

# **Auswirkung von Chloriden im Beton, Abhängigkeit von Betoneigenschaften**

**Prof. Dr.-Ing. Michael Raupach**

**Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, IBAC,**

## **1 Einführung**

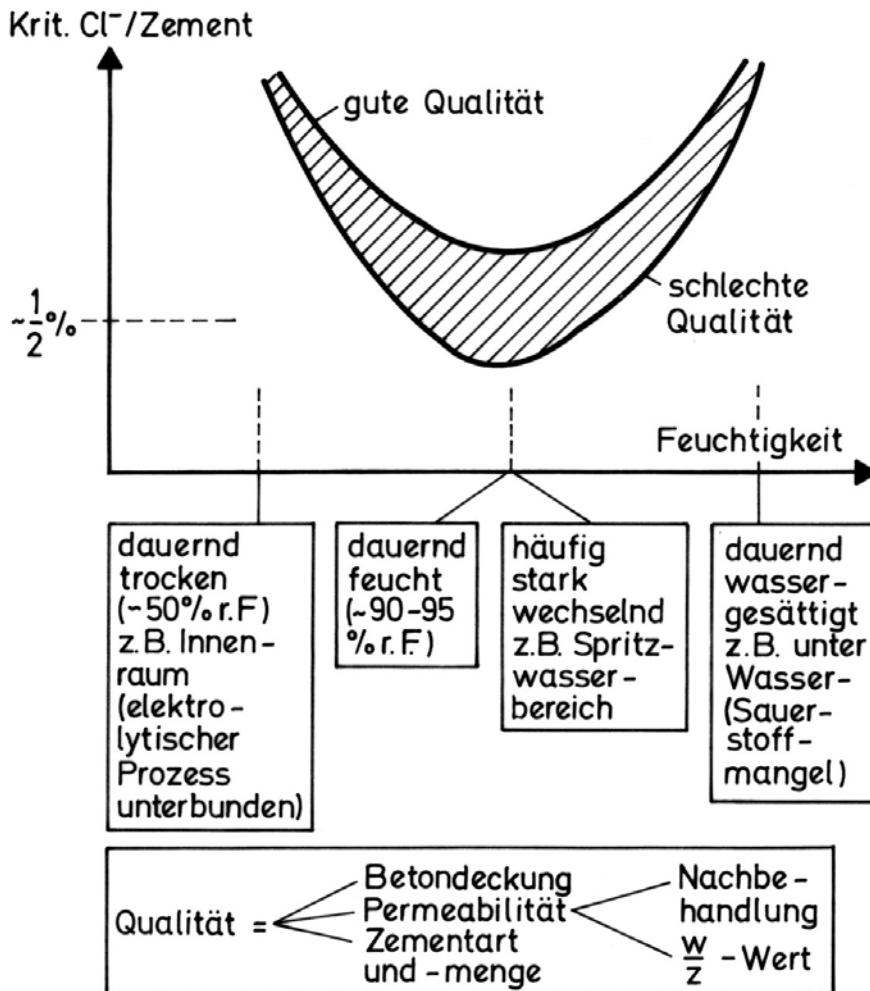
Stahl ist bekanntermaßen in ordnungsgemäß zusammengesetztem Beton vor Korrosion geschützt, auch wenn ausreichend Feuchtigkeit und Sauerstoff zur Verfügung stehen. Dieser Korrosionsschutz ist auf die Alkalität des Porenwassers des Betons zurückzuführen. Betone normaler Zusammensetzung weisen pH-Werte zwischen etwa  $\text{pH} = 12,5$  und  $\text{pH} = 13,5$  auf. Unter diesen Bedingungen bildet sich auf der Stahloberfläche eine mikroskopisch dünne Eisenoxidschicht (Passivschicht), die die Eisenauflösung bis auf vernachlässigbar kleine Werte unterdrückt.

Diese Passivität kann unter baupraktischen Bedingungen im wesentlichen infolge von zwei Prozessen verlorengehen, die vorwiegend die chemischen bzw. die elektrochemischen Eigenschaften des Betons beeinflussen:

- Karbonatisierung des Betons mit der Folge einer Absenkung des pH-Wertes unter 10 oder
- Chloride im Porenwasser über einem kritischen Grenzwert.

