

U. Nürnberger, T. Mansour, W. Beul, G. Onuseit

Korrosionsverhalten feuerverzinkter Bewehrung in Leichtbeton

Bericht Nr. 120
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

U. Nürnberger, T. Mansour, W. Beul, G. Onuseit

Korrosionsverhalten feuerverzinkter Bewehrung in Leichtbeton

**Bericht Nr. 120
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.**



Vorwort

In einem bewehrten, nichtgefügedichten Leichtbeton im Freien ist ein Korrosionsschutz der Stahleinlagen nicht gegeben bzw. ein solcher ist zumindest nicht ausreichend. Selbst in einem Beton mit Außenschutz kann Bewehrungsstahlkorrosion auf Dauer nicht ausgeschlossen werden, da ein aktiver Schutz durch Passivierung entfällt und auch der passive Schutz im Verhältnis zu den gefügedichten Betonen vergleichsweise niedrig ist. Dies hat zu der Entwicklung geführt, daß

Leichtbeton mit offenem bzw. porigem Gefüge vor allem als bewehrter Beton in korrosiver Umgebung (in der Atmosphäre) nur begrenzt eingesetzt wird,

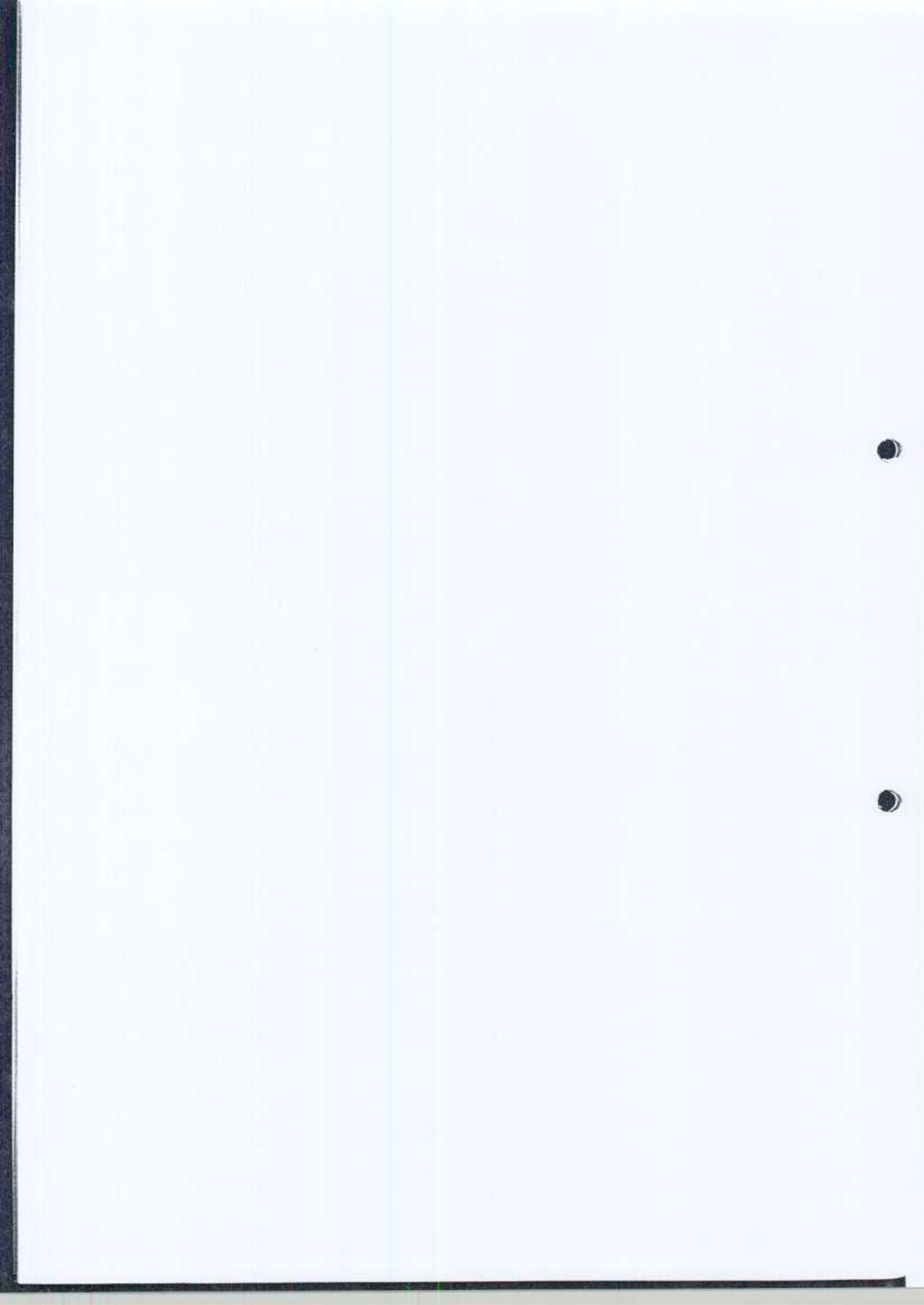
- oder versucht wird, den Stahl zusätzlich vor Korrosion zu schützen.

Der bisher erzielte Schutz ist jedoch nicht ausreichend bzw. dauerhaft, weshalb es Aufgabe dieser Arbeit sein wird, neuzeitliche Entwicklungen des Korrosionsschutzes auf ihre Anwendung für den Bereich des Leichtbetons zu untersuchen. In dieser Arbeit werden Ergebnisse zum Verhalten einer feuerverzinkten Bewehrung in Normalbeton, Konstruktionsleichtbeton und nichtgefügedichtem Leichtbeton behandelt. Hierzu wurden bewehrte Bauteile aus Beton bis zu 2,5 Jahren unter typischen, in der Praxis möglichen Korrosionsverhältnissen, ausgelagert.

Die Untersuchungen wurden im Rahmen der vom Bundesminister für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen (AIF-Nr. 7570) geförderten industriellen Gemeinschaftsforschung mit Unterstützung des Gemeinschaftsausschusses Verzinken (GAV-Nr. FA 20) ausgeführt. Die Autoren danken den genannten Institutionen für ihre freundliche Unterstützung.

Stuttgart, im Oktober 1992

U. Nürnberger



Inhaltsverzeichnis

Sachverhalt

- 2. Stand der Erkenntnisse
von Stahl in Leichtbeton
 - 2.1 Korrosion von Stahl in Leichtbeton
 - 2.2 Korrosionsschutz von Stahl in Leichtbeton
- 3. Versuchsmaterialien
 - 3.1 Bewehrungsstahl
 - 3.2 Beton
 - 3.3 Versuchskörper
- 4. Versuchsdurchführung
 - 4.1 Ermittlung korrosionsrelevanter Betonparameter
 - 4.2 Korrosionsversuche
- 5. Ergebnisse der Untersuchungen
 - 5.1 Porosität, Wasserhaushalt
 - 5.2 Karbonatisierung des Betons
 - 5.3 Chlorideindringung in Beton
 - 5.4 Korrosionsverhalten
 - 5.4.1 Äußeres Erscheinungsbild der Versuchskörper
 - 5.4.2 Art der Bewehrungsstahlkorrosion
 - 5.4.3 Intensität der Bewehrungsstahlkorrosion
 - 5.4.3.1 Unverzinkte Stähle
 - 5.4.3.2 Feuerverzinkte Stähle
- 6. Zusammenfassung



1. Sachverhalt

Normalbeton weist bekanntlich auch Eigenschaften auf, die für manche Anwendungsfälle nicht hingenommen werden können, so das hohe Eigengewicht und die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit. Dies hat zur Entwicklung der leichten Betone geführt. Als Leichtbetone werden i.a. alle Betone bezeichnet, deren Rohdichte $< 2 \text{ t/m}^3$ beträgt. Dabei werden die Rohdichten vor allem über Art, Menge und Kornklassen bzw. Verteilung der Zuschläge eingestellt. Mit der Abnahme der Rohdichte (Zunahme der Porosität der Zementsteinmatrix und der Zuschläge) werden - je nach Zuschlagart und Anteil des porigen Zuschlags - die wärmedämmenden Eigenschaften i.a. verbessert.

Leichtbeton wird aus hydraulischen Bindemitteln (Zement), Wasser, u.U. Porosität-erzeugenden Zusätzen und zumeist porösen Zuschlägen aus künstlich erzeugten oder natürlichen Gesteinen hergestellt. Bei der Anwendung des Leichtbetons haben sich im wesentlichen zwei Sorten durchgesetzt:

- Konstruktionsleichtbeton (gefügedicht),
- wärmedämmender Leichtbeton (nichtgefügedicht): Haufwerksporiger Beton, Porenbeton (Gas- und Schaumbeton).

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der gebräuchlichsten Sorten, wobei u.a. die Rohdichtebereiche, Festigkeitsklassen und Wärmeleitzahlen angegeben sind. Zum Vergleich sind auch Werte eines typischen Normalbetons aufgeführt. In der Tabelle wurden für Konstruktionsleichtbeton und haufwerksporigen Beton nur porige Zuschläge berücksichtigt, da diese einerseits bei Leichtbeton vornehmlich zur Anwendung kommen und im Fall von Konstruktionsleichtbeton - wenn überhaupt - nur für poröse Zuschläge eine Verschlechterung des korrosionstechnischen Verhaltens im Vergleich zu Normalbeton zu erwarten ist. Die Anwendungsbereiche von Leichtbeton reichen

von hochwärmedämmenden Betonen mit für raumabschließende Bauteile ausreichender Festigkeit (Gasbeton, Schaumbeton, haufwerksporiger Beton),

über den mittleren Festigkeitsbereich mit wärmedämmender und gleichzeitig konstruktiver Funktion (haufwerksporiger Beton, Konstruktionsleichtbeton),

bis zum höchsten Festigkeitsbereich mit nur konstruktiver Aufgabe, jedoch deutlich niedrigerer Rohdichte als Normalbeton (Konstruktionsleichtbeton).

Alle Betonarten können je nach Anwendungsfall bewehrt werden. Für den dem normalen Stahl- und Spannbeton entsprechenden Stahlleicht- und Spannleichtbeton darf z.Z. nur bewehrter Konstruktionsleichtbeton nach DIN 4219 (Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge) verwendet werden. Man geht i.a. davon aus, daß in einem derartigen Beton der eingebettete Stahl vergleichbar gut vor Korrosion geschützt ist wie in Normalbeton.

Bei den nichtgefügedichten Leichtbetonen steht -wie schon erwähnt- die Wärmedämmung im Vordergrund. Da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit etwa $0,50 \text{ kcal}/(\text{m}\cdot\text{h})$ etwa 25 mal größer ist als von ruhender Luft, nimmt diese mit steigendem Wassergehalt des Betons zu. Feuchtigkeit in porösen Baustoffen verschlechtert somit den Wärmeschutz. Außenbauteile (z.B. Wände, Dächer) aus nichtgefügedichten Leichtbetonen erhalten daher i.a. einen Witterungsschutz aus z.B. Putzen, Kunststoffdispersionsbeschichtungen oder hinterlüfteten bzw. dicht angesetzten Vorsatzschichten.

In einem bewehrten, nichtgefügedichten Leichtbeton ohne Witterungsschutz im Freien ist ein Korrosionsschutz der Stahleinlagen nicht gegeben, bzw. ein solcher ist zumindest nicht ausreichend. Selbst in einem derartigen Beton mit Außenschutz kann Bewehrungsstahlkorrosion auf Dauer nicht ausgeschlossen werden, da ein aktiver Korrosionsschutz durch Passivierung bei einigen Sorten entfällt und auch der physikalische Schutz im Verhältnis zu den gefügedichten Betonen vergleichsweise niedrig ist /1/. Dies hat zu der Entwicklung geführt, daß

Leichtbeton mit offenem bzw. porigem Gefüge, vor allem als bewehrter Beton in korrosiver Umgebung (in der Atmosphäre) nur begrenzt eingesetzt wird,

oder versucht wird, den Stahl zusätzlich vor Korrosion zu schützen.

Der bisher erzielte Schutz (Abschn. 2) ist jedoch nicht ausreichend bzw. dauerhaft, weshalb es Aufgabe dieser Arbeit sein wird, neuzeitliche Korrosionsschutzverfahren für Bewehrungsstahl wie das Feuerverzinken /2/ auf ihre Anwendung für den Bereich des Leichtbetons zu untersuchen. Hierzu wurden mit unverzinkten und feuerverzinkten Betonstählen bewehrte Normal- und Leichtbetonkörper unter typischen Umweltbedingungen ausgelagert. Nach 1 und 2,5 Jahren wurden die Stähle hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens untersucht. Zusätzlich wurden auch die notwendigen physikalischen und chemischen Parameter wie z.B. Porosität, Wasserhaushalt, Karbonatisierung und Chlorideindringung zwecks Erklärung bzw. Bewertung der Korrosion ermittelt.

2. Stand der Erkenntnisse

2.1. Korrosion von Stahl in Leichtbeton

In /1/ wurde herausgestellt, daß die für die Korrosion in betonnotwendigen Voraussetzungen wie Depassivierung, Sauerstoffzutritt und Leitfähigkeit um so eher zutreffen, je poröser der Beton ist und je geringer die anfängliche Alkalität des Zementstein ist. Deshalb nimmt, wie in der Literatur /3-6/ auch nachgewiesen wurde, die Korrosion im Beton in der Reihenfolge Normalbeton - Konstruktionsleichtbeton - luftgehärteter Porenbeton (Schaumbeton) - haufwerksporiger Beton - dampfgehärteter Porenbeton (Gasbeton) zu. Umso poröser der Beton ist, desto geringer wird der Einfluß der Betondeckung auf die Korrosion, da die von der Betondeckung abhängigen diffusionsgesteuerten Einflüsse ihren geschwindigkeitsbestimmenden Charakter verlieren.

In Konstruktionsleichtbeton ist die Korrosion gegenüber Normalbeton gleicher Festigkeit i.a. nur unwesentlich erhöht /4/. Der grö-

2.2 Korrosionsschutz von Stahl in Leichtbeton

Wegen der in Abschn. 2.1 geschilderten Zusammenhänge ist es notwendig, die Bewehrung in nichtgefügedichtem Leichtbeton in besonderer Weise vor Korrosion zu schützen. Anderenfalls würde bei Bauteilen im Freien Korrosion auch dann einsetzen, wenn die Betonoberflächen behandelt wurden und der Eintritt von Niederschlagswasser auszuschließen ist /3/. Im Fall von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge wird i.a. davon ausgegangen, daß - vergleichbar den Verhältnissen in Normalbeton - für den normalen Anwendungsfall ein ausreichender Korrosionsschutz gegeben ist. Nur in Sonderfällen wäre die Bewehrung zusätzlich zu schützen.

Die besondere Herstellung und Struktur der porösen Leichtbetone stellt an zusätzliche Korrosionsschutzmaßnahmen in Form von Schutzschichten auf dem Stahl besondere Anforderungen:

Schutzsysteme müssen auf der Bewehrung und im umschließenden Beton ausreichend haften.

Bei der Herstellung von Porenbetonen in Autoklaven sind Temperaturen bis 180°C und Drücke bis 12 atm möglich. Es herrschen somit Bedingungen mit hohen Temperaturen und Feuchtegehalten vor, denen die Schutzsysteme standhalten müssen.

Eine ausreichende Alkalitäts- und Alterungsbeständigkeit wird ebenfalls vorausgesetzt.

Während der Nutzung ist wegen der höheren "offenen" Porosität mit einer gegenüber Normalbeton erhöhten Einwirkung von Sauerstoff und je nach Anwendungsfall, zumindest zeitweise auch von Wasser zu rechnen. Im Hinblick auf Stahlkorrosion sollten Schutzschichten daher besonders diffusionsdicht und auch dick sein.

Die meisten der bekannten Schutzsysteme wurden für Porenbetone mit autoklaver Behandlung (Gasbeton) entwickelt und dann z.T. für Leichtzuschlagbeton wie haufwerksporigen Beton übernommen. Anfangs

pe

di

b

Überzüge auf der Basis Zement-Asphalt (4 Gewichtsanteile Zement, 1 Gewichtsanteil Asphalt) zeigten auch nach einer Autoklavenbehandlung gute und i.a. sehr viel bessere Korrosionsschutzeigenschaften als die zuvor genannten Maßnahmen /12-14/.

Hinsichtlich des Korrosionsschutzes in nichtgefügedichtem Leichtbeton wurden relativ gute Ergebnisse auch bei Beschichtungen mit bituminösen Stoffen erzielt /3, 7, 8, 10/. Bei allen bituminösen Stoffen (Biumina, Teere) handelt es sich um viskoelastische und thermoplastische Stoffe, die vor allem aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften ergeben sich aus ihrer Struktur. Durch das Herstellungsverfahren können die Eigenschaften den Erfordernissen des Korrosionsschutzes angepaßt werden. Korrosionsschutzsysteme auf der Basis von Bitumen werden in Betonen wegen einer Reihe wertvoller technischer Eigenschaften eingesetzt /15/:

Dichtigkeit und Beständigkeit gegenüber Wasser und aggressiven Medien,
gute Klebkraft und gutes Haftvermögen auf dem Untergrund,
Plastizität und eine gewisse Elastizität,
leichte Verarbeitbarkeit und niedrige Kosten.

Die Löslichkeit von Gasen, Dämpfen und Flüssigkeiten in reinen bituminösen Stoffen ist größtenteils nur auf die Oberfläche beschränkt. Schädliche Stoffe dringen daher bei ausreichender Schichtdicke nicht bis zur Metalloberfläche vor. Wasser löst sich in reinem Bitumen nur bis zu 0,01 %. Gegenüber verdünnten Laugen ist Bitumen beständig. Paraffinfreie Destillationsbitumina weisen die beste Klebkraft auf, während Extraktionsbitumen hart und spröde ist. Geblasene Bitumensorten weisen ebenfalls gute Haftfestigkeitseigenschaften auf.

Aufgrund der plastischen und elastischen Eigenschaften sind Bitumina nicht schubfest, was zu einer starken Abminderung des Haftverbundes führt. Da in Gasbeton die Haftspannungen ohnehin nicht in Rechnung gestellt werden und die Verankerung über Querstäbe ge-

d
d
d
d
d
d
b
d

mp

ü

g

ym

ym

p

d

b

h
ü

d ü ym

d d

ü

d

3. Versuchsmaterialien

3.1. Bewehrungsstahl

g

h

h

g

A

h

b

d

h

g

g

h

3.2 Beton

b

b d

p

d

Konstruktionsleichtbeton

d

hem Hohlraumgehalt und einer gesinterten Außenhaut. Dies macht Liapor unempfindlich gegen Wassereindringung und Frost.

Da bei Konstruktionsleichtbeton die Druckkräfte überwiegend durch das Mörtelgerüst zwischen den Zuschlägen übertragen werden, muß zur Herstellung eines LB 25 ein höherwertigerer Zementstein erzeugt werden als bei einem Normalbeton B25, bei welchem die Lastabtragung überwiegend über die höherfesten Zuschlagkörner erfolgt. Deshalb ist der Zementgehalt beim Konstruktionsleichtbeton höher und der Wasserzementwert niedriger als beim Normalbeton gleicher Festigkeit.

Beim Gesamtwassergehalt ist zusätzlich die Wasseraufnahme bei porösen Leichtzuschlägen zu berücksichtigen. So hat der Gesamtwassergehalt das Wasser zur Zementleimbildung und das Wasser, das von den Leichtzuschlägen aufgenommen wird, zu umfassen.

Haufwerksporiger Beton (HpB)

Durch Verwendung von Zement, Wasser und Zuschlagstoffen aus porigem Gestein ohne Kornabstufung wurde Leichtbeton mit Haufwerksporen hergestellt. Der Bindemittelgehalt wird bei dieser Betonart beschränkt. Hierdurch entsteht ein Leichtbeton mit Makrohohlräumen zwischen den Zuschlägen. Die Verkittung der Körner erfolgt an deren Berührungsstellen (Abb. 2 b und 3 b).

Die Rohdichte und die hiermit zusammenhängende Korn- bzw. Betonfestigkeit sowie der Wärmeschutz resultieren aus der Porigkeit der Zuschläge und der Struktur. Die Art der Zuschläge ist mit jenen des Konstruktionsleichtbetons identisch. Die Kornzusammensetzung ist so zu wählen, daß das Korngerüst einen möglichst großen Hohlraumgehalt enthält. Man verwendet deshalb im Grobbereich in der Regel nur eine eng begrenzte Korngruppe. Der Sandanteil wird auf den für die Verarbeitung notwendigen Gehalt beschränkt.

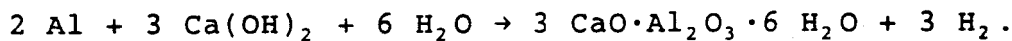
Der Zementgehalt wird bewußt niedrig gehalten, damit die Hohlräume zwischen den Zuschlägen weitgehend offen bleiben.

Die Wasserzugabe wird so bemessen, daß ein sämiger, zähklebriger Zementleim entsteht, der die Zuschlagkörner mit einer Haut umkleidet, aber nicht in die Haufwerksporen abfließt und diese verstopft.

Die Porenbetone werden nach der Art der Porenbildung in Gas- und Schaumbeton unterteilt. Sie sind gekennzeichnet durch ein zellenartiges Gefüge mit zahlreichen feinen Gas- oder Luftporen (Abb. 2 c).

Gasbeton GB

Der Gasbeton wurde durch Zugabe eines Treibmittels (Gasbildner) in ein frisches Gemisch von Zement, Kalk, Wasser und Feinsand hergestellt. Im erhärteten Zustand bildete sich ein Zellengefüge aus (Abb. 3 c). Das Treibmittel reagiert aufgrund seines amphoteren Verhaltens mit dem Alkaligehalt des Bindemittels, wobei Wasserstoff frei wird. Z.B. für Ca(OH)_2 gilt:



In der Regel benötigt man als Treibmittel je nach Porositätsgrad 1 bis 2 g Aluminiumpulver pro kg Zement. Der Mörtel wird dabei aufgebläht, bis er die Form ausfüllt; er enthält die für die Wärmedämmung notwendigen Luftporen. Das bei der Reaktion entstehende Tricalciumaluminat ist eine ähnliche Verbindung, wie sie auch im Zement als C_3A enthalten ist.

Der Gasbeton wurde dampfgehärtet. Früher ließ man Gasbeton an der Luft aushärten, was jedoch ein hohes Schwindmaß ($> 2\text{ mm/m}$) zur Folge hatte. Durch die sog. Autoklavhärtung wurde des Nachschwinden auf weniger als $0,50 \text{ mm/m}$ (zulässiger Maximalwert) reduziert. Bei der Herstellung autoklavengehärteten Gasbetons werden die Bauteile in Kesseln unter hochgespanntem Dampf bei etwa 180°C und Drücken von 12 atm und Härtezeiten von 10 bis 18 Stunden ausgehärtet. Die Festigkeit der Zement-Quarzmehl-Mischung hängt vor allem von dem Quarzanteil sowie den Erhärtungstemperaturen ab.

hydroxids des Bindemittels an das
ig alkalisch; der pH-Wert liegt bei

Q

Schaumbeton

tete Schaumbeton wurde durch Zugabe
n frisches Gemisch von Zement, Was-
Im erhärteten Zustand bildete sich

spezielles Gerät verwendet, mit dem
Luft Schaum erzeugt wurde (Abb. 4).

sgangsmischung in den laufenden Be-
n untergemengt. Die für den Schaum-

de für die gewünschte Betonrohricht-
Durch dieses Herstellungsverfahren

des Schaumbetons für die Dauer der
envolumen und Porenstruktur bleiben

ert sich nach dem Einbringen nicht.
ne Schwindmaß dieser Betone und die

Abb. 5 zeigt die Oberfläche des im
is nach einem Jahr, bei dem

sprechen die Gebrauchseigenschaften
Gasbeton.

Leichtbetone ist in Abb. 3 darge-
n das typische Oberflächenaussehen
lbetons.

3.3. Versuchskörper

e 2 aufgeführten Betonsorten wurden
nktem Stahl bewehrte Stahlbetonteil-

Ah

id

.b

g

d

d

h

tende pH-Abminderung verstanden. Karbonatisierter Beton weist einen pH-Wert um 8,3 auf.

4. Versuchsdurchführung

4.1 Ermittlung korrosionsrelevanter Betonparameter

Die Art und Zusammensetzungen der Betone beeinflusst die Porosität bzw. Porenverteilung, die Aufnahmefähigkeit und -geschwindigkeit von Flüssigwasser (Regen), die Wassergehalte infolge Kapillarkondensation bei relativen Feuchten < 100 % (Ausgleichsfeuchte), die Karbonatisierung und die Chlorideindringung. Diese Größen wurden im Labor untersucht und ermittelt:

Porosität(P)

Die Gesamtporosität des Betons werden aus der Differenz der Reindichte (ρ_o) und der Rohdichte (ρ_r) des Betons ermittelt. Die Gesamtporosität "P" ergibt sich dann zu

$$P = 100 \left(1 - \frac{\rho_r}{\rho_o} \right) \%$$

Zur Ermittlung der Rohdichte wurden 2 cm dicke Scheiben von Betonzylindern (Durchmesser 10 cm) abgesägt und deren Volumen (V) ermittelt. Danach wurden die Proben bei + 105°C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz (M) getrocknet. Die Rohdichte bestimmt sich mit

$$\rho_r = \frac{M}{V}$$

Die Reindichte wurde mit einem Heliumpyknometer gemessen. Hierfür wurden pro Betonart 4 Proben geprüft, Mittelwerte gebildet und mit der obengenannten Formel die Gesamtporosität errechnet.

Wasseraufnahmefähigkeit(W)

Hierbei wurde Probewürfel von Beton mit der Kantenlänge von 15 cm bei + 105°C im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet (Mt). Die Wasseraufnahme wurde durch Lagerung unter drucklosem Wasser geprüft. Nach bestimmten Lagerungszeiten wurde die Prüfpro-

be sättig, dann wurde die Probe oberflächlich getrocknet und gewogen (M_w). Die Wasseraufnahmefähigkeit (W) wurde auf das Volumen bezogen und mit der folgenden Formel berechnet:

$$W = \frac{M_w - M_t}{M_t} \cdot \rho_r \cdot 100 \text{ (vol.-%)}$$

Wassereindringungszahl (A)

Die Betonversuchskörper besitzen eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 20 cm. Die Proben wurden im Trockenschrank getrocknet (M_t). Um ein eindimensionales Eindringen des Wassers sicherzustellen, Wasserverdunstungen und Diffusionseffekt während der Versuchsdauer auszuschließen, wurden die Mantelflächen der Probekörper mit einer 2fachen Schicht aus 2komponentigen Epoxidharz beschichtet. Darüberhinaus wurden die Probekörper in einer Plastikwanne unter dem Abzug auf Abstandshalter gestellt, die als Auflager dienten. Der Wasserspiegel befand sich ca. 1 cm oberhalb der Unterkante der Prüfkörper. Die Gewichtszunahme von Beton wurde zu verschiedenen Zeitpunkten ermittelt. Daraus kann die Wassereindringungszahl (A) durch die Beziehung

$$m_w = A \sqrt{t}$$

bestimmt werden. Hier bedeuten:

m_w : flächenbezogene Wasseraufnahme in kg/m^2

t : Zeit in Stunden.

Ausgleichfeuchtigkeit

Zur Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalt von Beton wurden die Proben (4 x 1 x 1 cm) wie zuvor beschrieben getrocknet und in relativer Luftfeuchtigkeit von 100 %, 95 %, 80 % und 65 % und bei einer Temperatur von 20°C gelagert. Nach bestimmten Lagerungszeiten wurde das Gewicht der gewichtskonstanten Probe und die Feuchtigkeit in gelagertem Klima bestimmt.

Karbonatisierung

Die Betonversuchskörper besitzen eine zylindrische Form mit einem Durchmesser von 10 cm und einer Höhe von 20 cm. Sie wurden nach der Betonerhärtung bis zu 10 Tagen feucht (100 % relative Luft-

feuchte) und weiter bis zum 28. Tag im Klimaraum bei 20° C und 65 % relative Luftfeuchte gelagert. Die anschließende Lagerung bis zur Versuchsdurchführung erfolgte lufttrocken bei einer Raumtemperatur von 20°C.

Um eine eindimensionale Eindiffusion von Kohlendioxid in Beton sicherzustellen, wurden die Mantelflächen der Probekörper mit einer 3fachen Schicht aus 2komponentigen Epoxidharz beschichtet. Die Epoxidharzbeschichtung erfolgte mit einem Pinsel. Damit war sichergestellt, daß Beeinträchtigung der Ergebnisse durch Eindiffusion von Kohlendioxid an den Mantelflächen ausgeschlossen waren. Danach wurden die Proben im Freien unter Dach ausgelagert.

Als Kennwert für die Karbonatisierungstiefe wurde die Zone mit einem pH-Wert < 9 betrachtet. Das ist jener Bereich, in der Beton vollständig karbonatisiert ist. Diese Zone wird am einfachsten durch Besprühen mit dem Indikator Phenolphthalein gekennzeichnet.

Chlorideindringung

Das Chlorideindringungsverhalten wurde an den im Freien mit Chlorid beaufschlagten Proben untersucht (s.u. Chlorid 1).

Die Prüfkörper wurden nach einer Auslagerungszeit von 2,5 Jahren entnommen und es wurde der Chloridgehalt in den verschiedenen Betontiefen bestimmt.

4.2 Korrosionsversuche

Die Probekörper wurden unter folgenden Bedingungen ausgelagert (Tabelle 3):

Im Freien unter Dach: Die Bauteile unterliegen den üblichen Schwankungen der relativen Feuchte, sind jedoch keinen Niederschlägen ausgesetzt. In Stuttgart beträgt die jährliche mittlere relative Luftfeuchte 75 % und die mittlere Temperatur 10°C.

Im Freien: Die Bauteile sind der normalen Bewitterung ausgesetzt. In Stuttgart betragen die jährlichen Niederschläge 630 l/m^2 (Mittelwert 1990/91).

In einem Klimaraum mit 100 % relativer Feuchte und 20°C

Im Freien mit Chloridbeaufschlagung: Dabei wird in Wasser gelöstes Chlorid (1,5 Mass.-%) auf die Betonoberfläche aufgesprüht. In Anlehnung an die typische Zusammensetzung von Streusalz besteht das Chlorid zu etwa 87 % aus NaCl und 13 % CaCl_2 . Es wurden zwei Behandlungen gewählt:

- a - 50 Sprühungen mit 5 g Salz/m^2 verteilt auf 25 Tage im Sommer und 25 Tage im Winter (Chlorid 1)
- b - 150 Sprühungen pro Jahr mit 5 g Salz/m^2 in regelmäßigen Abständen (Chlorid 2).

Die Behandlung Chlorid 1 orientiert sich an Chloridbelastungen von Bauwerken durch Streusalze (Spritzwasser). Die Behandlung Chlorid 2 ist bei Leichtbeton sicherlich nicht im Hinblick auf baupraktische Verhältnisse gewählt worden. Sie dient lediglich der Verdeutlichung der Grenzen des Korrosionsschutzes im Medium Leichtbeton.

Die Abb. 8 und 9 zeigen einen Teil der im Freien ausgelagerten Probekörper. Die Bauteile wurden hochkant gestellt; die Bewehrung liegt unterhalb der äußeren vertikalen Flächen.

Sämtliche Versuchsvarianten wurden an 2,5jährigen Proben untersucht. Die im Freien und bei Chloridbeaufschlagung (Chlorid 1) ausgelagerten Proben wurden auch nach 1 Jahr entnommen. Die nach 5 Jahren zu entnehmenden Proben sind nicht Bestandteil dieses Vorhabens. Diese späteren Untersuchungen werden aus Eigenmitteln finanziert.

5. Ergebnisse der Untersuchungen

5.1. Porosität, Wasserhaushalt

Die, für die Porosität und den Wassergehalt der untersuchten Betone, charakteristischen Kennwerte sind in Tabelle 4 aufgeführt. Man findet

- Die mit dem Heliumpyknometer ermittelte Gesamtporosität:
Diese umschließt alle Poren, welche sich bei Einwirkung von Druckwasser füllen.
- Den Wassergehalt, der sich bei druckloser Lagerung unter Wasser einstellt. Er umschreibt die dem Wasser zugängliche Porosität. Diese entspricht nur einem Teil der Gesamtporosität.
- Die Wassereindringzahl, welche ein Maß für die Aufnahmegeschwindigkeit von Flüssigwasser ist.

Die Wassergehalte der Betone bei relativen Feuchten $< 100 \%$.

Normalbeton weist die niedrigste Gesamtporosität und bei Einwirkung von Flüssigwasser die geringste Aufnahmegeschwindigkeit und Aufnahmekapazität auf. Die Wassergehalte infolge Kapillarkondensation bei relativen Feuchten $< 100 \%$ sind im Vergleich zum aufnehmbaren Wasser relativ hoch; dies ist auf den hohen Anteil von kondensationsfähigen Mikroporen bis 100 nm im Zementstein an der Gesamtporosität zurückzuführen.

