammenhang zwischen Porosität und Transporteigenschaften des Betons:

Neben der füllbaren Porosität und der Gesamtporosität müssen noch weitere Porositätseigenschaften (z.B. Form der Poren, Grösse der Poren, Häufigkeitsverteilung der Poren, geometrischer Aufbau des Porensystems) bekannt sein, um eine allgemeingültige Beziehung zwischen Porosität und Transporteigenschaften geben zu können.

6.2 Zusammenhang zwischen den Transporteigenschaften und der Einlagerung hygroskopischer Salze

Hygroskopische Salze - in diesem Fall Kochsalz - beeinflussen den Feuchtigkeits- und Ionentransport nachhaltig. Die Konzentration der Salzlösung wurde auf 3 Gew.-% NaCl festgelegt. Lang /23/ überprüfte bei ihren Untersuchungen zu Strukturänderungen und Transportvorgängen im Porensystem des Zementsteines bei Frost und Frost-Tausalz-Angriff verschiedene Konzentrationen von NaCl-Lösungen. Die Zementsteinmatrix bei Lagerung in einer Salzlösung von 3 Gew.-% NaCl besass den höchsten Anteil an Chloridionen, wenn der Gelporenraum vernachlässigt und eine homogene Verteilung der Chloridionen in der Zementsteinmatrix und im Porenraum vorausgesetzt wurde. Bei Aufsaugversuchen über 24 Stunden war kein signifikanter Unterschied im kapillaren Flüssigkeitstransport von Wasser und einer 3%-igen NaCl-Lösung festzustellen. Unabhängig von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit wurde sowohl Wasser als auch die Salzlösung innerhalb der Streubreite in gleichem Masse aufgenommen. Längere Aufsaugversuche im Konstantklima bis zu 28 Tagen zeigten, dass Wasser rascher und tiefer in das Betoninnere vordrang als die Salzlösung. Dieser Effekt kann auf die Aenderung der Oberflächenspannung und der Viskosität durch wasserlösliche Salze sowie auf den osmotischen Druck zurückgeführt werden /24/.

Die Oberflächenspannung von Lösungen anorganischer Salze ist grösser als die von Wasser, weil die Salze durch ihre starke Wechselwirkung mit dem Lösungsmittel Wasser (Hydratation der Ionen) aus der Oberfläche verdrängt werden. Für eine 3%-ige Natriumchloridlösung beträgt bei 20 °C die Oberflächenspannung σ = 0.07375 N/m, verglichen mit Wasser σ = 0,07275 N/m /25/. Unter der vereinfachenden Annahme einer gut benetzbaren Oberfläche, $\Theta = 0$ °, und einer zylinderförmigen Kapillare mit einem Radius r = 0,05 µm stellen sich nachfolgende Kapillardrücke ein:

Salzlösung: $$\Delta p_k = \frac{2 \cdot 0{,}07375}{0{,}05 \cdot 10^{-6}} = 2{,}95 \text{ MPa}$$

Wasser: $$\Delta p_k = \frac{2 \cdot 0{,}07275}{0{,}05 \cdot 10^{-6}} = 2{,}91 \text{ MPa}$$

Im Bauteil sind durch die Feuchtigkeits- und Ionenwanderung bei der Aufnahme einer Salzlösung Zonen unterschiedlicher Salzkonzentration vorhanden. Eine konzentrierte Salzlösung, die durch eine Membran aus Zementstein vom Lösungsmittel getrennt ist, hat das Bestreben durch die Membran einen Konzentrationsausgleich vorzunehmen. Die Wassermoleküle sind aber beweglicher als die gelösten Salzmoleküle und damit wandern pro Zeiteinheit mehr Wassermoleküle in die Zonen hoher Salzkonzentration. Im porösen System baut sich dadurch ein Druck auf, der zum Stillstand kommt, sobald der osmotische Druck der Lösung erreicht ist. Der osmotische Druck kann mit Hilfe der folgenden Beziehung von van't Hoff ermittelt werden:

$$\Delta p_{Osm} = c \cdot R \cdot T \qquad (15)$$

mit:
- c = Konzentration der Lösung [Mol/l]
- R = Gaskonstante [J/(k Mol)]
- T = Temperatur [k]

Für eine 3%-ige Natriumchloridlösung wirkt bei 20 °C ein osmotischer Druck von Δp_{Osm} =1,25 MPa. Der resultierende Gesamtdruck einer 3%-igen Natriumchloridlösung ($\Delta p_{res} = \Delta p_k - \Delta p_{Osm}$) beträgt 1,70 MPa und ist kleiner als der Kapillardruck von Wasser.