In diesem Bericht wird nur die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton behandelt. Tuutti /1/ hat ein Schema für Schäden an der Bewehrung infolge von Stahlkorrosion vorgestellt, aus dem abgelesen werden kann, daß die Einleitungsperiode – Karbonatisierung oder Eindringen von Chloriden oder beides – getrennt von der eigentlichen Schädigungsperiode betrachtet werden muß, da beide Prozesse größtenteils von unterschiedlichen Einflußparametern abhängig sind. In den folgenden Kapiteln wird nur die eigentliche Schädigungsphase behandelt.

In einer Vielzahl von Untersuchungen sind sehr unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des kritischen Chloridgehaltes ermittelt worden. Manche dieser häufig widersprüchlichen Versuchsergebnisse können durch die Untersuchungsmethoden erklärt werden. Wegen der äußerst komplexen Zusammenhänge können nach wie vor keine präziseren Angaben zum kritischen Chloridgehalt als die in Bild 1 gegebenen qualitativen Zusammenhänge gegeben werden. Zur Bewertung des kritischen Chloridgehaltes für ein spezielles Bauwerk müssen deshalb die jeweils spezifischen Bedingungen bezüglich der Einflußparameter auf der Materialeite und auf der Mikroklimaseite unter Berücksichtigung der möglichen Korrosionsmechanismen (s. nächster Abschnitt) berücksichtigt werden.



L915R043/Rau/Ka

Bild 1: Einfluß der Betondeckung und der Umgebungsbedingungen auf den kritischen Chloridgehalt im Beton

## 2 Kritischer Chloridgehalt

Der kritische Chloridgehalt kann auf unterschiedliche Weise definiert werden:

- A Der kritische Chloridgehalt, bei dem die Bewehrung passiviert wird, unabhängig davon, ob diese Depassivierung zu sichtbarer Korrosion oder zu einem Schaden führt.
- B Ein kritischer Chloridgehalt, der im Laufe der Zeit zu Korrosionserscheinungen führt, die als Schaden eingestuft werden.

Der kritische Chloridgehalt nach Definition B kann wesentlich höher sein als der nach Definition A, da ein Korrosionsschaden immer nur dann eintritt, wenn nach der Depassivierung Bedingungen gegeben sind, die eine ausreichend hohe Korrosionsrate an der Bewehrung erzeugen (Vorhandensein von Sauerstoff und Wasser).

In der Literatur wird der „kritische Chloridgehalt“ in der Regel entsprechend Definition A ermittelt (z. B. /2/), insbesondere wenn er aus Laborversuchen abgeleitet wird. Bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit und des Zustandes bestehender Bauwerke wird allerdings auch

häufig Definition B herangezogen /3/. Diese Differenzierung muß berücksichtigt werden, um Fehlinterpretationen bei der Bewehrung von Literaturangaben zu vermeiden.

Nach anerkanntem Stand der Erkenntnisse ist der kritische Chloridgehalt kein Festwert, sondern hängt sowohl von der Qualität der Betondeckungsschicht (Art des Zements, Wasserzementwert, Nachbehandlung, Dicke) als auch von den Umgebungsbedingungen ab. Bild 1 zeigt diese Zusammenhänge qualitativ. Der häufig zitierte und auch kritisierte Chloridgehaltsgrenzwert von 0,4 M.-% bezogen auf Zement ist in /4/ abgeleitet worden (sogenanntes Richards-Kriterium). Dabei wurde aber lediglich die Bindekapazität von Chlorid in Portlandzementen in Form von Friedel'schem Salz untersucht, nicht jedoch die ggf. damit zusammenhängende Korrosionsauswirkung für die Bewehrung. Allerdings liegt der Grenzwert von 0,4 % i. d. R. auf der sicheren Seite, häufig können allerdings wesentlich höhere Chloridgehalte unschädlich sein.