Gasbeton weist genau entgegengesetzte Eigenschaften auf. Die Gesamtporosität bzw. Wasseraufnahmefähigkeit ist am höchsten; die Wasseraufnahmegeschwindigkeit ist mehr als 10fach höher als bei Normalbeton. Da Gasbeton kaum kondensationsfähige (enge) Mikroporen enthält, ist der Wassergehalt des Betons bei relativen Feuchten $< 100 \%$ sehr gering. Bei Wasserangebot liegen demnach bei Gasbeton sehr günstige Korrosionsbedingungen vor; bei behindertem Zutritt von Flüssigwasser ist auf Dauer keine schädigende Korrosion möglich.

Die entsprechenden Eigenschaften der übrigen Betone liegen zwischen den genannten Extremen: Der Konstruktionsleichtbeton tendiert eher in Richtung Normalbeton. Jedoch ist die Gesamtporosität wegen der Verwendung poröser Zuschläge deutlich höher. Die Wassergehalte bei relativen Feuchten $< 100 \%$ liegen jedoch nahezu ausschließlich in den Mikroporen von Zementstein und Zuschlägen vor. Der Schaumbeton und vor allem haufwerksporiger Beton tendiert bezüglich der genannten Eigenschaften eher in Richtung Gasbeton. Haufwerksporiger Beton weist wie Gasbeton einen hohen Anteil groberer Poren $> 100 \text{ nm}$ auf (offenen Porenkanäle, poröse Zuschläge); der Anteil von Mikroporen ist auf den geringen Zementsteinanteil (Brücken zwischen den Zuschlägen) und von Zuschlägen beschränkt. Schaumbeton weist eine ähnliche Porenstruktur auf wie Normalbeton, jedoch ist beim Schaumbeton der Anteil von Mikroporen $< 100 \text{ nm}$ kleiner als beim Normalbeton. Der Zementstein des luftgehärteten Schaumbetons entspricht hinsichtlich seiner Zusammensetzung einem Normalbeton, jedoch wurden zusätzlich künstliche Luftporen eingebracht. Eine hohe Betondeckung aus luftgehärtetem Schaumbeton entspricht aus korrosionstechnischer Sicht in etwa einer geringeren Betondeckung bei Normalbeton.

5.2 Karbonatisierung des Betons

Aufgrund des Porensystems können in der Atmosphäre enthaltene säurebildende Gase, vor allem Kohlendioxid, in den Beton eindiffundieren. Hier reagieren diese mit den im Porenwasser gelösten alkalischen Bestandteilen zu Karbonaten. Damit ist eine Alkalitätsabnahme des Betons verbunden, wodurch ein aktiver Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls nicht mehr vorhanden ist. Da die Eindiffusion von Kohlendioxid in Beton den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt aller Karbonatisierungsreaktionen darstellt, nimmt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit steigender Porosität des Zementsteins und fallendem Wassergehalt zu. Deshalb erhöht bei Normalbeton ein niedrigerer Wasserzementwert und/oder eine Nachbehandlung (steigende Betongüte) den Widerstand gegenüber Karbonatisierung und diese nimmt in der Reihenfolge Bauteil im Freien ungeschützt - im Freien geschützt - im Innenraum zu.

Im Vergleich zu Normalbeton liegen bei Leichtbetonen hinsichtlich der Karbonatisierungsgeschwindigkeit ungünstigere Verhältnisse vor (Abb. 10):

Bei hochwertigen Konstruktionsleichtbetonen (mit geschlossenem Gefüge) beeinflußt der Wasserzement den Korrosionsschutz günstig: Der Zementstein enthält wegen des niedrigeren wirksamen Wasserzementwertes (im vorliegenden Fall 0,5, Tabelle 3) weniger und auch feinere Poren und ist daher dichter als bei Normalbeton gleicher Festigkeit, der mit einem Wasserzementwert von 0,78 hergestellt wurde. Infolgedessen schreitet die Karbonatisierung im Zementstein des Konstruktionsleichtbetons eher langsamer voran als im Zementstein des Normalbetons vergleichbarer Festigkeit. Da die Leichtzuschläge trotz gesinteter Außenhaut nicht gasdicht sind, begünstigen diese die Diffusion des Kohlendioxids im Beton. Dadurch wird die Karbonatisierungsgeschwindigkeit erhöht. Je nach Betonzusammensetzung und Gasdichtigkeit der Zuschläge kann deshalb die Karbonatisierungsgeschwindigkeit eines konstruktiven Leichtbetons etwas niedriger oder höher sein als ein Normalbeton gleicher Festigkeit. In vorliegendem Fall karbonatisierte der LB 25 geringfügig schneller als der B 25.

Die in Abb. 10 dargestellten Karbonatisierungskurven wurden im Freien (mittlere relative Feuchte ~75 %) ermittelt, wobei die Einwirkung von Niederschlägen ausgeschlossen wurde. Demzufolge sind die nichtgefügedichten Leichtbetone relativ trocken und die Eindiffusion von CO_2 wird kaum gebremst und orientiert sich ausschließlich an der Porosität. Deshalb nimmt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in der Reihenfolge Normalbeton, Konstruktionsleichtbeton - Schaumbeton, haufwerksporigen Beton - Gasbeton zu. In Abb. 10 bezeichnet die Karbonatisierungstiefe jenen Bereich, in welchem der gesamte Zementstein eine Umwandlung mit pH-Abminderung erfahren hat. Dies ist in der Regel eine pH-Änderung von > 13 auf etwa pH 8,3, da der Anteil alkalischer Bestandteile sehr niedrig ist. Da bereits bei pH 10 Korrosion möglich und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ohnehin sehr hoch ist, ist das Karbonatisierungsverhalten von autoklavenbehandeltem Gasbeton nur von theoretischem Interesse.

Auch bei haufwerksporigem Beton hat das Karbonatisierungsverhalten nur eine untergeordnete praktische Bedeutung, da durch die Porenkanäle stets eine Teilkarbonatisierung im Betoninnern begünstigt wird.

5.3 Chlorideindringung in Beton

Chloride gelangen in gelöster Form durch gleichzeitigen Wassertransport und in wassergesättigtem Beton auch über Diffusion in das Betoninnere. Die Chlorideindringung in Beton ist somit vom Wasserhaushalt abhängig, welcher in spezifischer Weise von der Porosität des Betons beeinflußt wird. Da eine hohe Porosität, wie sie bei einigen Leichtbetonsorten vorliegt, den Wasseraustausch fördert, ist hier von einer rascheren Chlorideindringung auszugehen als in Normalbeton. Ebenso leicht können Chloride jedoch, z.B. durch Beregnung der Oberflächen, wieder ausgewaschen werden. In einen porösen Beton dringen die Chloride jedoch nicht nur schneller ein, sondern die Aufnahmefähigkeit für Chloride ist auch höher. Vergleicht man die Chloridaufnahme von den dichteren Normalbetonen mit poröserem Beton (z.B. Gasbeton), so muß deshalb, um Praxisnähe zu gewährleisten, die natürliche Bewitterung der Betonoberflächen mitberücksichtigt werden.

Das Chlorideindringverhalten wurde deshalb an den im Freien mit Chlorid beaufschlagten Proben untersucht. Abb. 11 zeigt die Eindringkurven für 2,5 Jahre, wobei die Chloridgehalte entweder auf den Gesamtbeton oder auf den Bindemittelgehalt (Zement plus gebundenes Wasser) bezogen wurde. Bei dem Konstruktionsleichtbeton und dem haufwerksporigem Beton wurde vereinfacht angenommen, daß die Zuschläge keine Chloride enthalten. Durch Röntgenanalyse wurde nämlich ermittelt, daß in den Leichtzuschlägen (Blähton) sehr viel weniger Chloride enthalten sind als im Zementstein.

Die Chlorideindringkurven gelten für die Chloridbehandlung 1 (Abschnitt 4.2), wonach die Betone an je 25 aufeinanderfolgenden Tagen im Sommer und Winter mit NaCl-Lösung besprüht wurden. In den Zwischenzeiten konnten Chloride durch eindringendes Regenwasser wiederum ausgewaschen werden. Diese Behandlung entspricht in etwa einer gelegentlichen Beaufschlagung von Beton mit Salzsprühnebel.

5. rro ve ten

5_4 Äußeres b_ der Versuc skorpei

Rißbildung eher bei feuerverzinktem und später auch über unverzinkten Stahl erfolgte (Abb. 12). Tabelle 5 faßt die festgestellten Erscheinungen zusammen. Aufgetragen ist die Rißbreite in mm. In der Regel erfolgte die Rißbildung im Beton über der gesamten Stablänge von 90 cm. Man erkennt in der Tabelle:

Die Rißbildung über den verzinkten Stäben ist deutlich ausgeprägter und nimmt erwartungsgemäß mit steigender Betondeckung ab.

Die Risse werden mit steigendem Chloridgehalt und somit zunehmender Metallkorrosion breiter. Der Zinkabtrag ist jedoch kein alleiniges Kriterium für Betonrißbildung, da in chloridfreiem Beton (Gasbeton) trotz beträchtlichem Zinkabtrag keine Betonrißbildung eintrat.

- Über unverzinktem Stahl traten vor allem in gefügedichteren Betonen Risse auf.

Es wurden zusätzliche Untersuchungen angestellt, um die vorgenannten Erscheinungen in chloridhaltigem Beton zu erklären:

Typisch für die Korrosionsprodukte des Eisens, sicherlich eine Mischung aus Fe_3O_4 , FeOOH und FeCl_2 , ist im Fall eines Betons mit Anteilen von Makroporen das Eindringen in diese Hohlräume. Die gegenüber dem Stahl etwa 3fach voluminöseren Korrosionsprodukte weichen dem entstehenden Druck aus. Bei dem sehr porösen Gasbeton wurden Korrosionsprodukte im Beton noch in einem Abstand von 5-10 mm von der Stahloberfläche festgestellt (Abb. 13).

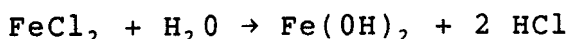
Bei den feuerverzinkten Stählen wurde stets ein sehr kompakter Saum von Zinkkorrosionsprodukten unmittelbar am Stahl festgestellt. Zur Verdeutlichung der Verhältnisse werden in Abb. 14 Ergebnisse von Untersuchungen an Korrosionsprodukten an anderweitig in chloridhaltigem Beton ausgelagerten, feuerverzinkten Stählen gezeigt. Aufgrund der extremen Korrosionsverhältnisse (sehr hohe Chloridgehalte) hat sich hier die ca. 200 μm dicke Zinkauflage in Zinkkorrosionsprodukte umgesetzt. Dabei wurde eine Volumenzunahme

des Zinks um etwa den Faktor 3 festgestellt. Durch Röntgenbeugungsuntersuchungen wurde dieses Korrosionsprodukt als $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$ erkannt. Diese Verbindung des Zinks weist ein 3,44fach höheres Volumen als das Zink selbst auf, was sich aus der stöchiometrischen Zusammensetzung des Korrosionsproduktes und der mit dem Helium-Pyknometer ermittelten mittleren Dichten ($7,15 \text{ g/cm}^3$ bei Zink und $3,38 \text{ g/cm}^3$ bei $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2$) ergibt. In Abb. 14 verweist auch die Chloridverteilung auf höhere Chloridgehalte im Korrosionsprodukt. Die Verteilung für Zink verdeutlicht eine nur begrenzte Eindringung von Zinkkorrosionsprodukten in den Beton.

In Abb. 15 sind die Verhältnisse für eine nur teilweise korrodierte Zinkauflage dargestellt; es handelt sich um die Abplatzung eines Zinkkorrosionsproduktes vom Zink. Diese teilweise Zinkkorrosion hatte bereits Rißbildung im Beton herbeigeführt. Man erkennt auch hier ein chloridreicheres Korrosionsprodukt an der Grenzfläche zum Zink und ein nur begrenztes Eindringen von Zinkkorrosionsprodukten in den Beton.

Aufgrund der bisherigen Feststellungen ist somit davon auszugehen, daß sowohl die chloridhaltigen Korrosionsprodukte des Eisens als auch jene des Zinks ein größeres Volumen aufweisen als das jeweilige Metall selbst: Während jedoch die Korrosionsprodukte des Eisens dem entstehenden Druck ausweichen können (in porösem Beton mehr als in dichteren), trifft dies für die Zinkkorrosionsprodukte offenbar nicht zu. Dies erklärt, warum vor allem in den poröseren Betonen (Normalbeton sehr geringer Güte, Leichtbeton) sich über korrodierenden verzinkten Stählen eher Risse bilden als über korrodierenden unverzinkten.

Das genannte unterschiedliche Verhalten der beiden Arten von Korrosionsprodukten bei Stahl und Zink ist zunächst unklar. Die Löslichkeit der Eisen- als auch Zinkverbindungen ist im alkalischen Bereich sehr gering /20,21/. Man weiß jedoch, daß das im Rost (Fe_3O_4 und/oder $\text{Fe}(\text{OH})_3$) enthaltene Eisenchlorid FeCl_2 gut löslich ist und als hydrolysierbares Salz sauer reagiert:



Dadurch könnten chloridhaltige Korrosionsprodukte des Eisens insgesamt besser löslich sein als Korrosionsprodukte des Zinks, die stets alkalisch reagieren.

Aufgrund der sowohl bei Zinkoberflächen als auch Stahl vorhandenen voluminösen Korrosionsprodukte, der jedoch vorhandenen besseren Löslichkeit des Rostes, ist erklärbar, daß der Beton über korrodierenden verzinkten Stäben eher aufreißt als über unverzinkten, obwohl bei gleichen Korrosionsbedingungen der Zinkabtrag erheblich niedriger ist als der Stahlabtrag. Daß bereits relativ geringe Zinkablagerungen in chloridhaltigem Beton zu Rissen in der Betondeckung führen, hängt sicherlich auch damit zusammen, daß die hier untersuchten Betone sämtlichst niedrigfester als übliche Normalbetone sind.

5.4.2 Art der Bewehrungsstahlkorrosion

Unverzinkte Stähle

Unverzinkte Stähle zeigten bei der Entnahme nach 1 bzw. 2,5 Jahren je nach Betonart, Betondeckung und Auslagerungsbedingungen mehr oder weniger Rost und Stahlabtrag. Abb. 16 zeigt typische Beispiele für entnommene Proben; das Aussehen von Proben aus Normalbeton entspricht jenem von Proben aus Konstruktionsleichtbeton.

In Abb. 17 sind Proben nach Abbeizen der Korrosionsprodukte dargestellt. Aufgrund der korrodierten Oberfläche, des über Gewichtsverlustmessungen ermittelten mittleren Abtrages und der Angriffstiefe (Mittelwert der 3 tiefsten Korrosionsnarben) wurde ein Korrosionsgrad von 0 (keine Korrosion) bis 5 ermittelt und in Abschn. 5.4.3 zur Bewertung des Korrosionsangriffs herangezogen. Hinsichtlich der Korrosionsart ist auffallend, daß in sämtlichen Leichtbetonen, unabhängig von der Art der Depassivierung (Karbonatisierung, Chloridangriff) eine Tendenz zur örtlichen Korrosion vorliegt. Zumindest in karbonatisiertem Normalbeton üblicher Güte wird in der Regel eher Flächenkorrosion festgestellt. Es ist davon auszugehen, daß aufgrund der heterogeneren Struktur dieser Betone

die Ausbildung von Mikroelementen gefördert wird. Am auffallendsten ist diese Erscheinung bei den mit Leichtzuschlägen hergestellten haufwerksporigen Beton (Abb. 17 b und 17 c); hier liegen tiefere Korrosionsnarben neben geringer angegriffenen Bereichen vor. In /1/ wurde in diesem Zusammenhang angenommen, daß sich die Anoden bzw. Kathoden in Abhängigkeit vom Wassergehalt ausbilden. Für Bauteile im Freien (hier sind im Mittel weniger als 25 % der vom Wasser erreichbaren Poren mit Wasser gefüllt und die kanalförmigen Hohlräume sind nahezu wasserfrei) sollte der in Abb. 18, oben dargestellte Fall gelten, wonach gut belüftete Makrohohlräume stets die kathodischeren Bereiche darstellen. Bei Bauteilen in stets feuchter Luft (~ 100 % relative Feuchte) trifft eher der in Abb. 18, unten dargestellte Fall zu.

Feuerverzinkte Stähle

In den Abb. 19 bis 21 ist das besondere Korrosionsverhalten der feuerverzinkten Stähle dargestellt. Abb. 19 zeigt den Normalfall, wonach bei den Prüfverhältnissen zwar Zink-, jedoch keine Stahlkorrosion auftrat.

Abb. 20 verdeutlicht, daß auch bei verzinkten Stählen in haufwerksporigem Beton ein ungleichmäßiger Angriff wegen Elementbildung erfolgt. Der Zementstein zwischen den Zuschlägen stellt bei Chloridangriff die Anode dar (Rostring nach Zinkabtrag) und die kanalförmigen Hohlräume die Kathode (vergl. Abb. 18).

Abb. 21 zeigt die Korrosion eines verzinkten Stahles in chloridhaltigem Gasbeton. Rostbildung bei feuerverzinktem Stahl in Gasbeton trat i.a. ab einem mittleren Zinkabtrag von etwa 50 μm auf, wenn etwa $\frac{1}{3}$ der Auflage abgetragen ist. Die Rostbildung erfolgte zunächst punktförmig und bei stärkerem Zinkabtrag auch flächig. In anderen Betonsorten (z.B. Schaumbeton) erfolgte trotz z.T. vergleichbarem Zinkabtrag noch keine Stahlkorrosion.

Die Abb. 22 bis 26 beschreiben das Zinkkorrosionsverhalten. Wie schon anderweitig /22/ festgestellt wurde, erfolgt in alkalischem

Beton eine geringfügige Flächenkorrosion (Abb. 22) und in chloridhaltigem Beton ein ungleichmäßiger Zinkabtrag (Abb. 24). Im vorliegenden Fall wurde nachgewiesen, daß durch eine Erhöhung des pH-Wertes vom Betonporenelektrolyten (Beton mit KOH-Zugabe) die Flächenkorrosion des Zinks verstärkt wird (Abb. 23).

Unabhängig von der Art der Auslagerung wurden bei feuerverzinkter Bewehrung in Gasbeton die in Abb. 25 dargestellten Erscheinungen beobachtet. Die Zinkauflage weist eine Vielzahl von Rissen auf, die durch die Wasserstoffentwicklung bei der Betonherstellung bedingt sind (Abschn. 3.2, Gasbeton). Bekanntlich wird bei Zinküberzügen durch eine Wasserstoffbeladung in wässrigen Medien Rißbildung im Zinküberzug oder Blasenbildung hervorgerufen /23/. Dabei diffundiert atomarer Wasserstoff in das Zink ein und führt bevorzugt im Bereich der Eisen-Zink-Legierungsphase zu Werkstofftrennungen nach Reduktion zu molekularem Wasserstoff. Bei der Herstellung von Gasbeton kann die wasserstoffinduzierte Rißbildung im Zinküberzug (Abb. 25) während des Betonierens, aber auch bei der anschließenden Autoklavenbehandlung stattfinden. Während der Autoklavenbehandlung bei 180°C kann sich nämlich das in der Zinkauflage vorhandenen Wasserstoffgas ausdehnen und zusätzliche innere Drücke aufbauen. Es wurde festgestellt, daß durch die zahlreichen Trennungen innerhalb der Zinkauflage die Zinkkorrosion erheblich gefördert wurde (Abb. 26).

5.4.3 Intensität der Bewehrungsstahlkorrosion

5.4.3.1 Unverzinkte Stähle

Nach 1 und 2,5 Jahren wurden Stahlproben aus den Betonkörpern ausgebaut und nach Reinigung (Beizen in inhibierter, verdünnter Salzsäure) hinsichtlich Art und Umfang einer Korrosion beurteilt. Es wurden Korrosionsgrade 0 bis 5 definiert, bei welchen die Narbentiefe (Mittelwert der 3 tiefsten Narben auf ca 0,9 m Probenlänge), der mittlere Stahlabtrag ermittelt über Gewichtsverlustmessungen und die Ausdehnung der korrodierten Oberfläche berücksichtigt wur-

den. Die Narbentiefe wurde mittels eines speziellen Tastgerätes mit angeschlossener Meßuhr ermittelt.

Der Korrosionsgrad wurde in Abhängigkeit von der Betonart, der Betondeckung, den Auslagerungsbedingungen und der Auslagerungsdauer (nur 2 Auslagerungsarten) ermittelt. In den Abb. 27 und 28 sind die Definitionen für den Korrosionsgrad angegeben und die Versuchsergebnisse in tabellarischer Form dargestellt. Durch eine besondere Kennzeichnung wird verdeutlicht, ob die Bewehrung in der jeweiligen Tiefe (Betondeckung) in karbonatisiertem Beton liegt oder nicht. Desweiteren wird für die Untersuchungen in chloridhaltigem Beton die Größenordnung des Chloridgehaltes im stahlnahen Bereich bezeichnet. In den Abb. 29 a bis 29 e sind die Versuchsergebnisse nach 2,5 Jahren in graphischer Form ersichtlich. Man erkennt folgende Zusammenhänge:

Betonart

Der Einfluß der Betonart auf die Stahlkorrosion ist für alle Behandlungszustände vergleichbar. Mittelt man z.B. die Korrosionsgrade für die Ergebnisse nach 2,5 Jahren für die Betondeckungen 1,5-2,5-5,0 cm und schließt den Extremfall Chloridbehandlung 2 aus, dann verhalten sich die Korrosionsintensitäten etwa wie folgt

$$\text{NB} : \text{SB} : \text{KLB} : \text{HpB} : \text{GB} = 1 : 2 : 3 : 8 : 13$$

Demnach verhalten sich die ungeschützten Stähle in haufwerksporigem Beton und insbesondere in Gasbeton besonders ungünstig (Abb. 39 c und 29 d). Dies ist mit der hohen offenen Porosität dieser Betone zu erklären. Es ist auch ein Hinweis darauf, daß insbesondere in diesen Betonen, unabhängig von der Betondeckung (s.u.), alle Stähle zusätzlich vor Korrosion geschützt werden müssen, falls die Bauteile der Bewitterung und einer Chloridbeanspruchung ausgesetzt sind.

In einem Normalbeton wäre ein zusätzlicher Korrosionsschutz prinzipiell nicht notwendig (Abb. 29 a), insbesondere wenn die Betone höherwertiger sind als im vorliegendem Fall ($\geq B 35$).

Bei Konstruktionsleichtbeton LB 25 wurde für alle wesentlichen Behandlungszustände, also z.B. Karbonatisierung des Betons der 1. Bewehrungslage und Chloridbeaufschlagung, eine stärkere Korrosion festgestellt als bei dem Normalbeton B 25 vergleichbarer Güte (Betonfestigkeit) (Abb. 29 b). Deshalb empfiehlt sich bei konstruktivem Leichtbeton ein zusätzlicher Korrosionsschutz, wenn bei Bauteilen im Freien geringe Betondeckungen um 1,5 cm nicht auszuschließen sind. Falls ein Chloridangriff stattfindet, sollte auch der Stahl in 2,5 cm Tiefe geschützt werden (vergl. Abb. 11). Die vergleichsweise starke Chloridkorrosion im Konstruktionsleichtbeton im Vergleich zum Normalbeton dürfte auf die inhomogenere Struktur des Leichtbetons und Mikro-Korrosionselemente zurückzuführen sein.

In Schaumbeton verhält sich ein ungeschützter Stahl ähnlich wie in einem Normalbeton niedriger Güte bei geringerer Betondeckung (Abb. 29 e). Dies ist mit den Porositätsverhältnissen beider Betone zu erklären (vergl. Abschn. 5.1). Es empfiehlt sich bei ungeschützten Bauteilen im Freien ohne und mit Chloridbeanspruchung, die Bewehrung in Schaumbeton stets bis in 2,5 cm Tiefe zu schützen.

Betondeckung

Bei dem Normal-, Konstruktionsleicht- und Schaumbeton nimmt die Korrosion erwartungsgemäß mit zunehmender Betondeckung ab. Dies ist vor allem auf den Einfluß der Karbonatisierung und Chlorideindringung zurückzuführen: Nur in jenen oberflächennahen Bereichen, die karbonatisiert sind und/oder ausreichend hohe Chloridgehalte aufweisen, findet ein Korrosionsangriff statt.

Bei haufwerksporigem Beton und Gasbeton ist die Korrosion nur gering bzw. gar nicht von der Betondeckung abhängig. Beide Betone sind struktur- bzw. herstellungsbedingt, zumindest örtlich, auch in größeren Betontiefen karbonatisiert (Abschn. 5.2). Sie enthalten bei Bewitterung in allen Querschnittsbereichen in ausreichendem Maße Wasser und die Sauerstoffdiffusion ist nicht behindert.

Auslagerungsbedingungen

Im Freien unter Dach:

Hier tritt trotz Begünstigung der Karbonatisierung i.a. keine starke Korrosion ein, da der Wassergehalt auf Dauer zu gering ist. Korrosion ist nur bei porösen Betonen zu erwarten, die herstellungsbedingt größere Mengen freien Restwassers enthalten. Es ist jedoch davon auszugehen, daß die Korrosionsgeschwindigkeit hier (nach Austrocknung) stark rückläufig ist. Genauere Aussagen sind nur aufgrund der Ergebnisse von Langzeitauslagerungen möglich. Auf einem zusätzlichen Korrosionsschutz kann bei Ausschluß von Wasser u.U. verzichtet werden. Dies gilt natürlich erst recht für Bauteile in Innenräumen.

Im Freien ungeschützt:

Hier ist grundsätzlich stärkere Korrosion als zuvor zu erwarten, falls die Stähle im karbonatisierten Bereich liegen. Bei Normal-, Konstruktionsleicht- und Schaumbeton ist die Karbonatisierung der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Der haufwerksporige und Gasbeton ist von Anfang an strukturabhängig karbonatisiert und der mittlere Wassergehalt bestimmt die Korrosion. Dieser ist bei Gasbeton aufgrund der Porosität und des Verhaltens bei der Wasseraufnahme und -abgabe höher als bei haufwerksporigem Beton (Abschn. 5.1).

100 % relative Feuchte:

In Normal-, Konstruktions- und Schaumbeton sind in Luft von 100 % relativer Feuchte alle offenen Poren mit Wasser gefüllt (Tabelle 4). Deshalb findet in diesen Betonen auf Dauer keine Sauerstoffdiffusion und somit keine Korrosion statt. Dies gilt auch dann, wenn - z.B. nach vorheriger Karbonatisierung - theoretisch aktive Korrosion möglich wäre. Bei dem haufwerksporigen und Gasbeton sind bei 100 % relativer Feuchte die (groberen) Poren nicht vollständig mit Wasser gefüllt. Es kann deshalb zusätzlich Sauerstoffdiffusion stattfinden. Da die Betone mehr oder weniger nicht alkalisch reagieren, ist die Korrosion hier stärker ausgeprägt als bei ungeschützter Lagerung im Freien und im Mittel trockeneren Betonen.

Chloridhaltiger Beton:

Der Korrosionsgrad der im Freien ungeschützt gelagerten Stahlbetonbauteile wird in dem Maße erhöht, wie Chloride zusätzlich an den Stahl gelangen. Bei den chloridbehandelten Proben ist lediglich zu beachten, daß der Normal- und Konstruktionsleichtbeton nicht zusätzlich künstlich karbonatisiert wurde.

In chloridhaltigem Beton im Freien (Chloridbehandlung 1) liegt die Korrosion bei Gasbeton und haufwerksporigem Beton in derselben Größenordnung wie bei chloridfreier Lagerung bei 100 % relativer Feuchte.

Auslagerungsdauer

Gegenüber einer Auslagerungszeit von 1 Jahr wurde nach 2,5 Jahren eine Zunahme der Korrosionsintensität festgestellt (Abb. 30). Im Mittel aller Versuche verhält sich die Korrosion bei den Leichtbetonsorten wie folgt:

1 Jahr : 2,5 Jahr ~ 1 : 2

Dies entspricht praktisch einer linearen Korrosionsrate und unterstreicht die Notwendigkeit einer Fortführung der Auslagerungsversuche zwecks Abschätzung des Langzeitkorrosionsverhaltens.

Unterscheidet man nach einzelnen Betonsorten, dann ergeben sich folgende Verhältniszahlen von 1 Jahr : 2,5 Jahren :

(NB - 0)
 KLB - 0,31
 SB - 0,40
 HpB - 0,61
 GB - 0,74

Dies bedeutet, daß bei den poröseren Betonen, HpB und GB, mit bereits anfänglich niedrigem pH-Wert und geringem Diffusionswiderstand für Chloride, Wasser- und Sauerstofftransport, bereits früh-

zeitig ein bedeutsamer Angriff stattfindet. Bei den dichterem Betonen ist zunächst eine Aktivierung der Stahloberfläche erforderlich, wodurch der Beginn der Stahlkorrosion verzögert wird.

5.4.3.2 Feuerverzinkte Stähle

Nach 1 und 2,5 Jahren wurden auch die feuerverzinkten Stähle entnommen und nach mechanischer Entfernung anhaftender Betonreste und von Zinkkorrosionsprodukten (Abbürsten und Bearbeiten mit Glasfaserpinsel) im Hinblick auf einen Zinkabtrag ausgewertet. Der Zinkabtrag wurde über Gewichtsverlustmessungen festgestellt und durch metallographische Untersuchungen kontrolliert. Auch der mittlere Zinkabtrag von ca. 15 cm langen Abschnitten wurde nach Korrosionsgraden von 1 bis 5 beurteilt.

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgte vergleichbar jener bei den unverzinkten Stählen (Abb. 31 bis 33). Es wurde der Korrosionsgrad in Abhängigkeit von der Betonart, der Betondeckung, den Auslagerungsbedingungen und der Auslagerungsdauer ermittelt. Bei den verzinkten Stäben wurde zusätzlich noch die Alkalität des Betons (normal mit pH 13,0 - 13,3 und erhöht mit pH 13,6) variiert. In den Abbildungen sind wiederum die Definitionen für den Korrosionsgrad (Zinkabtrag) angegeben und die Versuchsergebnisse in tabellarischer Form dargestellt. Der Zinkabtrag Nr. 1 mit $< 10 \mu\text{m}$ ist eine normale, in jedem alkalischen Beton bis zur Deckschichtbildung stattfindende Zinkkorrosion. Selbst ein Zinkabtrag Nr. 2 ist nicht ungewöhnlich und wird z.B. in schwach chloridhaltigem oder karbonatisiertem Normalbeton festgestellt. Ein Zinkabtrag Nr. 3 war bereits deutlich erhöht und zeigt an, daß die Schutzwirkung der Verzinkung nur temporär ist. Bei einem Abtrag ≥ 4 kann nur von einer zeitlich sehr begrenzten Schutzdauer ausgegangen werden und diese Schutzvariante wäre, für den entsprechenden Anwendungsfall, nicht zu empfehlen.

In den Abb. 34 und 35 sind die Versuchsergebnisse nach 2,5 Jahren in graphischer Form ersichtlich. Bei feuerverzinkten Stählen wurde in keinem Fall innerhalb der Versuchszeit ein vollständiger Zink-

abtrag festgestellt. Gegenüber unverzinkten Stählen ist durch die Verzinkung also ein Korrosionsschutz gegeben, welcher in Einzelfällen jedoch einzuschränken ist (vergl. z.B. Abb. 28 und 32):

Bei Bauteilen im Freien (geschützt oder ungeschützt) und in dauerfeuchter Umgebung kann, mit Ausnahme des Sonderfalls Gasbeton (s.u.), bei allen anderen gefügedichten oder nichtgefügedichten Betonen von einer dauerhaften Schutzwirkung ausgegangen werden (Abb. 34). Hier empfiehlt sich somit eine Feuerverzinkung als zusätzlicher Korrosionsschutz. Die deutlichsten Verbesserungen sind beim haufwerksporigen Beton zu sehen, in welchem unverzinkter Stahl insbesondere in feuchterer Umgebung sehr unbeständig ist.

Die bekannte Tatsache /24/, daß feuerverzinkte Bewehrung in hochchloridhaltigem Beton nur zeitlich begrenzt schützt, wurde auch in Leichtbeton, insbesondere in den nichtgefügedichten Sorten festgestellt (Abb. 34). Erhöhte Chloridgehalte in der Stahlumgebung nahmen wie erwartet bei fallender Betondeckung und steigender Chloridbeanspruchung zu. Die 2,5jährigen Auslagerungen erlauben jedoch noch keine abschließende Wertung. Hier sollten die Ergebnisse der fortgesetzten Auslagerung abgewartet werden. ¹⁾

In Gasbeton wurde stets, weitgehend unabhängig von den Auslagerungsbedingungen und der Betondeckung, eine starke Zinkkorrosion festgestellt (Abb. 35). Besonders ausgeprägt war der Zinkabtrag allerdings in chloridhaltigem Beton. Dieses ungewöhnliche Verhalten ist herstellungsbedingt und auf die in Abschn. 5.4.2 beschriebene Wasserstoffschädigung der Zinkauflage zurückzuführen. Für eine Anwendung in autoklavenbehandeltem Gasbeton ist eine Feuerverzinkung deshalb nicht zu empfehlen.

