

Eindringen von Chloriden in
Abhängigkeit von der Feuchte des
Betons (Chloriddiffusion)

F 1974

F 1974

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen -BMVBW- geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
BAUSTOFFINSTITUT

Institut für Bauingenieurwesen II
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung und
Prüfamt für Bituminöse Baustoffe und Kunststoffe

o.Prof.Dr. R. Springenschmid

EINDRINGEN VON CHLORIDEN
IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FEUCHTE DES BETONS
(CHLORIDDIFFUSION)

K.-H. LAWATSCH

A. VOLKWEIN

Der Bundesminister für Wohnungsbau

*Abschluß-Zwischen-Bericht
zum Forschungs-Auftrag*

Az.: BLS-800181-30 *ang.: 29.11.84*

*Sammlung der
Lageberichte
des Referats* BLS

Nr. 1974

MÜNCHEN 1984

Inhalt

- 1 Einführung und Zielsetzung
- 2 Kenntnisstand
- 3 Versuchsübersicht
- 4 Probekörper
 - 4.1 Ausgangsstoffe
 - 4.2 Betonrezeptur und Herstellung von Platten
 - 4.3 Nachbehandlung
 - 4.4 Charakterisierung der zu untersuchenden Betone
 - 4.5 Erzeugung von Rissen
 - 4.6 Versiegelung und Aufbringen des Salzes
- 5 Feuchte- und Diffusionsbedingungen
 - 5.1 Lagerung in Salzlösung
 - 5.2 Lagerung bei definierter Luftfeuchte und erhöhter CO₂-Konzentration
 - 5.3 Lagerung bei stationärer Wasserdampfdiffusion
 - 5.4 Lagerung im Freien unter Dach
- 6 Bestimmung der Chloridverteilungen und Carbonatisierungstiefen
 - 6.1 Herstellung der Analysenproben
 - 6.2 Bestimmung der Chloridgehalte
 - 6.3 Bestimmung der Carbonatisierungstiefen
- 7 Versuchsergebnisse und Diskussion der Zusammenhänge
 - 7.1 Feuchteabgabe bzw. -aufnahme während der Vorlagerung
 - 7.2 Eigenchloridgehalte der Betonplatten und deren Verteilungen
 - 7.3 Eindringen von Chlorid bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen
 - 7.3.1 Grundsätzliche Feststellungen zu den Bedingungen "Konstante Feuchte" und "Einmalige Feuchteänderung" (ohne CO₂)
 - 7.3.2 Chloridaufnahme nach Feuchteänderung von 77 nach 58 % r. F.
 - 7.3.3 Chloridaufnahme mit bzw. entgegen gleichzeitig stationärer Wasserdampfdiffusion
 - 7.3.4 Chloridaufnahme bei zyklisch wechselnder Feuchte und bei Lagerung im Freien

- 7.4 Einfluß erhöhter CO₂-Konzentration
- 7.5 Chloridverteilungen an Rissen
- 8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen
 - 8.1 Zielsetzung
 - 8.2 Versuchsdurchführung
 - 8.3 Ergebnisse
 - 8.4 Schlußfolgerungen
- 9 Literatur

Häufig verwendete Abkürzungen

- Cl_B⁻ Chloridgehalt des Betons in Gew.-%,
bezogen auf den bei + 105 °C getrockneten Beton
- Cl_{BO}⁻ Ausgangschloridgehalt des Betons, bedingt durch
die Eigenchloridgehalte von Zuschlag, Zement
und Anmachwasser
- Cl_Z⁻ Chloridgehalt des Betons in Gew.-%,
bezogen auf den Zement
- ..% r.F. Relative Luftfeuchte in Prozent,
bezogen auf die wasserdampfgesättigte Luft bei
gegebener Temperatur und normalem Luftdruck

1 Einführung und Zielsetzung

Seit geraumer Zeit ist bekannt, daß die z. B. auf Brückenbauteile neben und über der Fahrbahn einwirkenden Chloride aus Tausalzen innerhalb weniger Jahre in die Betondeckung eindringen und bei Erreichen der Bewehrung zu Korrosion des Stahles führen können /1 - 5/. Zur Beurteilung der Korrosionsgefährdung bei bestehenden wie neu zu bauenden Brücken wird daher angestrebt, den zeitlichen Ablauf des Eindringvorganges unter praktischen Bedingungen in etwa vorherzusagen. Hierzu liegen aber noch nicht genügend Erkenntnisse aus Bauwerksuntersuchungen vor. Es sind zwar in verschiedenen Klimagebieten an einer Vielzahl von Betonbauwerken unterschiedlichen Alters Chloridverteilungen als Funktion des Oberflächenabstandes ermittelt worden, jedoch lassen die Unterschiede in den Betoneigenschaften sowie die kaum vergleichbaren, örtlichen Bedingungen bisher kaum eine allgemeingültige Bewertung zu. Bevor nicht die Ergebnisse von systematischen, längerfristigen Auslagerungsversuchen vorliegen, ist man daher auf Laboruntersuchungen angewiesen, bei denen die in der Praxis denkbaren Einflußgrößen einzeln erfaßt werden können.

Aus derartigen Untersuchungen im Labor, bei denen Beton- oder Mörtelproben in der Regel mit Chloridlösungen beaufschlagt wurden, konnten bisher verschiedene Einflußgrößen wie z. B. Zementart, w/z-Wert, Verdichtungsgrad, Hydratationsgrad oder Carbonatisierung des Betons einerseits, sowie Chloridart, Lösungskonzentration oder Temperatur andererseits geklärt werden, vgl. z. B. die zusammenfassenden Darstellungen in /1 - 5/.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUINGENIEURWESEN II
LEHRSTUHL FÜR BAUSTOFFKUNDE UND WERKSTOFFPRÜFUNG UND
PRÜFAMT FÜR BITUMINÖSE BAUSTOFFE UND KUNSTSTOFFE
DIR.: O. PROFESSOR DR. R. SPRINGENSCHMID

Postanschrift:
Baustoffinstitut
Baumbachstraße 7, 8000 München 60
(früher: Paul-Gerhardt-Allee 2)
Telefon 8895-1, Durchwahl 8895-311
Unsere FA-Nr. 3123

Eindringen von Chloriden
in Abhängigkeit von der Feuchte
(Chloriddiffusion)

Dipl.-Ing. Karl-Heinz Lawatsch
Dipl.-Ing. Andreas Volkwein

München, November 1984

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben
"Chloriddiffusion", Az.: B I 5 - 80 01 81-20
Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn

Dieser Bericht umfaßt 62 Seiten.

Bei vielen Laboruntersuchungen kam man dabei zu dem Ergebnis oder ging davon aus, daß das Eindringen von Chloriden in Beton näherungsweise durch die Fick'schen Diffusionsgesetze beschrieben werden kann, womit der Eindringvorgang mit der Wurzel aus der Zeit, d. h. mit abnehmender Geschwindigkeit abliefe. Im Hinblick auf die bei Brückenbauten wechselnden Feuchtebedingungen muß jedoch zunächst in Frage gestellt werden¹⁾, ob die in Laboruntersuchungen bestimmten Diffusionskoeffizienten ohne weiteres in die Praxis übertragen werden können:

In den Wintermonaten kommen die Betonoberflächen im Bereich der Straße in zeitlich unregelmäßigen Abständen mit Chloridlösung (meist NaCl) wechselnder Konzentration in Berührung - z. B. in Form von Oberflächen- und Sickerwasser, Spritzwasser oder Sprühnebel. Die Salzlösungen können dabei auch bis zu auskristallisierten Salzkrusten abtrocknen, wie es in Form von weißen Rändern auf den Fahrbahnen oder an den Fahrzeugen bei trockener Witterung oft beobachtet werden kann.

In den wärmeren Jahreszeiten wirkt wiederum chloridfreies Wasser auf denselben Beton ein. In niederschlagsfreien Zeiten während des ganzen Jahres kann der Beton immer wieder austrocknen. Die äußeren Betonschichten sind dadurch einer ständig wechselnden Wasseraufnahme und -abgabe unterworfen. Mit dem dabei im Betongefüge transportierten Wasser werden u. a. auch Chloridionen transportiert und ggf. umverteilt /6/. Andererseits wird bei sehr geringen Feuchtegehalten des Betons das Eindringen von Chloridionen möglicherweise stark erschwert, obwohl genügend Salz, z. B. in Form von Krusten angeboten wird.

1) Nach Römpps Chemie-Lexikon /27/ versteht man unter "Diffusion" die ohne Einwirkung äußerer Kräfte allmählich eintretende Vermischung von verschiedenen, miteinander in Berührung befindlichen gasförmigen, flüssigen oder festen Stoffen, die durch selbständige Bewegung von Ionen, Atomen, Molekülen oder Kolloidteilchen verursacht wird.

Als Ziel dieser Arbeit wurde daher angestrebt, die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchtebedingungen des Betons auf das Eindringen von Chloriden zu untersuchen.

2 Kenntnisstand

Nach den in der Literatur mitgeteilten Laboruntersuchungen liegt der Diffusionskoeffizient unter Zugrundelegung der Fick'schen Gesetze etwa zwischen $0,5 \cdot 10^{-8}$ und $10 \cdot 10^{-8}$ cm^2/s . Die Angabe bezieht sich auf Chlorid aus NaCl bei Mörtel und Beton aus Portlandzement mit w/z-Werten zwischen 0,4 und 0,7.

Nach Messungen an 11 bis 20 Jahre alten Meeresbauwerken mehrere Meter über dem Wasserspiegel, mit Chlorid-Eindringtiefen bis zu 200 mm, lassen sich Diffusionskoeffizienten in der gleichen Größenordnung errechnen /7/.

Aus Untersuchungen an Betonproben, die nur zum Teil in Chloridlösung eintauchten, ist bekannt, daß besonders hohe Chloridgehalte und -eindringtiefen knapp über dem Lösungsspiegel oder in dem Bereich wechselnder Durchfeuchtung (auch Tidebereich an der Küste) auftreten /8/. Dabei ist der Chloridtransport bei hoher Umgebungsfeuchte über der Lösung offensichtlich geringer als bei niedriger Umgebungsfeuchte, wo der Wassertransport durch Verdunstung gefördert wird /1/.

Bei Untersuchungen zur Frostbeständigkeit von Beton /9/ wurde festgestellt, daß sich Chloride auch an der Unterseite der oben mit Chloridlösung beaufschlagten Betonplatten anreichern, obwohl im Innern der Platten nur wenig erhöhte Chloridgehalte nachweisbar waren. Ähnliche Beobachtungen ergaben sich auch bei Korrosionsversuchen an Betonbalken, die halbseitig in Chloridlösung gelagert wurden /10/.

Untersuchungen an Stützmauern neben Straßenunterführungen /11/ zeigten stark erhöhte Chloridgehalte auch an der erdberührten Seite, an der eine direkte Chlorideinwirkung auszuschließen war. Zumindest bei den Laborproben könnten derartige Phänomene mit der in /6/ beschriebenen Fähigkeit der Salze erklärt werden, an nur wenig feuchten Oberflächen entlangzukriechen.

Derartige Beobachtungen bestätigen, daß das Eindringen und Wandern von Chloriden durch eine gleichzeitige Wasserbewegung im Betongefüge entscheidend verstärkt wird. In trockenerem Beton fehlt das Transportmedium, das Eindringen und offenbar auch das Aufnahmevermögen von gelösten Chloriden wird geringer. Im Trocknungs- bzw. Verdunstungsbereich können dabei aber auch starke Chloridanreicherungen im oberflächennahen Beton entstehen. Eine Nachberechnung des Eindringvorganges aufgrund von gemessenen Chloridverteilungen nach den Fick'schen Diffusionsgesetzen ist dann oft kaum mehr möglich.

Diffusionsuntersuchungen unter definierten Feuchtebedingungen wurden von Locher und Sprung durchgeführt, wobei von einer kurzzeitigen Chloridbeaufschlagung in Form von Salzsäuredämpfen (im Zusammenhang mit PVC-Brandgasen) ausgegangen wurde /12/. Danach waren die Chlorideindringtiefen (für $Cl_Z^- \approx 0,4$ %) nach sechsmonatiger Lagerungsdauer bei 65 % und 32 % r. F. etwa gleich und bei 100 % r. F. demgegenüber um rd. die Hälfte größer (w/z-Werte 0,5 und 0,7). Eine zweimonatige Lagerung im siebentägigen Wechsel zwischen 100 % und 65 % r. F. ergab Eindringtiefen wie bei gleichbleibend 100 % r. F. Bei den niedrigen Luftfeuchten ergab sich in der Eindringgeschwindigkeit kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden w/z-Werten. Unter Einbeziehung von Zementgehalt und Porosität des Betons wurde sowohl bei diesen Laboruntersuchungen als auch bei Untersuchungen von 6 bis 50 Jahre alten, chloridbeaufschlagten Bauwerken festgestellt, daß für den Eindringvorgang eine einheitliche,

mathematische Beziehung zugrundegelegt werden kann. Danach ist in beiden Fällen im Gegensatz zum Fick'schen Diffusionsgesetz bei einer Extrapolation ($t = \infty$) auf eine endliche Eindringtiefe (x_∞) zu schließen:

$$\log x_t = \log a - \frac{bZ}{p\sqrt{t}} \quad \text{nach /12/} \quad (1)$$

$$\text{oder umgeformt mit } a = x_\infty: \frac{x_t}{x_\infty} = 10^{-\frac{bZ}{p\sqrt{t}}} \quad (2)$$

mit:

b...Konstante,

Z...Zementgehalt in kg/m^3 ,

p...Gesamtporosität in Vol.-%,

t...Zeit in Jahren,

x...Chlorideindringtiefe in mm für $\text{Cl}_Z \approx 0,4 \%$.

In die Konstante b gehen u. a. die Feuchtebedingungen ein. Nach dieser Untersuchung sind die Eindringgeschwindigkeiten bei den mehrere Jahre lang chloridbeaufschlagten Bauwerken wesentlich geringer ($b = 0,1028$) als bei den nach 6 Monaten untersuchten Laborproben in Luft mit 100, 65 und 32 % r. F. ($b = 0,0044$; $0,0036$ bzw. $0,0036$).

Es muß allerdings berücksichtigt werden, daß die Laborproben durch die anfängliche Salzsäurebeaufschlagung während des weiteren Eindringvorganges vermutlich keinen konstanten Feuchtegehalt aufwiesen, sondern daß auch hier, zumindest in den ersten Wochen, ein gleichzeitiger Feuchtetransport im Beton stattgefunden hat.

Untersuchungen an Betonträgern /13/, die infolge eines PVC-Brandes chloridverseucht waren und an die nachträglich chloridfreier Beton anbetoniert wurde, zeigten, daß ein Teil des Chlorids im Laufe von mehr als 6 Jahren bei Lagerung im Freien, d. h. bei wechselnden Feuchten, in den neu

aufgebrachten Beton eindrang. Der anfängliche Wassertransport - zunächst vom frischen zum alten Beton, später dann wieder umgekehrt - wird zwar nach /6/ eine erste Chloridumverteilung bewirkt haben. Das weitere Vordringen der Chloridfront in den neuen Beton während der folgenden Jahre kann jedoch auf die im Freien herrschenden Feuchtebedingungen zurückgeführt werden. Die maßgebende Bedeutung eines gleichzeitigen Wassertransports im Beton für das Eindringen von Chloriden wurde auch von /14/ nachgewiesen: Je weniger Wasser bzw. Lösung durch den Beton transportiert wurde, d. h. auch je dichter der Zementstein bzw. der Mörtel war, desto weniger tief drang Chlorid ein.

Bei Proben, die bereits einen erhöhten Chloridgehalt aufweisen, muß berücksichtigt werden, daß Chloridsalze hygroskopisch sind und daher die Feuchteaufnahme bzw. -abgabe und damit nicht nur den Feuchtehaushalt des Betons, sondern auch den Transport der Chloride beeinflussen. Nach /15/ sind die Feuchtegehalte von Zementsteinproben mit $w/z = 0,6$ und $Cl_Z^- = 2 \%$ in allen Feuchtbereichen sowohl bei der Desorption als auch bei der Adsorption höher als ohne Chloridzugabe, Bild 1. Außerdem kann danach davon ausgegangen werden, daß nicht nur die absoluten Feuchtegehalte bei erhöhtem Chloridgehalt höher sind, sondern daß auch die Hysterese der Sorptions-Isothermen verstärkt zu berücksichtigen ist.