Bei den Aufsaugversuchen mit einer Salzlösung wurde festgestellt, dass die Chloridionen beim Huckepacktransport wesentlich langsamer in das Betoninnere wandern als die Wasserfront vordringt. Dieser Filter- bzw. Siebeffekt wurde auch von Maultzsch /26/ bei Aufsaugversuchen an Zementmörtel und von Gräf /27/ bei Permeabilitätsmessungen an Beton beobachtet. Maultzsch erklärt diesen Filtereffekt mit einer Gegendiffusion der Na+ und Cl- Ionen, die zu Neu- und Umbildungen der Mineralphasen führen. Dadurch werden die Gefügemerkmale des Betons im Kapillar- und Mikroporenbereich beeinflusst. Gräf vermutet, dass die eingedrungenen Na+ und Cl- Ionen durch Eingehen von physikalischen und teilweise chemischen Bindungen mit den Festkörperoberflächenatomen und Molekülen den ursprünglichen Porenraum verkleinert haben. Auch Hydratations- und Quellvorgänge, ausgelöst durch das zusätzliche Lösungswasser, können zu diesem Ergebnis beitragen.

Neben Versuchen im Konstantklima wurde die Befeuchtung und Trocknung im Wechselklima untersucht. Zyklische Wechsellagerungen haben für die Praxis einen zeitraffenden Charakter und stellen für den Beton eine starke Beanspruchung dar. Die Zyklen, ein Kurzzeitzyklus im Tagesrhythmus und ein Langzeitzyklus im Wochenrhythmus, wurden in Anlehnung an Klimadaten für den Standort Zürich /28/ ausgewählt.

Die Befeuchtung und Trocknung sowohl im Kurzzeitzyklus als auch im Langzeitzyklus war von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig (vgl. Kap. 6.1). Die flächenbezogene Wasseraufnahme und -abgabe im Langzeitzyklus strebte bereits nach wenigen Zyklen einem Gleichgewicht in Abhängigkeit von der Betonqualität und von der Oberflächenbeschaffenheit entgegen. Nach 6 Zyklen konnte ein leichter Abfall der Wasseraufnahme bzw. -abgabe festgestellt werden. Dieser Effekt lässt sich vermutlich auf bei der Befeuchtung gelöste Ionen zurückführen, die ihrerseits beim Trocknen zur Verdunstungsseite wandern. In den oberflächennahen Zonen kristallisieren sie aus und verkleinern den Porenraum. Bei einer erneuten Befeuchtung steht nur noch ein geringerer Transportraum zur Verfügung.

Beim Kurzzeitzyklus für Wasser konnte für die Betone mit geschalter und abgestrichener Betonoberfläche und einem w/z-Wert von 0,5 selbst nach 28 Zyklen keine Annäherung an einen Grenzwert beobachtet werden. Der Beton mit einem w/z-Wert von 0,40 näherte sich nach 12 Zyklen einem Gleichgewicht.

Zusammenfassend gilt für die zyklische Wechsellagerung mit Wasser:

- Die Zeit, in der bei zyklischer Wechsellagerung ein Feuchtigkeitsgleichgewicht erreicht wird, ist von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig.

- Bei einem Langzeitzyklus wird das Feuchtigkeitsgleichgewicht nach weniger Zyklen erreicht als beim einem Kurzzeitzyklus.

Die zyklische Wechsellagerung mit einer 3%-igen NaCl-Lösung bewirkt durch die Einlagerung hygroskopischer Salze eine geringere Feuchtigkeitsabgabe beim Trocknen. Mit zunehmender Zyklenzahl wird somit der Feuchtigkeitsgehalt "aufgeschaukelt". Die Wasseraufnahme und -abgabe ist wiederum von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Beim Langzeitzyklus wird nach 6 Zyklen ein Gleichgewicht erreicht. Im Kurzzeitzyklus ist für die Betone mit geschalter und abgestrichener Betonoberfläche und einem w/z-Wert von 0,50 selbst nach 28 Zyklen keine Annäherung an einen Grenzwert festzustellen, während der Beton mit einem w/z-Wert von 0,40 nach 12 Zyklen einem Gleichgewicht zustrebt.