¹⁾ Solche weitergeführten Untersuchungen werden aus anderweitigen Mitteln finanziert.

Auch für den gefügedichten und nichtgefügedichten Leichtbeton konnte die für Normalbeton /25/ bekannte Tatsache bestätigt werden, daß durch eine hohe Alkalität des Zementsteins (z.B. als Folge der Verwendung besonders alkalischer Zemente) die Zinkkorrosion beschleunigt wird (vergl. Abb. 32 und 33). Legt man den Zinkabtrag in μm zugrunde, dann wird dieser durch den pH-Anstieg des Zementsteins von 13,0 - 13,3 auf 13,6 etwa verdoppelt.

Mit der Dauer der Auslagerung nahm die Zinkkorrosion in folgenden Fällen zu

- bei Gasbeton unabhängig von der Art der Auslagerung und der Betondeckung,

bei allen Betonen mit Chloridzugabe und niedrigen chloridan-gereicherten) Betondeckungen.

Ansonsten wurde keine Zunahme der Zinkkorrosion ermittelt, was darauf hindeutet, daß Zink in abgegrenztem Umfang nur zu Beginn stattfindet, solange sich schützende Deckschichten noch nicht ausgebildet haben.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden mit unverzinkten und feuerverzinkten Betonstählen bewehrte Normal- und Leichtbetonkörper (gefügedicht und nichtgefügedicht) mit Betondeckung von 1,5-2,5-5,0 und 8,0 cm unter folgenden Bedingungen ausgelagert:

Im Freien unter Dach,
im Freien,
in einem Klimaraum mit 100 % relativer Feuchte,
im Freien mit Chloridbeaufschlagung.

Nach 1 und 2,5 Jahren wurden die Stähle hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens untersucht. Zusätzlich wurden auch die notwendi-

gen physikalischen und chemischen Betonparameter wie z.B. Porosität, Wasserhaushalt, Karbonatisierung und Chlorideindringung zwecks Erklärung bzw. Bewertung der Korrosion ermittelt.

Die Versuchsergebnisse brachten in bezug auf Wasseraufnahmefähigkeit, Karbonatisierungstiefe, Stahlkorrosionshäufigkeit und -intensität für Leichtbeton ungünstigere Ergebnisse als für Normalbeton. Dies gilt besonders für nichtgefügedichte Leichtbetone (haufwerksporiger Beton und Porenbeton), trifft aber auch (in geringerem Maße) für gefügedichten Konstruktionsleichtbeton zu.

Es wurde festgestellt, daß nichtgefügedichte Leichtbetone aufgrund ihrer großen Gesamtporosität ein hohes Aufnahmevermögen für gasförmige und in Wasser gelöste Stoffe besitzen, aber die porositätsabhängigen Chloridgehalte nahe der Betonoberfläche durch Niederschläge ausgewaschen werden können.

Die Schädigung durch Stahlkorrosion in Beton nimmt in der Reihenfolge Normalbeton - Konstruktionsleichtbeton - luftgehärteter Porenbeton (Schaumbeton) - haufwerksporiger Beton - dampfgehärteter Porenbeton (Gasbeton) zu. Deshalb ist es notwendig, die Bewehrung in nichtgefügedichtem Leichtbeton in besonderer Weise vor Korrosion zu schützen. Im Fall von Konstruktionsleichtbeton wurde erkannt, daß, ähnlich den Verhältnissen in Normalbeton vergleichbarer Güte für den normalen Anwendungsfall, ein ausreichender Korrosionsschutz gegeben ist. Falls ein Chloridangriff stattfindet, sollte jedoch der Stahl geschützt werden.

Solange kein Chloridangriff stattfindet, ist durch eine Feuerverzinkung ein dauerhafter Korrosionsschutz gegeben. Dies trifft, mit Ausnahme des Gasbetons, für alle gefügedichten oder nichtgefügedichten Betone zu. Die deutlichsten Verbesserungen waren beim haufwerksporigen Beton zu sehen.

In hochchloridhaltigem Beton erwies sich die Feuerverzinkung als eine nur zeitliche begrenzte Korrosionsschutzmaßnahme. Besonders ausgeprägt war der Zinkabtrag allerdings in nichtgefügedichten

Leichtbetonen. Dieses Verhalten ist auf den gleichzeitigen Einfluß von der abgeminderten Alkalität und dem geringen Diffusionswiderstand für Chloride bei diesen Sorten zurückzuführen.

In Gasbeton wurde unabhängig von den Auslagerungsbedingungen und der Betondeckung eine starke Zinkkorrosion festgestellt. Die Zinkauflage weist eine Vielzahl von Rissen auf, die durch die Wasserstoffentwicklung bei der Betonherstellung (Autoklavenbehandlung) bedingt sind.

In alkalireichem Beton (charakteristisch für eine Verwednung besonders alkalischer Zemente) wurde die Zinkkorrosion in den gefügedichten und nicht gefügedichten Leichtbetonen merklich beschleunigt.

Stuttgart, im Juni 1992

(Dr. Ing. habil. U. Nürnberger

hn

Ma id th h
be p b ä t
99

U ü nb g N b G
th vb xp V g hn
99

W th hä Ga th mbe
th d h th th A
thuß ü ah be //

/ W th ü g
/

thob id h g b
b th G
p th p
/

M id th b
geb A gup
g hn //

th ü d
h be t ah En l
C po emb W:

EM omm é
C M é
/

th id g id ö d
th d h be th g th h
d nh //

- /10/ F. Clementi: Zur Frage des Korrosionsschutzes der Bewehrung in Gasbeton. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar 18 (1971), 234/35
- /11/ E. Pilz: Korrosionsschutzsysteme auf der Grundlage wäßriger Dispersionen unter Berücksichtigung von PR II. SR BSt 34 (1975), 27/36
- /12/ E. Pilz: Bestimmung der Schutzeffektivität von Korrosionsschutzsystemen des Stahls in Gasbeton. SR BSt 34 (1975), 69/70
- S.N. Aleksiejew: Ochrona zbrojenia przed korozja w konstrukcjach z betonu komorkowego. Inzynieria; Budownictwo (1967), Warszawa, 461/463
- W. Gad: Korrosionsschutz der Bewehrung bei Konstruktionen aus Zellenbeton. Das Baugewerbe 10 (1976), 30/32
- R. Hutschenreuther: Einige physiko-chemische Probleme des bituminösen Korrosionsschutzes im Silikatbeton. Wissenschaftliche Zeitschrift für Architektur und Bauwesen, Weimar 18 (1971), 236/41
- /16/ E. Dehler: Comportement de l'armature d'acier du beton recouverte de zinc. RILEM-Symposium "Durabilite des Betons", Prag, 1969 Tagungsbericht Bd. IV S. 153, 161
- /17/ H. Arup: Galvanized Steel in Concrete; Materials Performance 04 (1979), 41/44
- /18/ K.W.J. Treadaway, B.L. Brown, and R.N. Cox; Durability of Galvanized Steel in Concrete, S. 102-130; in: Corrosion of Reinforcing Steel in Concrete, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1980

- /19/ D.F. Griffin: Errosion of Mild Steel in Concrete, U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Technical Report R-306 Supplemment, Aug. 1965
- /20/ W. Feitknecht: Métaux et Corrosion 23, (1947 192
- /21/ R.C. Weast: Handbook of Chemistry and physics. The Chemical Rubber Co., Gelveland/Ohio, 1970/71 (51 st. ed.)
- /22/ G. Rehm, U. Nürnberger, B. Neubert: Chloridkorrosion von Stahl in gerissenem Beton. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton 390 (1988) 43/144
- /23/ Merkblatt 400: Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl. Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1983
- /24/ U. Nürnberger, W.Beul: Einfluß einer Feuerverzinkung und PVC-Beschichtung von Bewehrungsstählen und von Inhibitoren auf die Korrosion von Stahl in gerissenem Beton; Werkstoffe und Korrosion 42, 537/546 (1991)
- /25/ A. Macias, C.Andrade: Corrosion rate of galvanized steel immersed in saturated solutions of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the pH range 12 - 13,8. Br. Corros. J. 18 (1983) 82/87

Tabelle 1: Übersicht der gebräuchlichsten Leichtbetone

Bezeichnung	Funktion	Anwendung	Bewehrung	Gefüge	Zuschlagart (DIN 4226)	Rohdichte kg/dm ³	Festigkeits- klasse	Wärmeleitzahl W/m·K
Konstruktions- leichtbeton DIN 4219	konstruktiv, wärmedämmend	Betonhochbau, Sichtbeton	unbewehrt, bewehrt	geschlossen	Naturbims, Lava Blähton	0,8 - 1,3	LB8 - LB15	0,3 - 0,6
	.	.	.	mit meist	.	.	.	.
	.	.	.	porigen	.	.	.	.
	.	.	.	Zuschlägen	.	.	.	.

	vorwiegend konstruktiv	Ingenieurbau, Spannbeton	bewehrt		Blähton, -schiefer, Sinterbims, Hüttenbims	1,3 - 1,8 (2,0)	LB15 - LB45 (- LB55)	0,6 - 1,0 (1,2)
Haufwerks- poriger Beton	wärmedämmend, in geringem Umfang sta- tisch tragend	Wände, Stahl- betonhohldie- len, Hohl- blocksteine (Vollsteine)	Bewehrung möglich	offen mit meist porigen Zuschlägen	wie bei Konstruk- tionsleichtbeton	¹⁾ 0,6 - 1,2	LB2 - LB10 (- LB15)	0,2 - 0,5
Gasbeton, Schaumbeton (Porenbeton) DIN 4164	wärmedämmend, in geringem Umfang sta- tisch tragend	Blocksteine, Bauplatten, Wände, Sohlen	unbewehrt bewehrt	porig	Quarzsand Blähton (z. T. Zusatzstoffe) GB: Blähmittel SB: Schaumbilder	GB: (SB) ²⁾ 0,4 - 0,85 SB: ³⁾ 0,4 - 1,6	G2 - G6 (1-15 N/mm ²)	0,1 - 0,25

¹⁾ bei Verwendung dichter Zuschläge bis 2,0²⁾ dampfgehärtet³⁾ luftgehärtet

Normalbeton DIN 1045	konstruktiv	Betonbau Stahlbetonbau Spannbetonbau	unbewehrt	geschlossen	Kies, Sand (Sandstein, Quar- zit, Kalkstein, Granit)	2,1 - 2,4	B5 - B55	0,7
			.	mit dichten			.	(Kalkstein)
			.	Zuschlägen			.	-
			.				.	6,6
			bewehrt				B15 - B55	(Quarz)

Tabelle 2: Zusammensetzung und wichtige Eigenschaften der verwendeten Betonarten

Beton	Festigkeits- klasse	Zement		w/z	Zuschläge		Zusmischungen		Flachbeton				Festbeton	
		Type	Menge kg/m ³		Korngruppe bzw. Art	Gewicht (kg/m ³)	Art	Menge	Verdichtung -maß (t)	Ausbreit- maß (cm)	Rohdichte (t/m ³)	Rohdichte (t/m ³)	Rohdichte (t/m ³)	Druckfestigkeit B28 (N/mm ²)
Normalbeton	B 25	FAZ 35F	270	0,78	0 - 2 0 - 8 0 - 16	655) 578) 1927 694)	-	-	1,02	55	2,30	2,30	2,30	37,0
Konstruktions- -leichtbeton	LB 25	PZ	370	0,50	Lilapor G5 (Blähton)	437)	-	-	1,90	48	1,60	1,40	1,40	30,0
		45 F		0,68	Lilaporsand 0 - 4 Rheinsand 0 - 2	200) 899 262)	KOH	0,05 kg/l						
Haufwerks- porenbeton	LB 8	-	230	0,52	Lilapor 4 (Blähton)	410)	-	-	-	43	1,70	1,10	1,10	9,00
					Lilaporsand 0 - 4 Reinsand 0 - 2	52) 712 250)	KOH	0,05 kg/l						
Gasbeton	GB 3.3	PZ 35 F oder 45 F	130 Zement + 65 Kalk	0,50 bis 0,70	Feingemeh- lener Quarzsand 70% davon <90 µm	400	AL als Treibm- ittel	1 bis 2 g je kg Zement	-	-	-	0,65	0,65	3,40
Schaumbeton	-	PZ 35 F	350	0,47	0 - 2	510	Schaum- bildner	1 l/m ³	-	61	1,10	1,00	1,00	4,00

*) entspricht Gesamtwassergehalt für Zement und Zuschläge

Tabelle 3 : Versuchsprogramm der verwendeten Betone

Betonart	Herstellung	Alkalität	Auslagerung	ausgelegte probe		
				1,0 Jahr	2,5 Jahre	5,0 Jahre
Normalbeton B 25	FMPA	Normal	100 % r.F.	-	*	*
			im Freien.	-	-	*
			unter Dach	-	-	-
			Chlorid 1	*	*	*
			Chlorid 2	-	*	*
		Karbonatis- iert	im Freien	*	*	*
			unter Dach	-	*	*
Konstruktions- leichtbeton LB 25	FMPA	Hoch	im Freien	-	*	*
			Chlorid 1	-	*	*
		Normal	100 % r.F.	-	*	*
			im Freien	-	-	*
			unter Dach	-	-	-
			Chlorid 1	*	*	*
			Chlorid 2	-	*	*
		Karbonati- siert	im Freien	*	*	*
			unter Dach	-	*	*
Haufwerks- poriger Beton LB 5	Fa. Liapor, Tuningen	Hoch	im Freien	-	*	*
			Chlorid 1	-	*	*
		normal	100 % r.F.	-	*	*
			im Freien	*	*	*
			unter Dach	-	*	*
			Chlorid 1	*	*	*
			Chlorid 2	-	*	*
Gasbeton GB 3.3	Fa. Hebel fürstenfeld- bruck	normal (pH - Wert abgeminder)	100 % r.F.	-	*	*
			im Freien	*	*	*
			unter Dach	-	*	*
			Chlorid 1	*	*	*
			Chlorid 2	-	*	*
Schaumbeton	Fa. Heidelberger Zement	normal	100 % r.F.	-	*	*
			im Freien	*	*	*
			unter Dach	-	*	*
			Chlorid 1	*	*	*
			Chlorid 2		*	*

Tabelle 4: Porosität und Wasserhaushalt der verwendeten Betone

Beton	Gesamt- porosität in Vol. %	Wasser- eindring- zahl in $\text{kg/m}^2\text{h}^{1/2}$	Wassergehalt in Vol. %				
			in druck- losem Wasser	in 100 % rel.Feuchte	in 95 % rel.Feuchte	in 80 % rel.Feuchte	in 65 % rel.Feuchte
Normalbeton	15	0,75	13	13	9	5	3,5
Konstruktions- leichtbeton	36	1,55	29	29	12	7	6,5
Haufwerksporiger Beton	52	2,70	39	28	9	5	4,5
Gasbeton	74	6,75	52	45	3	2	1,5
Schaumbeton	58	1,90	31	29	11	6	5,5

Tabelle 5: Reißbereite in chloriedhaltigen Betonen in mm (nach 2 Jahren)

Stahl	unverzinkt						feuerverzinkt		
	Chlorid 1			Chlorid 2			Chlorid 1		Chlorid 2
Chloridzugabe	1,5	2,5		1,5	2,5		1,5	2,5	2,5
Betondeckung(cm)									
Normalbeton				0,20			0,05-0,10		0,15
Konstruktions- leichtbeton	0,05			0,20-0,25			0,15		0,15-0,30 0,05-0,10
Haufwerksporiger Beton	0,25-0,30	0,15-0,20							0,15-0,25 0,05-0,10
Gasbeton							0,35		0,40 0,10
Schaumbeton							0,05		0,20-0,35 0,05-0,10

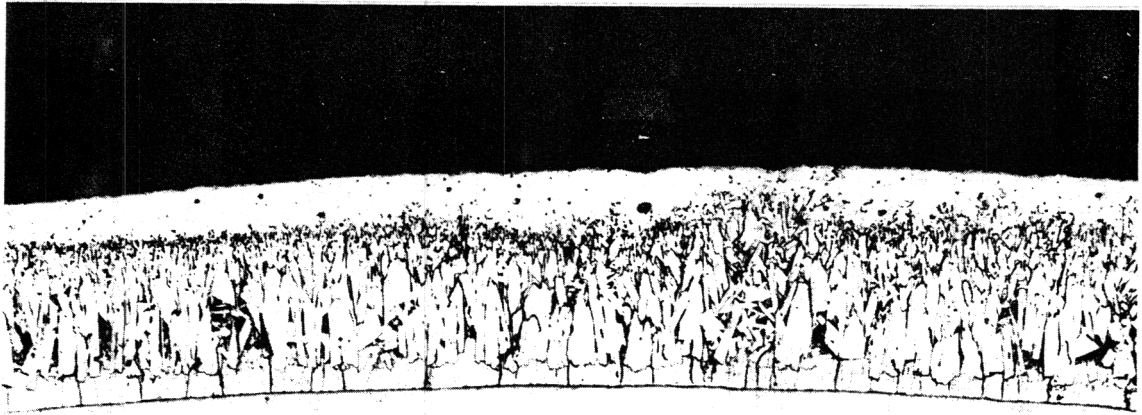
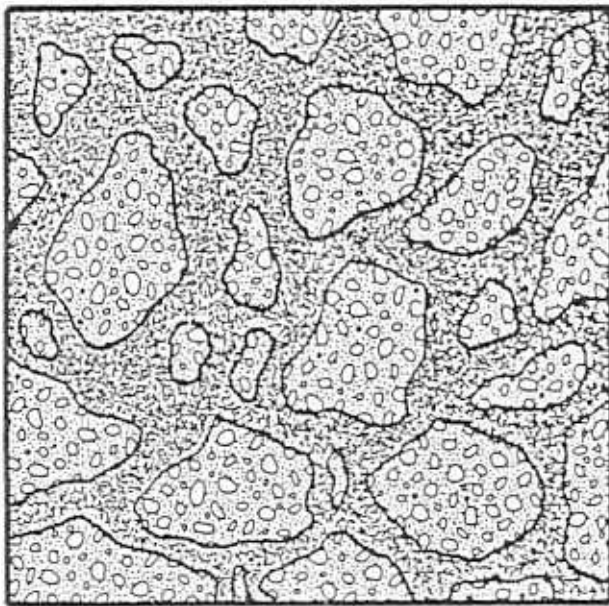
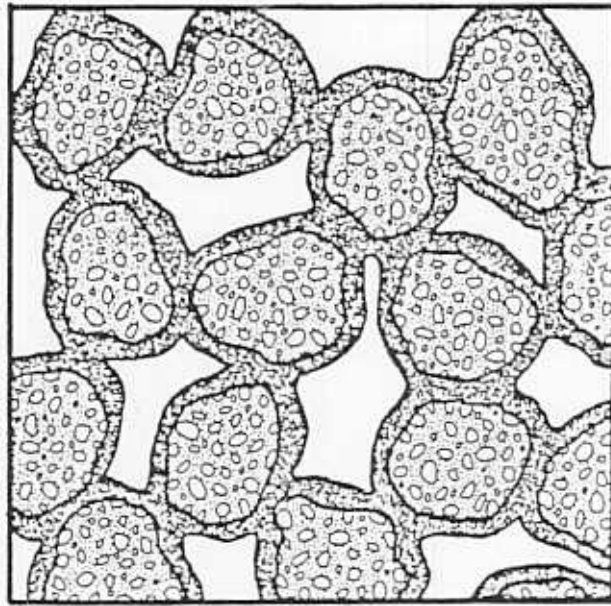


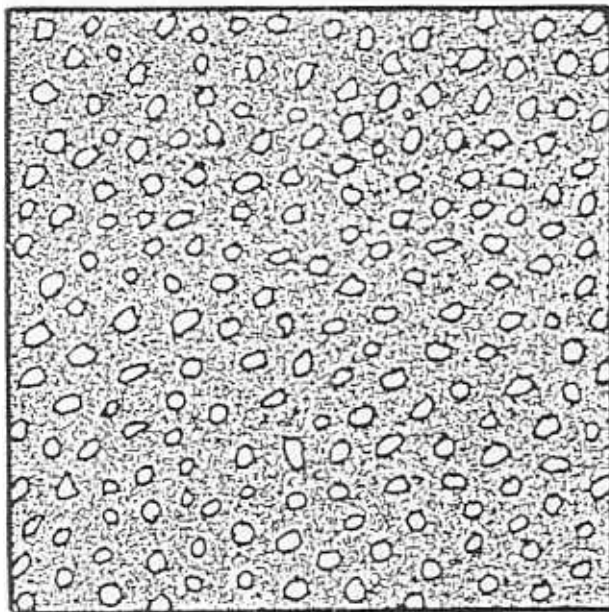
Abb. 1: Aufbau der Zinkschicht (200:1)



a)



b)



c)



- a) gefügedichter Leichtzuschlagstoffbeton
 b) haufwerksporiger Leichtzuschlagstoffbeton
 c) Porenbeton (Gas- oder Schaumbeton)