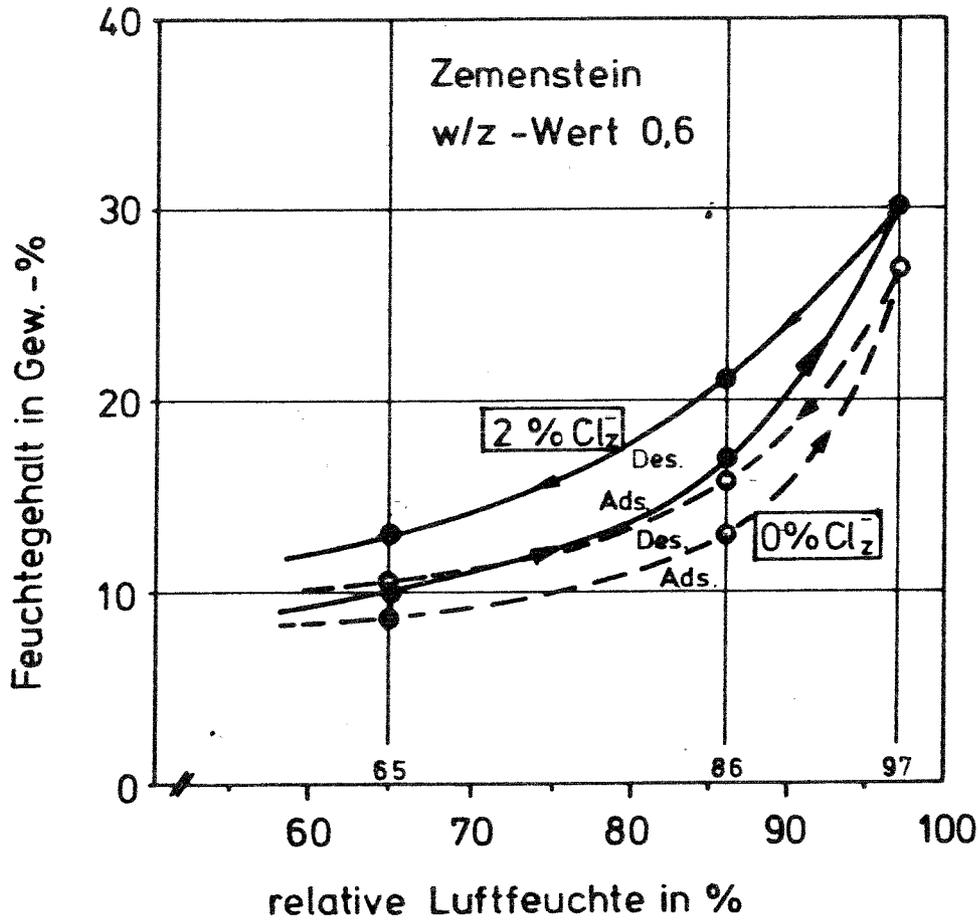


Bild 1: Feuchtigkeitsaufnahme (Adsorption) und -abgabe (Desorption) von gebrochenem Zementstein (Körnung 1/2 mm) mit und ohne Chloridzugabe zum Anmachwasser, aufgetragen nach Meßergebnissen von J. Tritthart /15/.

3 Versuchsübersicht

Zur Untersuchung des Feuchteinflusses war eine Chloridbeaufschlagung zu wählen, bei der die für den Beton maßgebenden Feuchtebedingungen über die Dauer der Chlorideinwirkung weitgehend konstant gehalten werden konnten. Dazu war zunächst erforderlich, daß die Proben erst nach möglichst weit fortgeschrittener Hydratation mit Chlorid beaufschlagt wurden.

Im Hinblick auf die Art der Chloridbeaufschlagung mußte zwischen den Feuchtebedingungen unterschiedliche Luftfeuchte und Wassersättigung unterschieden werden.

Die erste Bedingung sollte dadurch eingehalten werden, daß Betonplatten auf einer Oberfläche mit fein gemahlenem, bei der jeweiligen Feuchte vorgelagertem NaCl eingerieben und überschichtet wurden. Für die zweite Bedingung mußten die Platten in NaCl-Lösung lagern, wobei eine gesättigte Lösung zu wählen war, damit in beiden Fällen vergleichbare Chloridkonzentrationen vorlagen.

Damit die Betonplatten ab Beginn der Chloridbeaufschlagung einen definierten Feuchte-Gleichgewichtszustand aufwiesen, wurden sie nach einer 2monatigen Nachbehandlung unter Wasser zunächst 3 Monate lang bei unterschiedlichen Feuchten ohne Chloridbeaufschlagung vorgelagert. (Im Folgenden mit Vorlagerung bezeichnet.)

Mit Beginn der Hauptlagerung wurden alle Proben einseitig von oben dem Chloridangebot ausgesetzt, wobei sowohl die bei der Vorlagerung gewählten Feuchtebedingungen beibehalten als auch geändert wurden, Tabelle 1.

Tabelle 1: Übersicht über die Lagerungsbedingungen

	Vorlagerung	Hauptlagerung
Feuchtebedingung vor und während Chloridbeaufschlagung beibehalten	58 %)	- 58 % + Salzschiicht (S))
	77 %) *)	- 77 % + Salzschiicht (S)) *)
	92 %)	- 92 % + Salzschiicht (S))
	unter Wasser	- gesättigte NaCl-Lösung
stationäre Wasserdampf-diffusion	von oben (92 %)	- wie Vorlagerung + (S), d.h. Wasserdampftransport mit Chloridtransport
	nach unten (58 %)	
	von unten (92 %)	- wie Vorlagerung + (S), d.h. Wasserdampftransport gegen Chloridtransport
	nach oben (58 %)	
Feuchtebedingung mit Chloridbeaufschlagung geändert	77 % r. F.	<ul style="list-style-type: none"> - 58 % r.F.+Salzschiicht (S) - 92 % + (S) - NaCl-Lösung - 2 tägiger Wechsel 58↔92 % +(S) - 7 tägiger Wechsel 58↔92 % +(S) - im Freien unter Dach + (S)

*) ohne wie auch mit Zuführung CO₂-angereicherter Luft

Für die ab Aufbringen des Salzes geänderten Feuchtebedingungen wurde als Ausgangsfeuchte die relative Luftfeuchte von 77 % gewählt, weil diese der in Deutschland über das Jahr gemittelten relativen Feuchte von 83 % sehr nahe kommt, vgl. Abschn. 5.4.

Nach 1, 3 und 8 Monaten Einwirkungsdauer des Chlorids wurden an den Platten die Chloridverteilungen über die Plattendicke bestimmt.

Um trotz der für einen schnellen Feuchteausgleich erforderlichen geringen Probenabmessungen größere Bauteile simulieren zu können, wurden die Betonplatten unter Ausnahme der chloridbeaufschlagten Oberfläche (Schalfläche) mit Epoxidharz versiegelt.

Es wurden zwei Betone mit unterschiedlicher Porosität (angestrebte w/z-Werte 0,5 und 0,7) untersucht. Ferner wurden für den höheren w/z-Wert erstens zwei sich im C_3A -Gehalt unterscheidende Portlandzemente einbezogen, um das Chlorideindringen bei unterschiedlichem Chlorid-Bindungsvermögen der Zemente studieren zu können. Zweitens wurde bei einer Serie auch der Ausgangschloridgehalt Cl_{BO}^- durch Zugabe von NaCl zum Anmachwasser auf $Cl_Z^- = 0,4$ % angehoben.

Zur Klärung, inwieweit Risse im Beton das Eindringen von Chloriden beeinflussen, wurden an einigen Platten vor der Vorlagerung Risse senkrecht zur chloridbeaufschlagten Fläche erzeugt, an denen auch quer zur Reißfläche das Chlorideindringen untersucht wurde.

In Tabelle 2 wurden die nach Beton-Serien und Lagerungsbedingungen gegliederten Untersuchungen mit Angabe der Einwirkungsdauer des Chlorids (Hauptlagerungsdauer) zusammengestellt.

Tabelle 2: Übersicht über die
einbezogenen Versuchsparameter

			Hauptlagerung																
Serie	Beton	Vorlagerung	Dauer in Monaten																
			58 % rF	77 % rF	92 % rF	NaCl-Lösung, gesättigt	58 % rF + CO ₂	77 % rF + CO ₂	92 % rF + CO ₂	stat. Diffusion 92 + 58 % rF	stat. Diffusion 58 + 92 % rF	Wechsel 2 d 58 bzw. 92 % rF	Wechsel 7 d 58 bzw. 92 % rF	im Freien unter Dach					
AI	PZ 35 F w/z ca. 0,6	58 % rF	1,3,8				3												
		77 % rF	1,3,8	1,3,8	8	1,3,8		3				8	8	8					
		92 % rF			1,8				3										
		Wasser				1,3,8													
		58 % rF + CO ₂						3											
		77 % rF + CO ₂							3										
		92 % rF + CO ₂								3									
		stat. Diffusion 92 + 58 % rF									1,8								
		stat. Diffusion 58 + 92 % rF										1,8							
AI C1	PZ 35 F w/z ca. 0,6 Cl _Z ⁻ 0,4 %	58 % rF					3												
		77 % rF	1,3,8	1,3,8				3											
		Wasser				1,3,8													
		58 % rF + CO ₂						3											
		77 % rF + CO ₂							3										
BI	PZ 45 F-HS w/z ca. 0,6	77 % rF		1,3,8													8		
		Wasser				1,3,8													
AII	PZ 35 F w/z ca. 0,5	58 % rF	8																
		77 % rF	8	1,3,8	8	1,3,8									8	8			
		92 % rF							3										
		Wasser				1,3,8													
		92 % rF + CO ₂							3										
		stat. Diffusion 92 + 58 % rF									1,8								
AIIR	PZ 35 F w/z ca. 0,5 mit RiB	77 % rF		1												1,8			
		stat. Diffusion 92 + 58 % rF								1									
		stat. Diffusion 58 + 92 % rF										1							

4 Probekörper

4.1 Ausgangsstoffe

Die chemischen Zusammensetzungen und die hieraus errechneten C_3A -Gehalte der verwendeten Zemente sind in Tabelle 3 angegeben. Danach entsprechen die C_3A -Gehalte (PZ 35 F bzw. PZ 45 F-HS) mit 11,6 Gew.-% bzw. 1,6 Gew.-% etwa den Mittelwerten für deutsche Zemente /16/. Für alle Betonmischungen wurde ein einheitlicher, im Brückenbau häufig verwendeter Zementgehalt von 350 kg/m^3 angestrebt.

Als Zuschlag wurde Rheinkiessand (Raum Karlsruhe) der Korngruppen 0/2 mm und 2/8 mm verwendet.

Zur späteren Bestimmung des Hydratationsgrades der Betonproben wurden von den beiden Zuschlag-Korngruppen die Glühverluste (bei + 600 und + 1000 °C, jeweils bezogen auf das 105 °C-Gewicht) ermittelt:

	<u>Korngruppe 0/2</u>	<u>Korngruppe 2/8</u>
Glühverlust + 105° → + 600 °C:	0,39 %	0,55 %
Glühverlust + 600° → + 1000 °C:	2,62 %	6,52 %

Geht man davon aus, daß der Glühverlust von + 600 nach + 1000 °C einer Abgabe von CO_2 gleichzusetzen ist und nimmt an, daß dieses nur an CaO gebunden war, so errechnen sich daraus folgende Carbonatgehalte der Zuschläge:

Korngruppe 0/2 .. ca. 6 %

Korngruppe 2/8 .. ca. 15 %

Die Chloridgehalte der Zuschläge (Bestimmung gemäß Abschn. 6.2) betragen, jeweils bezogen auf das Trockengewicht:

Korngruppe 0/2 .. 0,015 %

Korngruppe 2/8 .. 0,017 %

Das Anmachwasser (Leitungswasser) wies einen Chloridgehalt von 4,3 mg/l auf.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente nach Angabe des Herstellers (Cl_Z^- nach eigener Messung)

	Zementart	
	PZ 35 F	PZ 45 F-HS
Bestandteil	Gehalt in Gew.-%	
Glühverlust	2,5	1,6
Unlösliches	1,1	0,6
SiO_2	18,8	19,1
Al_2O_3	5,8	4,3
Fe_2O_3	2,3	5,8
CaO	61,8	63,1
MgO	2,5	1,6
SO_3	3,3	3,1
K_2O	-	0,8
Cl^-	0,036	0,015
Summe	98,1	100,0
C_3A , rechnerisch	11,6	1,6

4.2 Betonrezeptur und Herstellung von Platten

Um bei gleichem Zementgehalt, aber unterschiedlichen w/z-Werten extreme Konsistenzunterschiede zu vermeiden, wurde der Gehalt des Zuschlags an Feinstteilen für den Beton mit hohem w/z-Wert stark erhöht. Hierzu wurde nicht nur der Sandanteil gegenüber dem Kiesanteil erhöht, sondern nach entsprechenden Vorversuchen zusätzlich 15 % Quarzmehl (Größtkorn rd. 90 μm), bezogen auf Zement, zugegeben. Für die Betonserie AI wurde ein Ausbreitmaß von 46 cm ermittelt (Konsistenz K3), für die Betonserie AII ein Verdichtungsmaß von 1,37 (Konsistenz K1).

Mit den vier Betonmischungen wurden insgesamt 112 Platten (Abmessung 100 x 100 x 40 mm^3) in einer nicht saugenden Holzschalung ohne Verwendung von Schalöl stehend betoniert. Während des stetigen Einbringens des Betons in die Schalung erfolgte die Verdichtung auf einem Rütteltisch, wobei die Rüttelzeit für den Beton mit niedrigerem w/z-Wert rd. 1 min, für den Beton mit höherem w/z-Wert rd. 30 s betrug.

Der flüssigere Beton wies beim Verdichten trotz der optimierten Sieblinie noch geringe Neigung zum Bluten auf. Es muß daher davon ausgegangen werden, daß der rechnerisch zugrundegelegte Wassergehalt (245 l/m^3) um den Teil des beim Abziehens der Frischbetonoberfläche mit abgezogenen Blutwassers reduziert wurde. Dementsprechend waren auch die gemessenen Frischbeton-Rohdichten (gemessen im 8 l-LP-Topf) hier höher als die bei der Stoffraumrechnung zunächst angestrebten Sollwerte. Es wurden daher für die verwendeten Betone gemäß den gemessenen Frischbeton-Kennwerten korrigierte Stoffraumrechnungen durchgeführt, Tabelle 4.

Danach ergaben sich die als wirksam angenommenen w/z-Werte von rd. 0,5 bzw. 0,6, sowie gegenüber der ursprünglichen Stoffraumrechnung geringfügig abweichende Gewichtsanteile von Zement und Zuschlag.

Tabelle 3: Gemäß Frischbeton-Kennwerten korrigierte Stoffraum-Rechnungen
für die verwendeten Betone

Serie (Zementart)		AI (PZ 35 F)				AI/CL (PZ 35 F)			BI (PZ 45 F-HS)			AII (PZ 35 F)			
gemessene Frischbeton-Rohdichte		ρ_{FB}	2,266 kg/dm ³				2,280 kg/dm ³			2,273 kg/dm ³			2,342 kg/dm ³		
gemessener Porenraum		p_o	2,5 Vol.-%				2,0 Vol.-%			2,2 Vol.-%			2,8 Vol.-%		
Mischungsteil	Dichte kg/dm ³	Kurzzeichen	Mischungsverh. in Gew.-Teilen	G kg/m ³	V dm ³ /m ³	MV (Gew.-Tl.)	G kg/m ³	V dm ³ /m ³	MV (Gew.-Tl.)	G kg/m ³	V dm ³ /m ³	MV (Gew.-Tl.-)	G kg/m ³	V dm ³ /m ³	
Zement	3,10 3,22	Z Z _{HS}	1 -	357 -	116 -	1 -	360 -	116 -	- 1	- 356	- 110	1 -	342 -	111 -	
Wasser		W _o	-	218	218	-	202	202	-	228	228	-	166	166	
Zuschlag 0/2	2,633	K _{0/2}	2,963)	1056	401	2,966)	1068	406	2,966)	1056	401	2,116)	724	275	
Zuschlag 2/8	2,640	K _{2/8}	1,629) 4,742	581	220	1,650) 4,766	594	225	1,630) 4,745	580	219	3,240) 5,356	1110	420	
Quarzmehl	2,640	M	0,150)	54	20	0,150)	54	20	0,150)	53	20	-	-	-	
NaCl-Zusatz	2,165	Cl	-	-	-	0,0066	2,3	1	-	-	-	-	-	-	
Verdichtungs-poren	0	P _o	-	0	25	-	0	20	-	0	22	-	0	28	
Summen		Σ	-	2266	1000	-	2280	1000	-	2273	1000	-	2342	1000	
wirksamer w/z-Wert		ω'	0,61				0,56			0,64			0,49		

4.3 Nachbehandlung

Unmittelbar nach der Herstellung lagerten die Platten in der mit Glasplatten abgedeckten Schalung 2 Tage im Feuchtraum (20 °C, \approx 100 % r.F.) und nach anschließendem Ausschalen weitere 8 Wochen in abgedeckten Behältern unter Wasser. In die Wasserbehälter wurden zuvor die jeweils verwendeten Zemente als Bodenkörper zugefügt, um ein Auslaugen der Betonproben zu verhindern.

Alle Platten mit Ausnahme derjenigen, die sich während der gesamten Versuchsdauer in Wasser bzw. später in Natriumchloridlösung befanden, wurden dann bis zur Vorlagerung in den jeweils vorgesehenen Klimaten 4 Wochen im Klimaraum 20 °C/65 % r.F. zwischengelagert, um die in den Behältern (vgl. 4.3) eingestellten Luftfeuchten nicht zu sehr zu beeinflussen.