Ein Vergleich von Wasser und Salzlösung bei den entsprechenden Betonqualitäten und Oberflächenbeschaffenheiten führt beim Kurzzeitzyklus zu grösseren Unterschieden in der Wasseraufnahme und -abgabe als beim Langzeitzyklus. Eine Ausnahme bildet beim Kurzzeitzyklus der Beton mit einem w/z-Wert von 0,40, bei dem unabhängig von der Art des Lösungsmittels die Befeuchtung und Trocknung gleich verläuft. Bei den zyklischen Wechsellagerungen mit einer Salzlösung konnte der bereits erwähnte Sieb- bzw. Filtereffekt ebenfalls festgestellt werden. Die ermittelten Chloridgehalte waren bei den entsprechenden Betonqualitäten und Oberflächenbeschaffenheiten aufgrund der "Pumpwirkung" der zyklischen Wechsellagerung erheblich höher. Darüberhinaus wurden Chloridgehalte über 1 Gew.-%, bezogen auf das Zementgewicht noch in Tiefen bis zu 30 mm festgestellt.

6.3 Zusammenhang zwischen Transporteigenschaften und einer Hydrophobierung

Der Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von einer Hydrophobierung auf Silanbasis in 20%-iger Verdünnung wurde untersucht. Die Wirksamkeit und die Haltbarkeit von Hydrophobierungen werden wesentlich von der bei der Imprägnierung erzielten Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels bestimmt. In Abhängigkeit von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit nahm der Beton beim Imprägnieren mehr Hydrophobierungsmittel auf, das mit den nach der Färbemethode ermittelten Eindringtiefen korrelierte. Die Grenze zwischen hydrophobierter Zone und unbehandeltem Beton war beim Nachweis mit der Färbemethode klar gekennzeichnet.

Die Tiefenwirkung des Hydrophobierungsmittels wurde mit einem 2. Verfahren untersucht. Die kapillare Wasseraufnahme wurde in Verbindung mit schichtweisem Abfräsen der Oberfläche von 1 mm geprüft. Unabhängig von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit führte das Abfräsen von bereits 1 mm zu einer erheblichen Wasseraufnahme, die sich bereits bei 2 mm Abschleiftiefe dem unbehandelten Beton näherte.

Dieses Ergebnis bestätigt die Untersuchungen von Roth /29/, der die Verteilung eines Hydrophobierungsmittels in der hydrophobierten Zone überprüfte. Er vermutet, dass die Imprägnierlösung durch chromatographische Effekte beim Eindringen in den porösen Werkstoff an Wirksubstanz verarmt. Die wasserabweisende Wirkung ist im Bereich der Baustoffoberfläche am grössten und fällt nach innen ab.

Die kapillare Wasseraufnahme wurde sowohl im Konstantklima als auch im Wechselklima drastisch reduziert. Im Konstantklima und im Wechselklima wurde kein signifikanter Unterschied im Aufsaugverhalten von verschiedenen, hydrophobierten Betonoberflächen festgestellt. Unabhängig von der Betonqualität und der Oberflächenbeschaffenheit wiesen alle untersuchten Betone sowohl nach kurzen als auch nach längeren Aufsaugzeiten Ergebnisse im Bereich der Streubreite auf. Die Aufnahme flüssigen Wassers wird verhindert und nur ein Feuchtigkeitstransport über die Gasphase wird zugelassen, der durch die Dicke der hydrophobierten Zone und den Diffusionskoeffizienten des Hydrophobierungsmittels bestimmt wird.

Die Aufsaugversuche mit einer 3%-igen NaCl-Lösung im Konstantklima und im Wechselklima zeigten, dass das Eindringen der Chloridionen wirkungsvoll unterbunden wurde, obwohl die Wasserfront nach längeren Aufsaugzeiten sich wesentlich tiefer im Betoninneren befand. Chloride konnten nur an der unmittelbaren Oberfläche in nennenswertem Umfang nachgewiesen werden und sind auf die anhaftende Salzlösung zurückzuführen. Damit werden frühere Untersuchungen zum Aufsaugverhalten hydrophobierter Betonoberflächen bestätigt /30/.