Abb.2: Einteilung der Leichtbetone nach dem Gefüge

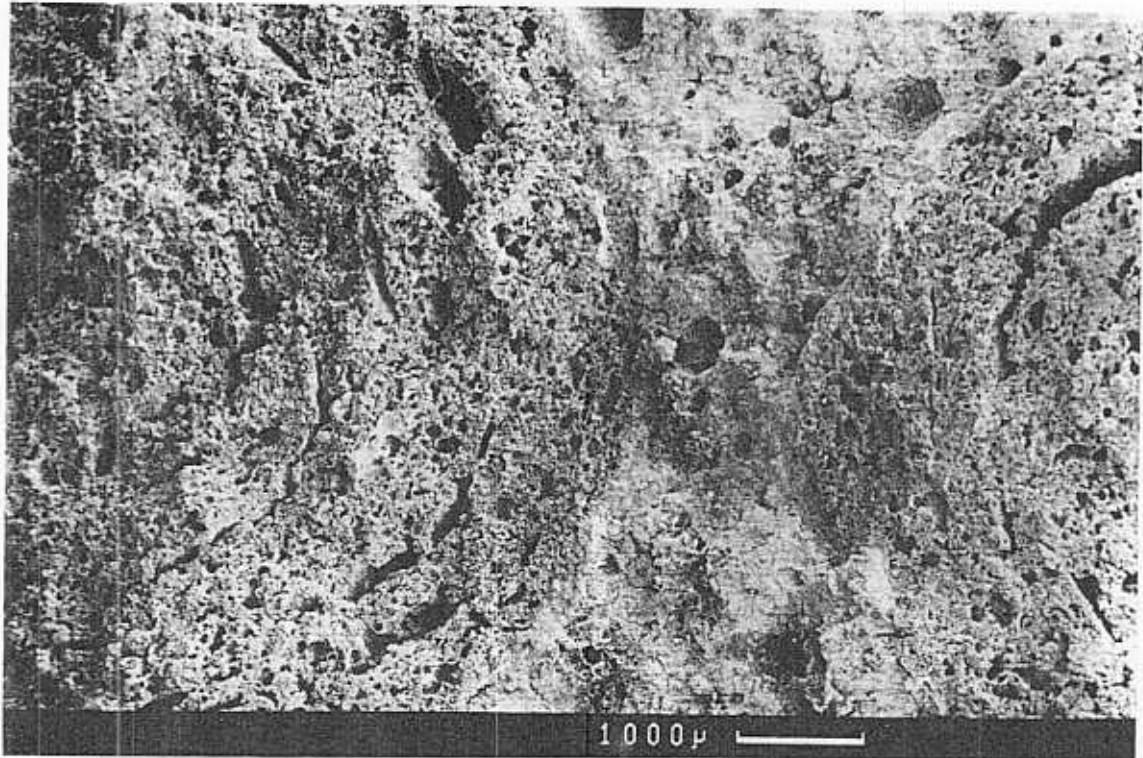


Abb. 3a: Bruchfläche des Konstruktionsleichtbetons

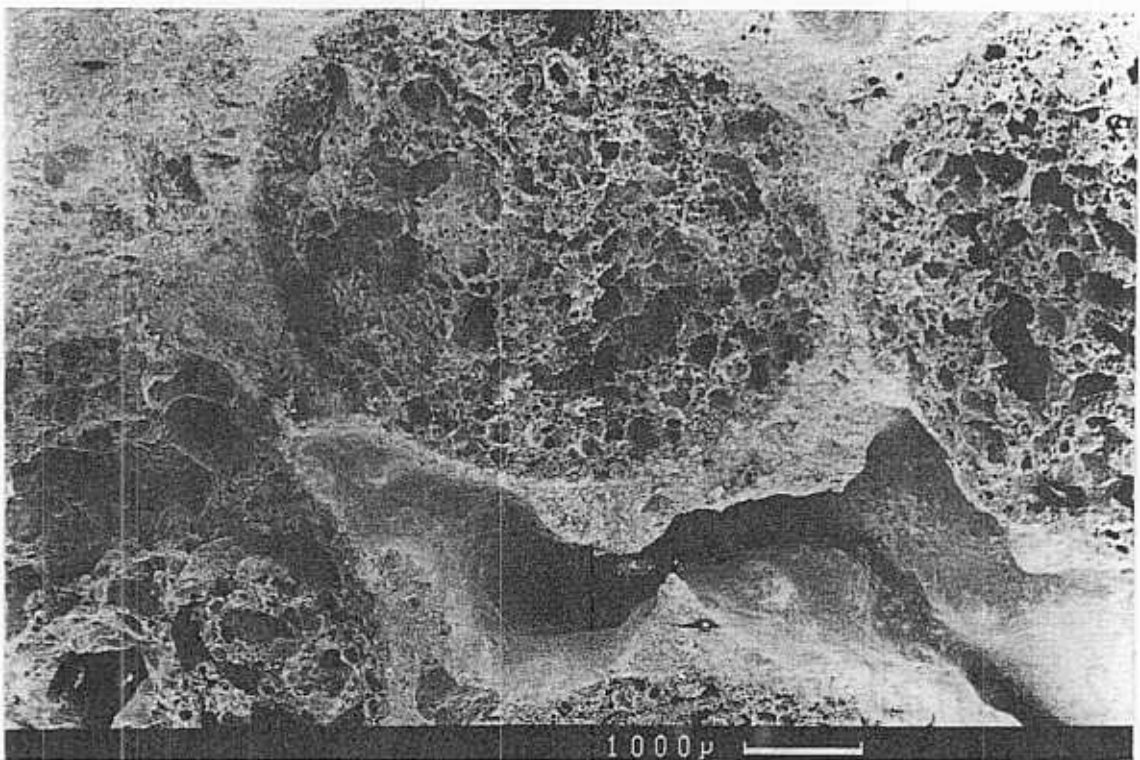


Abb. 3b: Bruchfläche des haufwerksporigen Betons

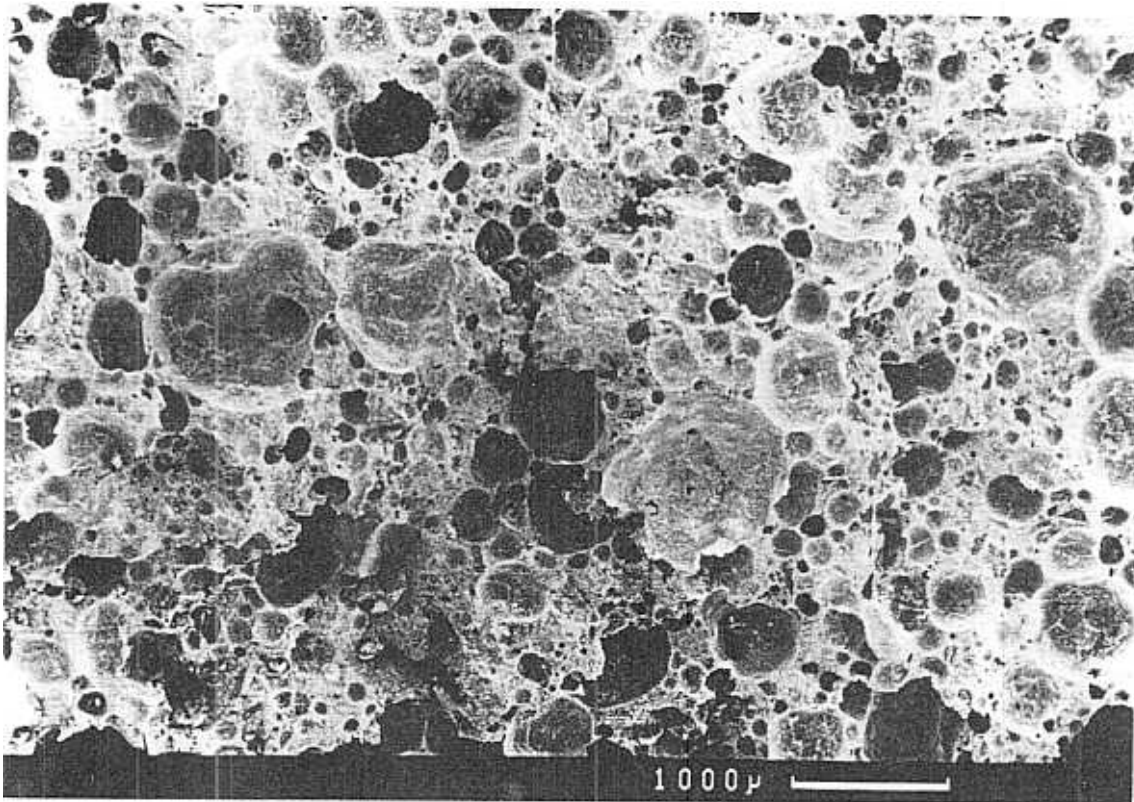


Abb. 3c: Bruchfläche des Gasbetons

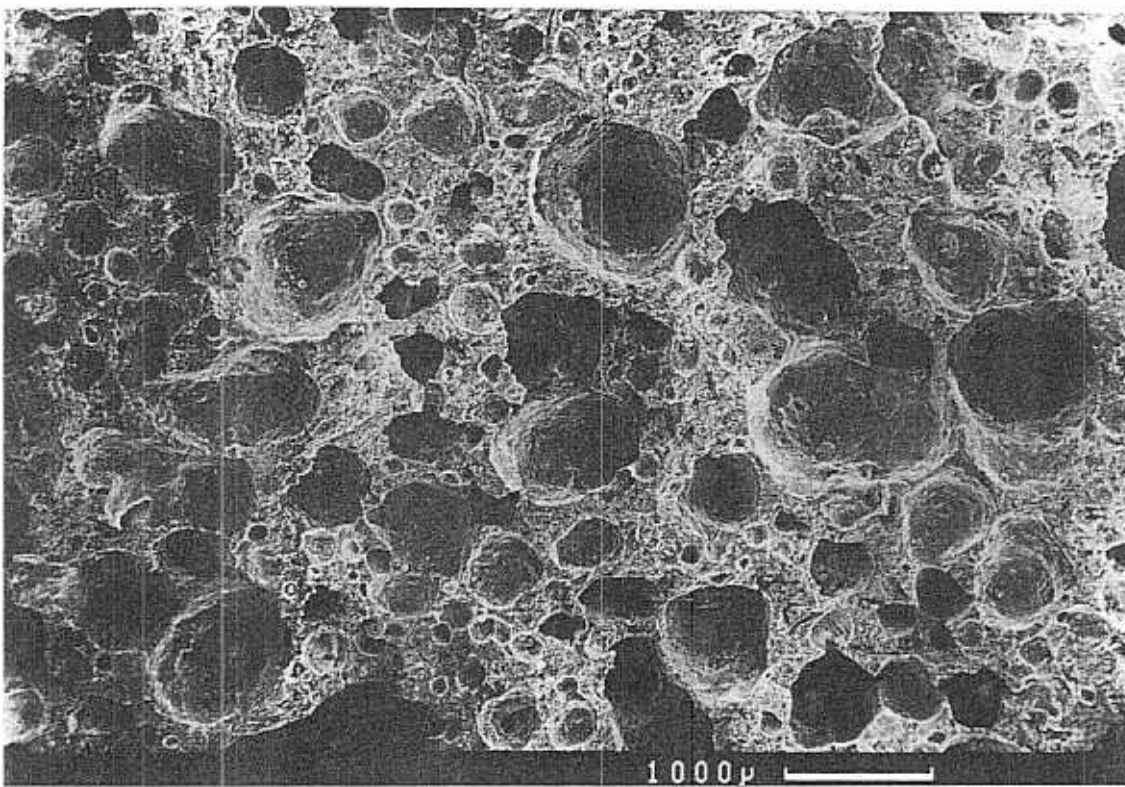


Abb. 3d: Bruchfläche des Schaumbetons

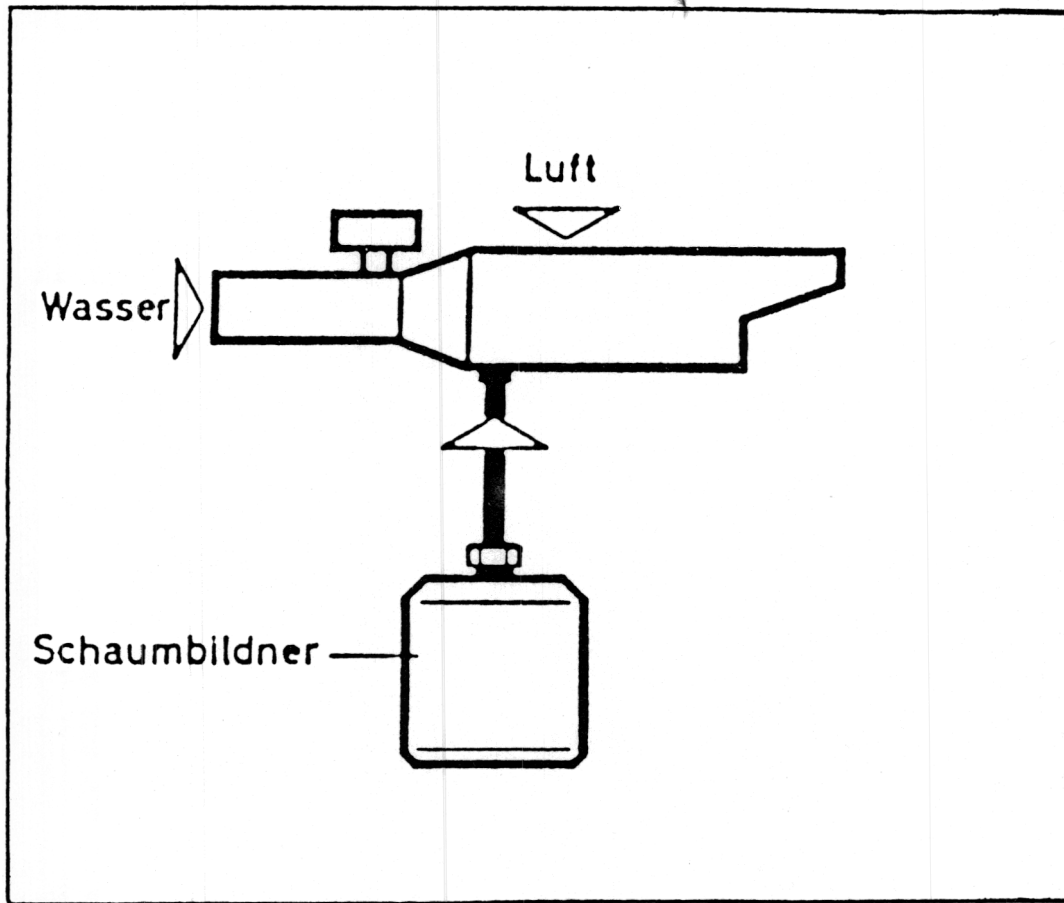


Abb. 4: Schematische Darstellung des Schaumgerätes

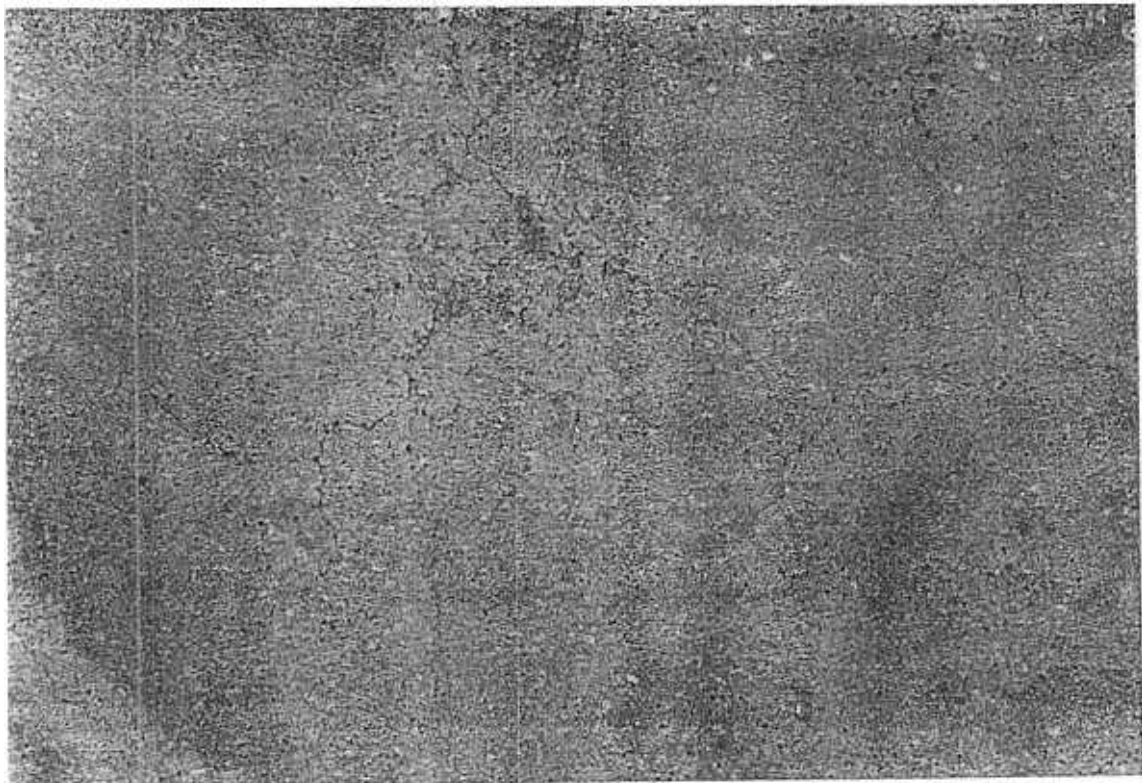


Abb. 5: Oberfläche des luftgehärteten Schaumbetons nach 1 Jahr

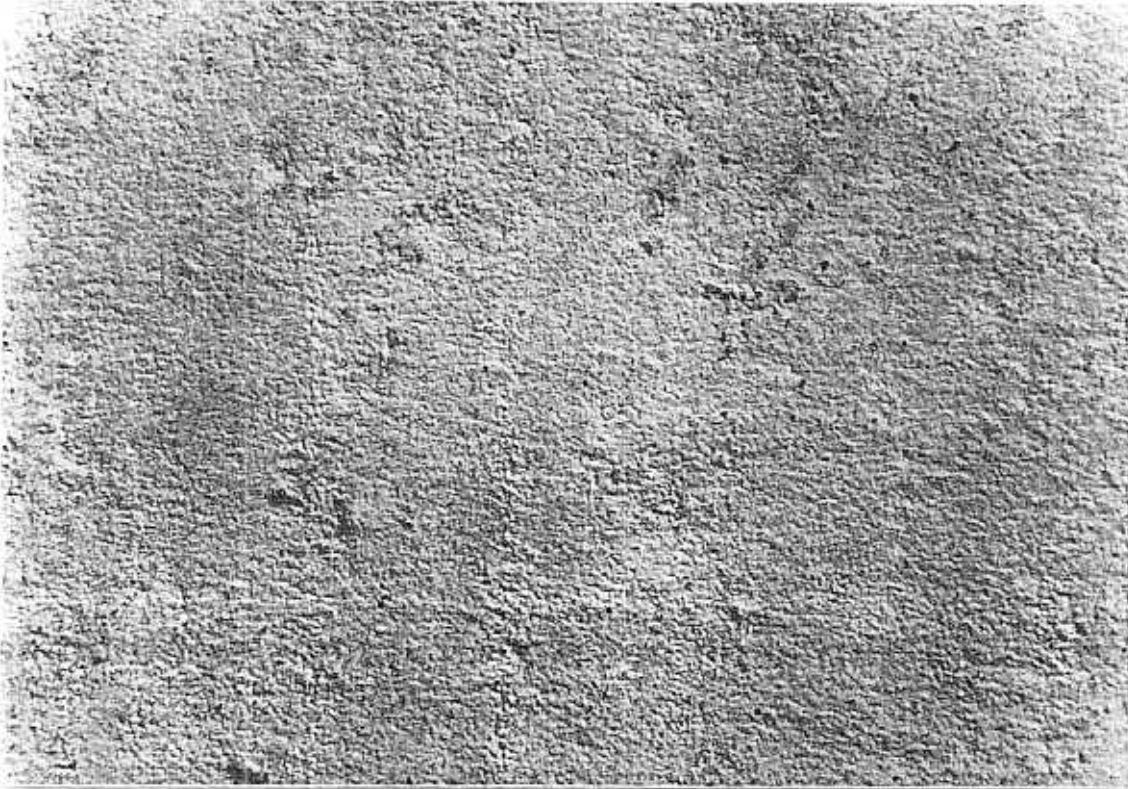


Abb. 6a: Oberfläche des Normalbetons



Abb. 6b: Oberfläche des Konstruktionsleichtbetons

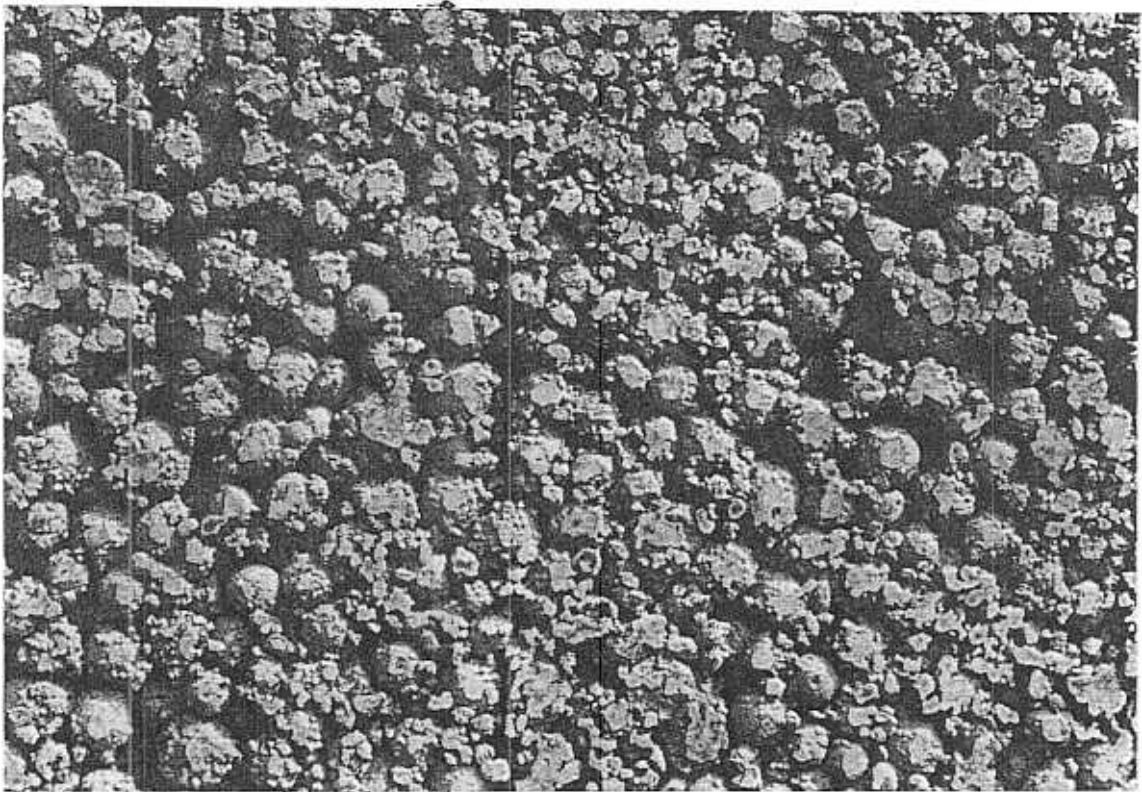
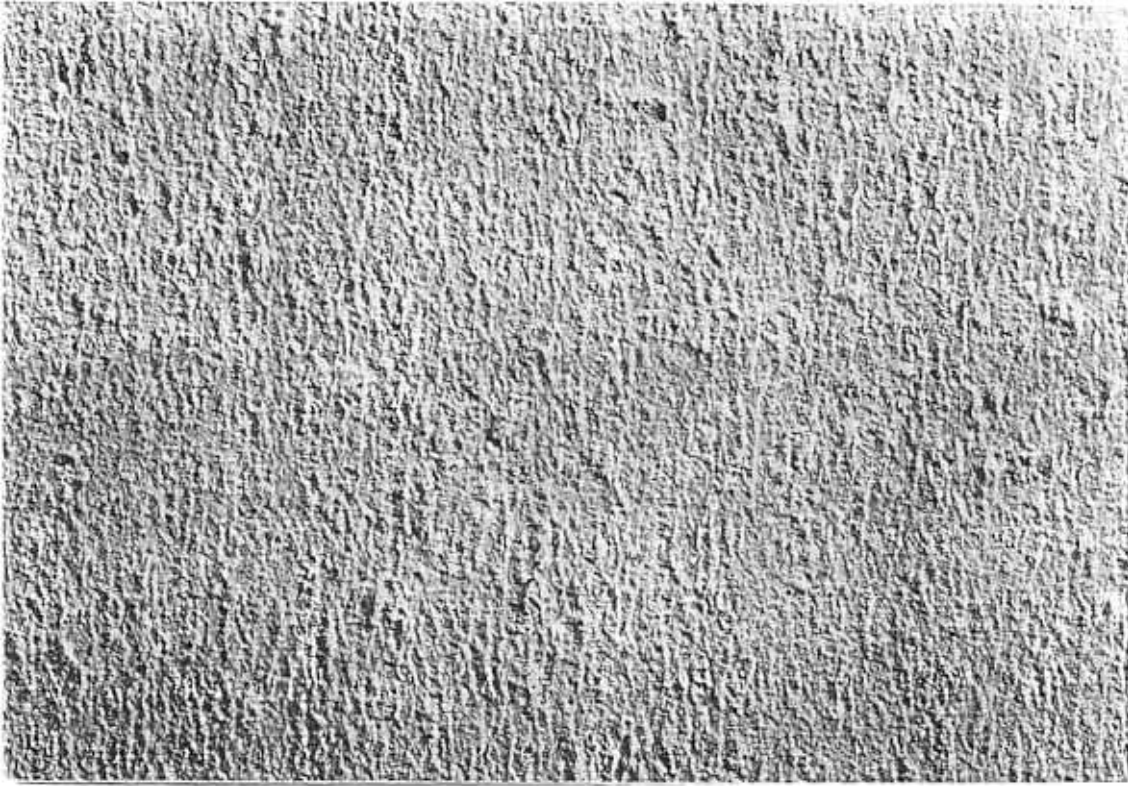


Abb. 6c: Oberfläche des haufwerksporigen Betons



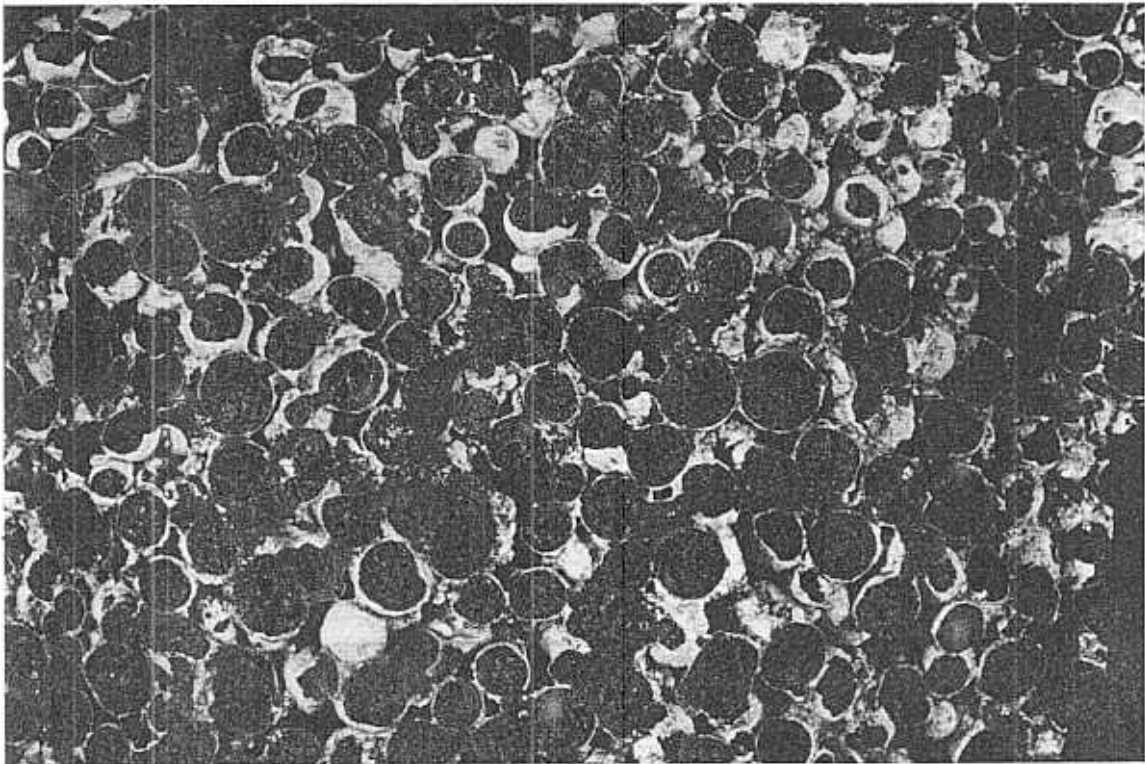


Abb.7: Makroporen, Zuschläge und Zementstein (rot) bei haufwerksporigem Beton

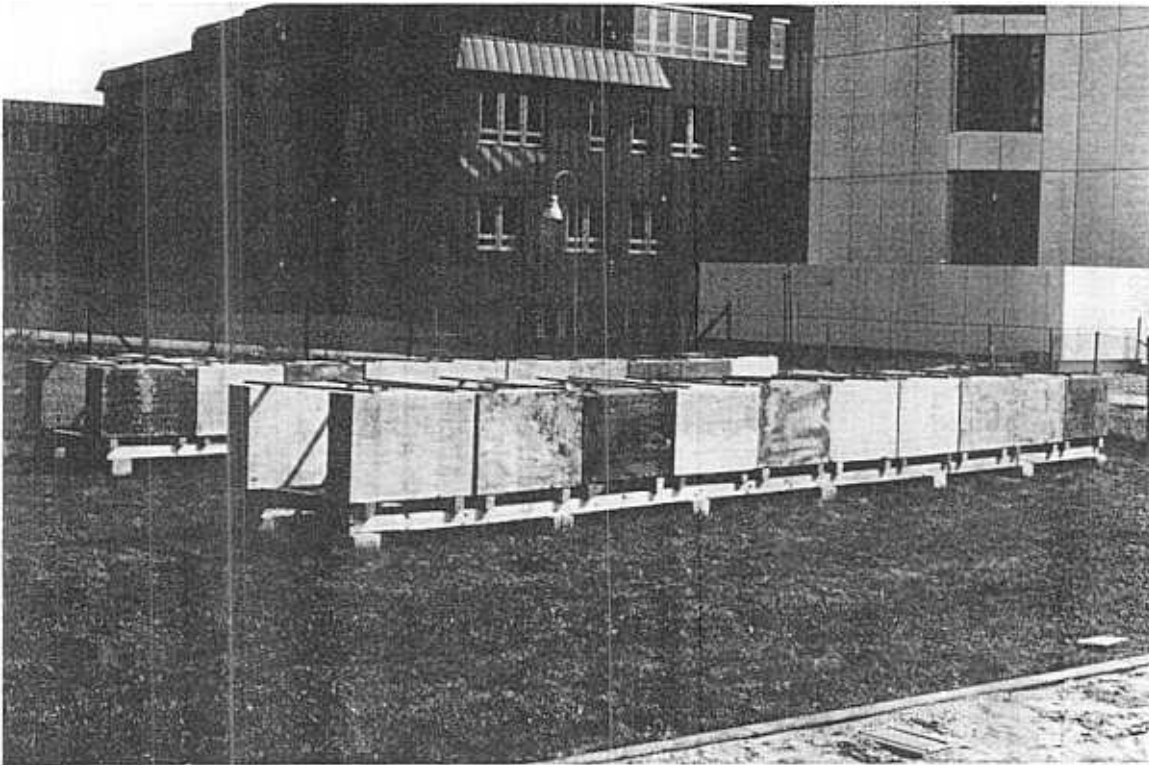


Abb. 8: Lagerung der Proben im Freien

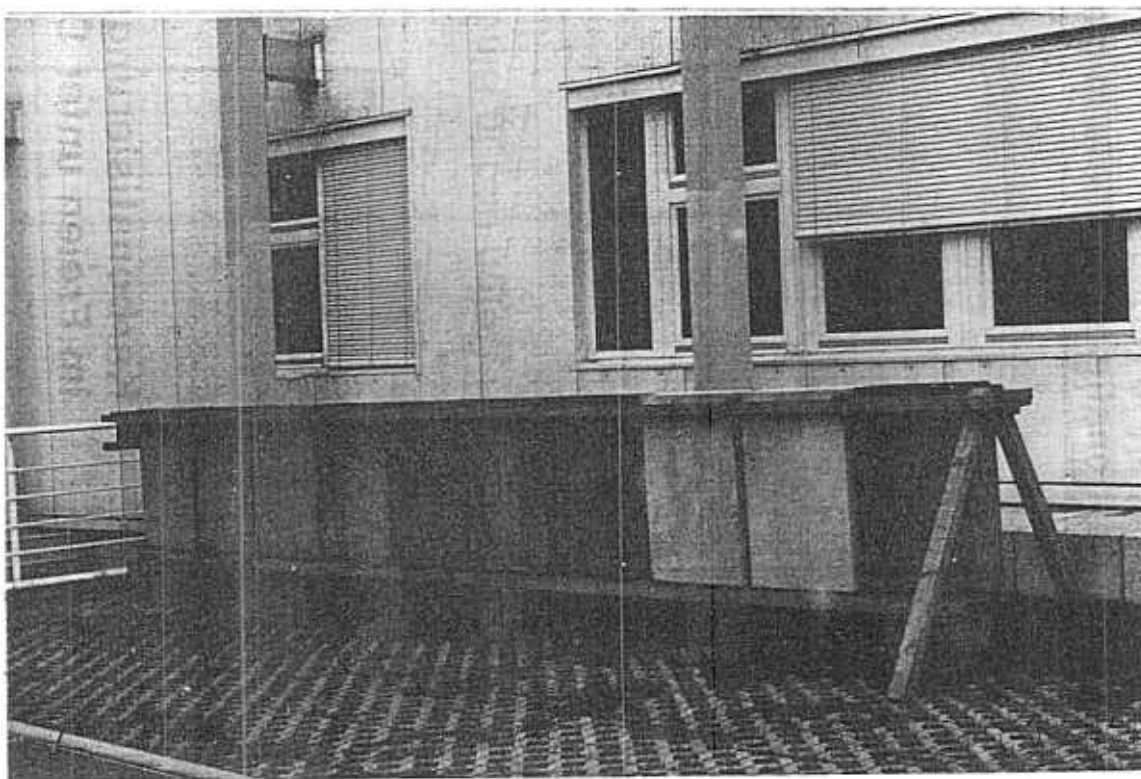


Abb. 9: Lagerung der Proben im Freien mit Chloridbe-
aufschlagung

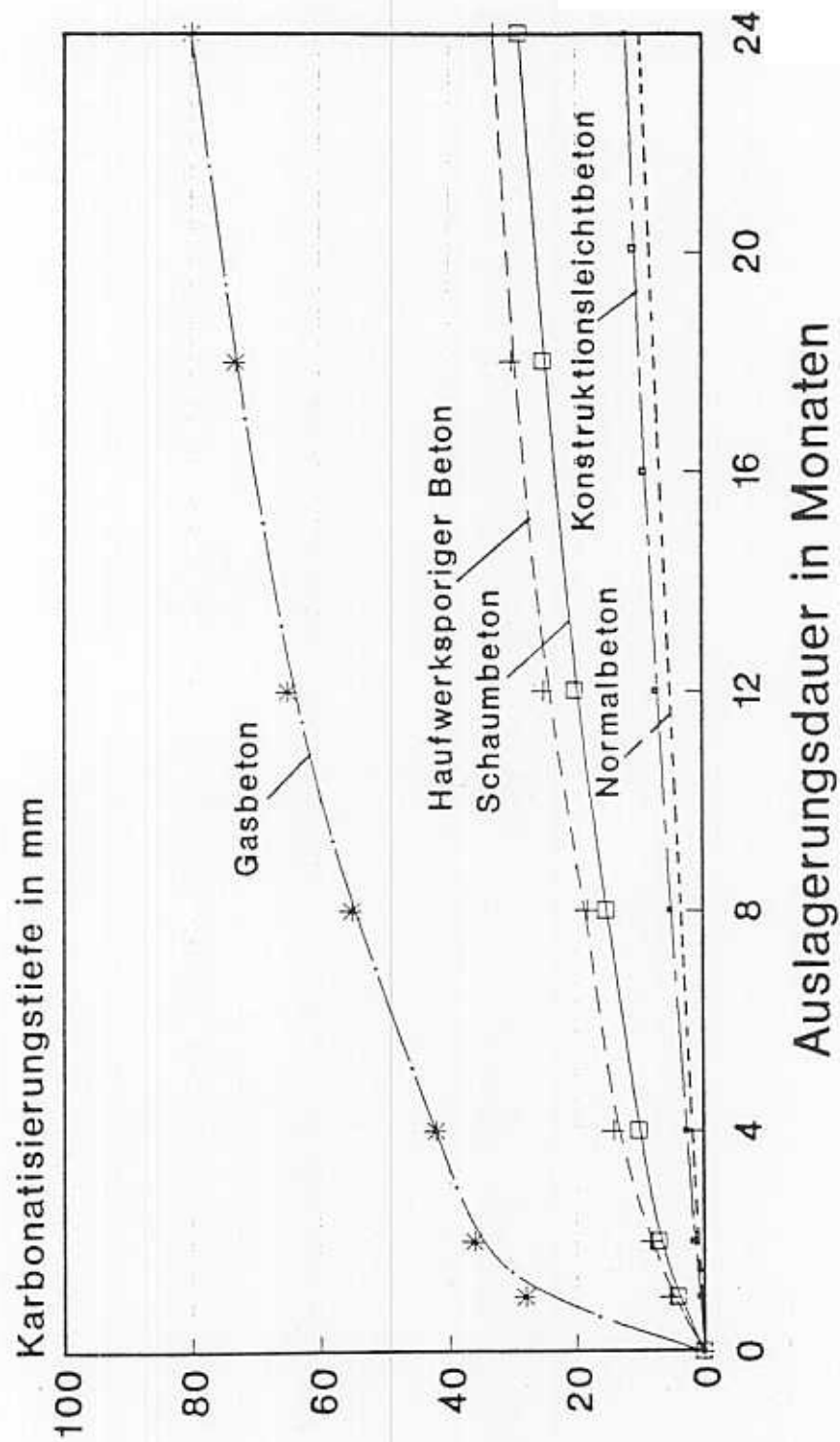


Abb. 10: Karbonatisierungstiefe von Beton nach Auslagerung im Freien unter Dach

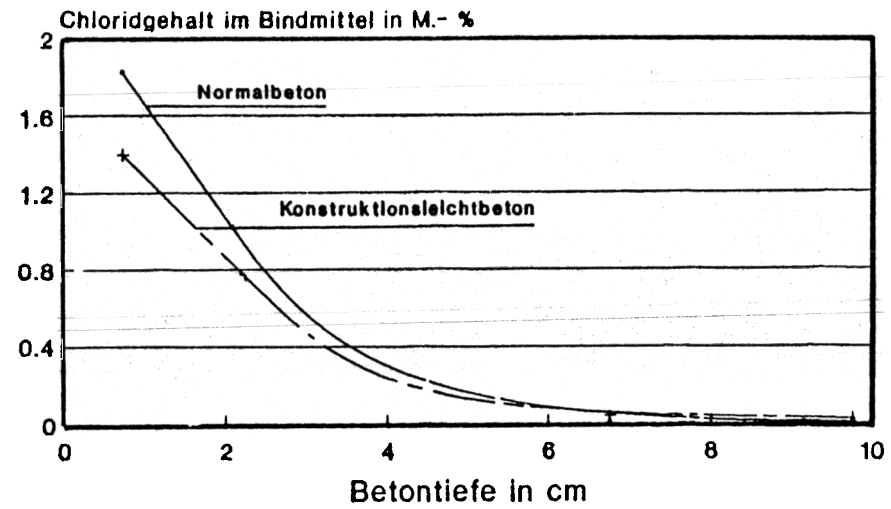
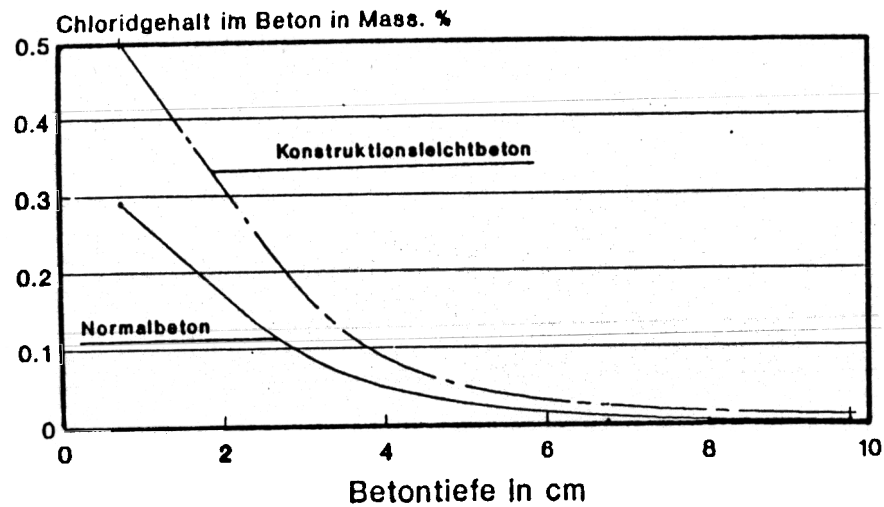


Abb. 11a: Chloridgehalt in Beton und in Bindmittel von Normalbeton und Konstruktions leichtbeton

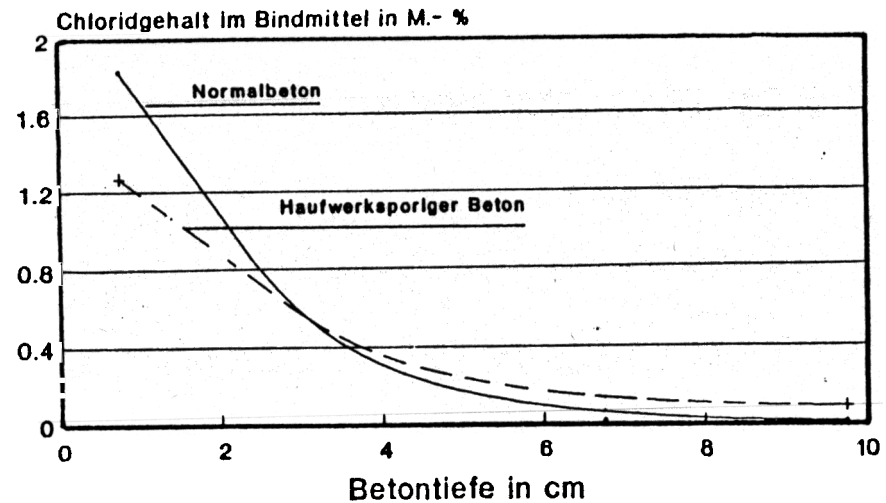
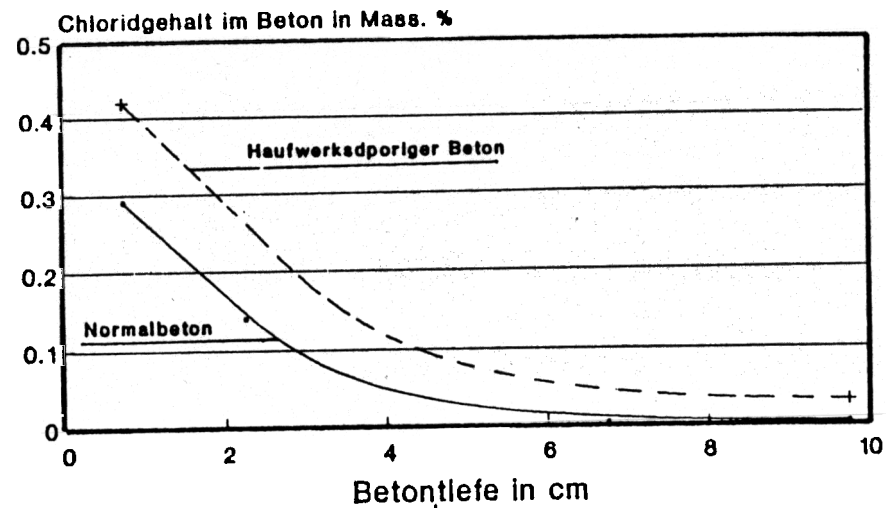