Die Platten der Serie AI/Cl (Chloridzugabe zum Anmachwasser) wurden ebenfalls unter Wasser mit Zement als Bodenkörper nachbehandelt, da im Rahmen von Vorversuchen nicht geklärt werden konnte, bei welcher Chloridzugabe zum Lagerungswasser kein Chloridtransport in die Proben hinein bzw. aus ihnen heraus auftritt. Es mußte daher möglicherweise mit einer geringen Auslaugung von Chlorid aus der Randschicht der Proben gerechnet werden. Eine Überprüfung der Chloridgehalte des Lagerungswassers ergab in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer t folgende Zunahme bei 13 Proben in ca. 10 Litern:

$t = 0$... 4,3 mg/l
$t = 1$ Mon.	... 7,4 mg/l
$t = 2$ Mon.	... 7,8 mg/l
$t = 3$ Mon.	... 7,8 mg/l

Daraus ergibt sich eine durchschnittliche Abnahme des Chloridgehaltes im Beton von rd. 2,7 mg je Probe (entsprechend 0,002 %, bez. auf Zement), was gegenüber $Cl_Z^- \approx 0,4$ % vernachlässigbar gering ist, vgl. auch Messungen an den Platten in Abschn. 7.2.

4.4 Charakterisierung der zu untersuchenden Betone

Aus jeder Betonserie wurden mehrere Betonplatten nach der Nachbehandlung über ca. 1 Jahr im Normalklima 20 °C/65 % r. F. gelagert. Von jeweils drei Platten wurden zunächst allseitig die Zementschlämmeschichten durch Schleifen mit Korund entfernt. An diesen Proben wurden dann nacheinander folgende Messungen durchgeführt:

- Ausgangsgewicht und Volumen nach einjähriger Lagerung in Normalklima,
- Gewichtszunahme bei kapillarer Wasseraufnahme bis zur Sättigung (Hierzu wurden die Platten flach auf einen ständig wassergesättigten Schwamm in einen abgedeckten Behälter gelegt, arbeitstäglich entnommen, oberflächlich an der Auflagefläche abgetupft und gewogen.),
- Trockengewicht nach einwöchiger Trocknung bei 105 °C im Trockenschrank bis zur annähernden Gewichtskonstanz,
- Carbonatisierungstiefe an einer abgespaltenen Plattenhälfte,
- Glühverluste an der jeweils zweiten Plattenhälfte im Muffelofen.

Nach diesen Untersuchungen ergaben sich die in Tabelle 5 aufgeführten Kennwerte. Die Angaben zum Feuchtegehalt und zum Glühverlust wurden auf die Trocken-Rohdichte bezogen. Als Poren-Füllungsgrad wurde das Verhältnis der Feuchtegehalte nach Lagerung bei 65 % r. F. und nach

kapillarem Wassersaugen bezeichnet. Bei den jeweils drei Proben aus einer Serie waren die Streuungen so gering, daß von ihrer Berücksichtigung abgesehen werden kann.

Tabelle 5: Mittlere Kennwerte der ca. 1 Jahr alten, im Normalklima (20/65) gelagerten Betone

Serie (Zementart) wirksamer w/z-Wert, vgl. Tab. 4		AI (PZ) 0,61	BI (PZ-HS) 0,64	III (PZ) 0,49
Trocken-Rohdichte (105 °C)	kg/m ³	2144	2172	2295
Feuchtegehalt nach 65 % r. F.	Gew.-%	2,85	2,53	2,63
	kg/m ³	61	55	60
Sättigungs-Wassergehalt	Gew.-%	6,81	7,08	4,42
	kg/m ³	146	154	101
Wasseraufnahme-Geschwindigkeit		vgl. Bild 2		
Glühverlust 105 → 600 °C	Gew.-%	3,5	3,6	3,0
	kg/m ³	75	78	69
Glühverlust 600 → 1000 °C	Gew.-%	4,4	3,8	4,1
	kg/m ³	94	83	94
Carbonatisierungstiefe	mm	3	3,5	0,5
Poren-Füllungsgrad	%	42	36	59

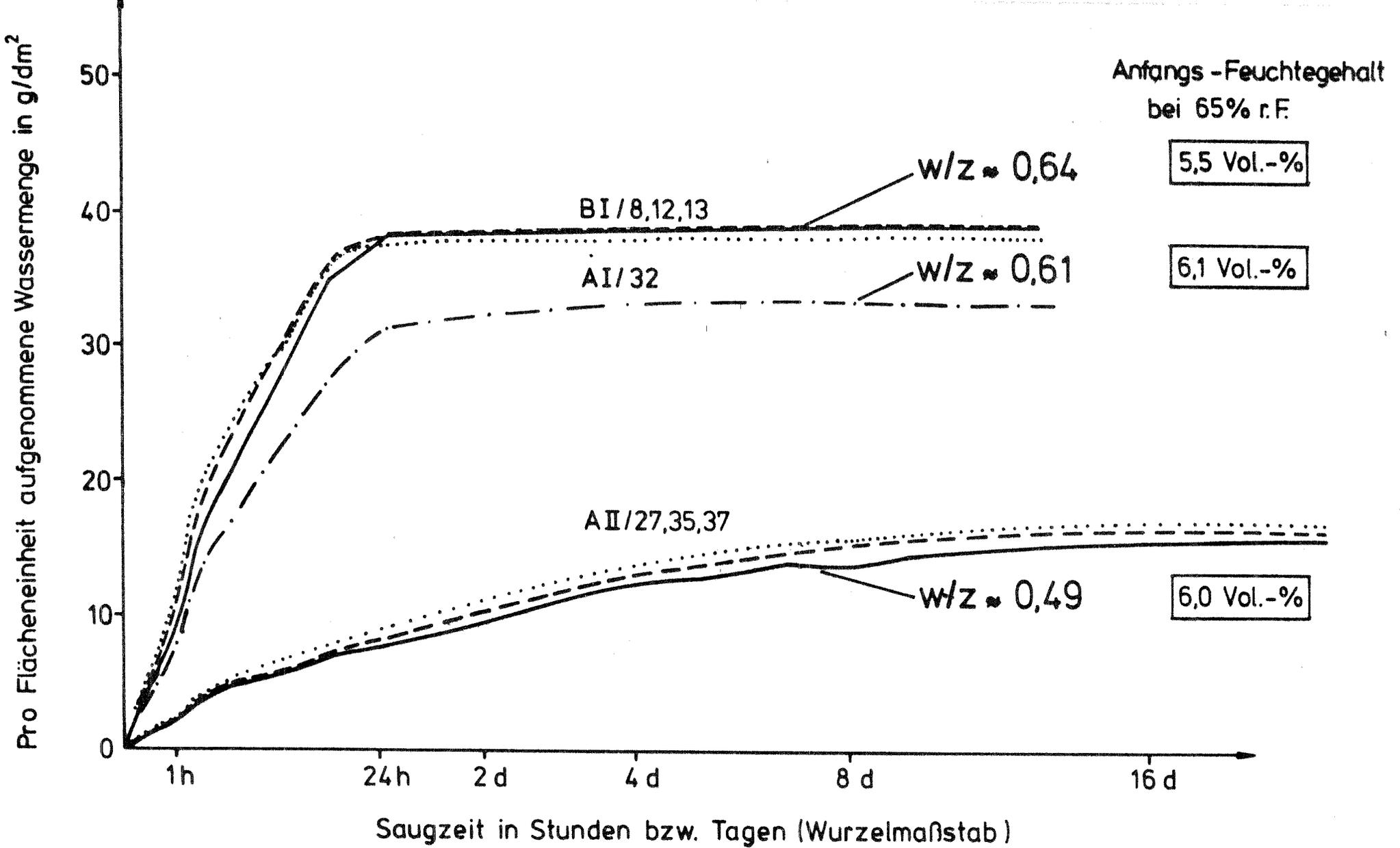


Bild 2: Gewichtszunahme der Betonplatten während einseitiger kapillarer Wasseraufnahme bis zur Gewichtskonstanz

Wie aufgrund der unterschiedlichen w/z-Werte zu erwarten war, ergaben sich bei allen Kennwerten mit Ausnahme des Ausgleichs-Feuchtegehalts bei 65 % r. F., bez. auf das Betonvolumen, deutliche Unterschiede. Bezogen auf den Sättigungs-Wassergehalt ergab sich demnach ein mit steigendem w/z-Wert abnehmender Poren-Füllungsgrad bei 65 % r. F..

Die Glühverluste zwischen 600 und 1000 °C und die Carbonatisierungstiefen können nicht unmittelbar miteinander verglichen werden, weil u. a. der Zuschlag teilweise Glühverlust aufwies. Ebenso kann aus der Wasseraufnahme nicht auf den Hohlraumgehalt des nicht carbonatisierten Betons und auf den ebenfalls interessierenden Hydratationsgrad des Zementes geschlossen werden. Zu diesem Zweck wurden in Tab. 6 Nachberechnungen durchgeführt. Danach liegen die aus den Glühverlusten ermittelten Hydratwasser-Gehalte im zu erwartenden Bereich, Tab. 6, Zeilen 1 und 2. Im Vergleich zum Wasseraufnahmevermögen bei kapillarer Sättigung (vgl. Tab. 5) ist der allein aus dem Hydratwasser-Volumen errechenbare Porenraum (Tab. 6, Zeile 3) um einheitlich rd. 20 l/m³ Beton größer (Tab. 6, Zeile 7). Ein bestimmter Teil dieser Differenz kann dem infolge Carbonatisierung zugenommenen Feststoff-Volumen zugeschrieben werden. Eine genauere Betrachtung ist jedoch nicht möglich, weil sich im Hinblick auf die zugehörige Gewichtszunahme infolge CO₂-Aufnahme teilweise widersprüchlich weit auseinanderliegende Rechenwerte ergaben (Tab. 6, Zeilen 4 bis 6).

Tabelle 6: Rechenwerte zur Porosität des Betons

Betonserie (Zementart)		AI (PZ)	BI (PZ-HS)	AII (PZ)		
wirksamer w/z-Wert, vgl. Tab. 4		0,61	0,64	0,49		
①	Hydratwasser-Gehalt = Glühverlust-Zementstein (+105→600°C) = Glühverlust Beton ÷ Glühverlust Zuschlag	kg/m ³	68	71	60	
②	Hydratwasser-Gehalt ①, bezogen auf den Zementgehalt 2)	Gew.-%	19,0	19,9	17,5	
③	Mit Wasser füllbarer Porenraum 1) einschl. Volumen des vom Zement gebunde- nen CO ₂ = Anmachwassergehalt 2) ÷ 0,75 ① 3)	l/m ³	167	175	121	
④	CO ₂ -Aufnahme	berechnet aus der Carbonati- sierungstiefe 4)	kg/m ³	29	34	5
⑤		Glühverlust Beton (+600→1000°C) ÷ Glühverluste von Zement u. Zuschlag	kg/m ³	28	17	2
⑥		Trocken-Rohdichte ÷ Zementgehalt ÷ Zuschlaggehalt ÷ ①	kg/m ³	28	56	59
⑦	Feststoff-Volumenzunahme durch CO ₂ -Aufnahme aus Differenz : ③ ÷ aufgenommene Wasser- menge bei kapillarer Wassersättigung in l/m ³		l/m ³	21	21	20

1) Dichte des in den Gel- und Kapillarporen enthaltenen Wassers mit 1,0 kg/l angenommen, Verdichtungsporengelalt 2) nicht berücksichtigt, vgl. hierzu auch Fagerlund /17/.

2) vgl. Tabelle 4.

3) Scheinbare Volumenkontraktion des chemisch gebundenen Wassers nach Czernin /18/: 25 Vol.-%

4) Gewichtszunahme des Zementsteins infolge Carbonatisierung nach Schießl /19/: 30 Gew.-%, bezogen auf Zement.

4.5 Erzeugung von Rissen

An insgesamt 6 Platten der Serie AII wurden in einer Prüfmaschine verformungsgesteuert Biegerisse senkrecht zur Prüffläche erzeugt. Während der Biegebelastung der unbewehrten Platten wurden die zwei gegenüberliegenden, maßgeblichen Plattenstirnseiten mit einer stark vergrößernden Lupe beobachtet und die Belastung unmittelbar bei Auftreten des ersten erkennbaren Anrisses an der im Versuch untenliegenden Prüffläche abgebrochen.

Die mit einem Rißbreitenmaßstab gemessenen Öffnungsbreiten betragen im Mittel rd. 0,10, 0,15 bzw. 0,30 mm. In der Regel endeten die sichtbaren Risse rd. 10 mm vor dem gegenüberliegenden Plattenrand.

Die beiden Probehälften hielten so fest zusammen, daß eine Veränderung der Rißbreiten bis zur Beschichtung mit Kunstharz nachweislich nicht auftrat.

4.6 Versiegelung und Aufbringen des Salzes

Nach der 3-monatigen Vorlagerungszeit wurden die Platten bis auf die Prüffläche mit Epoxidharz beschichtet und zur Aushärtung des Harzes 7 Tage im Klimaraum 20 °C/65 % r. F. zwischengelagert. Diejenigen Platten, für die eine Lagerung bei stationärer Wasserdampfdiffusion, vgl. Abschn. 4.3.3, vorgesehen war, wurden bereits 7 Tage vor der 3-monatigen Vorlagerung nur an den 4 Stirnseiten versiegelt und zur Aushärtung des Harzes - wie oben beschrieben - behandelt.

Im Alter von insgesamt 25 Wochen wurden die Platten an der unversiegelten Prüffläche mit im Mörser pulverisiertem und im jeweiligen Klima vorgelagertem NaCl eingerieben und vollflächig ca. 2 mm dick überschichtet. Um zu verhindern, daß das Salz von den Platten herabfiel, wurden zuvor selbstklebende Kunststoffolien um die Plattenränder mit einem Überstand von ca. 3 mm geklebt.

Nach rd. 2 Wochen bildete sich bei den Platten, die bei 77 % r. F. und 92 % r. F. lagerten, auf der Kochsalzschicht infolge hygroskopischer Wirkung des Salzes ein Wasserfilm, nach weiteren 4 bis 5 Wochen reduzierte sich die Salzschildtdicke infolge Eindringens der Chloride in den Beton. Die Salzschildtdicken wurden daher in regelmäßigen Zeitabständen kontrolliert und gegebenenfalls ergänzt. Im Gegensatz dazu war die Kochsalzschicht auf den bei 58 % r. F. gelagerten Platten während der gesamten Hauptlagerung nach Augenschein trocken und mußte nicht aufgefüllt werden.

5 Feuchte- und Diffusionsbedingungen

5.1 Lagerung in Salzlösung

Zur Lagerung in übersättigter NaCl-Lösung wurde in einer Kunststoffwanne mit aufgelegtem Deckel entionisiertes Wasser solange mit NaCl (chemisch reinst) versetzt, bis sich ein rd. 5 mm hoher Bodenkörper ergab. Damit die Proben mit dem Bodenkörper nicht unmittelbar in Berührung kamen, wurden am Wannenboden Abstandsleisten eingelegt.

5.2 Lagerung bei definierter Luftfeuchte und erhöhter CO₂-Konzentration

Die Platten wurden bei + 20 °C in luftdicht verschließbaren Acrylglasbehältern mit einem Volumen von 50 x 50 x 50 cm³ gelagert. Die gewünschten Luftfeuchten wurden in den Behältern jeweils mit chloridfreien, wässrigen, übersättigten Lösungen aus NaBr für 58 %, (NH₄)₂SO₄ für 77 % und (NH₄)H₂PO₄ für 92 % r. F. erzeugt, die sich am Behälterboden in Kunststoffwannen befanden. Darüber lagerten die Platten in drei über die Behälterhöhe gleichmäßig verteilten Ebenen auf Gitterrosten.

Um eine kontinuierliche Luftumwälzung und damit eine über den Behälterquerschnitt konstante Feuchteverteilung zu erreichen, wurde durch perforierte Schlauchleitungen, die mit externen Membranpumpen verbunden waren, im geschlossenen Kreislauf Luft in die Salzlösungen eingeleitet und über entsprechende, an der Behälteroberseite befestigte Schlauchleitungen wieder abgesaugt. Die Lösungswannen waren ganzflächig mit luftdurchlässigen Glasvliesen abgedeckt, um eine durch eventuelles Aufspritzen der Salzlösung mögliche Benetzung der Proben zu vermeiden. In jedem Klimabehälter befand sich ein Haarhygrometer, mit dem etwa wöchentlich die Luftfeuchte überprüft wurde. Dabei ergaben sich - gemittelt über die gesamte Versuchsdauer - relative Luftfeuchten von 58 %, 77 % bzw. 92 %.

Durch Feuchtemessungen an verschiedenen Stellen im Behälter konnte nachgewiesen werden, daß über die Behälterhöhe jeweils gleiche Feuchten vorhanden waren.

Bei drei Klimabehältern, in denen jeweils unterschiedliche Luftfeuchten eingestellt waren, wurde der Luftinhalt wöchentlich mit kohlendioxidangereicherter, synthetischer Luft (Zusammensetzung: 8 % CO₂, 18 % O₂, 74 % N₂) erneuert.

5.3 Lagerung bei stationärer Wasserdampfdiffusion

Hierzu wurden zwei Klimabehälter jeweils in der Mitte durch einen stabilen, dichten Zwischenboden aus Acrylglas abgeteilt, in dem bis zu maximal 5 Betonplatten in paßgenauen Aussparungen eingelassen und mit Silicon abgedichtet waren. An der oberen und unteren Behälterhälfte war nach dem in Abschn. 4.3.2 beschriebenen Prinzip die jeweils gewünschte relative Luftfeuchte eingestellt. Bild 3 zeigt die zur Erzeugung eines mit dem Eindringen der Chloride gleichgerichteten, stationären Wasserdampfdiffusionsstromes (92 % → 58 % r. F.) verwendete Versuchsanordnung. Im zweiten Behälter wurde durch umgekehrte Anordnung der Feuchten ein zur Chlorideindringrichtung entgegengesetzter Diffusionsstrom erzeugt.