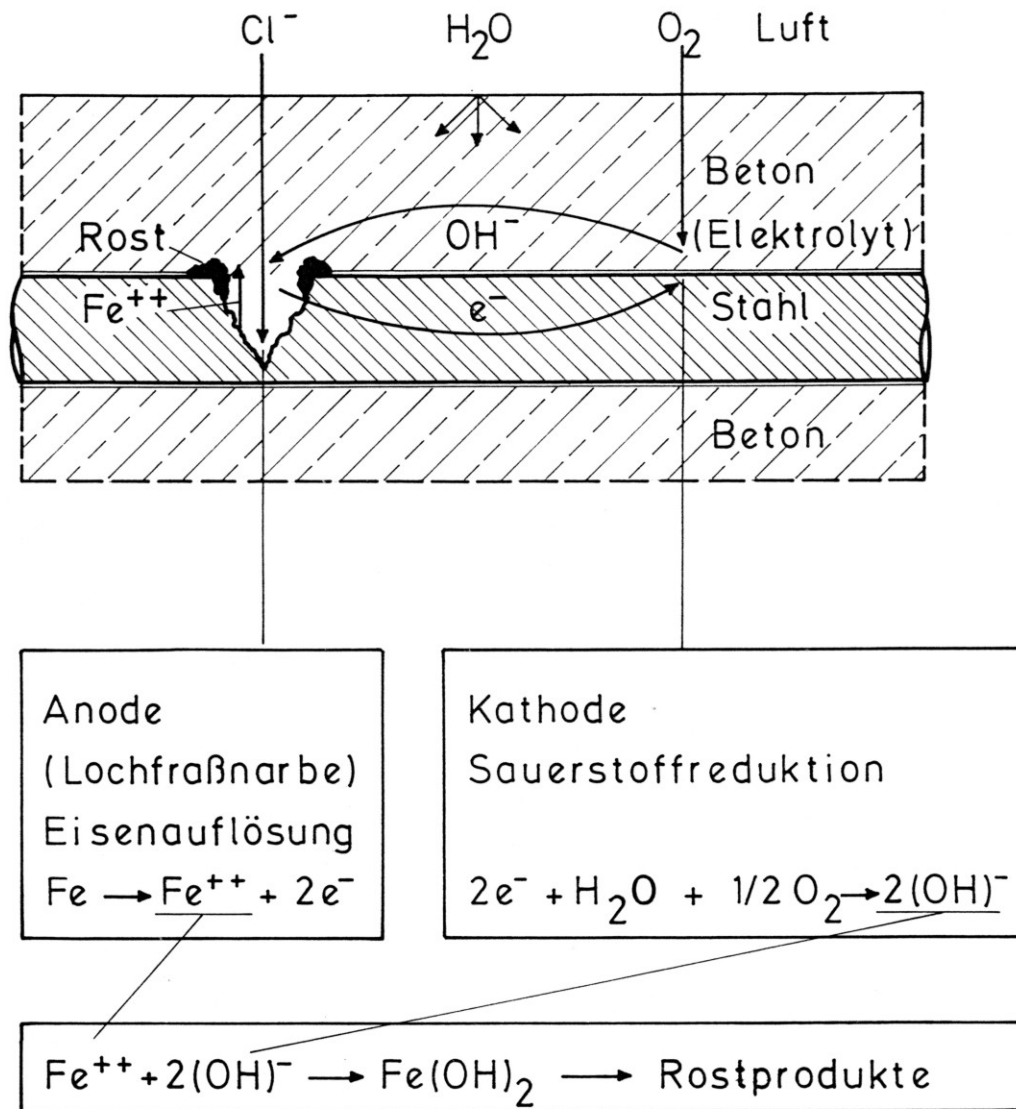
Ein umfassender Sachstandsbericht wurde von Breit in /5/ zur Thematik des kritischen Chloridgehaltes auf Basis einer ausführlichen Literaturstudie sowie umfangreichen Untersuchungen erstellt, die am  $\text{IB}=\text{C}$  durchgeführt wurden.