Abb. 11b: Chloridgehalt in Beton und in Bindmittel von Normalbeton und haufwerksporigem Beton

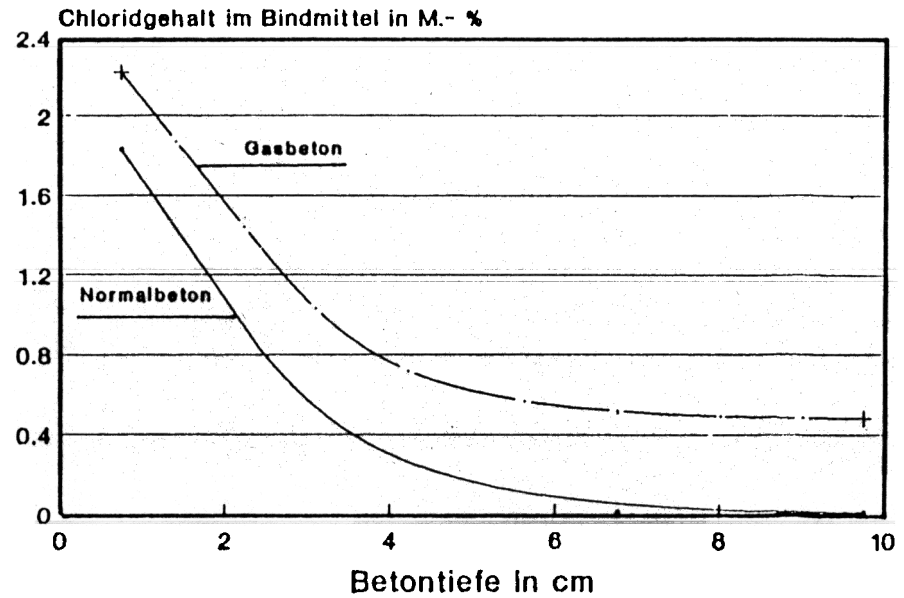
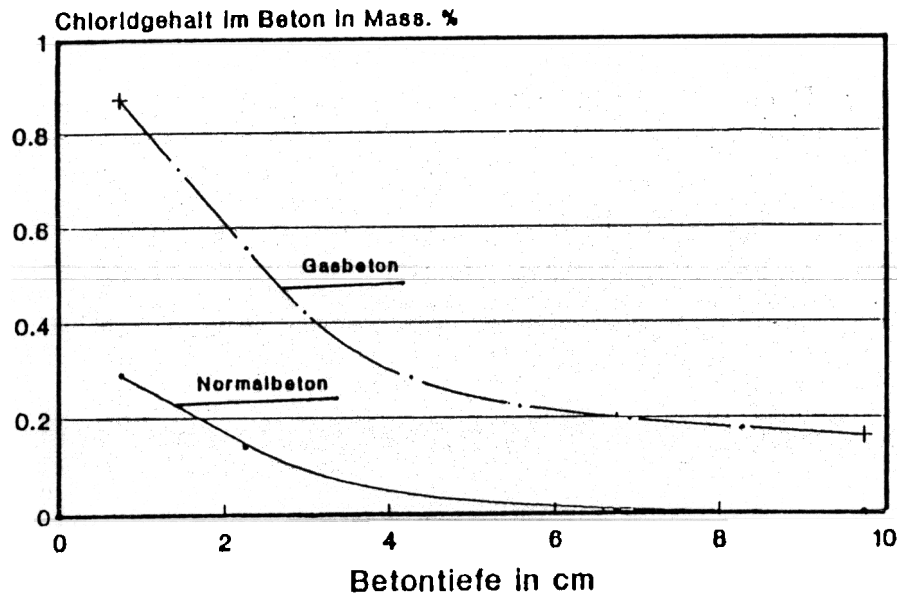


Abb. 11c: Chloridgehalt in Beton und in Bindmittel von Normalbeton und Gasbeton

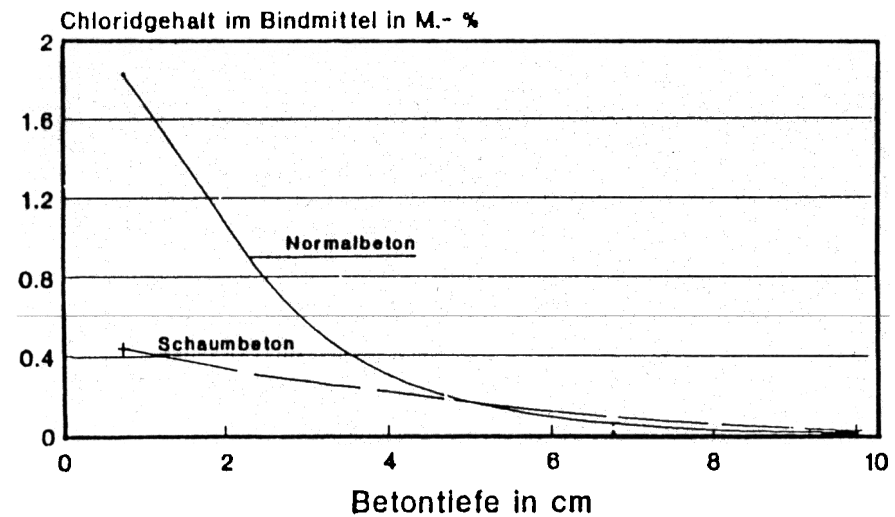
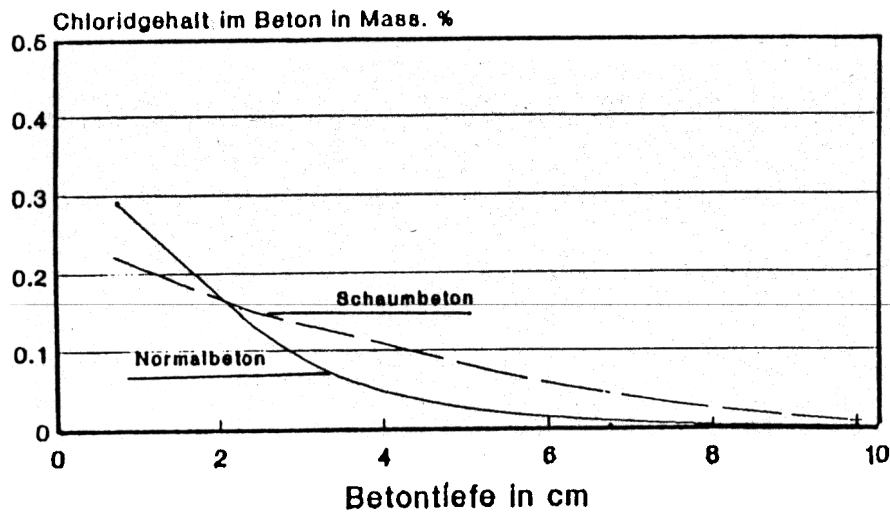


Abb. 11d: Chloridgehalt in Beton und in Bindmittel von Normalbeton und Schaumbeton

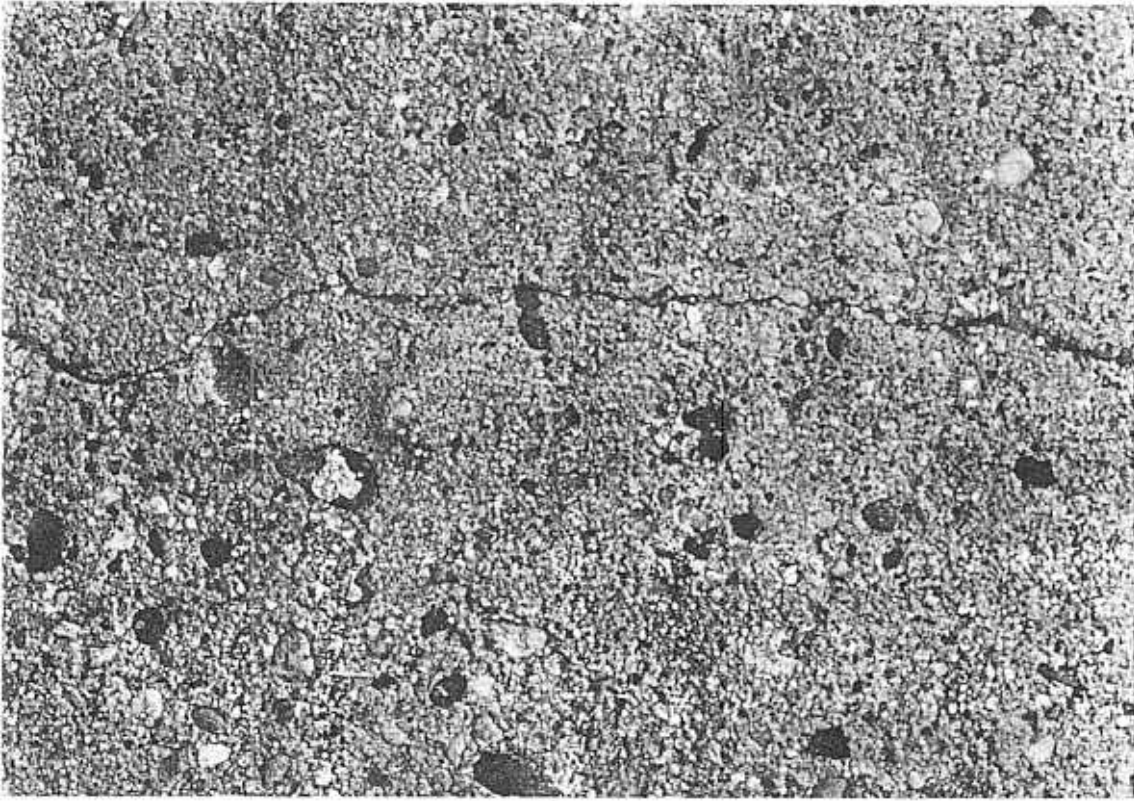


Abb. 12a: Riß in Normalbeton über verzinktem Bewehrungsstahl

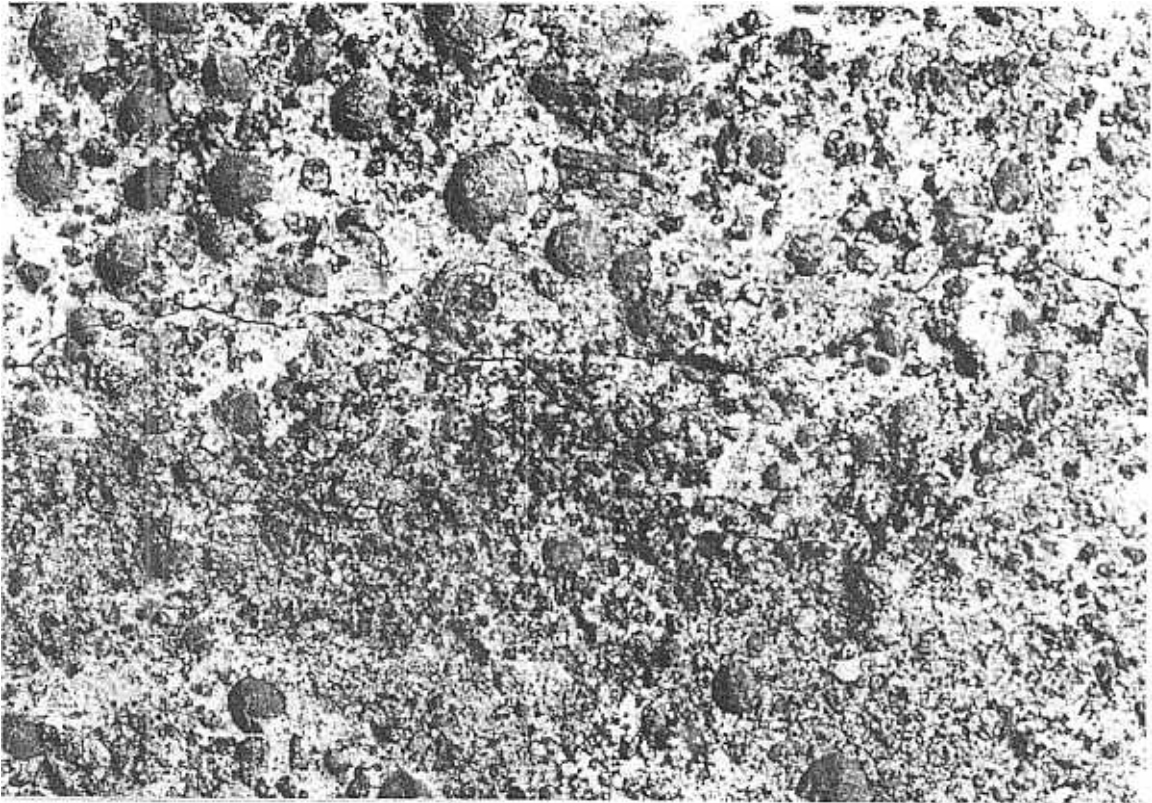


Abb. 12b: Riß in Konstruktionsleichtbeton über verzinktem Bewehrungsstahl

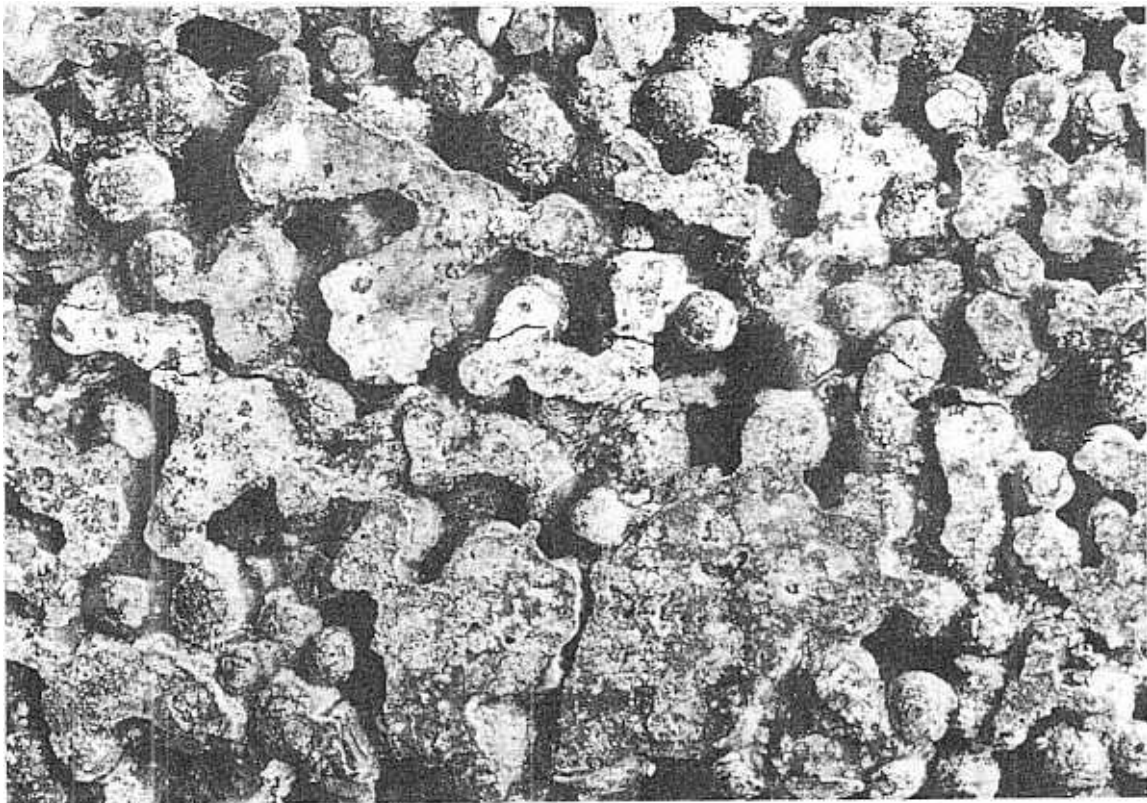


Abb. 12c: Riß in haufwerksporigem Beton über verzinktem Bewehrungsstahl

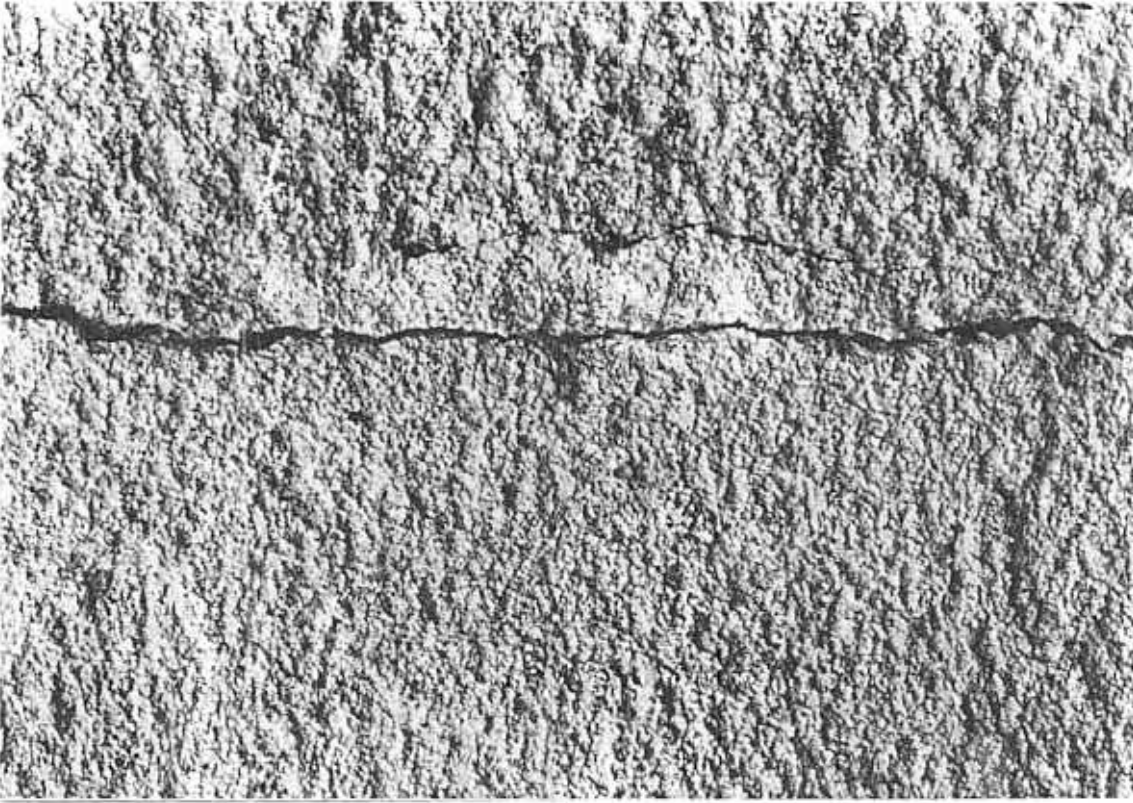
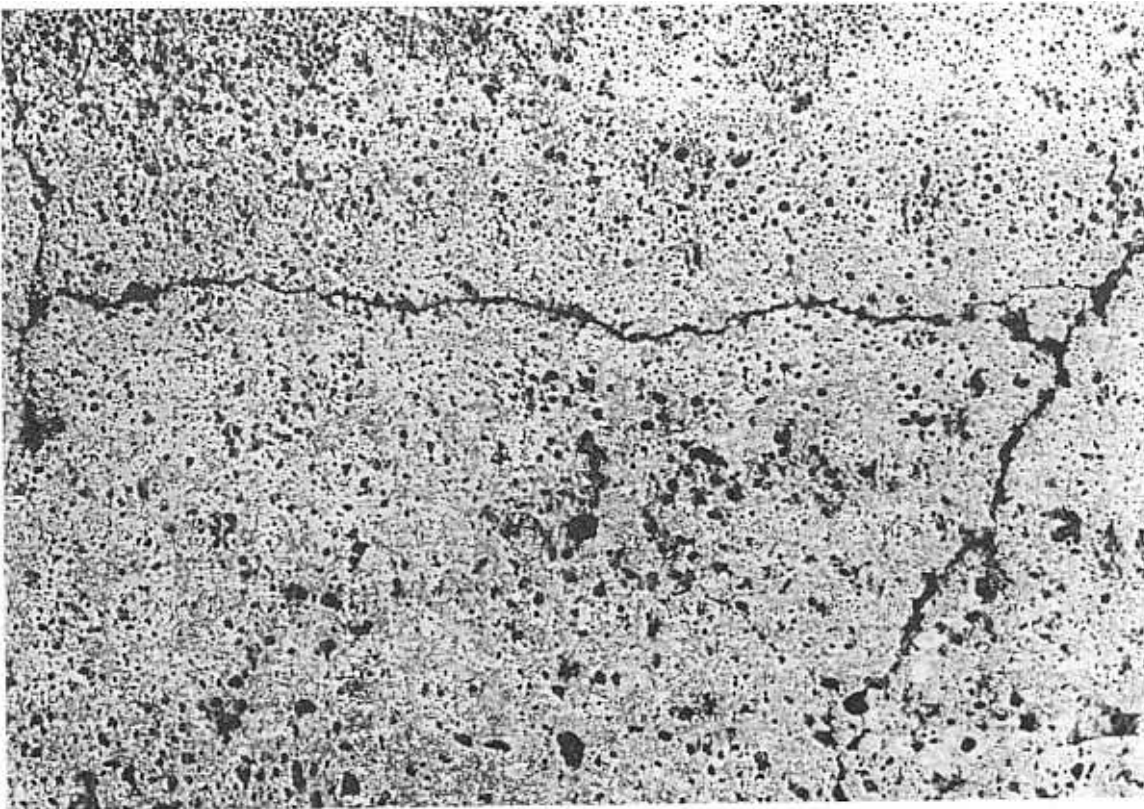


Abb. 12d: Riß in Gasbeton über verzinktem Bewehrungsstahl



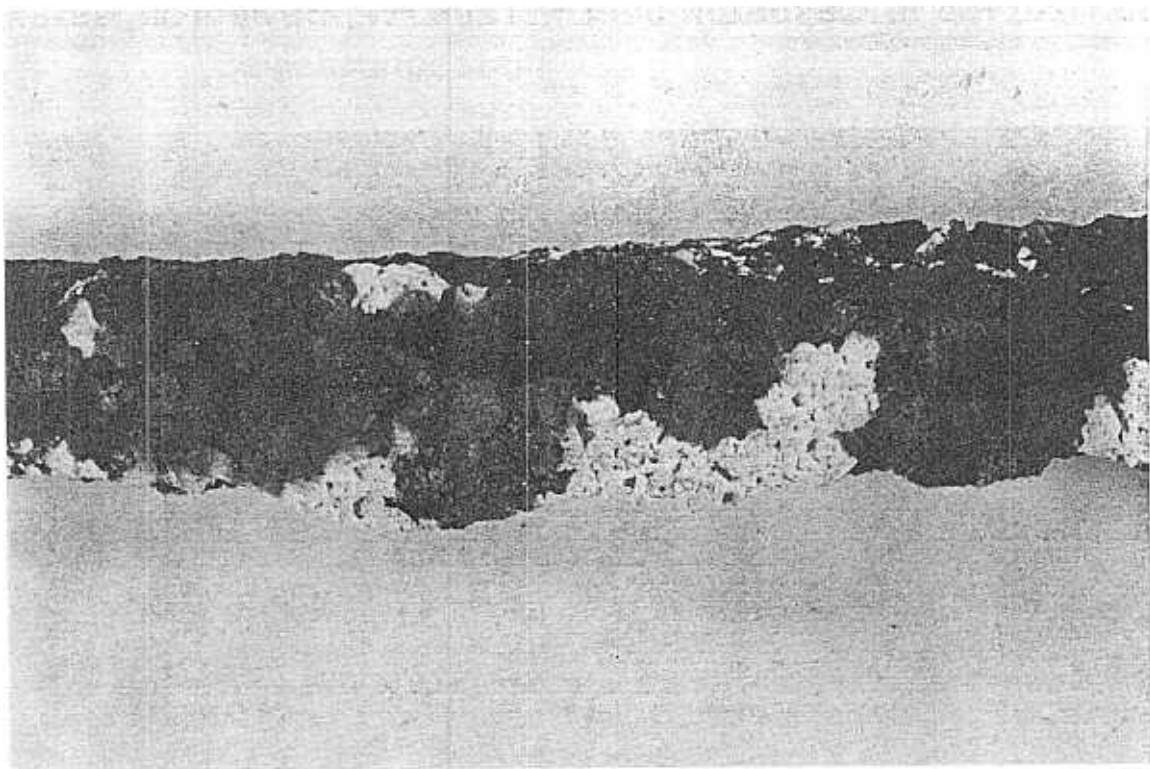
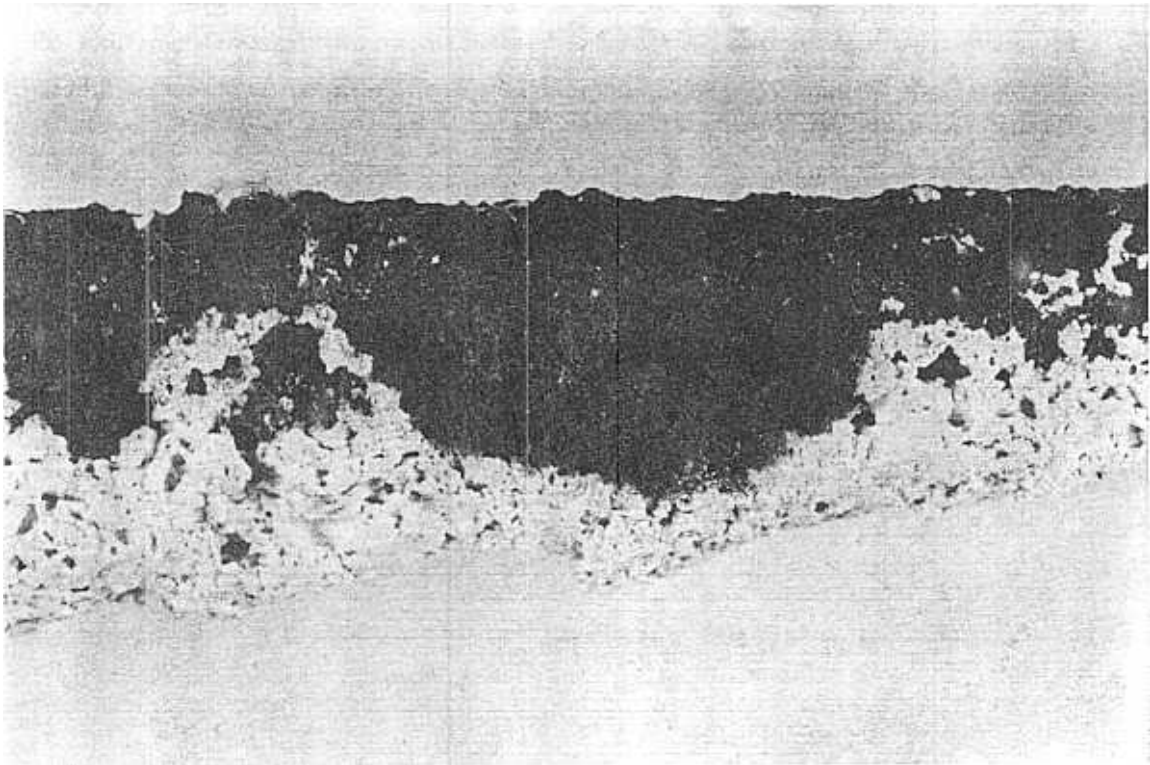
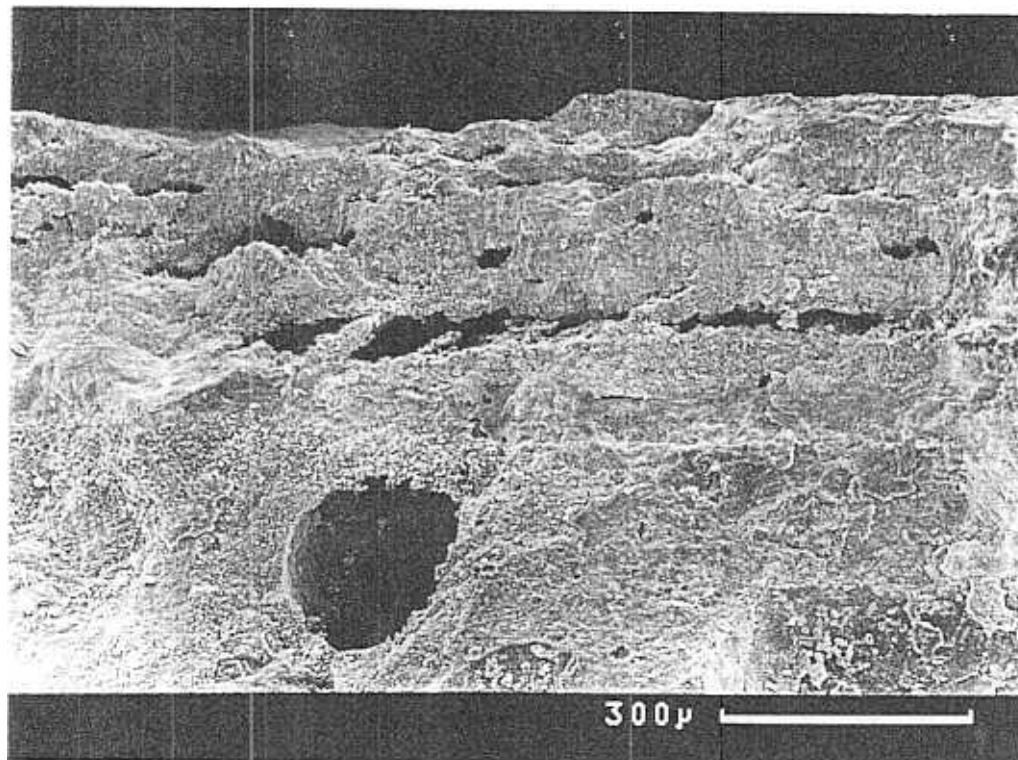


Abb. 13: Eindringung von Korrosionsprodukten des unlegierten Stahls in Gasbeton

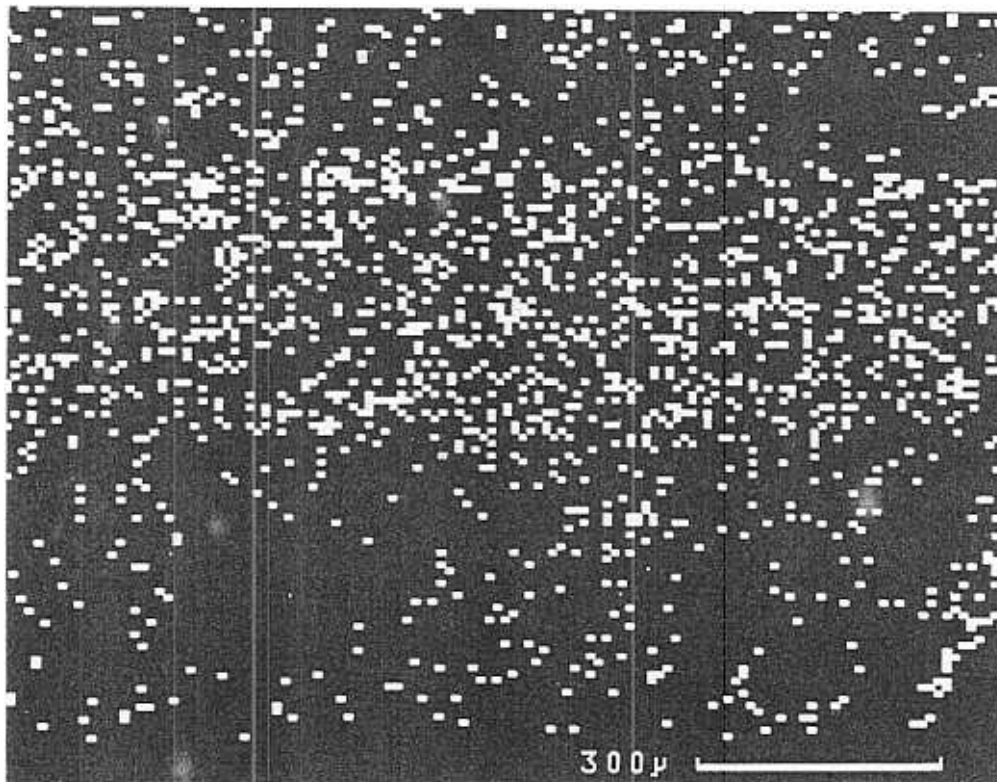


Stahl

Zink-
korrosions-
produkt

Beton

Abb. 14: Abplatzung von Zinkkorrosionsprodukt und Beton bei feuerverzinktem Stahl nach 6,0 -jähriger Lagerung in hochchloridhaltigem Normalbeton B 15