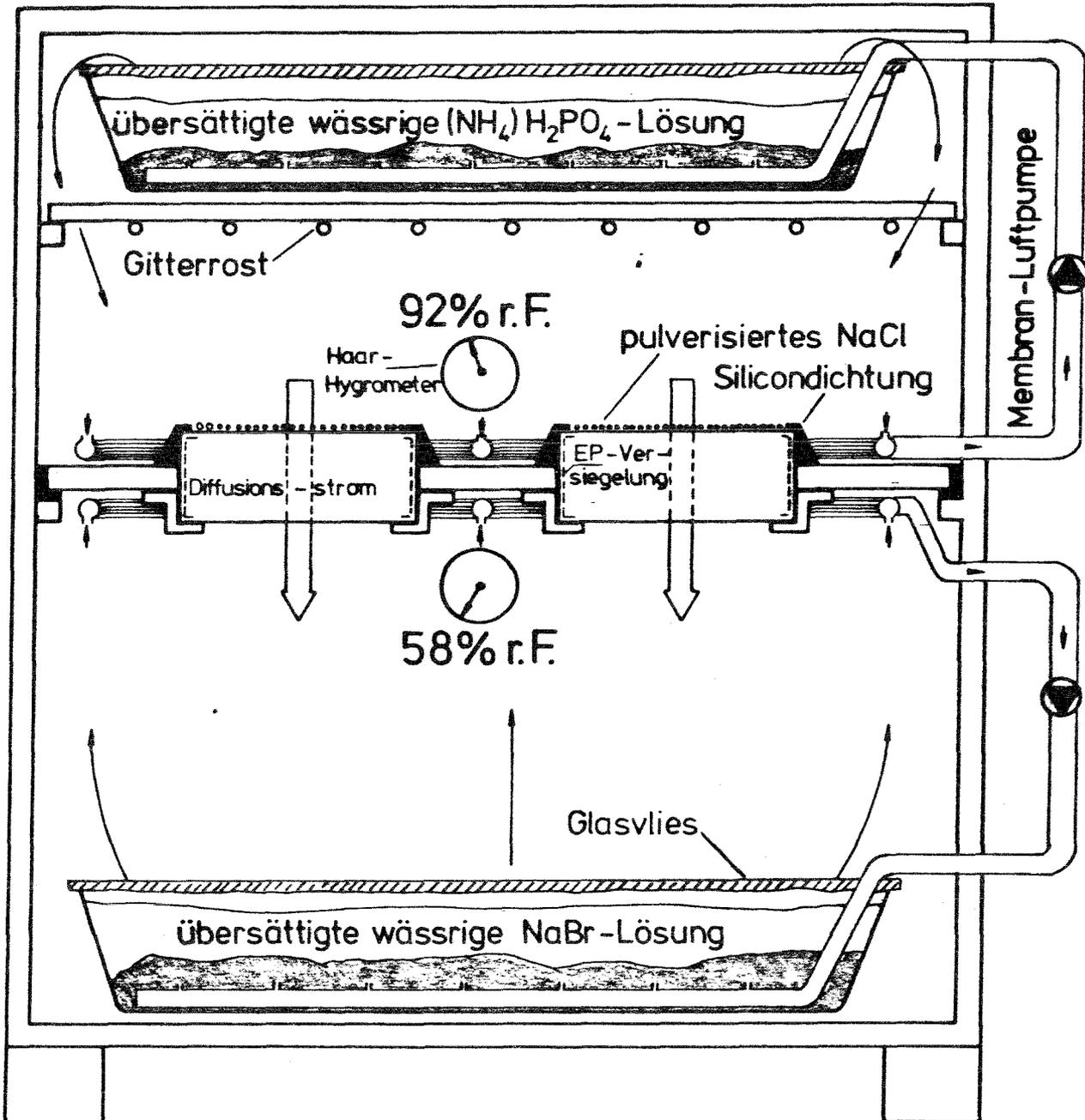


Bild 3: Versuchsanordnung zur Erzeugung stationärer Wasserdampfdiffusion (hier gleichgerichtet mit der Chloriddiffusion)

5.4 Lagerung im Freien unter Dach

Unter einem Dach in 2 m Höhe im Freigelände des Institutes in München-Pasing wurden in rd. 1,5 m Höhe vor Regen geschützt Proben von Juni 1983 bis Januar 1984 ausgelagert. Es ist bemerkenswert, daß 1983 ein außergewöhnlich heißer und trockener Sommer und Herbst herrschte. Die über das Jahr gemittelte relative Luftfeuchte kann näherungsweise mit rd. 83 % angenommen werden /20, 21/. Für den hier zu betrachtenden Zeitraum dürften zwischen 65 und 75 % r. F. ansetzbar sein. (Ausgearbeitete Statistiken liegen beim Wetteramt noch nicht vor.)

Bei der Angabe einer mittleren Feuchte muß berücksichtigt werden, daß in der Regel täglich starke Feuchtewechsel auftreten. Sie liegt nachts meist über 90 %, um tagsüber bei trockener Witterung im Sommer bis herab auf 30 % r. F. zu gehen.

6 Bestimmung der Chloridverteilungen und der Carbonatisierungstiefen

6.1 Herstellen der Analysenproben

Nach 1 bzw. 3 bzw. 8 Monaten wurden die Platten dem jeweiligen Klima entnommen und die Salzsichten abgebürstet. Um Randeinflüsse zu eliminieren, wurden aus dem Innenbereich der Platten unmittelbar nach der Entnahme zunächst Körper von 50 x 50 x 40 mm³ mit einer Diamantsäge trocken herausgesägt und anschließend an der Ober- und Unterseite rd. 1 mm tief trocken abgefräst, Bild 4. Diese Körper wurden dann wiederum in 4 horizontale Teilproben zersägt.

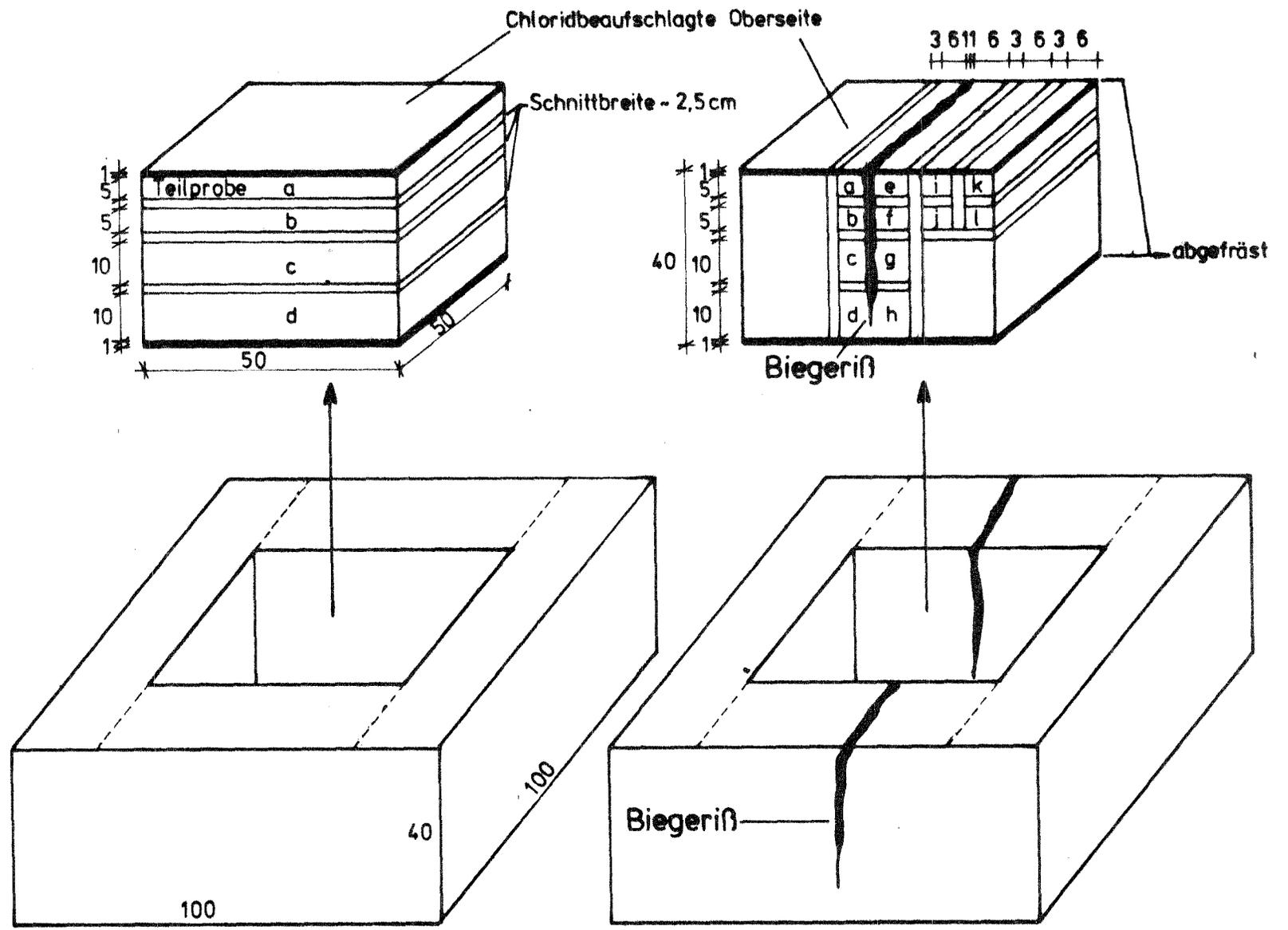


Bild 4: Aufteilung der Betonplatten in Teilproben zur Bestimmung der Chloridverteilungen für den Regelfall und bei Platten mit künstlich erzeugtem RiB

Die Körper aus den Platten mit künstlich erzeugten Rissen wurden vorher am Riß gebrochen. Auch die Rißflächen wurden rd. 1 mm tief trocken abgefräst. Die horizontalen Teilproben-Scheiben wurden darüberhinaus auch noch in unterschiedlichem Abstand vom Riß in weitere Teilproben aufgeteilt.

Alle Teilproben wurden rd. 24 Std. bei + 40 °C vorgetrocknet (Ein Trocknen der Proben vor dem Sägen wurde bewußt umgangen, um eine Umverteilung von Chlorid zu vermeiden.) und sodann in einer Scheibenschwingmühle auf Analysenfeinheit (Größtkorn ca. 90 µm) gemahlen.

6.2 Bestimmung der Chloridgehalte

Von den homogenisierten und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrockneten, gemahlene Teilproben wurden rd. 2 g entnommen und in 0,1normaler Salpetersäure gelöst. Am Filtrat der Lösung wurde dann gemäß /22/ der Gesamtchloridgehalt potentiometrisch gemessen.

Die Meßgenauigkeit dieses Verfahrens, vgl. /23/, einschließlich der Einflüsse aus der Präparation der Teilproben, kann hier ungünstigenfalls mit relativ $\pm 10\%$ angenommen werden, wenn der zu ermittelnde Chloridgehalt mehr als $\text{Cl}_B^- = 0,05\%$ beträgt. Darunter ist mit zunehmend größeren Streuungen zu rechnen, etwa $\Delta\text{Cl}_B^- = \pm 0,005\%$ bis $\pm 0,01\%$ ($\hat{=}$ Erfassungsgrenze).

6.3 Bestimmung der Carbonatisierungstiefen

An den Reststücken der zersägten Platten, vgl. Bild 4, wurden an frischen Bruchflächen die Carbonatisierungstiefen nach Aufsprühen einer 0,1%igen Phenolphthaleinlösung gemessen. Die zugrundegelegte Meßlänge betrug dabei rd. 50 mm, über die die Carbonatisierungstiefe gemittelt wurde.

7 Versuchsergebnisse und Diskussion der Zusammenhänge

7.1 Feuchteabgabe bzw. -aufnahme während der Vorlagerung

Zu Beginn und nach der dreimonatigen Vorlagerung wurden die bei verschiedenen rel. Luftfeuchten und CO_2 -Gehalten gelagerten Betonplatten gewogen. Die Gewichtsänderungen sind in Bild 5 in Abhängigkeit von der Feuchte aufgetragen.

Danach haben die Platten, die bei 77 % r. F. gelagert wurden, ihr Gewicht kaum verändert (insbesondere bei dem niedrigeren w/z-Wert), während bei höherer Feuchte (92 %) eine deutliche Gewichtszunahme und bei niedrigerer Feuchte (58 %) eine noch größere Austrocknung festgestellt wurde. Daraus ließe sich ableiten, daß bei Lagerung um rd. 80 % r. F. keine Gewichtsänderung und damit kein Wassertransport auftrat.

Zwischen den jeweils drei Feuchten einer Betonserie ergaben sich etwa lineare Zusammenhänge. Bei den schon während der Vorlagerung mit CO_2 -angereicherter Luft beaufschlagten Platten verlaufen die Linien etwa parallel und zu positiven Gewichtsänderungen hin verschoben. Letzteres dürfte mit der CO_2 -Aufnahme der Platten erklärbar sein.

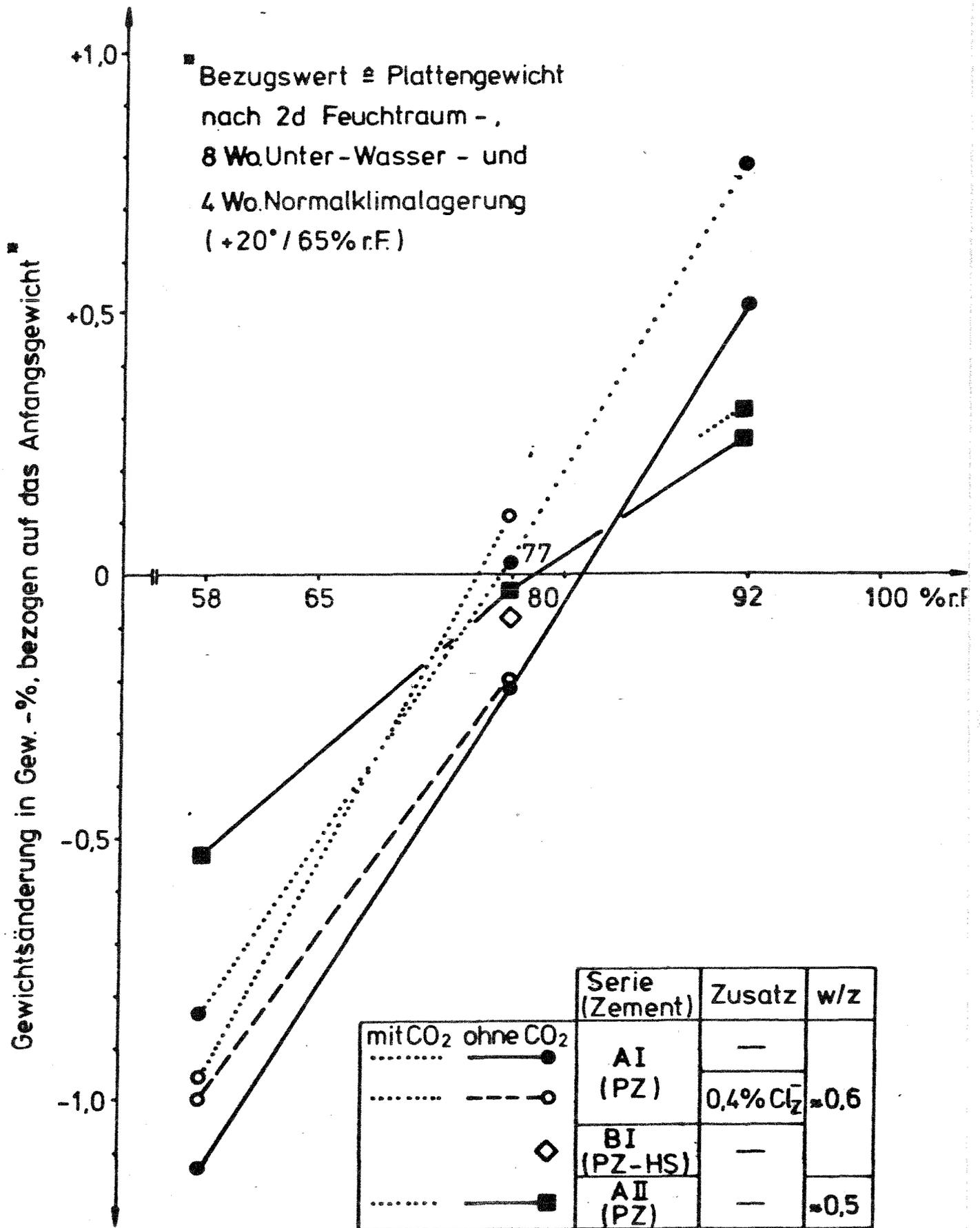


Bild 5: Gewichtsänderung der Platten während der 3-monatigen Vorlagerung

7.2 Eigenchloridgehalte der Betonplatten und deren Verteilungen

Nach den in Abschn. 4.2 ermittelten Frischbetonzusammensetzungen und den in Abschn. 4.1 gemessenen Eigenschloridgehalten der Ausgangsstoffe waren die in Bild 6 eingetragenen Soll-Chloridgehalte zu erwarten (vgl. oberes Diagramm).