6.4 Realkalisierung

Eine Realkalisierung karbonatisierter Betonbauteilen wurde mit hydraulisch gebundenen Reparaturmörteln an Laborproben und Bauwerksbeton erfolgreich durchgeführt. Die Ergebnisse zur Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen bestätigen die Ergebnisse von Bier /31/. Ein Unterschied im Verhalten von Zementmörtel, Kalk-Zementmörtel und Kalkmörtel konnte nicht festgestellt werden. Dieses Ergebnis ist in dem geringen Löslichkeit von Calziumhydroxid, bei 20°C 1,7 g/l, begründet. Dennoch sollte der Reparaturmörtel ein ausreichendes Depot an Calziumhydroxid aufweisen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Realkalisierung übte der Feuchtigkeitsgehalt des karbonatisierten Untergrundes auf. Vor der Applikation des Reparaturmörtels über 2 Tage bei 50°C getrocknete Oberflächen wiesen die besten Ergebnisse hinsichtlich des Zeitraumes einer erfolgten Realklisierung auf. Bei wassergesättigten Untergründen trat unabhängig von der Art des Reparaturmörtels innerhalb von 3 Wochen keine Realkalisierung auf. Dieses Ergebnis ist auf die Art des Transportmechanismus zurückzuführen. Getrocknete Oberflächen nehmen das Porenwasser des Reparaturmörtels durch kapillares Saugen auf, während bei gesättigtem Untergrund Diffusion vorherrscht. Die Kapillarleitung ist, wie bereits dargelegt, der wesentlich leistungsstärkere Transportmechanismus. Dennoch muss die Trocknung der karbonatisierten Betonoberfläche behutsam durchgeführt werden, um Gefügeschädigungen zu verhindern und ein Austrocknen, "Verbrennen", des Reparaturmörtels zu verhindern.

Die Lagerungsbedingungen, d.h. Nachbehandlung des aufgebrachten Reparaturmörtels, beeinflussen den Fortschritt der Realkalisierung erheblich. Die Lagerung unter einer Folie im Klima 20°C/60 % r.F. führte zu keiner Realkalisierung. Die Lagerungsarten unter Wasser, im Wasserbad sowie unter feuchten Tüchern und Folie sind als gleichwertig zu beurteilen. Eine Austrockung des Reparaturmörtels muss durch geeignete Verfahren verhindert werden, um einen ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt im Reparaturmörtel zu gewährleisten.

Das Langzeitverhaltens realkalisierter Betonbauteilen, d.h. die Rekarbonatisierung, wurde überprüft. Bei realkalisierten Oberflächen ohne zusätzliche Schutzmassnahme setzte die Rekarbonatisierung unmittelbar nach Abschlagen des Reparaturmörtels ein. Eine realkalisierte Oberfläche ist nur bei Belassen des

Reparaturmörtels oder in Verbindung mit der Applikation einer Karbonatisierungsbremse auf die ursprüngliche Oberfläche über längere Zeiträume hinreichend vor einer Rekarbonatisierung geschützt. Calziumhydroxid ist durch die Realkalisierung in die Poren der zuvor karbonatisierten Zone eingebracht worden und setzt sich dort nicht chemisch mit den Karbonatisierungsprodukten um. Das eingebrachte Calciumhydroxid bewirkt eine Erhöhung des pH-Wertes vom Porenwasser auf pH ≈ 12,5. Die eingebrachte Menge an Calciumhydroxid ist mit 1,7 g/l vergleichsweise sehr gering, so dass eine Rekarbonatisierung unmittelbar fortschreiten kann. Das Aufbringen einer Karbonatisierungsbremse erhöht den Diffusionskoeffzienten gegenüber CO_2 und das Belassen des Reparaturmörtels bewirkt eine grössere Diffusionslänge für die angreifenden CO_2-Moleküle.