Zink-
korrosions-
produkt

Beton

Abb. 14a: Chloridverteilung von Probe in Abb.14

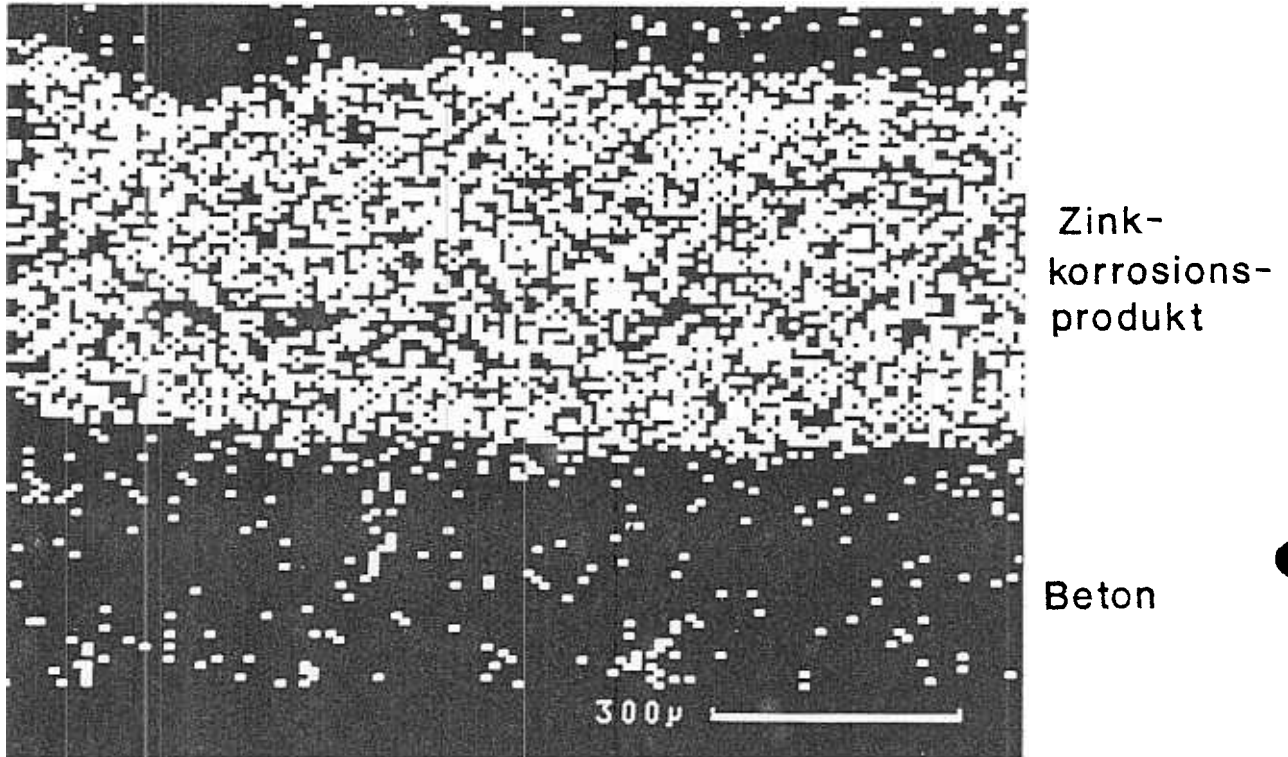


Abb. 14b: Zinkverteilung von Probe in Abb.14

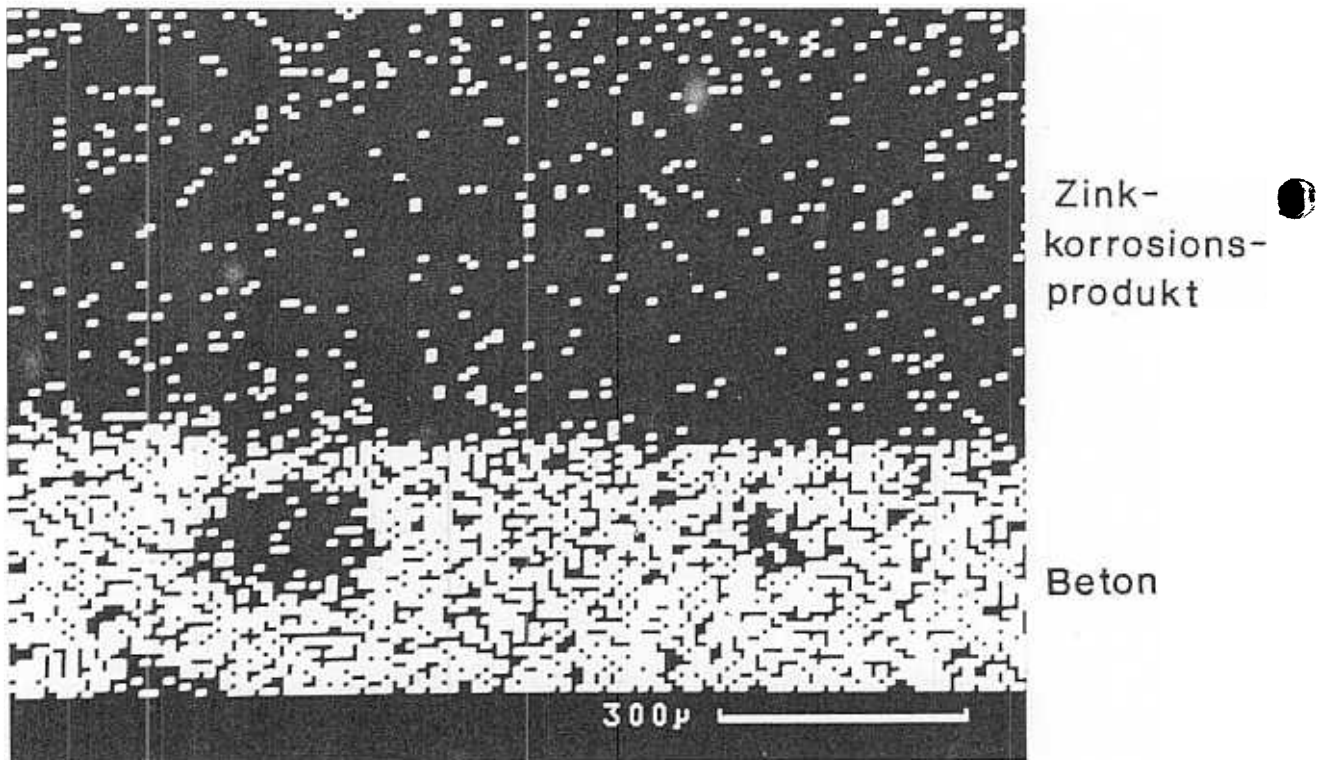


Abb. 14c: Calciumverteilung von Probe in Abb.14

Analyse

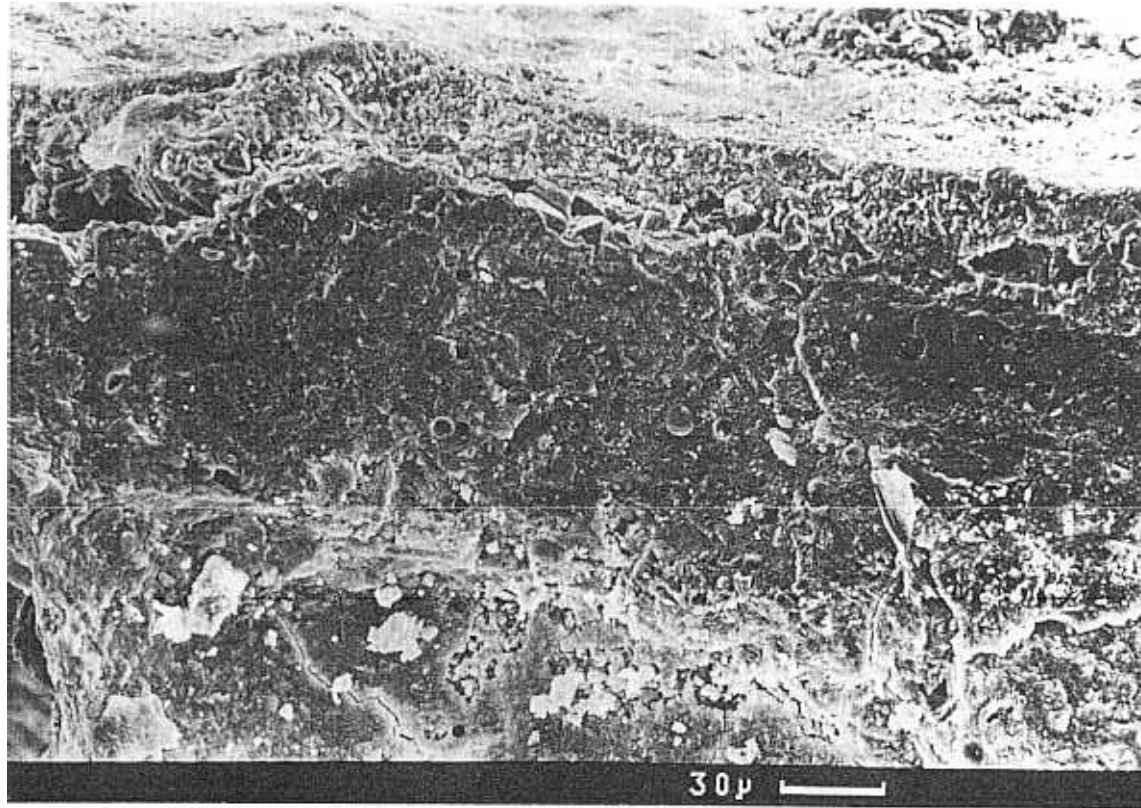
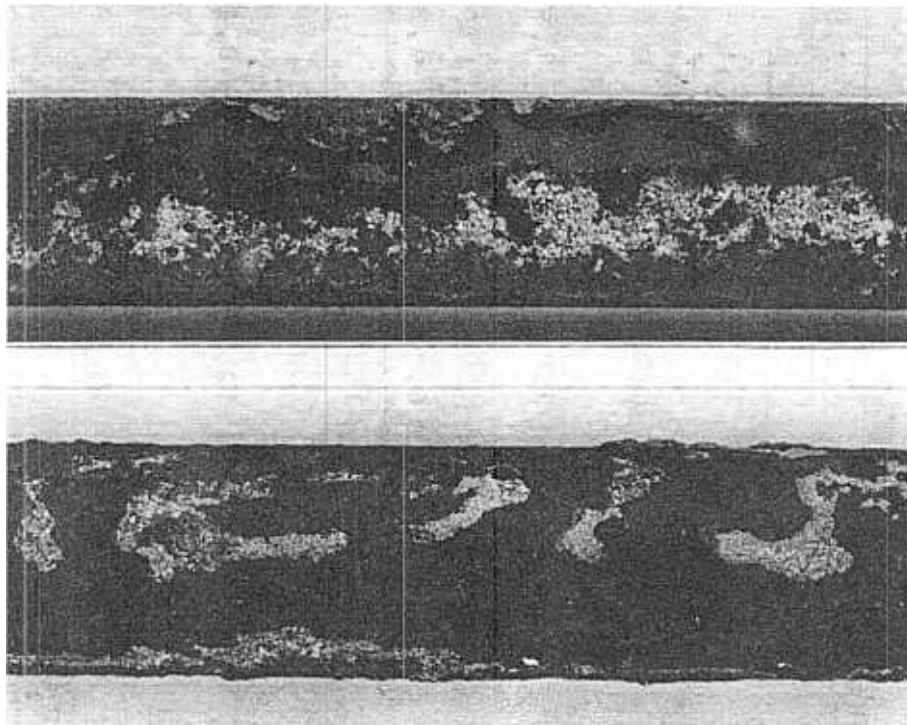


Abb. 15: Abplatzung von Zinkkorrosionsprodukt und Beton bei feuerverzinktem Stahl nach 2,5 -jähriger Lagerung in chloridhaltigem Normalbeton B 25

	Analyse in Mass- %				
	Si	Cl	Ca	Fe	Zn
Zink					100
Zink-	0,4	6,9	0	3,5	89,2
korrosions-	1,4	0,3	2,2	1,4	94,7
produkt	0,9	0	6,1	0,5	92,5
	2,0	0	10,6	1,4	85,0
	6,8	0	31,5	4,2	57,5
	10,1	1,2	51,5	11,2	26,0
Beton	12,3	1,4	64,7	8,4	13,2
0,5mm	23,9	2,4	58,1	8,9	6,7
2,0mm	24,9	2,0	61,2	7,8	4,1
5,0mm	21,0	1,6	66,4	8,4	2,2

Analysenergebnisse aus energiedispersiver Röntgenanalyse (ohne Berücksichtigung von Wasserstoff und Sauerstoff)



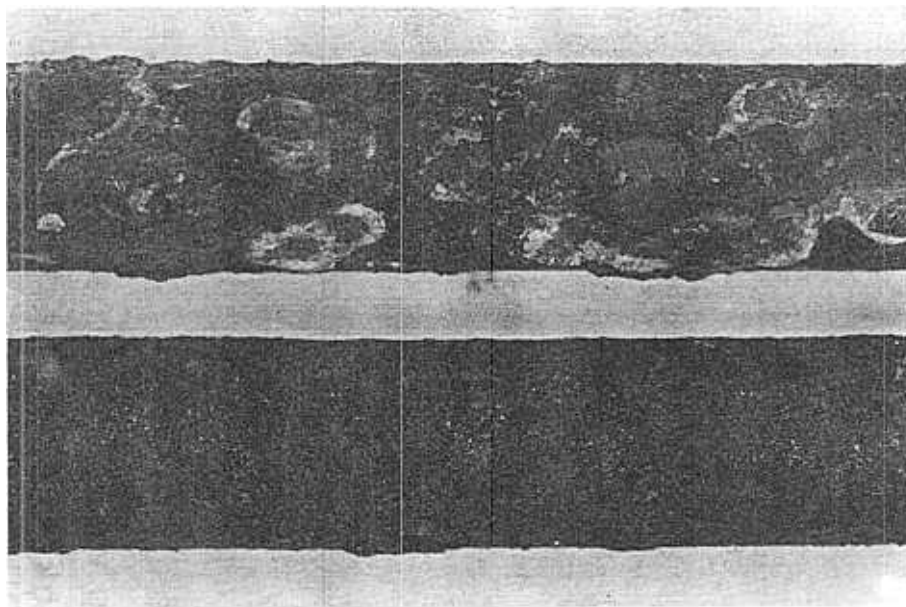
KG 1

KG 4

Abb. 16a : Korrosionsgrad von Stahl in Konstruktionsleichtbeton
nach 2,5 Jahren

KG 1: im Freien, $c = 2,5 \text{ cm}$

KG 4: Chlorid 1, $c = 2,5 \text{ cm}$



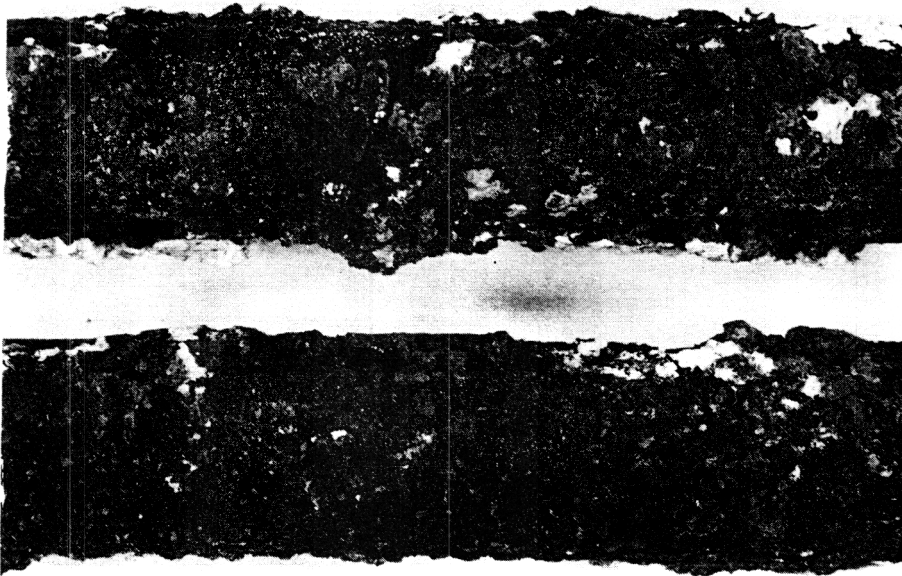
KG 2

KG 3

Abb. 16b : Korrosionsgrad von Stahl in haufwerksporigem Beton
nach 2,5 Jahren

KG 2: im Freien, $c = 1,5 \text{ cm}$

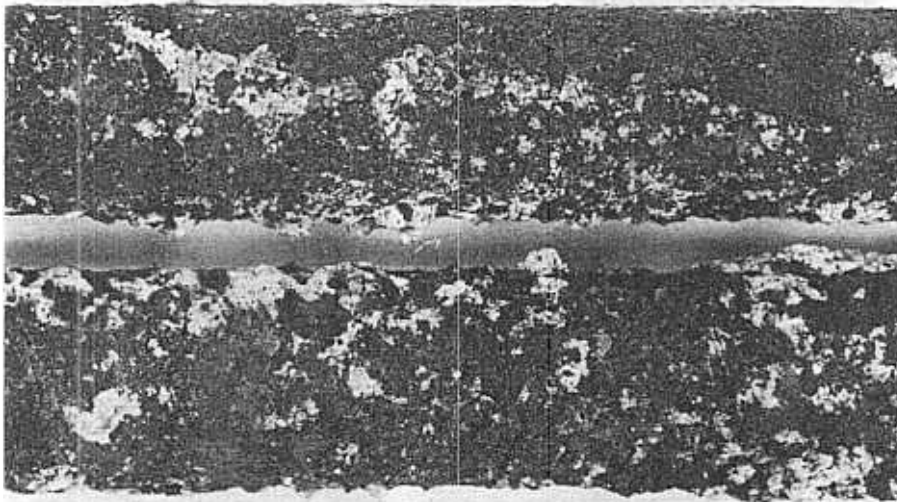
KG 3: Chlorid 1, $c = 2,5 \text{ cm}$



KG 3

KG 3

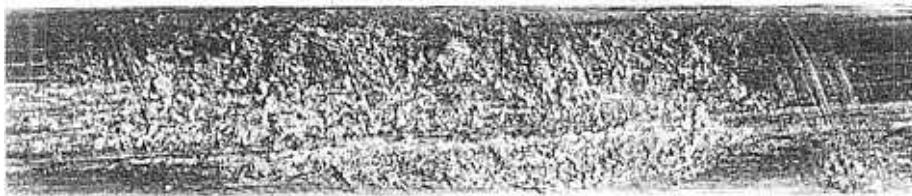
Abb. 16c : Korrosionsgrad von Stahl in Gasbeton nach 2,5 Jahren
 KG 3: im Freien, $c = 2,5$ cm
 KG 3: im 100% r.F., $c = 8,0$ cm



KG 1

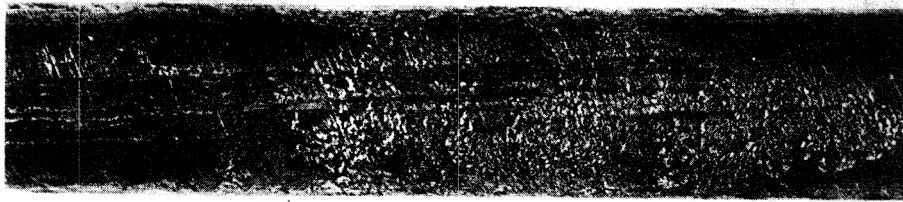
KG 2

Abb. 16d : Korrosionsgrad von Stahl in Schaumbeton nach 2,5 Jahren
 KG 1: im Freien, $c = 1,5$ cm
 KG 2: Chlorid 1, $c = 1,5$ cm

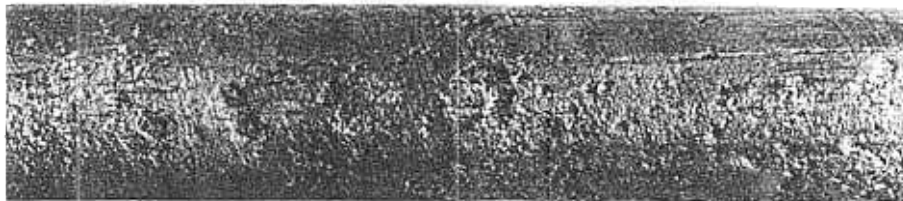


KG 1

Abb. 17a : Korrosionsgrad von Stahl in Normalbeton nach 2,5 Jahren,
Probe gereinigt
KG 1: im Freien, $c \approx 1,5$ cm



KG 1



KG 2



KG 4

Abb. 17b : Korrosionsgrad von Stahl in Konstruktionsleichtbeton
nach 2,5 Jahren, Probe gereinigt

KG 1: im Freien, $c = 2,5 \text{ cm}$

KG 2: im Freien, $c = 1,5 \text{ cm}$

KG 4: Chlorid 1, $c = 1,5 \text{ cm}$



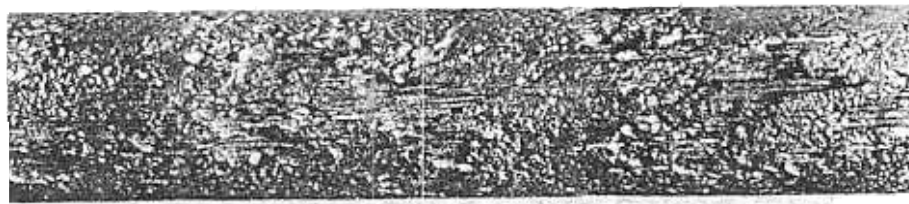
KG 1



KG 2



KG 3



KG 4

Abb. 17c : Korrosionsgrad von Stahl in haufwerksporigem Beton nach 2,5 Jahren, Probe gereinigt

KG 1: im Freien, $c = 2,5$ cm

KG 2: im Freien, $c = 1,5$ cm

KG 3: im 100% r.F., $c = 1,5$ cm

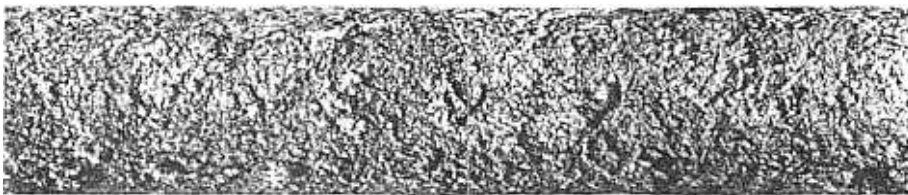
KG 4: Chlorid 1, $c = 1,5$ cm



KG 1



KG 2



KG 3



KG 4

Abb. 17d : Korrosionsgrad von Stahl in Gasbeton nach 2,5 Jahren,
Probe gereinigt

KG 1: im Freien unter Dach, $c = 8,0$ cm

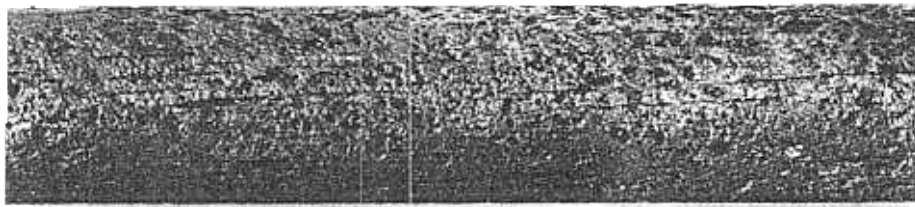
KG 2: im Freien unter Dach, $c = 1,5$ cm

KG 3: im Freien, $c = 2,5$ cm

KG 4: Chlorid 1, $c = 2,5$ cm



KG 1



KG 2

Abb. 17e : Korrosionsgrad von Stahl in Schaumbeton nach 2,5 Jahren,
Probe gereinigt
KG 1: Chlorid 1, $c = 2,5$ cm
KG 2: Chlorid 1, $c = 1,5$ cm

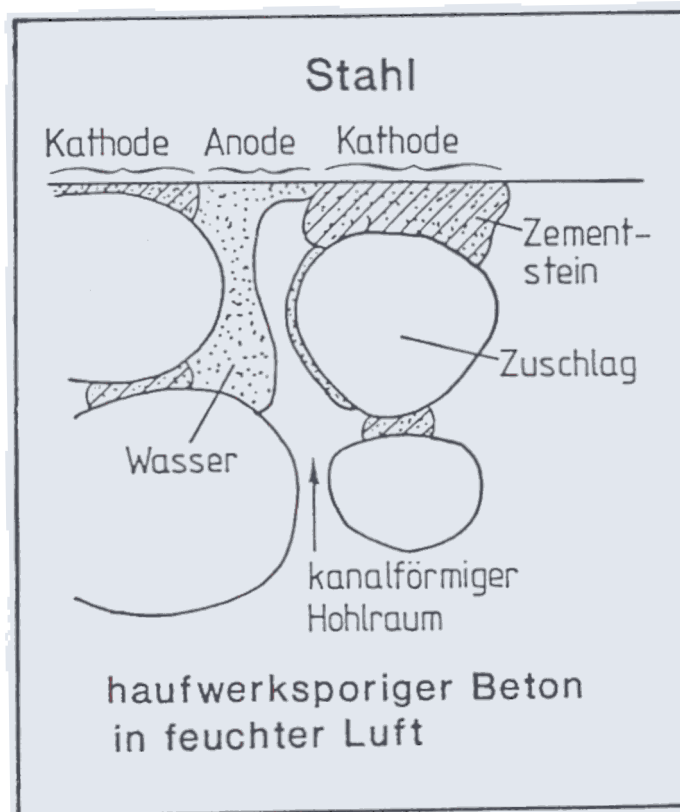
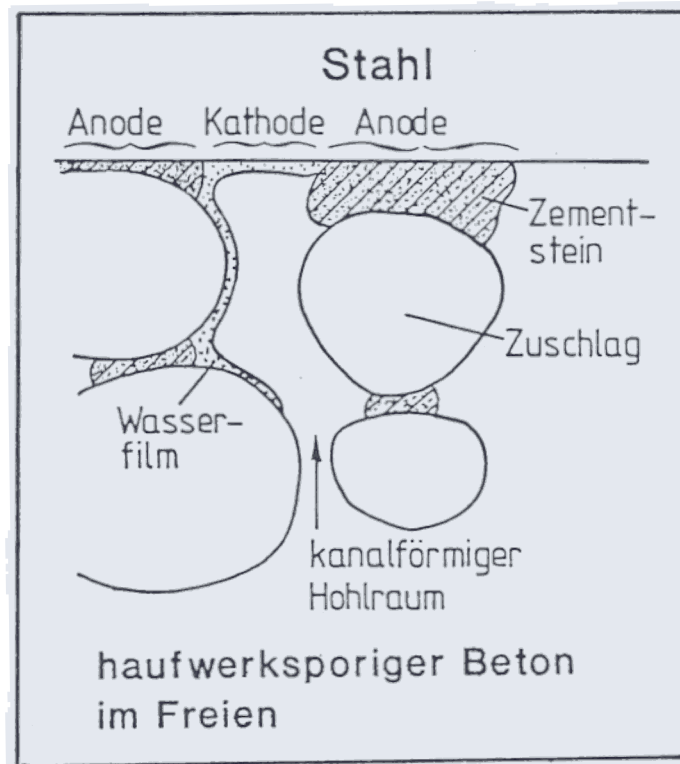


Abb. 18: Mögliche Korrosionsverhältnisse in haufwerksporigem Beton mit unterschiedlichem Wassergehalt /1/

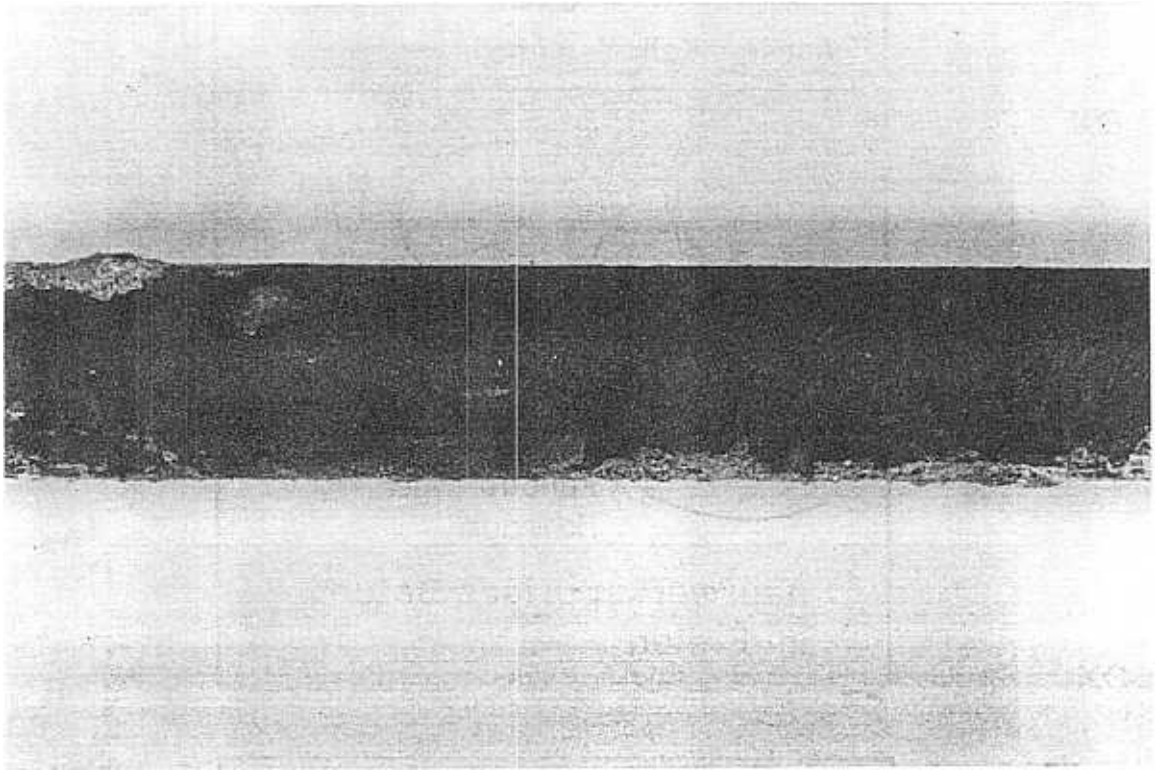


Abb. 19: Feuerverzinkter Stahl ohne Korrosion

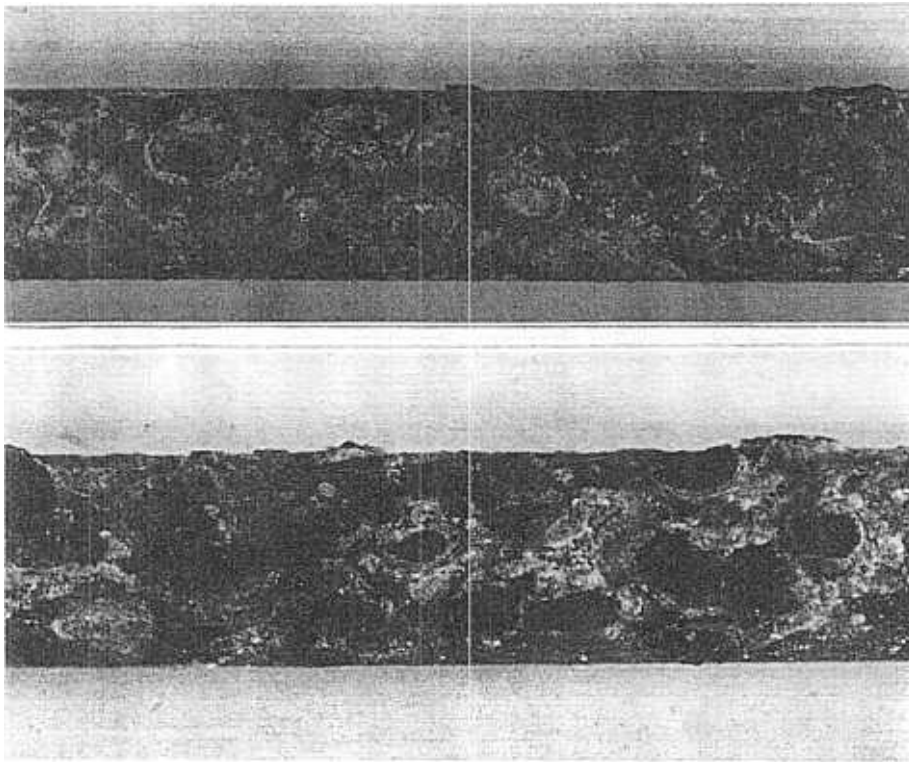
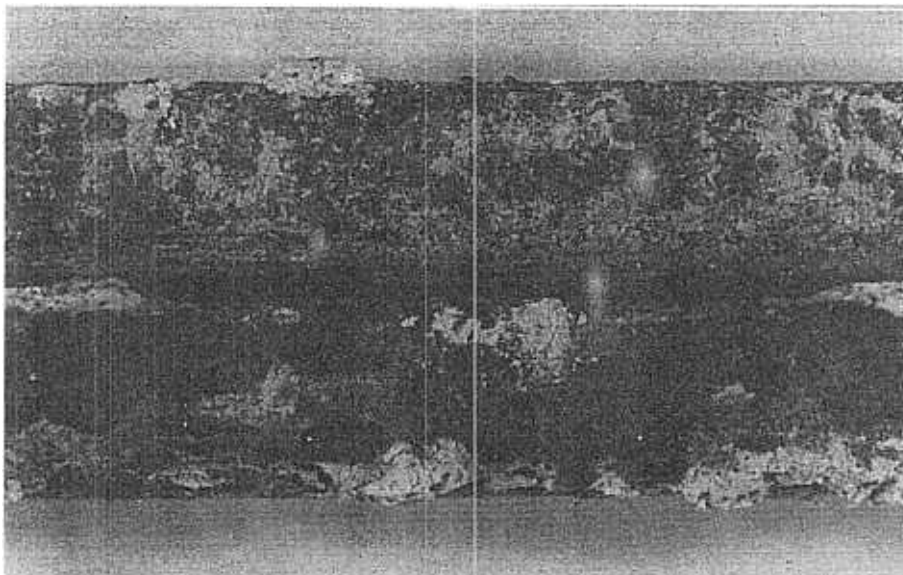