Nach der 8wöchigen Nachbehandlung unter Wasser (mit Zement als Bodenkörper) wurde an einer Betonplatte der Serie BI der Eigenchloridgehalt in Abhängigkeit vom Abstand von den Schalflächen bzw. der Abstrichfläche überprüft, vgl. Teilprobenaufteilung in Bild 6. Danach wurde zwar ein gegenüber dem Soll-Wert etwas höherer Chloridgehalt $Cl_{BO} \approx 0,02 \%$ - bei relativ gleichförmiger Verteilung - festgestellt, jedoch kann diese Abweichung nicht weiter bewertet werden, da sich die Meßstreuungen bei derart niedrigen Chloridgehalten in der gleichen Größenordnung bewegen.

Bei den Platten, die mit erhöhtem Chloridgehalt hergestellt wurden (Serie AI/Cl) wurde diese Überprüfung zusätzlich auch noch nach der 3monatigen Vorlagerung unter Wasser sowie bei 58 und 77 % r. F. (jeweils mit und ohne CO_2) durchgeführt. Danach ergaben sich sowohl vor wie auch nach der Vorlagerung etwa vergleichbare Chloridverteilungen, vgl. schraffierte Bereiche in Bild 6.

Da keine signifikanten Veränderungen festgestellt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß sich während der Vorlagerung kein Chlorid mehr umverteilt hat oder herausgelöst wurde.

Aus dem Verlauf der Chloridverteilungen in den beiden Plattenrichtungen (x und z) kann entnommen werden, daß der Chloridgehalt nahe der Abstrichfläche höher ist als an der beim Betonieren unten liegenden Schalfläche. Dies kann mit dem Absetzen des Zuschlags und dem Bluten in Zusammenhang gebracht werden. Quer zur Betonierrichtung ist an den Schalflächen gegenüber der Probenmitte ein etwas geringerer Chloridgehalt vorhanden. Möglicherweise wurde hier während der Nachbehandlung unter Wasser ab dem 2. Tag anfänglich etwas Chlorid herausgelöst. Dies stünde auch in Einklang mit der Zunahme des Chloridgehaltes im Lagerungsbehälter (Abschn. 4.3). Insofern wäre auch der gegenüber dem Soll-Chloridgehalt von 0,08 % etwas geringere Mittelwert von $\text{Cl}_{\text{BO}}^- \approx 0,07 \%$ erklärlich.

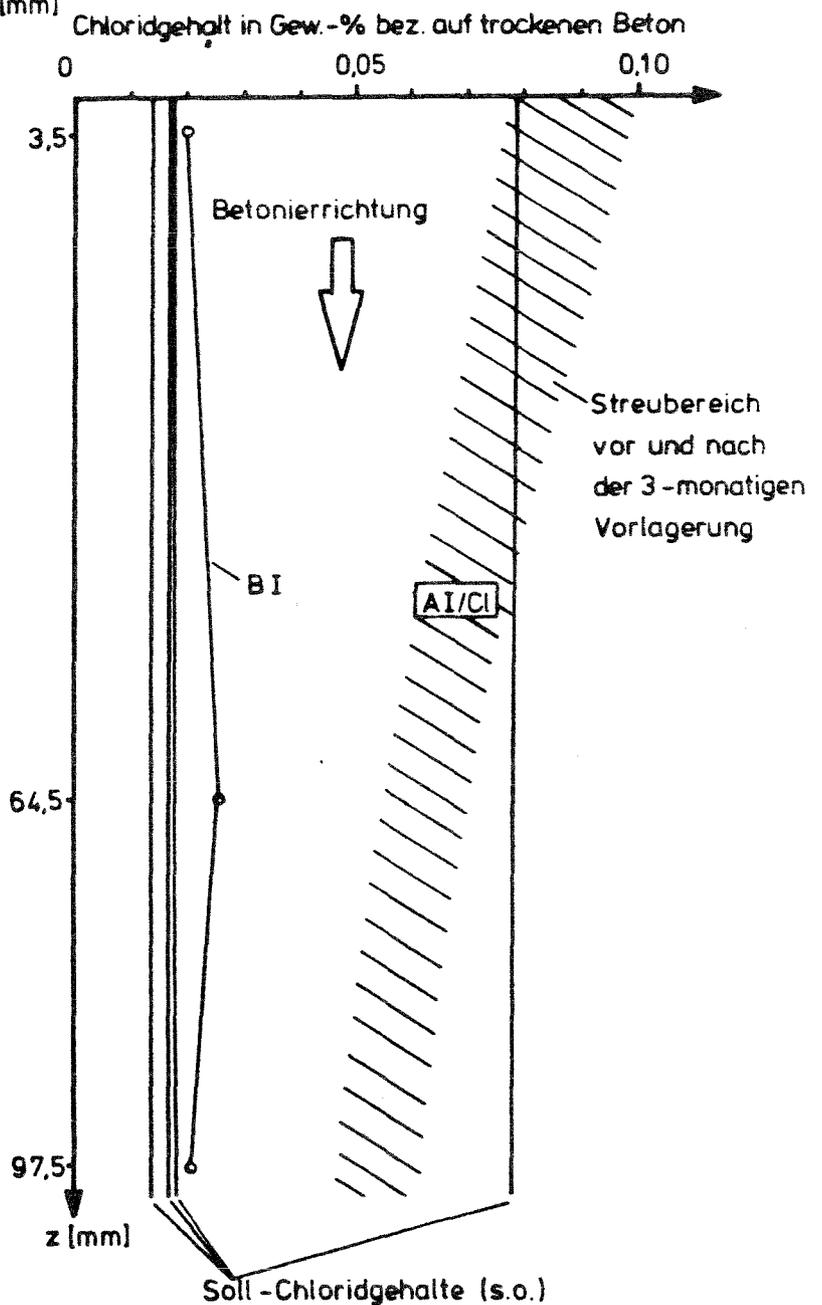
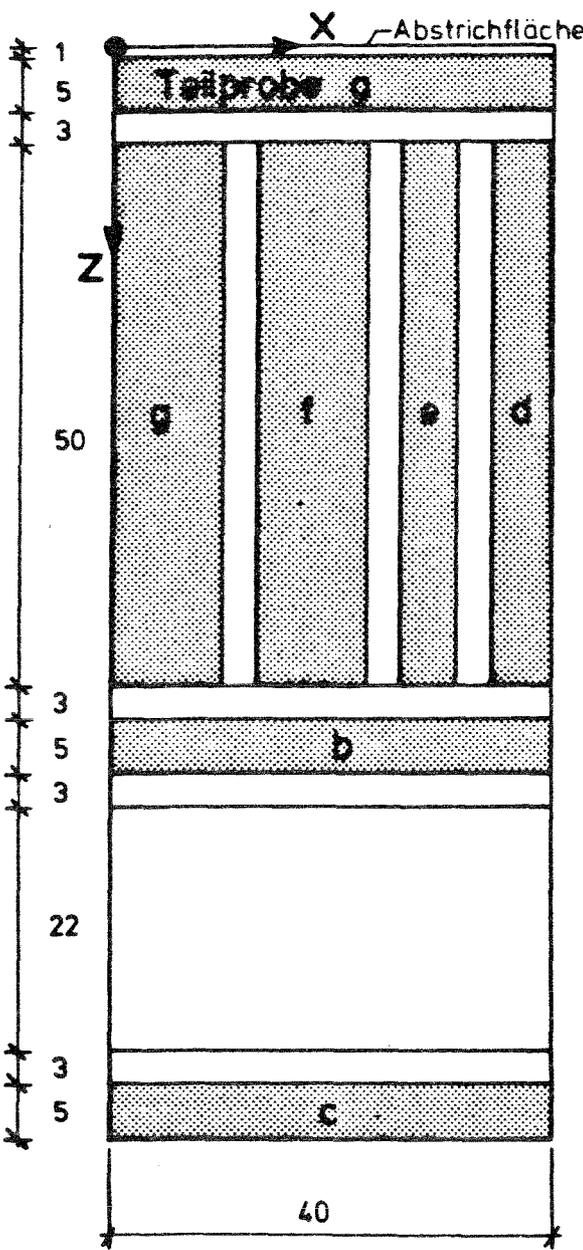
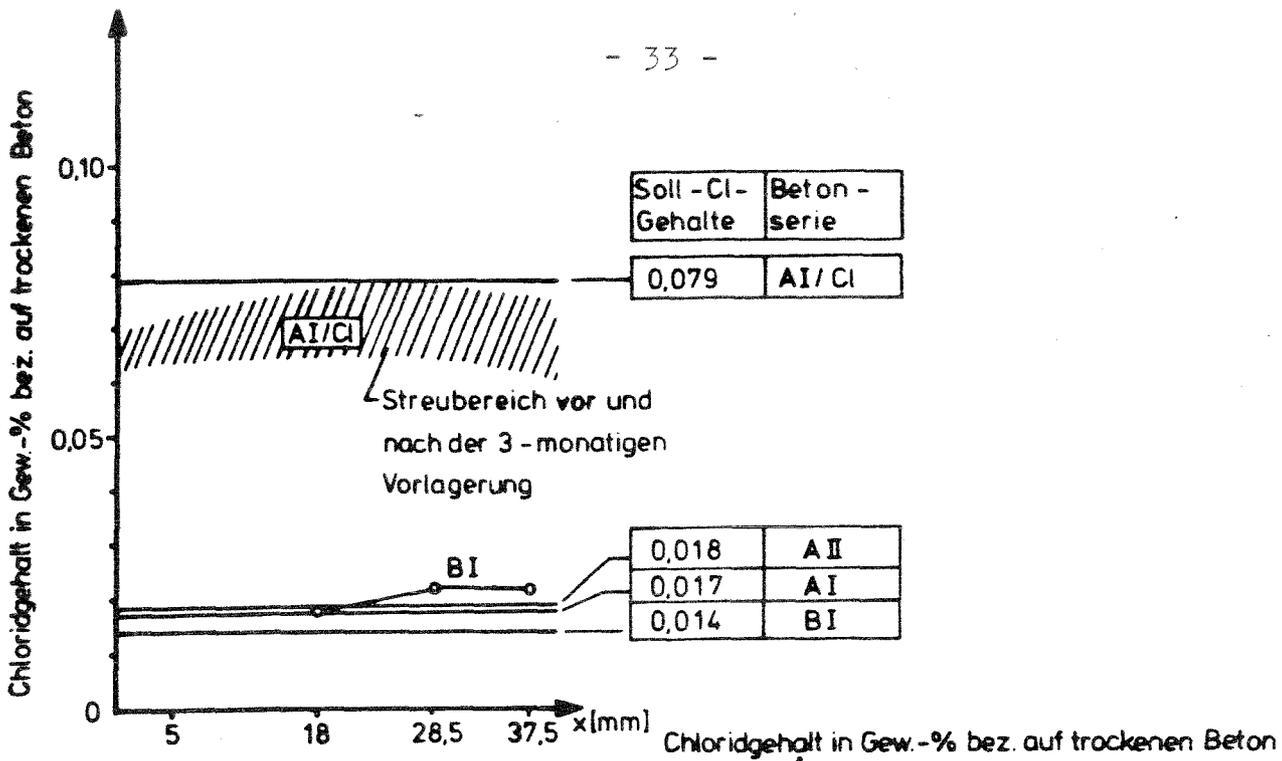


Bild 6: Chloridverteilung in Betonierrichtung (Teilproben a-c) und senkrecht dazu (Teilproben d-g) vor und nach der Vorlagerung

7.3 Eindringen von Chlorid bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen

In den Bildern 7a und 7b wurden sämtliche Chloridverteilungen nach 1 bzw. 3 bzw. 8 Monaten getrennt nach den Umgebungsbedingungen (1) bis (17) während der Vor- und Hauptlagerung und den jeweiligen Betonserien dargestellt. Die über die Plattenhöhe jeweils gleich verteilten vier Meßpunkte wurden sinngemäß miteinander verbunden und die sich ergebenden Kurven bis zu den Plattenrändern ($x = 0$ bzw. 40 mm) entsprechend extrapoliert, was in Anbetracht der in der Regel nur wenig streuenden und einen stetigen Verlauf aufweisenden Meßwerte gerechtfertigt erschien.

7.3.1 Grundsätzliche Feststellungen zu den Bedingungen "Konstante Feuchte" und "Einmalige Feuchteänderungen" (ohne CO_2)

In allen Fällen, in denen an der chloridbeaufschlagten Plattenseite während der Hauptlagerung 77 oder 92 % r. F. herrschten oder die gesättigte Salzlösung unmittelbar auf den Beton einwirkte, betrug die oberflächennahen Chloridgehalte meist mehr als das 10fache gegenüber der Lagerung bei 58 % r. F. Bei den hohen Feuchten ergaben sich nach 8 Monaten Chlorideindringtiefen von ca. 20 mm ($w/z \approx 0,5$) bis z. T. weit über 40 mm ($w/z \approx 0,6$, insbesondere bei PZ 45 F-HS). Aufgrund der bei der niedrigen Feuchte kaum über $\text{Cl}_B^- = 0,1$ % und ab 10 - 20 mm Tiefe nurmehr im Bereich der Eigenchloridgehalte liegenden Meßwerte muß berücksichtigt werden, daß die ungünstigenfalls anzusetzende Meßgenauigkeit bis in die gleiche Größenordnung reicht, vgl. Abschn. 6.2. Dennoch ergaben sich auch hier meist relativ stetige und daher noch als auswertbar anzusehende Chloridverteilungen.

WECHSELNDE FEUCHTE

⑦

77%

im Freien
unter Dach

⑧

77%

2-tägig
58% → 92%

⑨

77%

7-tägig
58% → 92%

EINMALIGE FEUCHTEÄNDERUNG

⑩

77%

92%

⑪

77%

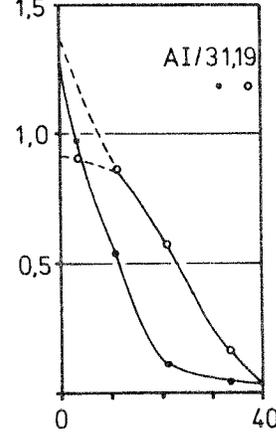
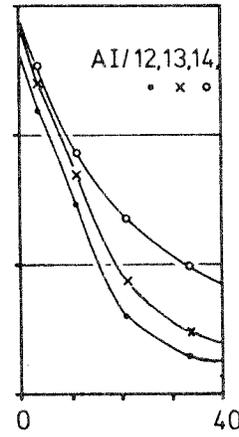
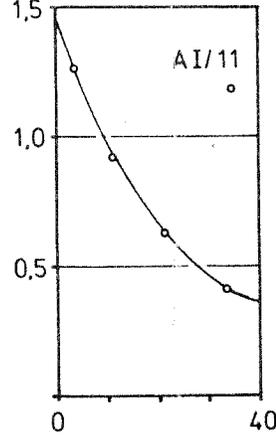
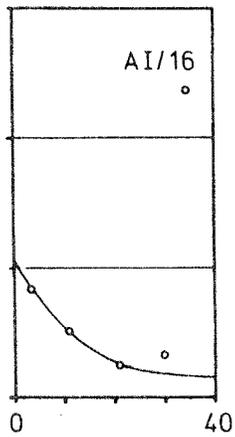
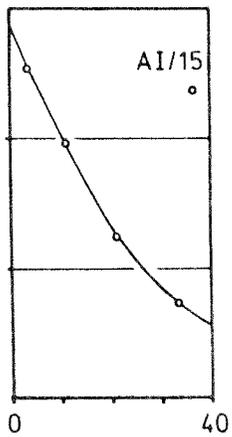
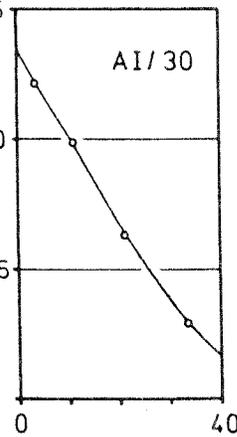
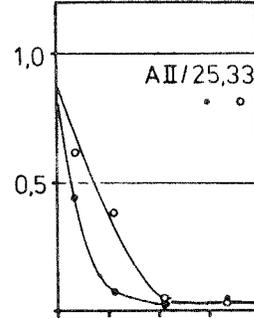
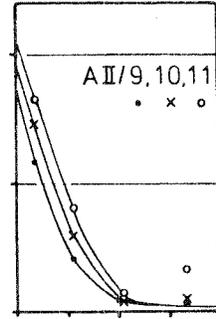
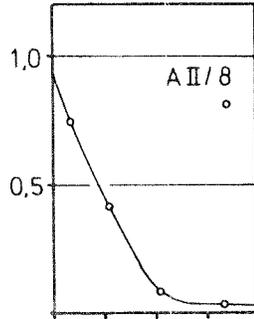
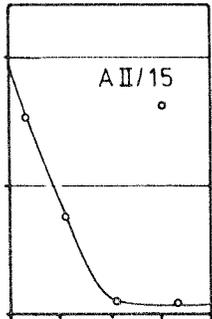
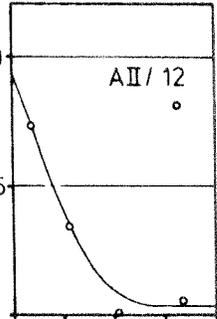
gesätt. NaCl-Lsg

STATIONÄRE FEUCHTEDIFF.