Anhand der nachfolgenden Darstellung wird der Karbonatisierungsfortschritt rein theoretisch, d.h. ohne Berücksichtigung weiterer werkstoffzerstörender Einflüsse, behandelt. Für den Karbonatisierungsfortschritt gilt aufgrund der Diffusionsgesetze die nachfolgende Beziehung:

$$d_c = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{c_1}{c_2} t} \qquad (16)$$

mit:

- d_c = Karbonatisierungstiefe [m]
- D = Diffusionskoeffizient CO_2 [m^2/s]
- c_1 = Konzentration an CO_2 in der Atmosphäre (≈ 0,6 g/m^3)
- c_2 = Konzentration an CO_2, die zur Karbonatisierung von 1 m^3 Beton benötigt wird [kg/m^3].
- t = Karbonatisierungszeit [s]

Mit den folgenden vereinfachenden Annahmen kann für eine gegebene Karbonatisierungstiefe d_c = 10 mm die Karbonatisierungsgeschwindigkeit für einen jungen, noch nicht karbonatisierten Beton und ein realkalisiertes Betonbauteil ermittelt werden. Der Diffusionskoeffizient von Kohlendioxid für einen Standardbeton beträgt $D_{CO2} \approx 9\ 10^{-7}\ m^2/s$ bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 48 und 86 %. Für einen Standardbeton mit einem Zementgehalt von Z = 300 Kg/m^3 wird ein Calciumhydroxidgehalt von 60 kg/m^3 und eine Porosität von 20 Vol-% angenommen. Aus der Löslichkeit von Calciumhydroxid und den entsprechenden Annahmen kann ein Gehalt an Calciumhydroxid von 0,34 kg/m^3 berechnet werden.

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit eines realkalisierten Betonbauteiles erfolgt unter den gegebenen Bedingungen mit dem Faktor 176 gegenüber der Karbonatisierung eines jungen, nicht karbonatisierten Betons.

7. Folgerungen und offene Fragen

Der kapillare Wassertransport in Beton wird nur unzureichend mit einem $\sqrt{t}$-Gesetz beschrieben. Die werkstoffspezifischen Kenngrössen - Wasseraufnahmekoeffzient A und Wassereindringkoeffzient B - stellen somit keine geeigneten Grössen zur Charakterisierung der kapillaren Wasseraufnahme und der Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme dar.

Der Zusammenhang zwischen Porosität und Transporteigenschaften des Betons wurde eingehend untersucht. Dabei zeigte sich, dass neben der füllbaren Porosität und der Gesamtporosität noch weitere Porositätseigenschaften (z.B. Form der Poren, Grösse der Poren, Häufigkeitsverteilung der Poren, geometrischer Aufbau des Porensystems) bekannt sein müssen, um eine allgemeingültige Beziehung zwischen Porosität und Transporteigenschaften angeben zu können.

Der kapillare Feuchtigkeitstransport wurde in Abhängigkeit von betontechnologischen Parametern bestimmt. Ein geringer w/z-Wert, künstlich eingeführte Luftporen sowie ein zunehmendes Grösstkorn des Zuschlages führten zu einer geringeren kapillaren Wasseraufnahme. Schalseiten, mit und ohne Verwendung von Schalöl, nahmen unabhängig von der Betonqualität weniger Wasser auf als Abstrichseiten. Der Einfluss des verwendeten Schalöls auf den kapillaren Feuchtigkeitstransport kann vernachlässigt werden. Die Art der Nachbehandlung bestimmt die Transporteigenschaften nachhaltig. Keine Nachbehandlung führt in jedem Fall zu einer grösseren Flüssigkeitsaufnahme. Betone mit einer Nachbehandlung von 7 Tagen unter feuchten Tüchern und Folie bzw. mit einer Nachbehandlung von 14 Tagen unter Wasserlagerung wiesen im Prüfalter von 90 Tagen keinen signifikanten Unterschied im Aufsaugverhalten auf. Eine Nachbehandlung ist bei der Verwendung von Portlandzement hinsichtlich der Transporteigenschaften unter normalen klimatischen Bedingungen bis zum 7. Tag bei entsprechenden Massnahmen, z.B. feucht halten und Folien, hinreichend. Fragen des Einflusses von Rissen in der Betonoberfläche, d.h. definierter Rissbreite und -tiefe, auf das Aufsaugverhalten bedürfen näherer Untersuchungen .