Abb.20: Abtrag von feuerverzinktem Stahl in haufwerksporigem Beton nach 2,5 Jahren

oben: typischer Zinkabtrag für 1-3
unten: typischer Zinkabtrag für 4-5



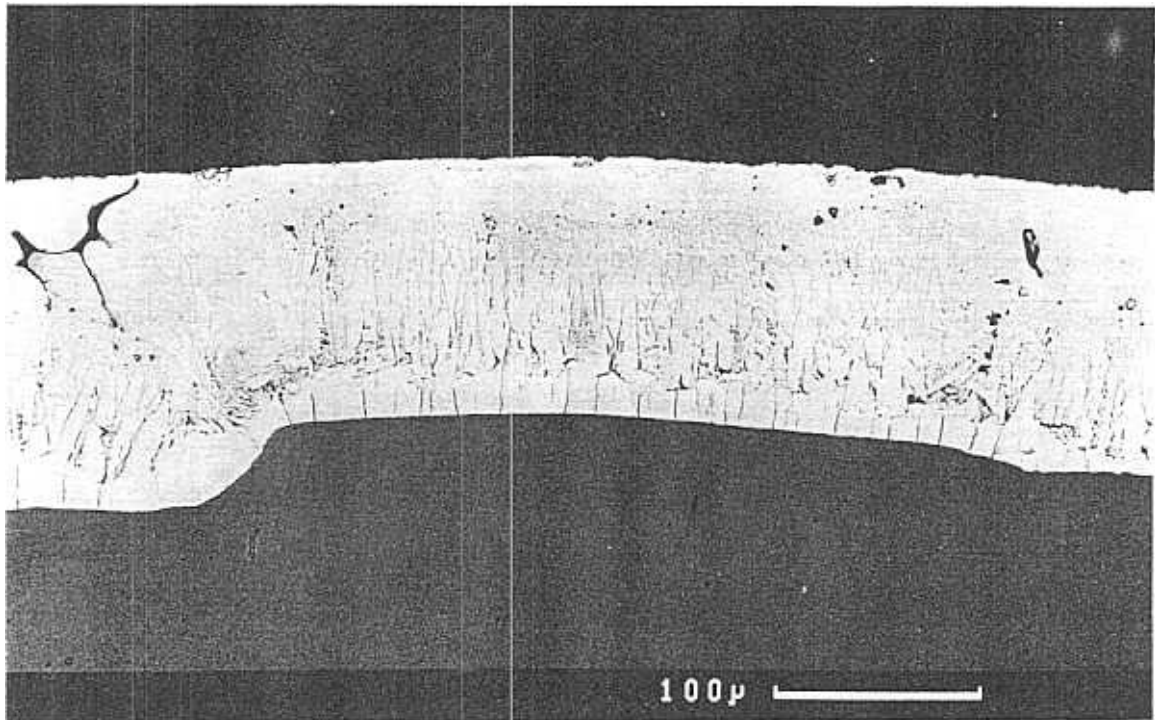


Abb. 22: Zinkauflage nach 2,5 Jahren in Beton normaler Alkalität

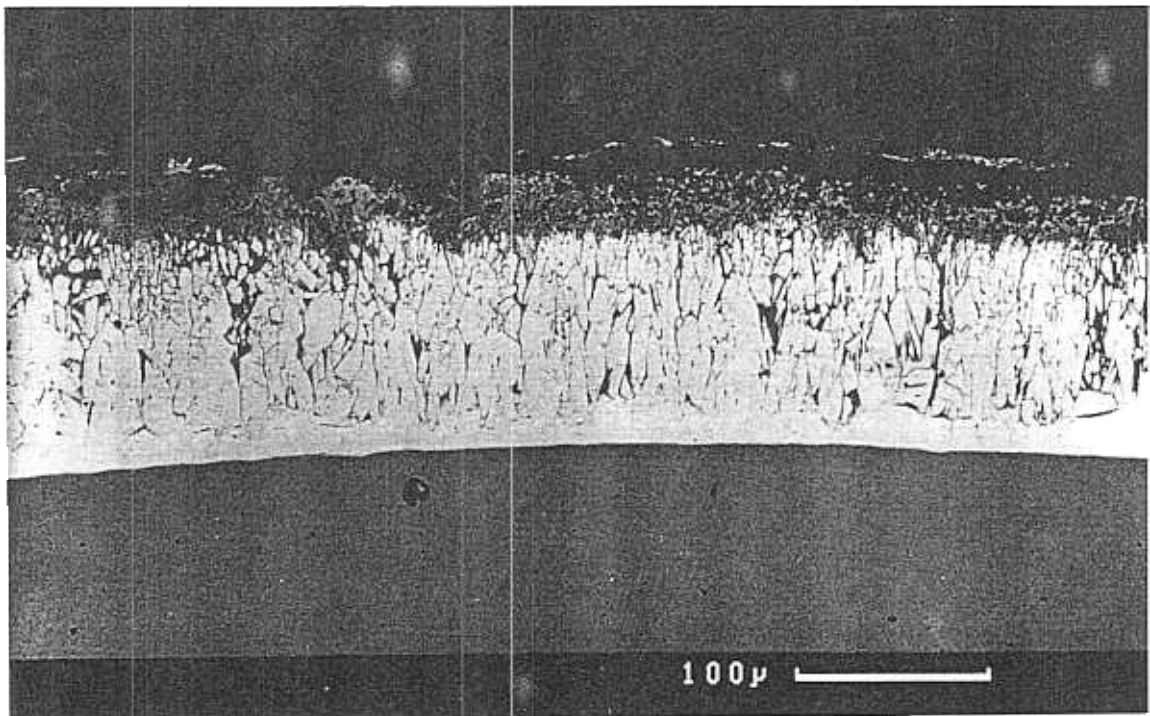
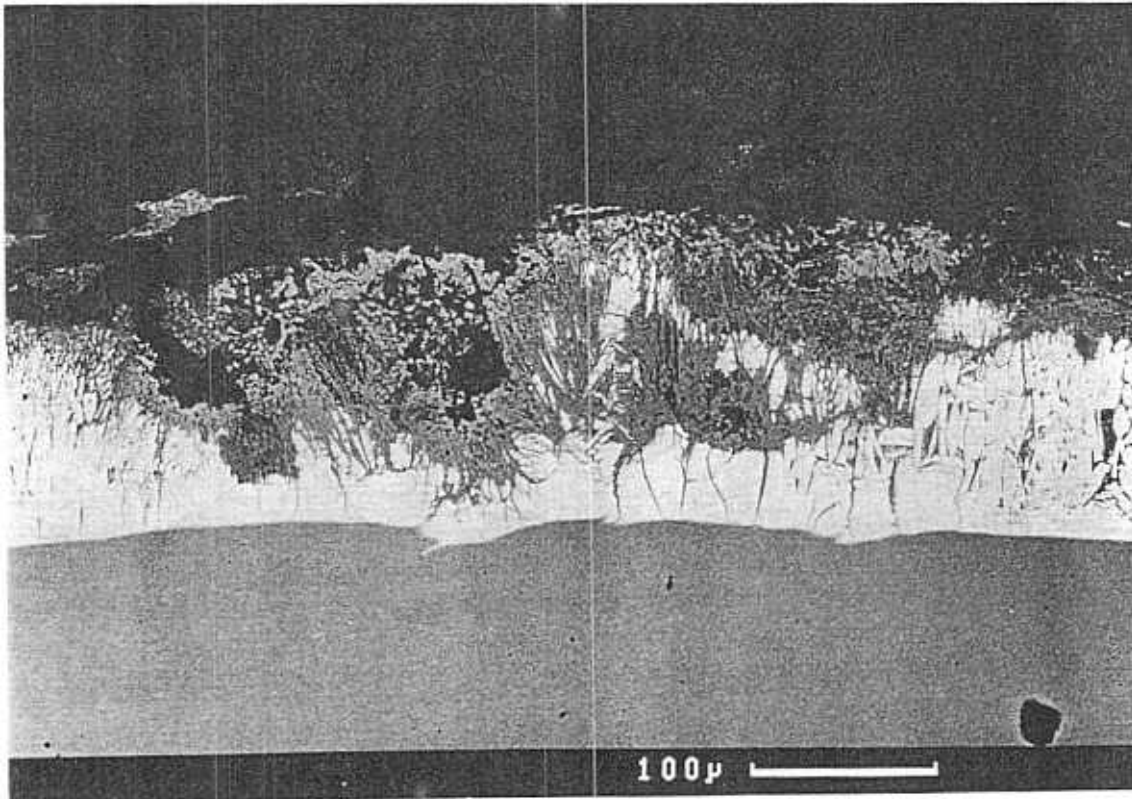
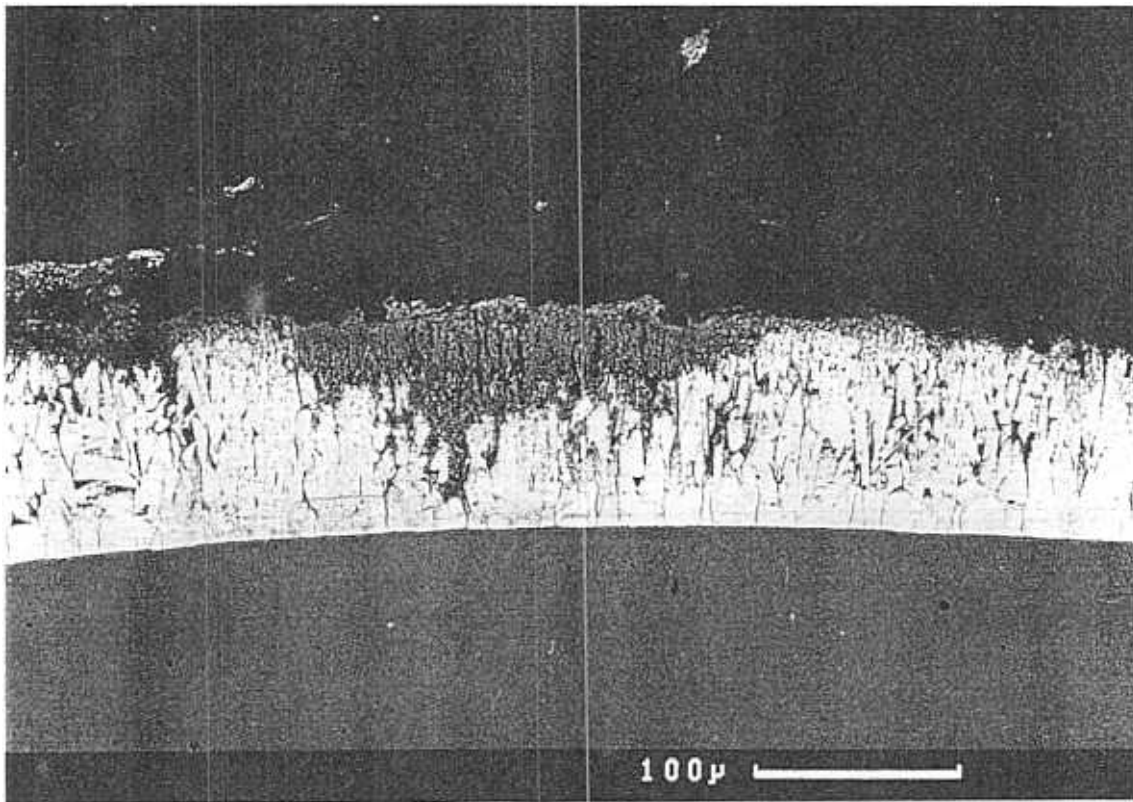


Abb. 23: Zinkauflage nach 2,5 Jahren in Beton erhöhter Alkalität



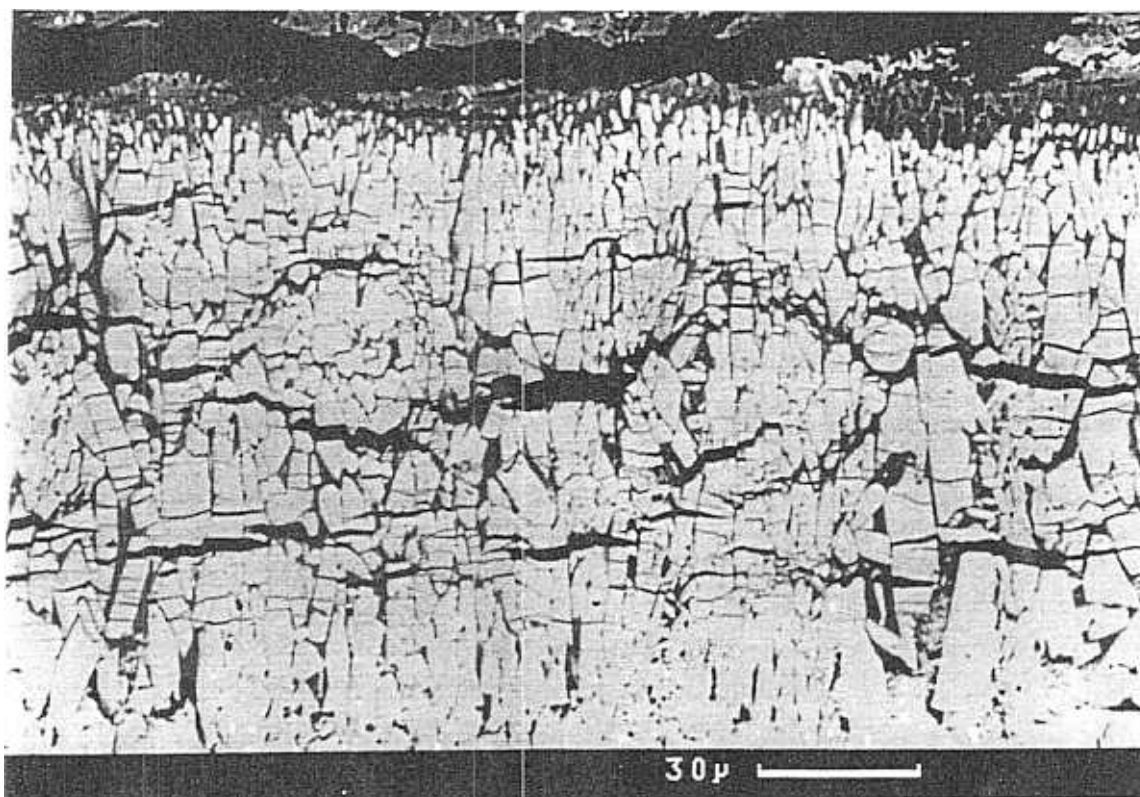
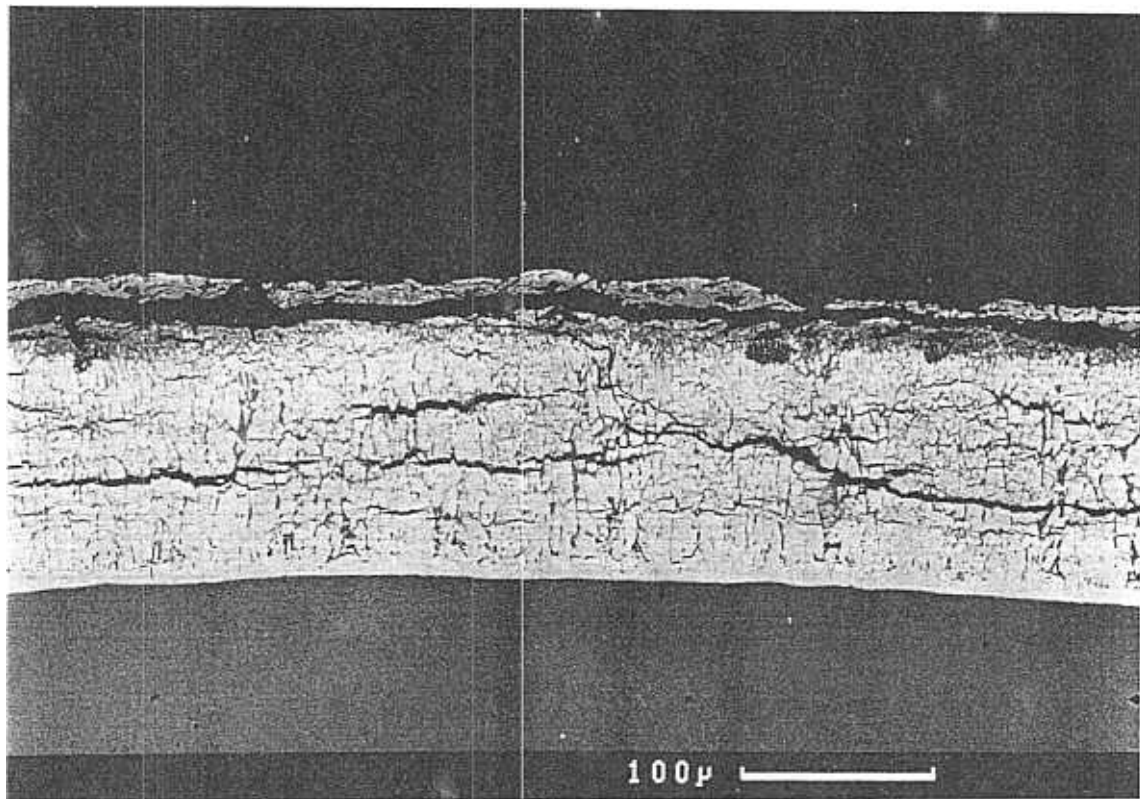


Abb. 25: Zinkauflage nach Autoklavenbehandlung von Gasbeton

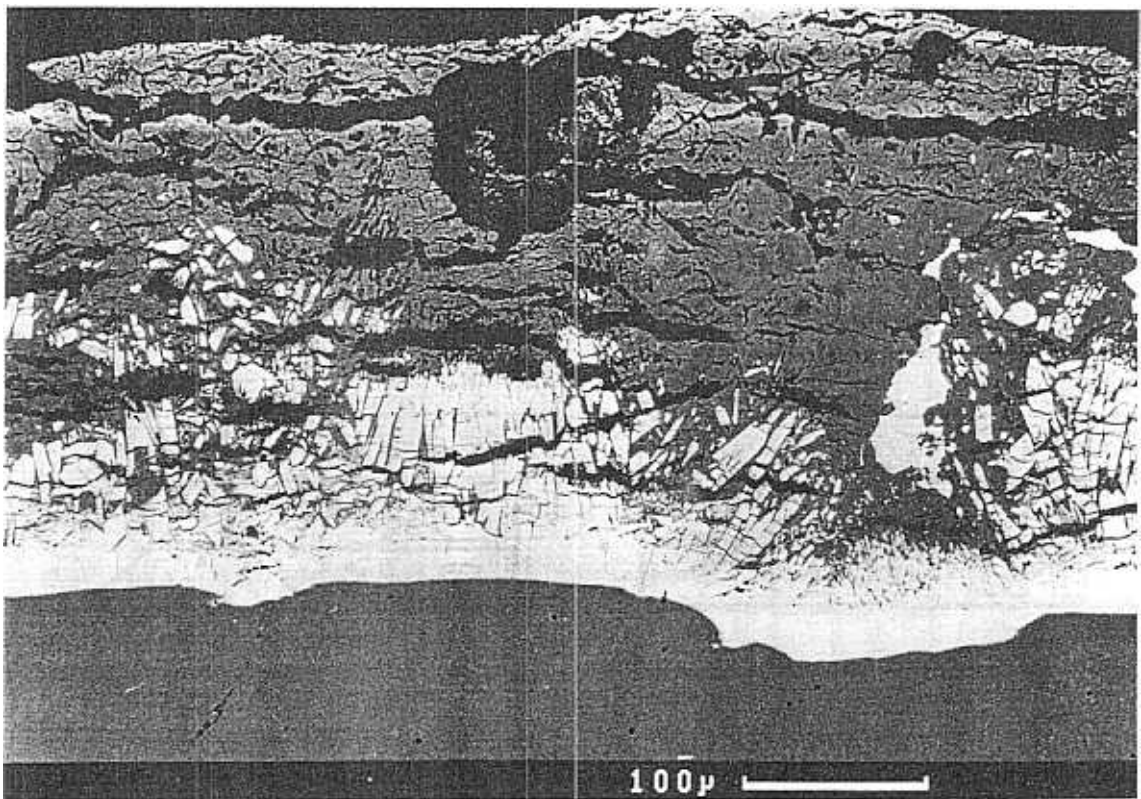
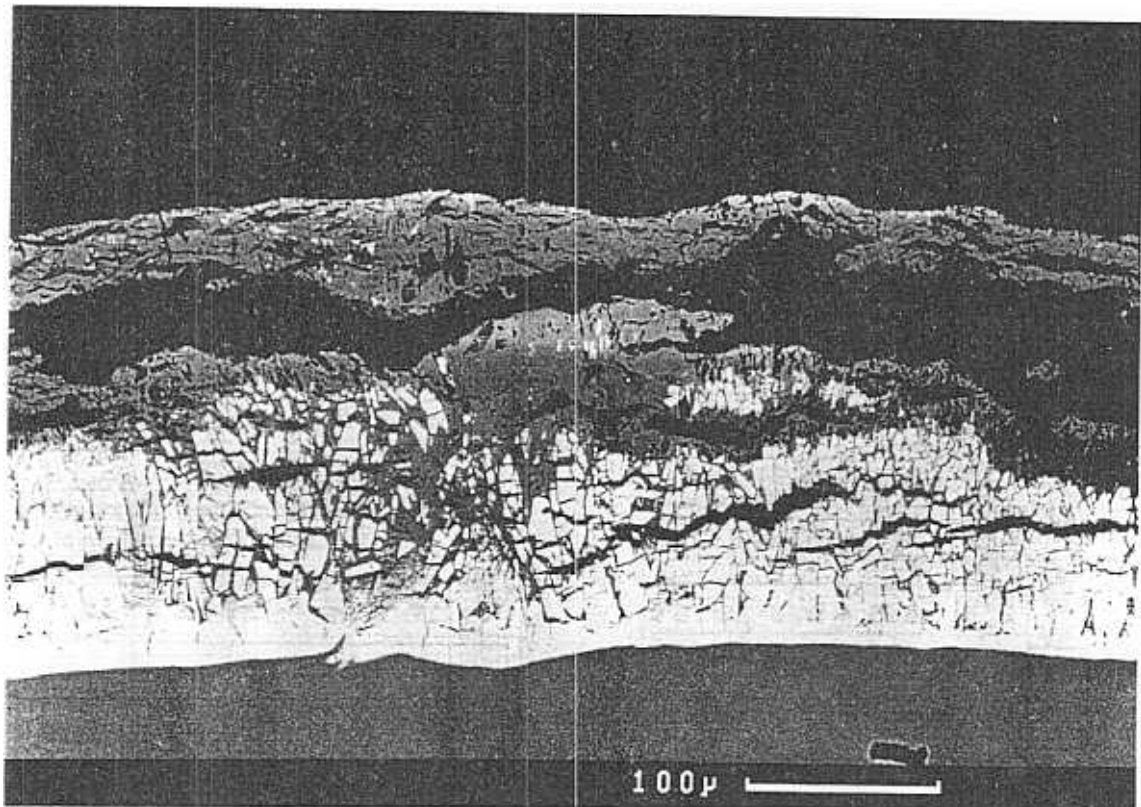


Abb. 26: Zinkkorrosion in Gasbeton (hier: nach Chloridzugabe)

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	nicht entnommen			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
im Freien unter Dach				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB	1	0-1		
HpB	1	1	1	0-1
GB	3	2-3	2	2
SB	1			
im Freien ungeschützt				

Korrosionsgrad von Stahl

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	nicht entnommen			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
bei 100 % rel. Feucht				

KG	Narben- tiefe ¹⁾ in μm	mittl. Abtrag in μm	KO ²⁾ in %
0	0	0	0
1	<100	<25	<30
2	100-300	25-50	30-65
3	300-500	50-100	65-90
4	500-800	100-150	100
5	800-2000	150-300	100

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	○			
KLB	①	○		
HpB	②	②	1	1
GB	③	③	2-3	2
SB	①	○		
Chloridbehandlung 1				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	nicht entnommen			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
Chloridbehandlung 2				

Abb. 27: Korrosionsgrad von unlegiertem Stahl in Beton nach 1 Jahr

1) Narbentiefe: mittl. Wert der 3 tiefesten Narbe

2) KO : korrodierte Oberfläche

Chloridgehalt im Beton in Mass-%

Karbonatisierung

○ >0,3 ○ >0,2 ○ >0,1
 [] vorhanden [] teilweise

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB	0-1	0-1	1	1
GB	2	2	2	1
SB	0-1			
im Freien unter Dach				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1			
KLB	2	1		
HpB	2	1	1	1
GB	3-4	3	2-3	2
SB	1	1		
im Freien ungeschützt				

Korrosionsgrad von Stahl

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB	3	3	2-3	
GB	4-5	4	3-4	3
SB	0-1			
bei 100 % rel. Feucht				

KG	Narben- tiefe ¹⁾ in μm	mittl. Abtrag in μm	KO ²⁾ in %
0	0	0	0
1	<100	<25	<30
2	100-300	25-50	30-65
3	300-500	50-100	65-90
4	500-800	100-150	100
5	800-2000	150-300	100

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	(2)	○		
KLB	(4)	(1)		
HpB	(4)	(3)	2	1-2
GB	(4)	(4)	(4)	(4)
SB	(2)	(1)		
Chloridbehandlung 1				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				
Chloridbehandlung 2				