⑫

92% (Dampf
mit Cl⁻)
58%

Cl_g in Gew.-%
↑
Oberflächenabstand
in mm



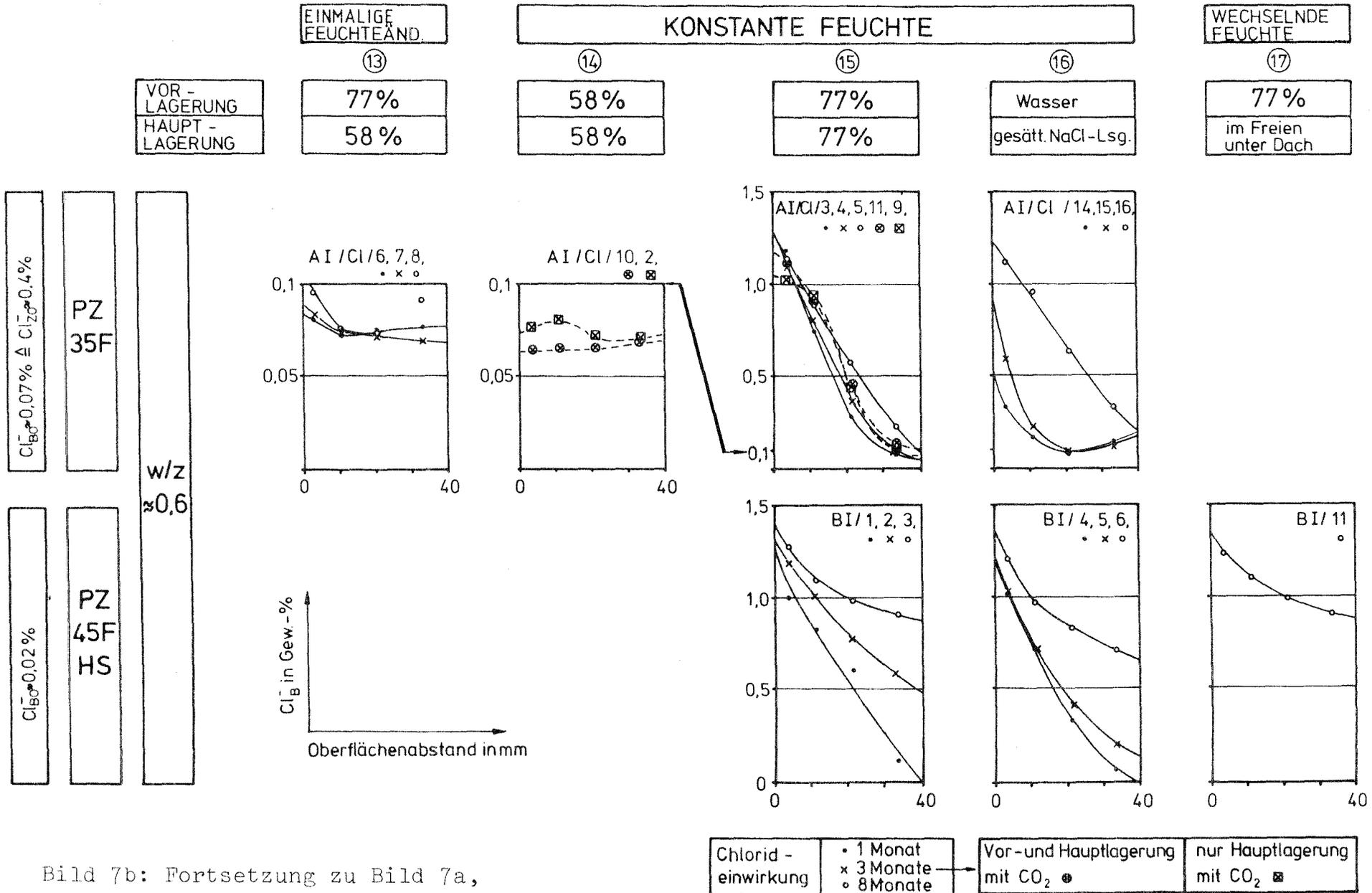


Bild 7b: Fortsetzung zu Bild 7a,
Serien AI/Cl und BI

Die unterschiedliche Dauer der Chlorideinwirkung von 1, 3 und 8 Monaten tritt nur bei der Betonserie BI mit HS-Zement so deutlich in Erscheinung, wie es generell für alle Platten erwartet wurde, vgl. (15) und (16) in Bild 7b unten. Dagegen ergaben sich bei den anderen Serien oft nur geringe Änderungen mit kaum zunehmenden Eindringtiefen, vgl. insbesondere (4) und (11) in Bild 7a oben.

Bei den hohen Feuchten ab 77 % r. F. ist ferner festzustellen, daß sich die Chloridgehalte nahe der Oberfläche (bei $x = 0$ mm) mit zunehmender Einwirkungsdauer bei allen Betonserien nicht mehr nennenswert änderten und daß diese offensichtlich nicht überschreitbaren Chloridgehalte für den jeweiligen w/z-Wert der Betone - unabhängig von der Feuchtebedingung und der Zementart - etwa einheitlich ausfielen:

bei w/z-Wert 0,6 max Cl_B^- 1,2 bis 1,4 %,
bei w/z-Wert 0,5 max Cl_B^- 0,8 bis 0,9 %.

Diese Feststellung wäre erklärbar, wenn man davon ausgeht, daß der maximal erreichbare Chloridgehalt, bezogen auf das Trockengewicht des Betons, durch das in den Poren des Betons vorhandene Wasservolumen und die darin maximal löslichen Chloride bestimmt wird. Die in den Bildern 7a und b aufgrund der grafischen Extrapolation ablesbaren maximalen Chloridgehalte max Cl_B^- an der Probenoberfläche wurden in Tabelle 7 für jede Betonserie für die Lagerungsbedingungen bei 77 und 92 % r. F. sowie in NaCl-Lösung auf das aus der Wasseraufnahme bei Porensättigung ermittelte Gel- und Kapillarporenvolumen P_{g+k} (vgl. Abschn. 4.4) als Chloridkonzentration pro Liter Porenlösung $Cl_{P.-Lö.}^-$ umgerechnet:

$$Cl_{P.-Lö.}^- \frac{[g/l]}{7} = \frac{\max Cl_B^- \frac{[\%]}{7} \cdot \rho_{B.tr.} \frac{[kg/m^3]}{7}}{P_{g+k} \frac{[l/m^3]}{7}} \cdot \frac{1000}{100} \quad (3)$$

Tabelle 7: Oberflächennahe Chloridkonzentrationen,
bezogen auf die Porenlösung bei Lagerung
in 77 % und 92 % r. F. sowie in NaCl-Lösung

Serie (Zementart) wirksamer w/z-Wert	AI (PZ) 0,61			BI (PZ-HS) 0,64			AII (PZ) 0,49		
+ 105 °C Trocken-Rohdichte (kg/m ³)	2144			2172			2295		
Wasseraufnahme bei Sättigung (kg/m ³)	146			154			101		
Feuchtebedingung (% r.F. bzw. ges. NaCl-Lösung)	77	92	Lösg.	77	92	Lösg.	77	92	Lösg.
max Cl _B ⁻ Gew.-%	1,3	1,3	1,2	1,35	-	1,35	0,9	0,8	0,85
max Cl _B ⁻ (Mittel) kg/m ³	27,2			29,3			19,5		
Cl _{P.-Lö.} ⁻ (Mittel) g/l	186			190			193		

Danach wurde im Gesamtmittel trotz unterschiedlicher w/z-Werte eine in etwa einheitliche Chloridkonzentration in der Porenlösung von im Mittel 190 g/l erreicht. Aus Tabellenwerken, z. B. /24/, kann entnommen werden, daß bei + 20 °C maximal 359 g NaCl pro Liter Wasser löslich sind. Das sind bei der Dichte einer gesättigten NaCl-Lösung von 1,201 kg/l bei + 20 °C rd. 317 g NaCl pro Liter Lösung, oder stöchiometrisch 192 g Cl⁻ pro Liter Lösung. Dieser Wert ist nahezu identisch mit den für das Porenwasser des Betons errechneten Konzentrationen. Für die entsprechenden Sättigungskonzentrationen von CaCl₂ und KCl ergeben sich gemäß /24/ davon weit abweichende Chloridgehalte von 390 bzw. 143 g Cl⁻ pro Liter Lösung.

Daraus läßt sich folgern, daß bei der hier gewählten Chloridbeaufschlagung im Beton nahe der Oberfläche eine gesättigte NaCl-Lösung entstand und daß der Porenraum offenbar wie bei

einer kapillaren Wassersättigung statt mit Wasser mit NaCl-Lösung vollständig gefüllt wurde, womit bezogen auf das Porenwasser ein konstanter, bezogen auf das Beton-Trockengewicht jedoch ein vom w/z-Wert abhängiger Chloridgehalt meßbar ist. Die erste Feststellung wäre nicht überraschend, da Salz jeweils im Überschuß angeboten wurde. Die zweite Feststellung wurde für die Lagerung in 77 und 92 % r. F. zunächst nicht erwartet. Offensichtlich wirkte aber auch unter diesen Bedingungen eine konzentrierte NaCl-Lösung auf den Beton ein.

Dies wird durch die in Abschn. 4.6 beschriebene Beobachtung bestätigt, wonach sich bei diesen Feuchten auf der Salzschrift schnell ein Wasserfilm bildete, den der nicht wassergesättigte Beton aufsaugen konnte. Berücksichtigt man die sich über einer übersättigten NaCl-Lösung einstellende relative Luftfeuchte von 75 bis 76 % bei + 20 °C /24, 26/, so ist naheliegend, daß sich kristallines NaCl solange mit Wasser aus der umgebenden Luft - mit mehr als 75 % r. F. - verdünnt, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Da bei den hier gewählten Versuchsbedingungen die Luftfeuchte konstant gehalten wurde, wurde von der Salzschrift ständig Wasser aufgenommen, so daß sich auf der Probe in zunehmender Menge eine gesättigte Lösung bilden konnte.

Um dies nachzuweisen, wurde ein Zusatzversuch durchgeführt, bei dem zwei gleiche Proben der Serie AI (w/z \approx 0,6) nach einjähriger Lagerung im Normalklima (+ 20 °C/65 % r.F) in einen Klimaraum mit + 20 °C/80 % r. F. umgelagert wurden. Die eine der beiden Proben wurde dabei auf eine NaCl-Schicht gelegt, die sich auf einer trockenen Pappunterlage befand, und auf der Oberseite wie bei den Regelversuchen mit NaCl ca. 2 mm hoch überschichtet. Bereits nach 5 Tagen zeichneten

sich an der Betonoberseite feuchte Ränder ab und das Chlorid war größtenteils vom Beton aufgenommen worden. An der Unterseite war die etwa gleich dicke Salzschrift nur wenig verringert, der Beton augenscheinlich trocken und die Pappunterlage stattdessen naß. Die Feuchtebestimmung an beiden Proben durch Trocknung bei + 105 °C ergab Feuchtegehalte von 4,42 Gew.-% für die chloridbeaufschlagte gegenüber nur 2,42 Gew.-% für die unbehandelte Probe, d. h. die chloridbeaufschlagte Probe hat in der nur kurzen Zeit insgesamt etwa 17 g Wasser ($\cong 4,25$ Vol.-%) über die obere Fläche von 100 x 100 mm² aufgenommen. ;

Für die während der Hauptlagerung bei 58 % r. F. gelagerten Betonplatten ist eine Berechnung gemäß Tabelle 7 nicht gerechtfertigt, weil sich kein definierter, maximaler Oberflächen-Chloridgehalt abzeichnete und auch nicht von einer Porensättigung ausgegangen werden kann. Geht man von einem etwas geringeren Feuchtegehalt als bei 65 % r. F. (vgl. Tab. 4 in Abschn. 4.4) aus und nimmt 50 kg/m³ an, so würden sich bei einer gleich großen Menge von gesättigter NaCl-Lösung folgende Chloridgehalte ergeben:

Serie AI	Cl _B ⁻	= 0,44 %
Serie BI	Cl _B ⁻	= 0,43 %
Serie AII.....	Cl _B ⁻	= 0,41 %

Diese Chloridgehalte liegen jedoch weit über den gemessenen bzw. daraus extrapolierten Werten nahe der Oberfläche, vgl. Bild 7a: (2) und (3) . Entweder die Betone waren - möglicherweise durch das Salz - stärker ausgetrocknet oder aber das Eindringen von Chlorid war aufgrund der nur geringen Feuchte derart behindert, daß sich innerhalb von nur wenigen Millimetern ein extremer Konzentrationsgradient und damit keine

gesättigte Porenlösung ausbilden konnte. Eine Feuchtebestimmung des Betons oder eine Überprüfung der Probengewichte während der Hauptlagerung hätte hier weitere Hinweise gebracht.

Unter der Annahme, daß das Chlorid bei 77 und 92 % r. F. als gesättigte NaCl-Lösung vom Beton aufgesaugt wurde, müßte es bei den schon während der Vorlagerung wassergesättigten Platten weniger intensiv eingedrungen sein. Dies läßt sich aus den gemessenen Chloridverteilungen (in Bild 7a: (4) bis (6) und Bild 7b: (15) und (16)) nur in schwacher Tendenz, insbesondere nach ein- und dreimonatiger Lagerungsdauer ableiten. Die Schlußfolgerung, daß ein entsprechend starkes Chlorideindringen auch ohne einen gleichzeitigen Wassertransport möglich ist, kann daraus jedoch nicht abgeleitet werden, weil auch diese Proben zur Aushärtung der Versiegelung vor Beginn der Chloridbeaufschlagung eine Woche lang austrocknen konnten.

Insofern ist der vorangestellte Versuchsplan nicht konsequent eingehalten worden. Die nach drei Monaten, z. T. auch schon nach einem Monat, kaum mehr zunehmenden Eindringtiefen, insbesondere bei dem niedrigen w/z-Wert, deuten jedoch an, daß eine Diffusion von Chlorid ohne gleichzeitigen Wassertransport auch bei sehr feuchtem oder wassergesättigtem Beton wesentlich langsamer abläuft. Es ist beabsichtigt, hierzu noch ergänzende Untersuchungen durchzuführen, über die dann an anderer Stelle berichtet wird.

7.3.2 Chloridaufnahme nach Feuchteänderung von 77 nach 58 % r.F.

Die Platten, die mit Beginn der Chloridbeaufschlagung von 77 % nach 58 % r. F. umgelagert wurden (2) haben gegenüber konstant 58 % r. F. (3) deutlich weniger Chlorid aufgenommen. Bei den Platten mit erhöhtem Ausgangschloridgehalt (13) wurde das Eigenchlorid während der Hauptlagerung möglicherweise zu den Rändern hin umverteilt,

vgl. auch Bild 6 oben: Streubereiche der Chloridverteilungen vor und nach der Vorlagerung.

7.3.3 Chloridaufnahme mit bzw. entgegen gleichzeitig stationärer Wasserdampfdiffusion

Bei den Platten, bei denen vor und während der Chlorideinwirkung gleichzeitig ein Feuchtegefälle von der salzbeaufschlagten Oberseite zur Unterseite hin aufrecht erhalten wurde (12), ergaben sich Chloridverteilungen ähnlich wie bei konstanter Feuchte von 77 und 92 % r. F. und bei Lagerung in Salzlösung, wobei die in Abschn. 7.3.1 festgestellte w/z-Wert-Abhängigkeit für $\max Cl_B^-$ ebenfalls gefunden wurde.

Bei einem der aufgetragenen Salzsicht entgegengerichteten Feuchtegefälle (1) drang wie bei konstanter Lagerung bei 58 % r. F. kaum Chlorid in den Beton, allerdings wurden hier keine gleichförmigen Chloridverteilungen gemessen. Die Chloridgehalte bilden in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand z. T. wellenförmige Verteilungen. Z. B. wurden nach 8 Monaten in 10 oder 20 mm Tiefe mit z. T. über 0,05 Gew.-% deutlich über den Eigenchloridgehalt erhöhte Werte festgestellt, während nahe der chloridbeaufschlagten Oberfläche demgegenüber keine Erhöhung abgelesen werden konnte. Hierfür kann derzeit keine Erklärung angeführt werden.

7.3.4 Chloridaufnahme bei zyklisch wechselnder Feuchte und bei Lagerung im Freien

Betrachtet man zunächst für den Beton mit $w/z \approx 0,6$ die zwischen 58 % r. F. und 92 % r. F. zwei- bzw. siebentägig wechselgelagerten Platten (8) und (9), so ist ein deutlicher Unterschied der Chloridverteilungen feststellbar. Während bei zweitägigem Wechsel eine ebenso starke

Chloridaufnahme gemessen wurde, wie bei extrem starker Feuchteeinwirkung (Chlorideindringtiefen > 40 mm), wurde bei siebentägigem Wechsel nurmehr rd. ein Drittel davon und nur bis in eine Tiefe von rd. 20 mm aufgenommen.