Unter praxisnahen klimatischen Bedingungen wurde die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und ggf. anschliessende Trocknung untersucht. Wasser dringt im Konstantklima in Beton rascher und tiefer ein als Salzlösungen. Beim Eindringen einer Salzlösung wandern die Chloridionen wesentlich langsamer als

das Lösungsmittel Wasser. Bei zyklischer Wechsellagerung führt die Hygroskopie der eingetragenen Salze im Laufe der Zeit zu einem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt, der die Frost- und Tausalzbeständigkeit des Betons erheblich verringert. Der Chloridgehalt im Bereich der Betonüberdeckung ist bei zyklischer Wechsellagerung wesentlich höher als bei einer Lagerung im Konstantklima. Die Korrosionsgefahr der oberflächennahen Armierung und der tiefer liegenden Armierung ist in jedem Fall grösser.

Der Feuchtigkeits- und Ionentransport in Abhängigkeit von oberflächentechnologischen Massnahmen (Hydrophobierung) wurde untersucht. Eine Hydrophobierung behindert bei Rissefreiheit den kapillaren Wassertransport merklich und verhindert das Eindringen von Salzen, ohne die Gasdiffusion zu beeinträchtigen. Eine hydrophobierende Oberflächenbehandlung verbessert die Dauerhaftigkeit eines Bauteiles aus Stahlbeton, unabhängig von der Verbesserung der Frost- und Tausalzbeständigkeit. Eine Beurteilung der Eindringtiefe rein optisch nach der Färbemethode gibt wenig Aufschluss über die erzielte Tiefenwirkung des verwendeten Hydrophobierungsmittels, da sich ein Wirkstoffgefälle in der hydrophobierten Zone einstellt. Die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels im Beton beträgt nur wenige Millimeter, so dass möglicherweise nach einer längeren Periode eine Wiederholung der Oberflächenbehandlung notwendig wird. Eine Eindringtiefe von mindestens 5 mm im Beton, wäre notwendig, um den Feuchtigkeits- und Ionentransport langfristig hinreichend zu beeinflussen bzw. zu unterbinden. Fragen des Langzeitverhalten von Hydrophobierungen durch UV-Strahleneinwirkung sowie die Problematik von Fehlstellen in der Imprägnierung sowie in der Betonoberfläche bedürfen einer näheren Untersuchung.

Eine Realkalisierung karbonatisierter Betonrandschichten wurde mit hydraulischgebundenen Reparaturmörteln unter praxisnahen Bedingungen erfolgreich durchgeführt. Der Feuchtigkeitsgehalt der Oberfläche darf nicht zu hoch und muss andernfalls vor der Applikation des Reparaturmörtels durch Trocknen auf einen günstigen Wert eingestellt werden, so dass ein schnelles Einbringen von Calziumhydroxid in die karbonatisierte Zone infolge kapillaren Saugens erfolgen kann. Das Langzeitverhaltens realkalisierter Betonrandzonen, d.h. der Rekarbonatisierung, wurde überprüft. Eine realkalisierte Oberfläche ist nur bei Belassen des Reparaturmörtels oder in Verbindung mit der Applikation einer Karbonatisierungsbremse auf die ursprüngliche Oberfläche über längere Zeiträume hinreichend vor einer Rekarbonatisierung geschützt. Die Karbonatisierung realkalisierter Ober-

flächen wird in der Praxis ohne zusätzliche Schutzmassnahmen wesentlich schneller fortschreiten. Fragen einer genaueren Bestimmung von Karbonatisierungprofilen durch geeignete Messverfahren sowie des Verhaltens von Chloriden in der realkalisierten Betonrandzone bedürfen weiterer Untersuchungen.

8. Literaturverzeichnis

/1/ CEB - "Durability of Concrete Structures", State-of-the-Art Report, CEB Bulletin 148

/2/ Setzer,M.J.;"Transportvorgänge und Porenstruktur - Wassertransport"; in: "Erhalten von Beton", Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten, Internationales Kolloquium, Wien, Heft 39,7-17 (1986)

/3/ IUPAC Manual of Symbols and Terminology, Appendix 2, Part I, Colloid and Surface Chemestry; in: Pure and Application Chemestry **31** , 578 (1972)

/4/ Smolczyk,H.-G.; "Flüssigkeit in den Poren des Betons - Zusammensetzung und Transportvorgänge in der flüssigen Phase des Zementsteines", Beton-Information, Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut Eisenhütten-schlacken, **24,** 3-10 (1984)

/5/ Gaber,K.G.; "Einfluss der Porengrössenverteilung in der Mörtelmatrix auf den Transport von Wasser, Chlorid und Sauerstoff im Beton", Dissertation, TH Darmstadt, (1989)