Abb. 28: Korrosionsgrad von unlegiertem Stahl in Beton nach 2,5 Jahren

1) Narbentiefe: mittl. Wert der 3 tiefesten Narbe

2) KO : korrodierte Oberfläche

Chloridgehalt im Beton in Mass- %

○ >0,3

○ >0,2

○ >0,1

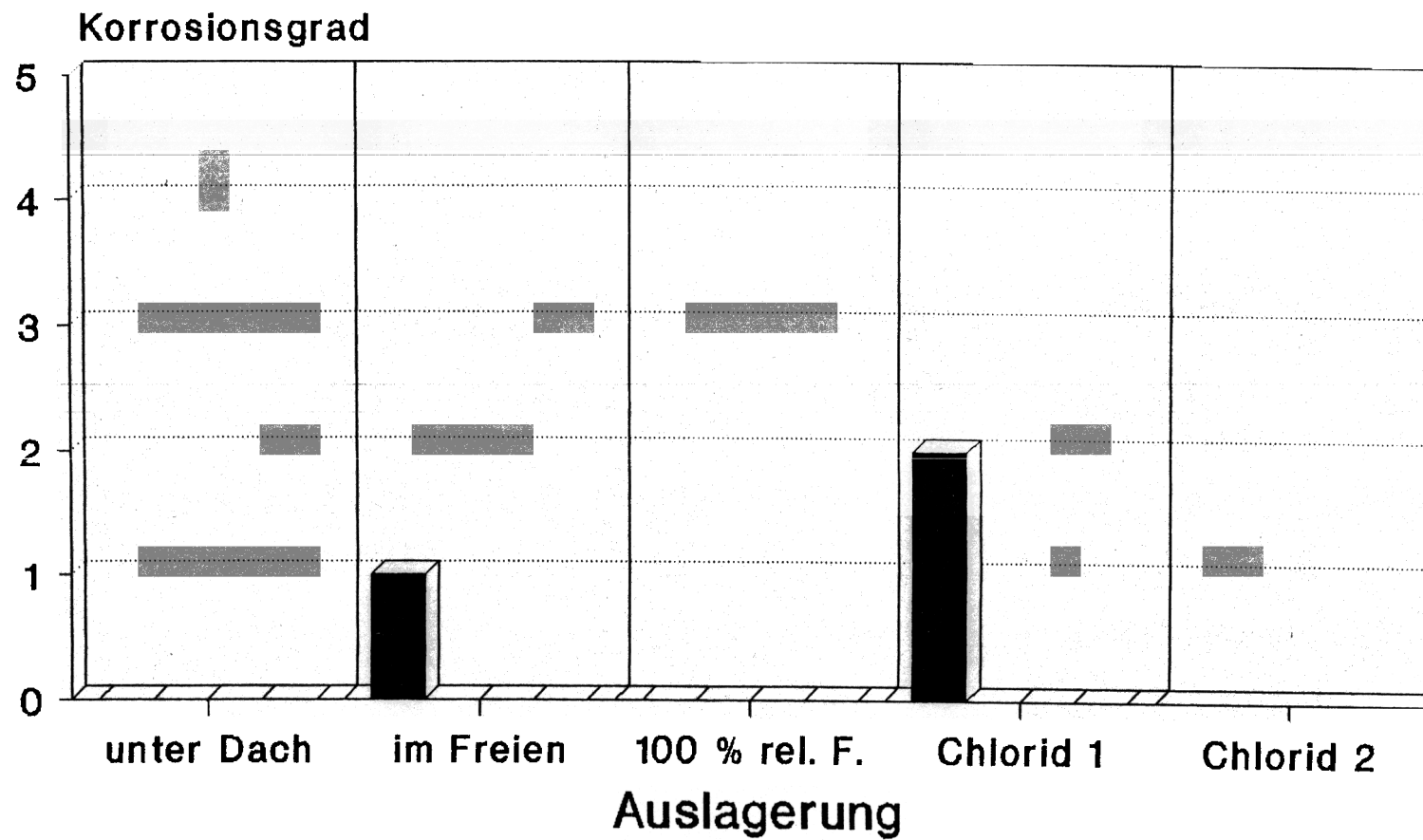
Karbonatisierung

□ vorhanden

□ teilweise

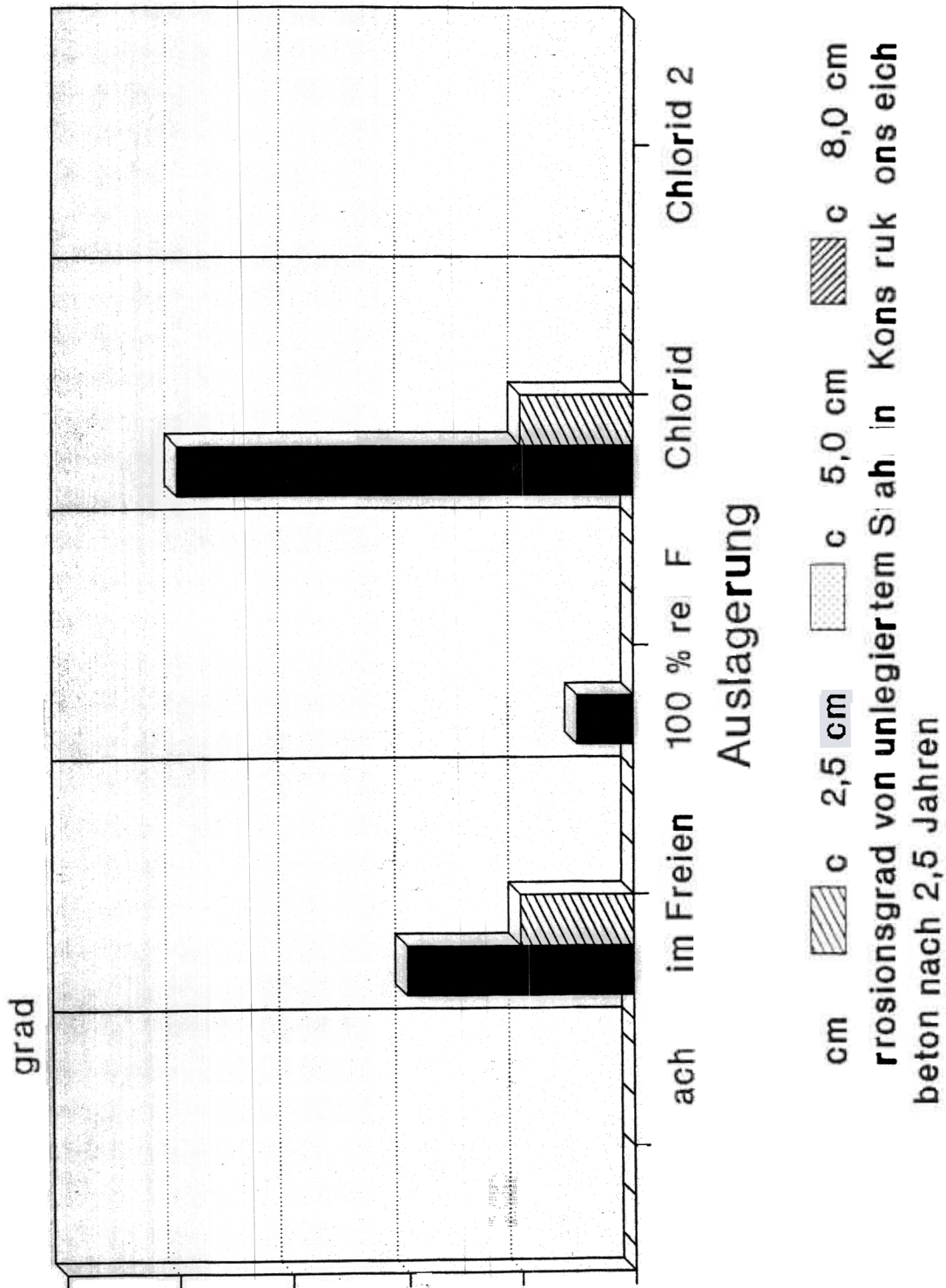
□ teilweise

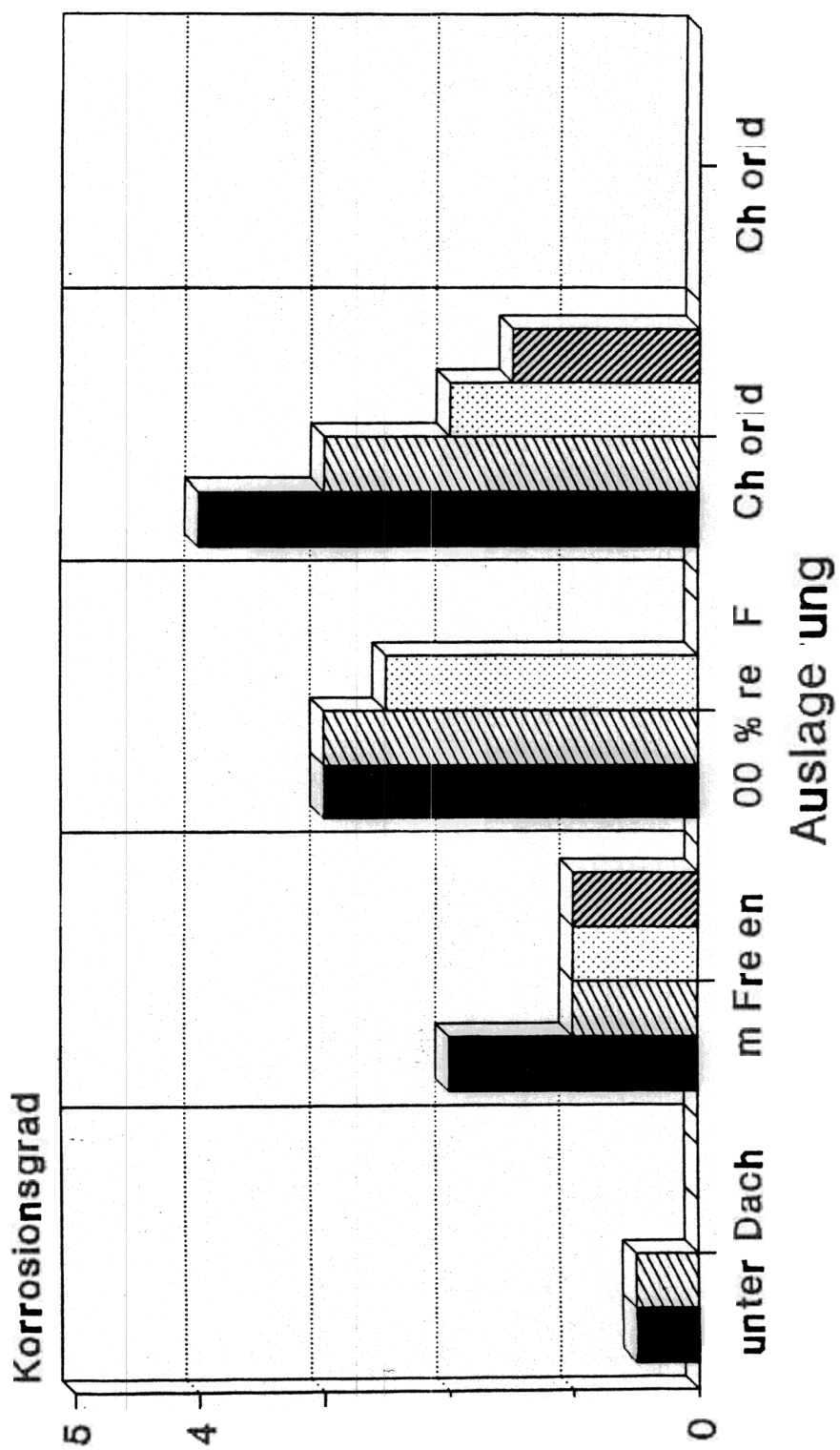
□ teilweise



■ c = 1,5 cm ▨ c = 2,5 cm ▩ c = 5,0 cm ▩ c = 8,0 cm

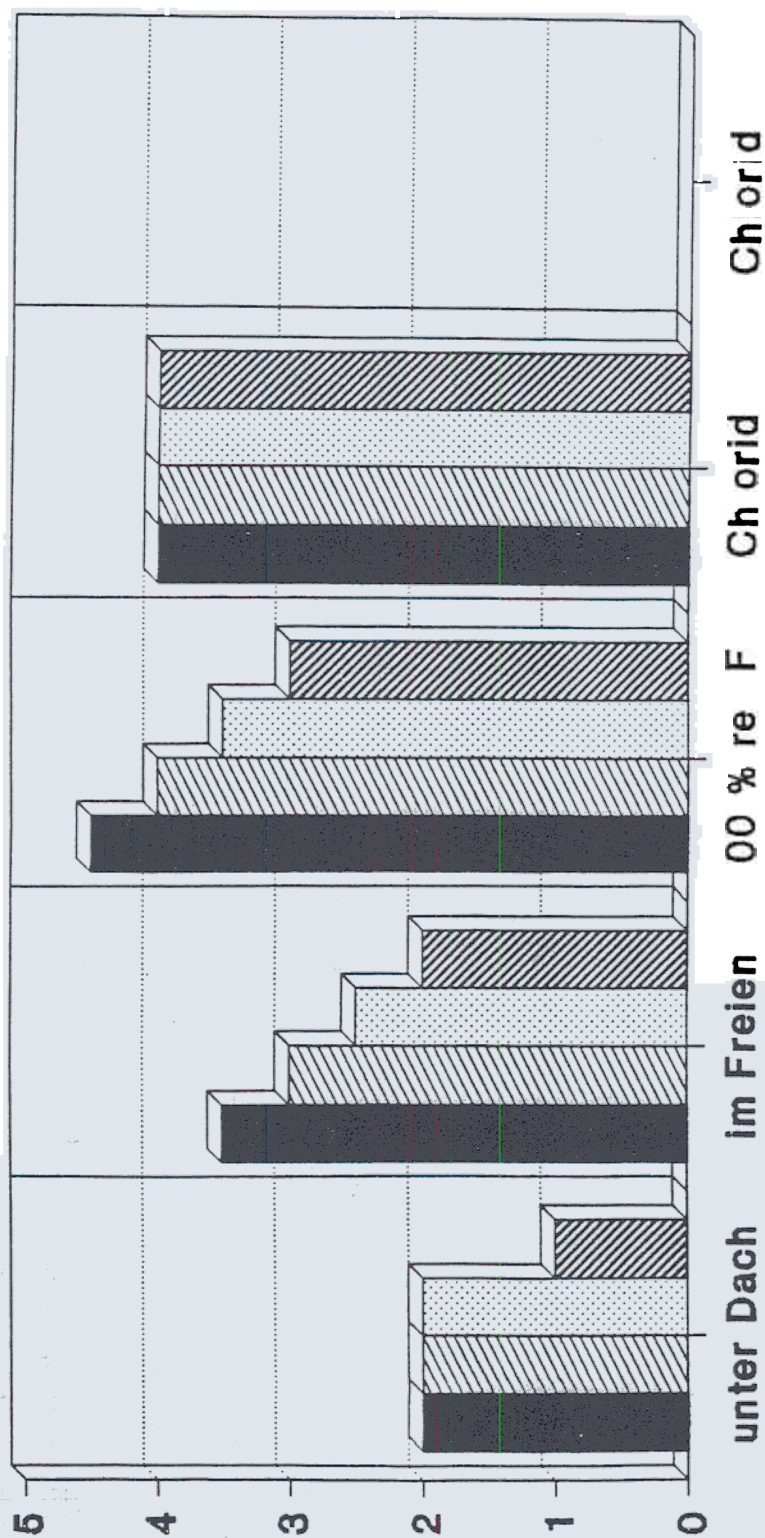
Abb. 29a: Korrosionsgrad von unlegiertem Stahl in Normalbeton nach 2,5 Jahren





■ c 1,5 cm ▨ c 5 cm ▤ c 80 cm
 Abb 9c: Korrosionsgrad von un egiertem ah in au werkspor igem
 Beton nach 5 Jahren

Korrosionsgrad



Ausagerung

c = 1,5 cm c 5 cm c 8 cm c 10 cm c 15 cm c 20 cm

Abb. 29d: Korrosionsgrad von unegiertem ah n Gasbeton nach 5 Jahren

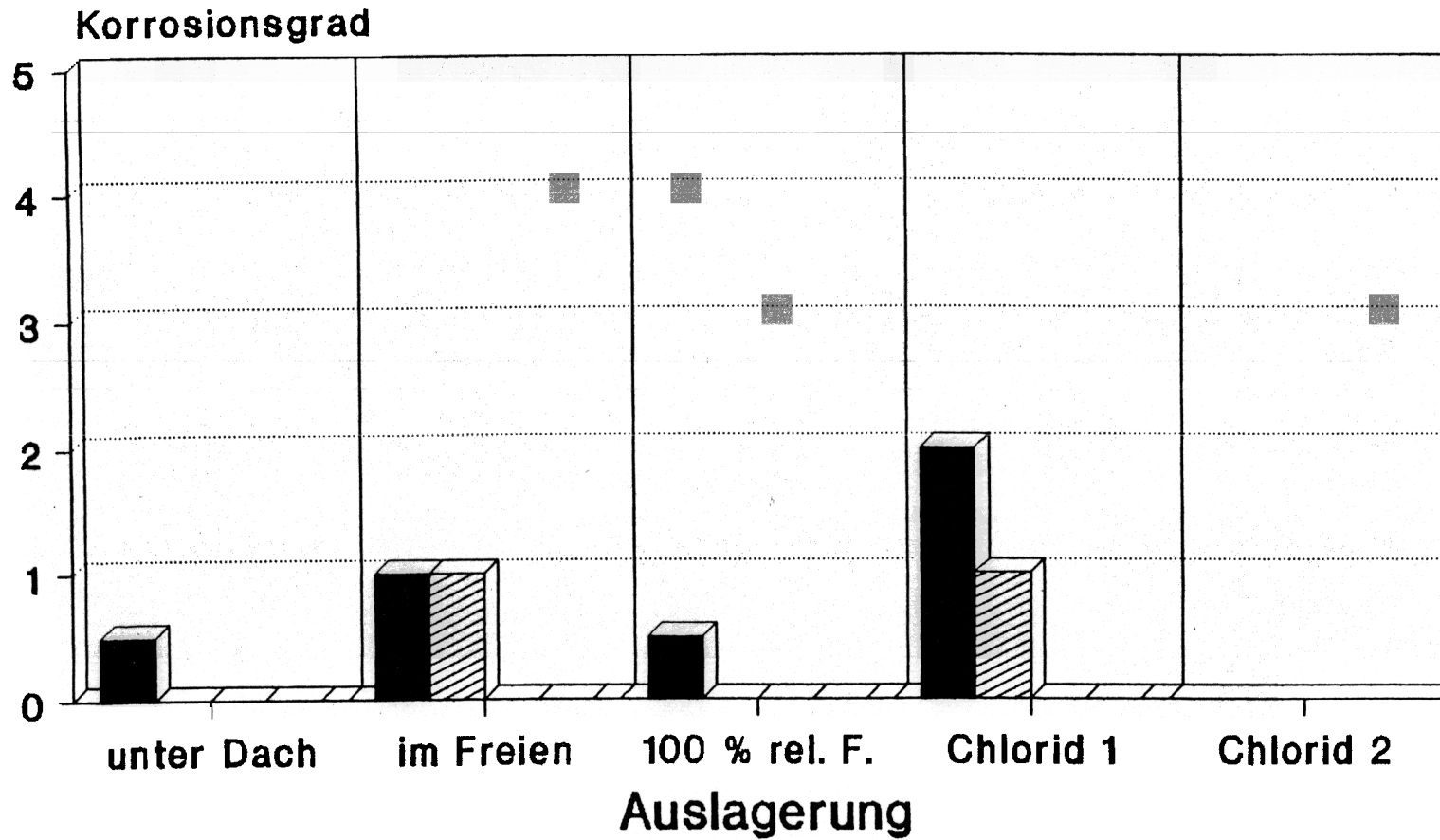


Abb. 29e: Korrosionsgrad von unlegiertem Stahl in Schaumbeton nach 2,5 Jahren

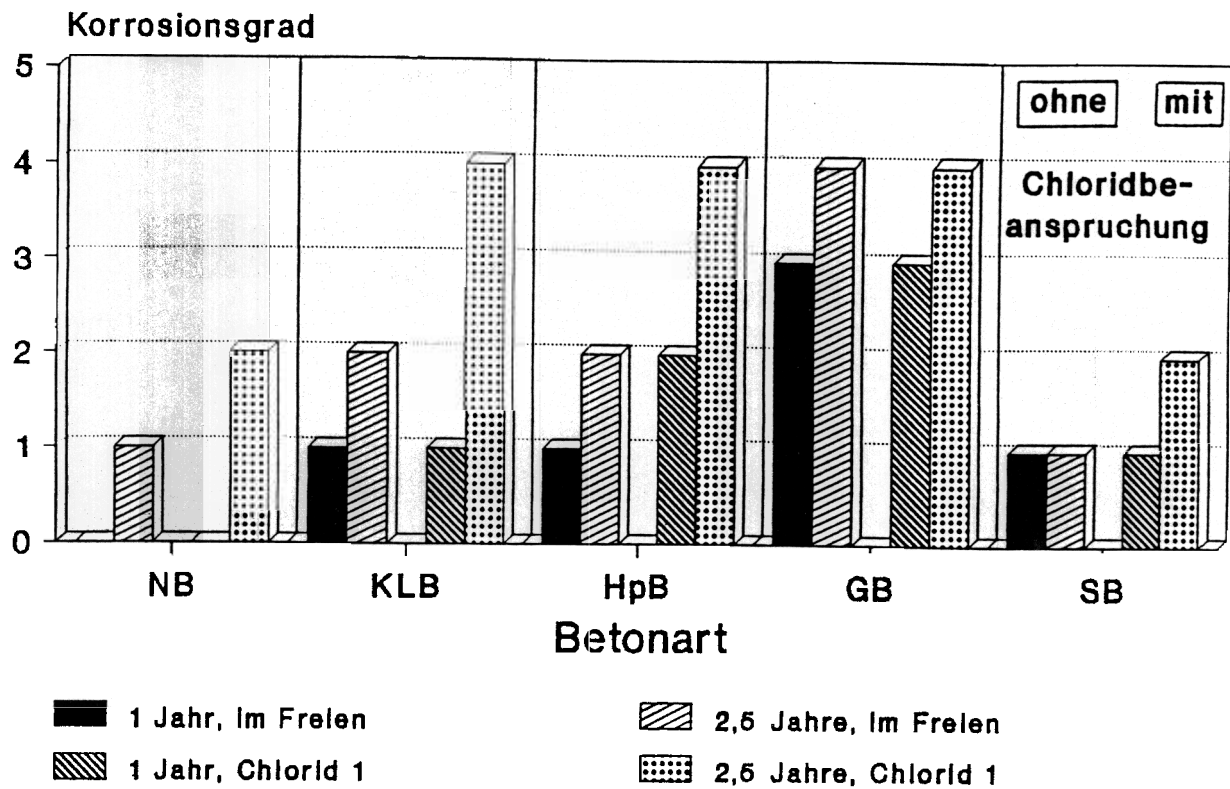


Abb.30a: Einfluß der Auslagerungsdauer auf den Korrosionsgrad von Stahl in Beton bei Lagerung im Freien und einer Betondeckung von 1,5cm

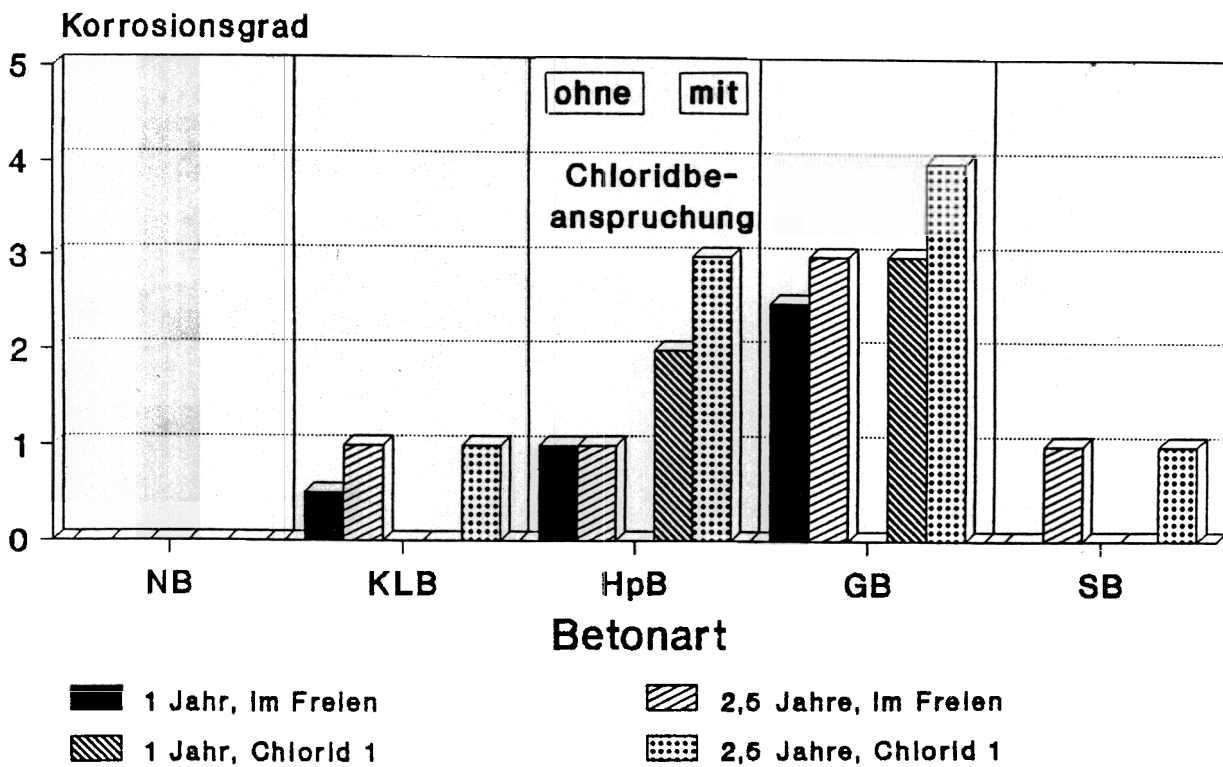


Abb.30b: Einfluß der Auslagerungsdauer auf den Korrosionsgrad von Stahl in Beton bei Lagerung im Freien und einer Betondeckung von 2,5cm

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	<div>nicht entnommen</div>			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
im Freien unter Dach				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1-2	1	1	1
KLB	1-2	1	1	1
HpB	1-2	1	1	1
GB	2	2-3	2	2
SB	1-2	1	1	1
im Freien ungeschützt				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	nicht entnommen			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
bei 100 % rel. Feucht				

Zinkabtrag von feuerver. Stahl

Zink- Abtrag	mittl. Abtrag in μm	mittl. Abtrag in %*
1	<10	<7
2	10-25	7-17
3	25-40	17-28
4	40-70	28-48
5	>70	>48

* bezogen auf 145 μm Zinkschicht

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1	1	1	1
KLB	1	1	1	1
HpB	2-3	2	2	1
GB	2	3-4	2	1
SB	2	1	1	1
Chloridbehandlung 1				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	nicht entnommen			
KLB				
HpB				
GB				
SB				
Chloridbehandlung 2				

Abb. 31: Zinkabtrag von feuerverzinktem Stahl in Beton nach 1 Jahr

Karbonatisierung

 vorhanden

 teilweise

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1	1	1	1
KLB	1	1	1	1
HpB	1	1	1	1
GB	3-4	2-3	2	1-2
SB	1	1	1	1
im Freien unter Dach				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1-2	1	1	1
KLB	1-2	1	1	1
HpB	1-2	1	1	1
GB	3	3	3	3
SB	1-2	1	1	1
im Freien ungeschützt				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	1	1	1	1
KLB	1	1	1	1
HpB	1-2	1	1	1
GB	3-4	3	3	3
SB	1	1	1	1
bei 100 % rel. Feucht				

Zinkabtrag von feuerverz. Stahl

Zink- Abtrag	mittl. Abtrag in μm	mittl. Abtrag in %*
1	<10	<7
2	10-25	7-17
3	25-40	17-28
4	40-70	28-48
5	>70	>48

* bezogen auf 145 μm Zinkschicht

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB	2	1	1	1
KLB	1-2	1	1	1
HpB	3	3	2	2
GB	3-4	4	3-4	3
SB	3-4	1	1	1
Chloridbehandlung 1				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				
Chloridbehandlung 2				

Abb. 32: Zinkabtrag von feuerverzinktem Stahl in Beton nach 2,5 Jahren

Karbonatisierung



vorhanden



teilweise

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				
im Freien unter Dach				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB	2	2-3	2-3	2-3
HpB	2	2	2	2
GB				
SB				
im Freien ungeschützt				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				
bei 100 % rel. Feucht				

Zinkabtrag von feuerverz. Stahl

Zink- Abtrag	mittl. Abtrag in μm	mittl. Abtrag in %*
1	<10	<7
2	10-25	7-17
3	25-40	17-28
4	40-70	28-48
5	>70	>48

* bezogen auf 145 μm Zinkschicht

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB	3	3	2-3	2-3
HpB	4-5	4	3	3
GB				
SB				
Chloridbehandlung 1				

Beton	Betondeckung in cm			
	1,5	2,5	5,0	8,0
NB				
KLB				
HpB				
GB				
SB				
Chloridbehandlung 2				

Abb. 33: Zinkabtrag von feuerverzinktem Stahl in Beton nach 2,5 Jahren (Alkalität künstlich auf pH 13,6 erhöht)

Karbonatisierung



vorhanden



teilweise

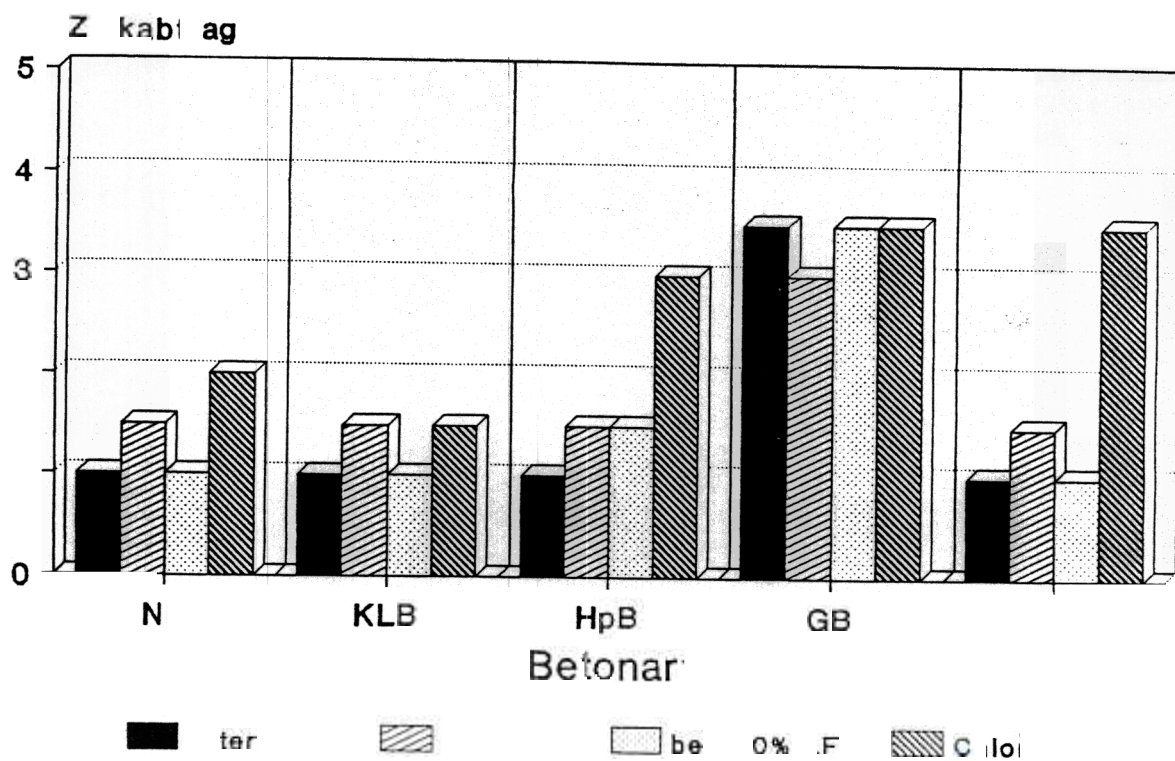
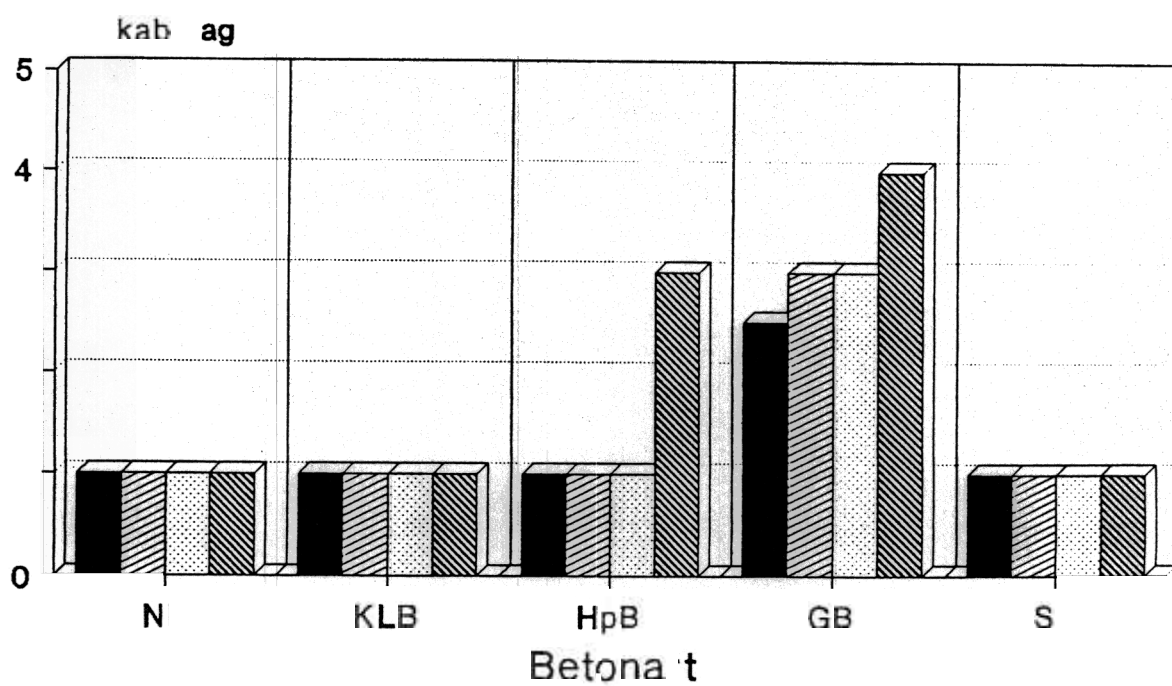


Abb. 34 ab ervei inktem S ah in Beto ah
ei ei Betondec 1, m



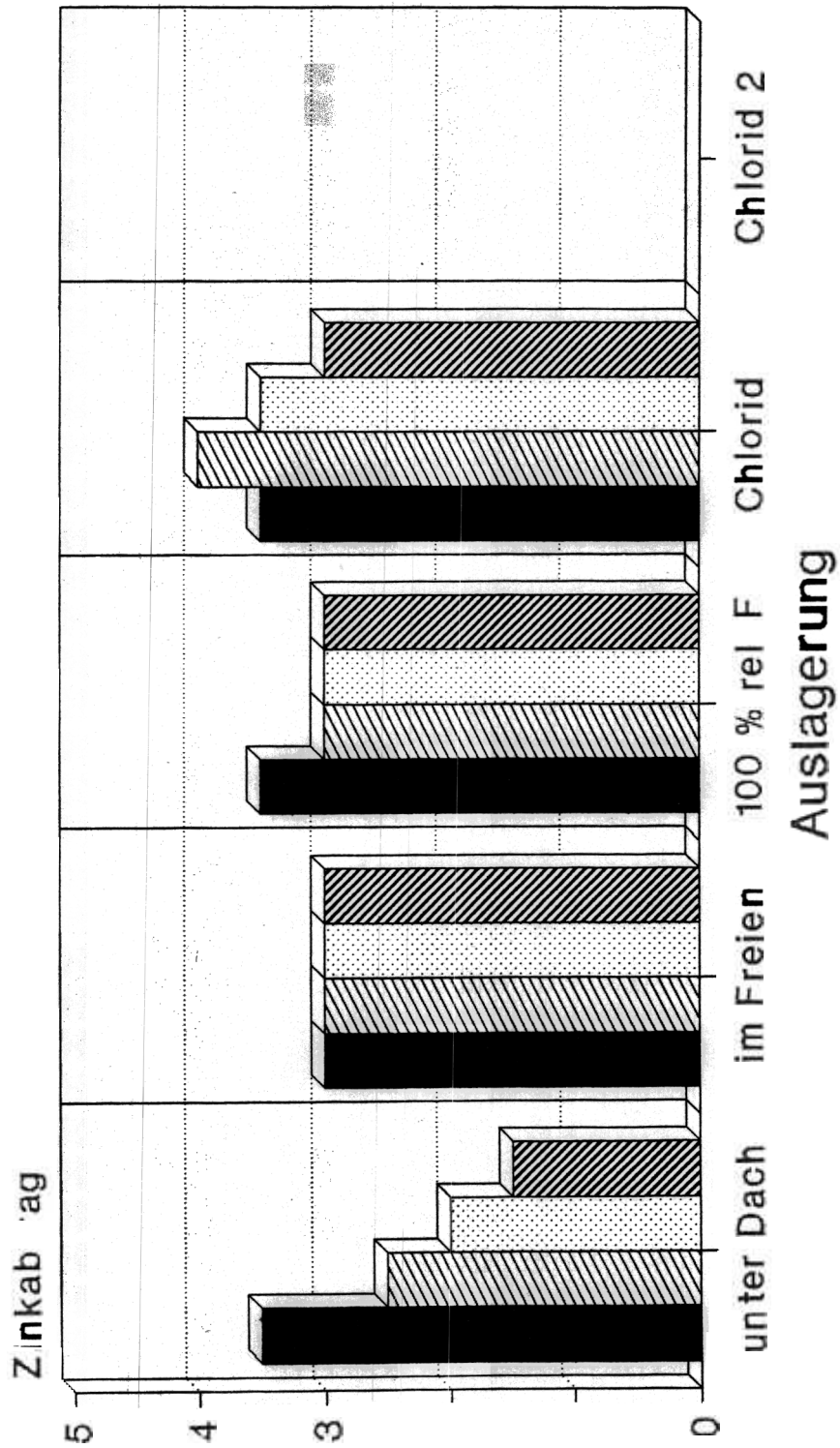


Abb 35 Zinkabtrag von euerverzinktem Sta in Gasbeton nach 25 Jahren