Bei der Platte mit $w/z \approx 0,5$ ergab sich demgegenüber bei siebentägigem Wechsel (9) eine mit konstant starker Feuchteeinwirkung vergleichbare Chloridverteilung.

Bei Lagerung im Freien unter Dach drang das Chlorid in vergleichbarer Intensität ein, wie bei der künstlichen, zweitägigen Wechsellagerung oder den Lagerungen bei konstant hoher Feuchte. Beim HS-Zement wurde von allen Lagerungsarten auch hier das stärkste Chlorideindringen festgestellt, vgl. auch Bild 8.

7.4 Einfluß erhöhter CO_2 -Konzentration

In Bezug auf die Chlorideindringtiefe wurden durch die Lagerung bei erhöhter CO_2 -Konzentration keine wesentlichen Unterschiede gegenüber CO_2 -freier Lagerung festgestellt. Beim hohen w/z -Wert sowohl mit als auch ohne erhöhtem Ausgangschloridgehalt ergab sich gegenüber den sonst stetig gekrümmten Verteilungskurven zum Rand hin ein gegensinnig gekrümmter Verlauf, vgl. (4), (5) und (15). Bei 58 % r. F.

(3) und (14) ist dieses Phänomen nicht in der Form erkennbar.

Ein gegensinnig gekrümmter Kurvenverlauf wird mitunter auch bei Brückenbetonen, die tiefer carbonatisiert sind, im Spritzwasserbereich der Fahrzeuge, d. h. bei meist starker Chlorideinwirkung im Winter, beobachtet. Die Erörterung von Abschn. 7.3.1, wonach der maximal erreichbare Chloridgehalt $\max Cl_B^-$ durch den mit Wasser sättigbaren Porenraum bestimmt wird, läßt sich bei dem hier durchgeführten Versuch auch auf diese Beobachtung übertragen: Durch die Carbonatisierung, d. h.

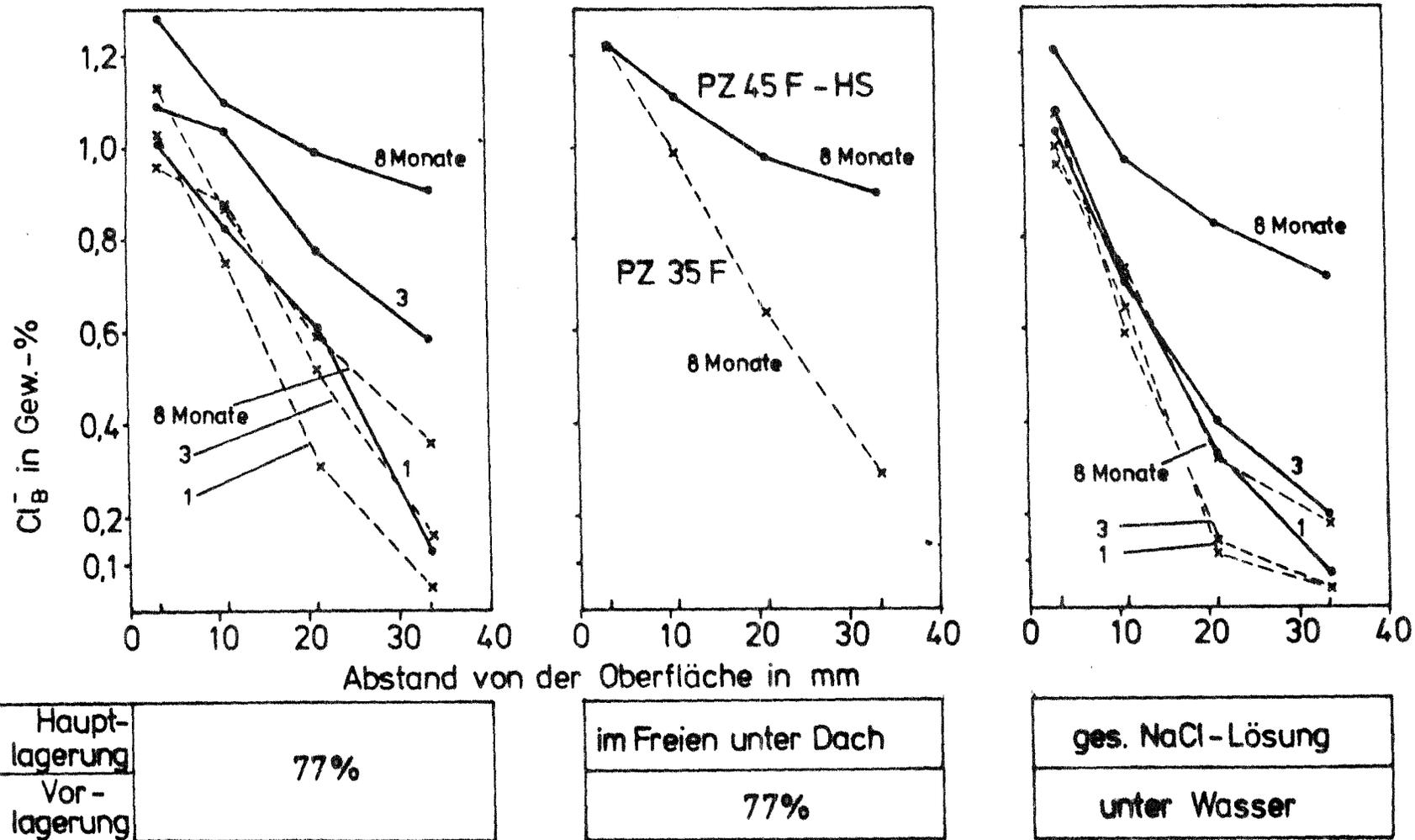


Bild 8: Vergleich von PZ 35 F und PZ 45 F-HS bei unterschiedlicher Lagerung und Dauer der Chlorideinwirkung (w/z-Wert 0,6)

die Bindung von CO_2 im Zementst in, nimmt das Porenvolumen des Betons ab und es steigt wegen damit verbundener Schwindvorgänge und Bildung größerer Carbonatkristalle auch die Durchlässigkeit u. a. für Wasser /18/. Von daher wäre im carbonatisierten Randbereich mit einem verminderten $\max \text{Cl}_B^-$, aber einer größeren Eindringtiefe, zu rechnen. Beides wurde hier bei den höheren Feuchten festgestellt.

Die Messung der Carbonatisierungstiefen mit Phenolphthalein an den nach drei Monaten entnommenen Platten ergab nur bei 58 % r. F. eine merkliche Zunahme bis zu 7 mm, während bei 77 % und 92 % r. F. nur zwischen 0,5 mm und wenig über 2 mm festgestellt wurden, vgl. Bild 9.

Wie aus Bild 9 ersichtlich ist, verlaufen das Eindringen von Chlorid und die Zunahme der Carbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der relativen Feuchte entgegengesetzt. Dies steht zunächst im Widerspruch zu obiger Interpretation zum gegensinnig gekrümmten Verlauf der Chloridverteilungen im Bereich der als carbonatisiert angekommenen Randschicht. Es kann jedoch hier nicht unterstellt werden, daß die vom Indikator angezeigte Carbonatisierungstiefe mit der Tiefe, bis in die CO_2 eingedrungen ist, übereinstimmt- vgl. auch /25/, wonach bei Untersuchungen an Bauwerksbetonen, in die Chlorid eingedrungen ist, eine verminderte Basizität bis in größere Tiefe festgestellt wurde, als es durch die Prüfung mit Phenolphthalein erwartet wurde.

Bei 77 % r. F. wurden in allen Tiefen etwas höhere Chloridgehalte gemessen als bei 95 % r. F. wurden. Dies hängt offensichtlich damit zusammen, daß die bei 77 % r. F. vorgelagerten Proben trockener waren und die sich bildende Salzlösung tiefer in sich aufsaugen konnten.

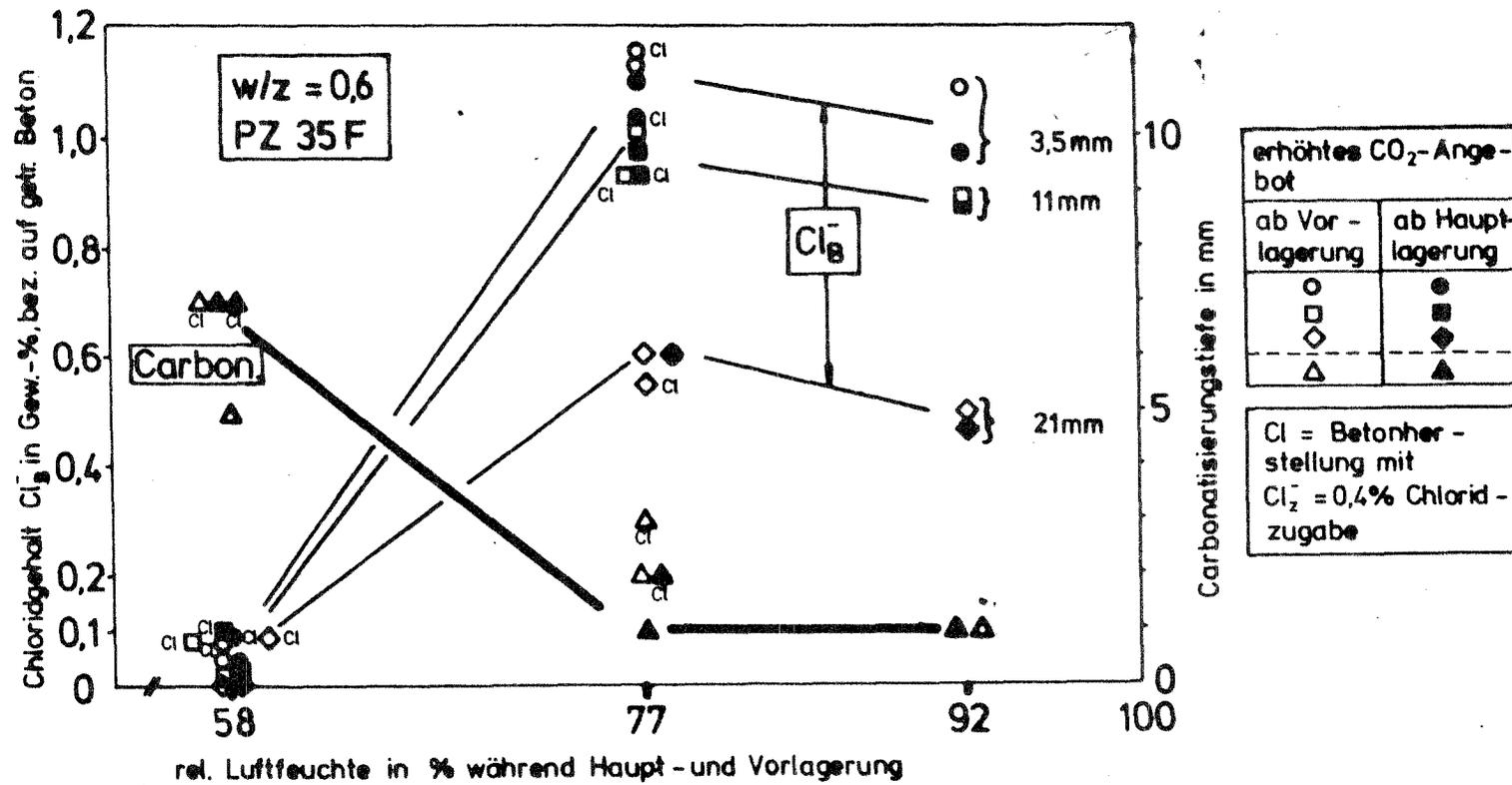
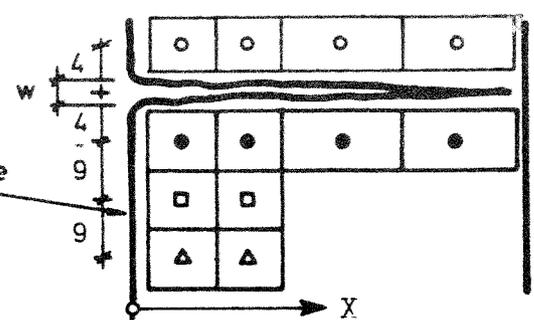


Bild 9: Carbonatisierungstiefen und Chloridgehalte in unterschiedlichem Oberflächenabstand nach 3-monatiger Vor- und 3-monatiger Hauptlagerung bei 58, 77 bzw. 92 % r. F.

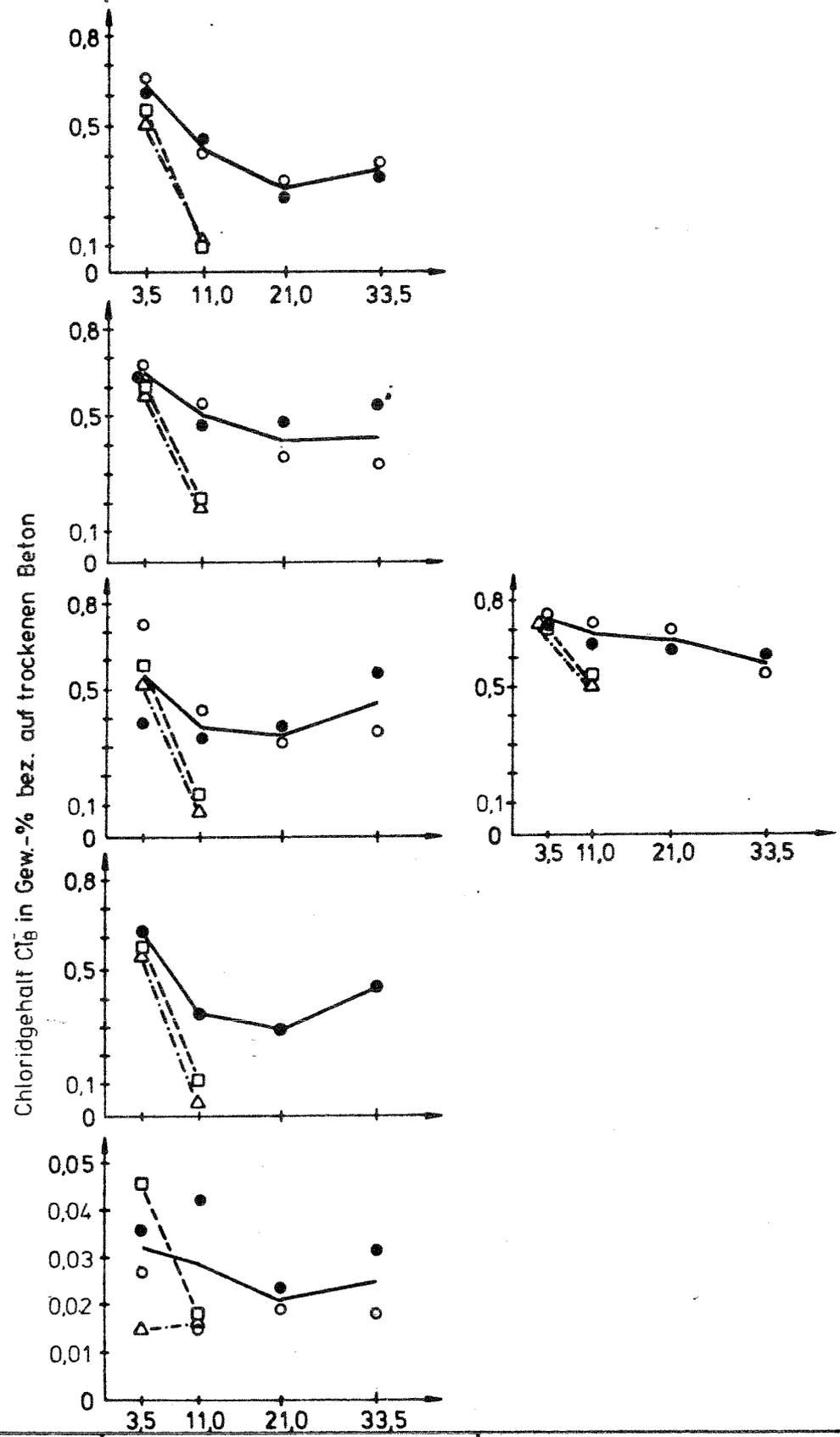
7.5 Chloridverteilungen an Rissen

Während außerhalb des Rißbereiches mit 7, 14 und 21 mm Abstand vom Riß die Chloridverteilungen von Abschn. 7.3 weitgehend bestätigt wurden (Bild 10), ergaben sich am Riß deutlich größere Chlorideindringtiefen. Auffällig ist dabei, daß der Chloridgehalt zur Rißwurzel nach 1-monatiger Lagerung höher ist als im Mittelbereich der Rißtiefe. Nach 8 Monaten ist dieser Verlauf bei einem insgesamt sehr hohen Chloridgehalt bis in über 30 mm Tiefe in einem Fall bei Wechsellagerung nicht mehr feststellbar. Gegenüber einer Rißbreite von 0,15 mm ergab sich bei 0,3 mm (jeweils 77 % r. F.) ein nur geringfügig stärkeres Eindringen von Chlorid.

chloridbeaufschlagte
Betonoberfläche



Vor-Lagerung	Haupt-Lagerung	w(mm)
	77% r.F.	0,15
77% r.F.		0,30
	Wechsel 58 ↔ 92 % r.F. im 7-Tage Zyklus	0,15
Stationäre Diffusion	92 → 58 % r.F.	0,10
Stationäre Diffusion	58 → 92 % r.F.	0,15



Lagerdauer	1 Monat	8 Monate
------------	---------	----------

Bild 10: Chloridverteilung an Biegerissen im Beton (w/z ≈ 0,5)

8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

8.1 Zielsetzung

Bauwerke unterliegen ständig wechselnden Feuchtebedingungen. Im Randbereich von Betonbauteilen im Freien treten dadurch starke Änderungen des Feuchtegehaltes auf. Wirken gleichzeitig Tausalze ein oder enthält der Beton wasserlösliches Chlorid, ist zu vermuten, daß das Eindringen von Chloriden von den jeweiligen Feuchtebedingungen abhängt.