/6/ Hoshino,M.: "Difference of the W/C ratio, porosity and microscopical aspect between the upper boundary paste and the lower biundary paste of the aggregate in concrete", Materials and Structures/Materieux et Construction, **21**, 336-340 (1988)

/7/ Lang,I. und Setzer,M.J.: "Einfluss von Feinstteilen auf die Porenstruktur und Betoneigenschaften", TIZ International, Magazin für Verfahrenstechnik, **112,** 239-242 (1988)

/8/ Rose,D.A.: "Water Movement in Porous Materials", Brit. I. Appl. Phy. , **14,** 256-262 und 491-496 (1963)

/9/ Grube, H.: "Einfluss der Wasserdurchlässigkeit des Betons auf die Gebrauchseigenschaften", Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der österreichischen Zementfabrikanten, Internationales Kolloquium, Wien, Heft 39, 17-23 (1986)

/10/ Sasse,H.R.: "Hydrophobierungen und filmbildende Beschichtungen: Theorie und Praxis", in:"Schutz und Sanierungsmethoden von Stahlbeton-bauwerken, SIA Dokumentation D 021, 43-66 (1988)

/11/ Schubert,H.: "Kapillarität in porösen Feststoffsystemen", Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982

/12/ Greenkorn,R.A.: "Flow Phenomina in Porous Media", Marcel Dekker, New York, 1983

/13/ Dullien,F.A.L.: "Porous Media, Fluid Transport and Pore Structure", Academic Press, New York, 1979

/14/ Rösli,A. und Mitarbeiter: "Frost- und Tausalzbeständigkeit von Beton", Strassenbauforschung des Eidgenössischen Departements des Innern, Forschungsprojekt 9/78, 26-29 (1983)

/15/ Lunk,P.: "Kapillare Wasseraufnahme poröser Werkstoffe des Bauwesens", Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, Institutsbericht , 1991 (in Vorbereitung)

/16/ Dorner,H.W.; Dietlmeier,H. und Letsch,R.: "Schnelle Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton durch Direktpotentiometrie", TIZ International, Magazin für Verfahrenstechnik, **111**, 329-331 (1987)

/17/ Yang,Q.: "Untersuchung des Betongefüges hinsichtlich der Beständigkeit unter besonderer Berücksichtigung des kapillaren Wassertransportes und der Chloridpenetration", Dissertation Nr. 8550, ETH Zürich, 1988

/18/ Powers,P.C. : "Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste", Jornal of the American Ceramic Society, **41**, 1-6 (1958)

/19/ Bitterli,K.; Yang,Q. und Peter,G.: "Zusammenhänge zwischen Betonporosität und Frostbeständigkeit", Schweizer Ingenieur Architekt, **111**, 628-636, (1985)

/20/ Adam,G.: "Frost-Tausalz-Beanspruchung von exponierten Betonbauteilen bei zyklischer Wasseraufnahme, Teil: Wasseraufnahme von beschichtetem Beton", Forschungsbericht, Institut für Bauingenieurswesen II, TU München, 1989

/21/ Rostasy,F.S.: "Baustoffe", Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1983

/22/ Rostasy,F.S. und Bunte,D.: "Dichtigkeitsprüfung an Bauwerksbeton", Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 1989

/23/ Lang,I.: "Strukturveränderungen und Transportvorgänge im Porensystem des Zementsteins bei Frost und Frost-Tausalz-Angriff", Dissertation, TU München, 1987

/24/ Pühringer,J.: "Möglichkeiten zur Verhinderung von Schäden durch Salze", in: Wittmann,F.H. "Werkstoffwissenschaften und Bausanierung", 2. Internationales Kolloquium, Technische Akademie Esslingen, 359-364 (1986)

/25/ Weast, R.C.; Astle, M.J und Beyer, W.H.: "Handbook of Chemistry and Physics", 69th Edition, CRC Press, Boca Raton, 1988

/26/ Maultzsch,M.: "Vorgänge beim Angriff von Chloridlösungen auf Zementstein und Beton", Material und Technik, **12**, 83-90 (1984)

/27/ Gräf,H.: "Ueber die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Beton", Dissertation, GH Essen, 1988

/28/ Flugwetterdienst Flughafen Kloten, Monatstabellen der automatischen Wetterstation Zürich

/29/ Roth,M.: "Das Wassersaugprofil einer Siliconimprägnierung", Bautenschutz und Bausanierung, **11**, 43-45 (1988)

/30/ Wittmann,F.H. : "Einfluss einer Hydrophobierung auf die Eigenschaften des Betons", Bautenschutz und Bausanierung, **10**, 151-155 (1987)

/31/ Bier,T: "Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton", Dissertation, U Karlsruhe, 1988,

9. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zwei Aspekte zur Oberflächentechnologie näher untersucht:

- Der Einfluss einer Hydrophobierung auf den Feuchtigkeits- und Ionentransport in den oberflächennahen Zonen des Betons unter besonderer Berücksichtigung einer Chloridionen Wanderung

- Die Realkalisierung eines bereits karbonatisierten Betonbauteiles durch Aufbringen einer Schicht aus einem hydraulisch gebundenen Reparaturmörtel

Mit Hilfe der Gammastrahlenabsorptionsmethode konnte eine quantitative Bestimmung des zeitabhängigen Feuchtigkeitsprofiles als Folge der kapillaren Wasseraufnahme gegeben werden.

Der kapillare Wassertransport in Beton wird nur unzureichend mit einem $\sqrt{t}$-Gesetz beschrieben. Die werkstoffspezifischen Kenngrössen - Wasseraufnahmekoeffzient A und Wassereindringkoeffzient B - stellen somit keine geeigneten Grössen zur Charakterisierung der kapillaren Wasseraufnahme und der Geschwindigkeit der kapillaren Wasseraufnahme dar.

Die kapillare Feuchtigkeitsaufnahme wurde in Abhängigkeit von betontechnologischen Parametern, praxisnahen klimatischen Bedingungen und oberflächentechnologischen Massnahmen bestimmt. Der Feuchtigkeitshaushalt von Betonbauteilen kann für gegebene Bedingungen berechnet werden.

Betonzusammensetzung und Nachbehandlung beeinflussen den Feuchtigkeitstransport nachhaltig. Der Zusammenhang zwischen Porosität und Transporteigenschaften des Betons wurde eingehend untersucht. Dabei zeigte sich, dass neben der füllbaren Porosität und der Gesamtporosität noch weitere Porositätseigenschaften (z.B. Form der Poren, Grösse der Poren, Häufigkeitsverteilung der Poren, geometrischer Aufbau des Porensystems) bekannt sein müssen, um eine allgemeingültige Beziehung zwischen Porosität und Transporteigenschaften geben zu können.

Unter praxisnahen klimatischen Bedingungen wurde die Befeuchtung infolge kapillaren Saugens und ggf. anschliessende Trocknung untersucht. Wasser dringt im Konstantklima in Beton rascher und tiefer ein als Salzlösungen. Beim Eindringen einer Salzlösung wandern die Chloridionen wesentlich langsamer als das Lösungsmittel Wasser. Bei zyklischer Wechsellagerung führt die Hygroskopie der eingetragenen Salze im Laufe der Zeit zu einem erhöhten Feuchtigkeitsgehalt.

Eine Hydrophobierung behindert bei Rissefreiheit den kapillaren Wassertransport merklich und verhindert das Eindringen von Salzen, ohne die Gasdiffusion zu beeinträchtigen. Eine Beurteilung der Eindringtiefe rein optisch nach der Färbemethode gibt wenig Aufschluss über die erzielte Tiefenwirkung des verwendeten Hydrophobierungsmittels. Das Abschleifen von 1 mm der hydrophobierten Zone führte bereits zu einer stark erhöhten Wasseraufnahme.

Eine Realkalisierung karbonatisierter Betonbauteile wurde mit hydraulisch gebundenen Reparaturmörteln unter praxisnahen Bedingungen erfolgreich durchgeführt. Das Langzeitverhaltens realkalisierter Betonrandzonen, d.h. der Rekarbonatisierung, wurde überprüft. Eine realkalisierte Oberfläche ist nur bei Belassen des Reparaturmörtels oder in Verbindung mit der Applikation einer Karbonatisierungsbremse auf die ursprüngliche Oberfläche über längere Zeiträume hinreichend vor einer Rekarbonatisierung geschützt.