Ziel dieser Arbeit war es deshalb, das Eindringen von Chlorid bei unterschiedlichen Feuchtebedingungen des Betons zu untersuchen.

8.2 Versuchsdurchführung

Es wurden Betonplatten (100x100x40 mm³, Größtkorn 8 mm) stehend betoniert, 8 Wochen unter Wasser nachbehandelt und anschließend während einer 3 Monate dauernden Vorlagerung bei 20 °C in unterschiedlich feuchter Luft (58 bzw. 77 bzw. 92 % r. F.) sowie unter Wasser auf einen definierten Feuchte-Ausgleichszustand konditioniert. Zusätzlich wurden mehrere Betonplatten an den Seitenflächen mit Epoxidharz versiegelt und einem stationären Wasserdampf-Partialdruckgefälle (Oberseite: 92 % - Unterseite: 58 % r. F. und umgekehrt) ausgesetzt.

Nach der Vorlagerung wurden die Platten während der Hauptlagerung auf einer Fläche (100x100 mm²) mit pulverisiertem NaCl beaufschlagt. Eine Serie wurde in gesättigter, wässriger NaCl-Lösung gelagert. Bis auf die Platten, die einem Feuchtegefälle

ausgesetzt waren, wurden alle anderen vor Beginn der Hauptlagerung an den Seitenflächen und der unteren Fläche mit Epoxidharz versiegelt. Dazu wurden die feuchten Platten zwischenzeitlich für 7 Tage im Klima 20/65 gelagert.

Während der Hauptlagerung wurden die Feuchtebedingungen der Vorlagerung beibehalten oder wie folgt geändert:

Umlagerung von 77 nach 58 bzw. 92 % r. F.,
Umlagerung von 77 % r. F. in gesättigte NaCl-Lösung,
Umlagerung von 77 % r. F. ins Freie, unter Dach,
Wechsel Lagerung 58/92 % r. F. im 2- und 7-Tage-Zyklus.

Nach 1 bzw. 3 bzw. 8 Monaten Hauptlagerung mit NaCl-Einwirkung wurden an den Platten die Chloridverteilungen bestimmt, indem aus unterschiedlichen Tiefen jeweils 4 Scheiben trocken herausgeschnitten wurden, an denen die Gesamt-Chloridgehalte Cl_B^- in Gew.-%, bezogen auf den getrockneten Beton, bestimmt wurden.

Neben den unterschiedlichen Feuchtebedingungen wurden folgende Parameter in die Untersuchungen einbezogen:

- Zementart: PZ 35 F und PZ 45 F-HS,
- w/z-Wert des Betons: ca. 0,5 und 0,6 bei etwa gleichem Zementgehalt von rd. 350 kg/m³,
- Ausgangschloridgehalt des Betons: Natürlicher Chloridgehalt und Zugabe von NaCl zum Anmachwasser entsprechend $Cl_Z^- = 0,4$ %,
- Biegeriß in der chloridbeaufschlagten Platten-Oberfläche (Rißbreite 0,1 bis 0,3 mm, Rißtiefe ca. 30 mm),
- Erhöhter CO₂-Gehalt der umgebenden Luft während der Vor- bzw. Hauptlagerung.

8.3 Ergebnisse (vgl. Bilder 7a und b)

8.3.1 - Bei Lagerung im Konstantklima mit 58 % r. F.,

- nach Umlagerung von 77 nach 58 % r. F.,
sowie
- bei Wasserdampfdiffusion entgegen dem eindringenden Chlorid,

erreichten die höchsten Chloridgehalte des Betons aus PZ 35 F

- unabhängig vom w/z-Wert und vom Ausgangschloridgehalt - kaum $Cl_B^- = 0,1$ %. Während die Chloridgehalte bei der konstanten Feuchte und der einmaligen Feuchteänderung in der Regel nach außen zunahm, ergaben sich bei der entgegengerichteten, stationären Feuchtediffusion in Probenmitte z. T. höhere Chloridgehalte als am Rand.

8.3.2 Bei allen feuchteren Lagerungsarten:

- Konstantklima mit 77 und 92 % r. F.,
- nach Umlagerung von 77 nach 92 %, von 77 % in gesättigte NaCl-Lösung und von Wasser in gesättigte NaCl-Lösung,
- bei Wechsellagerung 58/92 % im 2-Tage-Zyklus und im 7-Tage-Zyklus,
- bei Lagerung im Freien, unter Dach sowie
- bei Wasserdampfdiffusion mit dem eindringenden Chlorid,

waren die höchsten, randnahen Chloridgehalte erheblich größer als bei trockeneren Oberflächen, vgl. 8.3.1. Sie betrug weitgehend unabhängig vom Ausgangschloridgehalt, von der Zementart und von der Lagerungsdauer:

für w/z = 0,6 ... $Cl_B^- = 1,2$ bis 1,4 %,

für w/z = 0,5 ... $Cl_B^- = 0,8$ bis 0,9 %.

Die Eindringtiefen bei w/z = 0,5 (PZ 35 F) betrugen nach 8 Monaten bei allen Lagerungsarten etwa 20 mm. Während sie nach Umlagerung von Wasser in NaCl-Lösung und bei gleichgerichteter, stationärer Dampfdiffusion in Abhängigkeit von

der Zeit zunehmen, ergab sich in den anderen Fällen kaum ein Zeiteinfluß.

Bei $w/z = 0,6$ erreichte das Chlorid bei PZ 35 F wie auch PZ 45 F-HS die gegenüberliegende versiegelte Seite der 40 mm dicken Platten schon nach 1 Monat. Während sich bei PZ 35 F die Chloridverteilung in den folgenden 7 Monaten kaum mehr änderte, nahm der Chloridgehalt beim C_3A -armen Zement im Innern der Platte an der versiegelten Unterseite noch stark zu.

Bei PZ 35 F und $w/z = 0,5$ reichte die Eindringtiefe nur bis in Plattenmitte, d. h. bis in eine Tiefe von rd. 20 mm. Wie bei $w/z = 0,6$ und gleichem Zement veränderte sich die Chloridverteilung auch hier nach 1 Monat kaum mehr.

Dieser Effekt kann mit der zwischenzeitlichen, oberflächlichen Austrocknung der Platten beim Aufbringen der Versiegelungen erklärt werden. D. h. auch hier wurde das Eindringen von Chlorid im wesentlichen durch den Transport des Wassers bestimmt.

8.3.3 Bei Lagerungen in Luft mit 77 % r. F. und höher bildete sich an der aufgetragenen hygroskopischen Salzschiebt ein Wasserfilm, der mit dem darin gelösten Salz vom Beton aufgesaugt wurde, wie wenn auch diese Proben in gesättigter NaCl-Lösung gelagert worden wären.

8.3.4 Bei allen Lagerungsarten, bei denen eine gesättigte NaCl-Lösung in den Beton eindrang, ergab sich rechnerisch für die im Porenraum des randnahen Betons befindliche Lösung eine einheitliche Chloridkonzentration und zwar unabhängig vom w/z -Wert und von der Zementart entsprechend einer gesättigten NaCl-Lösung mit 190 g Cl^- pro Liter.

8.3.5 Bei den Platten mit Riß ($w/z = 0,5$) wurde bei stationärer Dampfdiffusion entgegen dem eindringenden Chlorid wie bei den Platten ohne Riß nur ein unbedeutender Anstieg des Chloridgehaltes festgestellt (vgl. Bild 10). Bei konstant 77 % r.F. bei Wechsellagerung 58/92 % (7tägig) sowie bei stationärer Dampfdiffusion mit dem Chlorid, wurden entlang dem Riß gegenüber ungerissenen Platten auch noch in größerer Tiefe deutlich erhöhte Chloridgehalte gemessen. Dabei nahmen die Chloridgehalte von der Außenfläche ausgehend zunächst ab, stiegen aber an der Rißwurzel wieder an. Ferner blieben die unterschiedlichen Rißbreiten von 0,1 bis 0,3 mm weitgehend ohne Einfluß.

8.3.6 Ein erhöhtes CO_2 -Angebot führte bei Feuchten ab 77 % r.F. r. F. nahe der Oberfläche zu nur geringfügig verminderten, in 10 bis ca. 20 mm Tiefe dagegen zu etwas höheren Chloridgehalten, so daß sich gegenüber den sonst stetig gekrümmten Chlorid-Verteilungskurven hier zweiseitig gekrümmte Kurvenverläufe ergaben.

Die mit Phenolphthalein gemessenen Carbonatisierungstiefen betragen dabei kaum 1 bis 2 mm.

Ursache könnten die mit der Carbonatisierung verbundenen Veränderungen im Gefügebau des Zementsteins sein. Dabei müßte jedoch das CO_2 tiefer in den Beton eingedrungen sein, als es mit Phenolphthalein angezeigt wurde.

8.4 Schlußfolgerungen

8.4.1 Sowohl bei niedriger Luftfeuchte, d. h. trockenem Beton, als auch bei einem Wassertransport im Beton entgegen dem einwirkenden Tausalz, d. h. auch während dem Austrocknen eines feuchten Betons, dringt das Chlorid praktisch kaum in den Beton ein. Offensichtlich werden wesentliche Mengen von Chlorid nur transportiert, wenn sich Wasser in gleicher Richtung bewegt.

8.4.2 Bei Luftfeuchten ab ca. 75 % r. F. nimmt NaCl soviel Wasser aus der Luft - bei feuchtem Beton vermutlich zunächst auch aus dem Beton - auf, daß sich eine gesättigte NaCl-Lösung bildet, die dann kapillar vom Beton aufgesaugt wird. Dadurch dringt Chlorid in den Beton ein, wie wenn eine gesättigte NaCl-Lösung auf einen zuvor nicht wassergesättigten Beton einwirken würde.

8.4.3 Mit dem Eindringen einer gesättigten NaCl-Lösung entsteht in den Betonporen nahe der Oberfläche eine Lösung, deren Chloridkonzentration einer gesättigten NaCl-Lösung entspricht und zwar unabhängig vom w/z-Wert und C_3A -Gehalt des Zementes. Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert, d. h. unterschiedlichem Porenraum, weisen demnach bei gleichem Chloridgehalt des Porenwassers (gesättigte Lösung) unterschiedliche Chloridgehalte bezogen auf das Betongewicht auf.

8.4.4 Die Eindringtiefe von Chlorid ist bei gleicher Einwirkungs-dauer für w/z = 0,6 deutlich größer als für w/z = 0,5. Nach 8 Monaten dringt das Chlorid bei w/z = 0,6 etwa doppelt so tief ein.

8.4.5 Bei Portlandzement mit durchschnittlichem C_3A -Gehalt ändert sich die Chloridverteilung nach 1 Monat kaum noch, während bei C_3A -armen Portlandzementen (z. B. HS-Zementen) der Chloridgehalt bis zum Ende der Lagerung nach insgesamt 8 Monaten noch deutlich zunimmt.

8.4.6 An Rissen, in die Chloridlösung eindringt, wird das Chlorid bis zur Rißwurzel mittransportiert, wobei es auch von den Riß-ufern aus in den Beton eindringt. Dabei zeigen Rißbreiten zwischen 0,1 und 0,3 mm kein unterschiedliches Verhalten. Bei einem, dem einwirkenden Chlorid entgegengerichteten Wasserdampftransport ist auch an Rissen das Eindringen von Chlorid unbedeutend.

8.4.7 Bekanntlich schreitet die Carbonatisierung des Betons bei relativen Luftfeuchten zwischen etwa 50 und 80 % am schnellsten voran. Bei gleichzeitiger Einwirkung von hygroskopischem Tausalz nimmt der Feuchtegehalt des Betons jedoch derart zu, daß eine Carbonatisierung schon bei niedrigeren Luftfeuchten (hier bei NaCl ab ca. 75 % r.F.) nahezu vollständig unterbunden wird.

9 Literatur

- / 1/ Volkwein, A.: Eindringen von Chloridionen in den Beton von Straßenbrücken. Straße und Autobahn 31 (1980), H. 4.
- / 2/ Chloridkorrosion. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, H. 36, 1983.
- / 3/ Sachstandbericht Chlorid im Beton. DBV-Merkblätter, Deutscher Betonverein e.V., Wiesbaden, Fassung 1982.
- / 4/ Brodersen, H.A.: Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins. Diss. RWTH Aachen, Jan. 1982.
- / 5/ Efes, Y.: Einfluß der Zemente mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt auf die Chloriddiffusion im Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 46 (1980), H. 4, 5 und 6.
- / 6/ Pühringer, J.: Salt Disintegration. Document D 15: 1983, Swedish Council for Building Research, Stockholm.
- / 7/ Sorensen, B., Maahn, E.: Penetration Rate of Chloride in Marine Concrete Structures. Nord. Concrete Research, Public. No. 1 (1982).
- / 8/ Weigler, H. u. Segmüller, E.: Einwirkung von Chloriden auf Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 39 (1973), H. 8.

- / 9/ Teilbericht 45/19, Aktiv.Nr. 2.3.7: Chlorideindringung - Vergleich Zeitraffer- und Langzeittest zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben: Spätschäden an Spannbetonbauteilen, Fa. Dyckerhoff & Widmann AG, München/Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn, FKZ-Nr. BAU 7006, 1983.
- /10/ Hartl, G.: in /2/
- /11/ Stichel, W. (BAM, Berlin): Besondere Untersuchungen an einer 20 Jahre alten Stützwand. Vortrag an der Fachtagung "Schäden an Brücken und Ingenieurbauwerken aus Beton und Möglichkeiten ihrer Verhütung", Verwaltungsakademie Berlin, 20.4.1982.
- /12/ Locher, F.W. u. Sprung, S.: Einwirkung von salzsäurehaltigen PVC-Brandgasen auf Beton. Betontechnische Berichte 1970, Beton-Verlag, Düsseldorf 1971.
- /13/ Martin, H.: Zeitlicher Verlauf der Chloridionenwanderung in Beton, der einem PVC-Brand ausgesetzt war. Betonwerk + Fertigteil-Technik 41 (1975), H. 1 und 2.
- /14/ Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete. Diss. Techn. Hochschule Stockholm, 1982; Swedish Cement and Concrete Research Inst. Stockholm, fo 4.82.
- /15/ Tritthart, J.: Vortrag am Forschungskolloquium im Forschungsinstitut des Vereins der österr. Zementfabrikanten, Wien 26.11.1980, und zusätzliche persönliche Mitteilung vom 25.2.1983.
- /16/ Zementtaschenbuch, 48. Ausgabe 1984. Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin.

- /17/ Fagerlund, G.: On the Capillarity of Concrete.
Nord. Concr. Res., No. 1 (1982)
- /18/ Czernin, W.: Zementchemie für Bauingenieure.
Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin, 1977.
- /19/ Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und
der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau
unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisie-
rung des Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton,
H. 255, 1976, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- /20/ DIN 50 019: Teil 1: Kennzeichnung und kartographische
Darstellung der Freiluftklimare (1979); Teil 2: Frei-
luftklimare, Klimadaten (1963); Teil 3: Technoklimare,
statistische Klimamodelle (1979); Beuth-Verlag, Berlin.
- /21/ Engstle, B.M.: Mikroklima an Bauwerksoberflächen und
Auswirkungen auf den Feuchte- und Temperaturverlauf
in der Betondeckung von Stahlbetonbauteilen. Diplom-
arbeit am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoff-
prüfung, TU München, 1983.
- /22/ Vorläufige Richtlinie zur Bestimmung der Chloridver-
teilung in Beton und ergänzende Untersuchungen,
Fassung Juni 1982, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton,
Arbeitskreis Chlorideindringtiefe.
- /23/ Volkwein, A., Dorner, H.: Chloridbestimmungsmethoden
- Übertragung von Labor- auf Bauwerksverhältnisse.
Teilbericht 45/8, Aktiv.Nr. 2.1.6, vgl. /9/.
- /24/ Kohlrausch, F.: Praktische Physik, Band 3 (Tafeln).
B. G. Teubner, Stuttgart, 1968 (22., neubearb. und
ergänzte Auflage).

- /25/ Volkwein, A., Dorner, H.: Transportphänomene, Löslichkeit von Ionen, Korrosionswirkung - Zusatzuntersuchungen an Bauwerksproben. Teilbericht 45/15, Aktiv.Nr. 2.2.5, vgl. /9/.
- /26/ Schneider, A.: Neue Diagramme zur Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit über gesättigten wässrigen Lösungen und bei wässrigen Schwefelsäurelösungen bei verschiedenen Temperaturen. Holz als Roh- und Werkstoff 18 (1960), Heft 7.
- /27/ Neumüller, O.-A.; Römpps Chemie-Lexikon. Franck'sche Verlagshandlung, Stuttgart (1981).