### **3 Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton**

#### **3.1 Mechanismen**

Gleichmäßige Korrosion auf Stahloberflächen ist i. d. R. die Folge einer Vielzahl von kleinen Korrosionszellen an der Stahloberfläche. Eine Korrosionszelle ist vereinfacht gesprochen im wesentlichen eine kurzgeschlossene Batterie, bestehend aus einer metallisch und elektrolytisch verbundenen Anode und Kathode. Anders als der Prozeß in einer aufladbaren Batterie ist der Korrosionsprozeß nicht umkehrbar. Die Spannung in einer Korrosionszelle ergibt sich durch Potentialunterschiede auf der Stahloberfläche. Die Potentialdifferenzen, die für die Korrosion erforderlich sind, können durch örtlich unterschiedliche Betonzusammensetzung, unterschiedliche Belüftungsbedingungen, Walzhautrückstände auf der Stahloberfläche und andere Einflüsse verursacht werden. Im Falle von Stahl in Beton sind solche Potentialunterschiede immer vorhanden,. Insbesondere bei chloridinduzierter Korrosion fällt nach örtlicher Depassivierung das Potential im Bereich der Korrosion ab, so daß sich gegenüber den Nachbarbereichen große Potentialunterschiede in der Höhe von mehreren 100 mV aufbauen, die die Korrosion in Gang halten. Korrosionszellen, wo die Potentialunterschiede durch Kombination unterschiedlicher Metalle erzeugt werden, bezeichnet man als Kontaktkorrosionselemente. Liegen unterschiedliche Konzentrationen bestimmter Bestandteile des Elektrolyten vor, in diesem Fall die Porenwasserzusammensetzung des Betons, spricht man von Konzentrationselementen. Elemente mit unterschiedlichen Gehalten an Sauerstoff entlang der Stahloberfläche werden als Belüftungselemente bezeichnet.

Wie in Bild 2 gezeigt, kann der Korrosionsprozeß in zwei Teilprozesse aufgeteilt werden:



L915R044/Rau/Ka

Bild 2: Schematische Darstellung chloridinduzierter Korrosion von Stahl in Beton

- An der Anode gehen Eisenionen in Lösung, Elektronen bleiben im Stahl zurück. In weiteren Reaktionsschritten im Elektrolyten werden die positiv geladenen Eisenionen in Rostprodukte verwandelt.
- An der Kathode werden an der Grenzfläche Stahl/Elektrolyt mit den überschüssigen Elektronen aus dem anodischen Prozeß mit Wasser und Sauerstoff Hydroxylionen gebildet. Der kathodische Teilprozeß erzeugt keine Schädigung am Stahl.

Die Hydroxylionen transportieren die negative Ladung im Elektrolyten infolge des elektrischen Feldes, das zwischen der Anode und der Kathode (Ursache Potentialunterschied) gebildet wird, in Richtung der Anode. In der Nähe der Anode reagieren Hydroxylionen mit den Stahlionen im Elektrolyten. Abhängig vom Wassergehalt und den Belüftungsbedingungen sind die Rostprodukte mehr oder weniger wasserreich.

Zum Ablauf von Korrosion sind fünf Voraussetzungen für den anodischen und kathodischen sowie für den elektrolytischen Prozeß erforderlich. Alle müssen gleichzeitig erfüllt sein, um Korrosion zu ermöglichen.

- Wie bereits bemerkt, müssen Potentialunterschiede vorhanden sein. Diese Voraussetzung ist praktisch immer gegeben, insbesondere nach Depassivierung durch Chloride.
- Die anodisch und kathodisch wirkenden Oberflächenzonen der Bewehrung müssen sowohl elektrisch als auch elektrolytisch miteinander verbunden sein, d. h., sowohl der elektrische als auch der elektrolytische Stromfluß muß möglich sein.
- Die elektrolytische Verbindung ist durch den Beton gegeben. Um eine ausreichend elektrolytische Leitfähigkeit zu gewährleisten, muß der Beton einen ausreichenden Wassergehalt aufweisen. In trockenen Innenräumen beispielsweise ist die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons so gering, daß Korrosionsraten vernachlässigbar klein sind, wenn beispielsweise die Karbonatisierung die Oberfläche der Bewehrung erreicht hat und der alkalische Schutz verlorengegangen ist.
- Die anodische Eisenauflösung muß infolge von Depassivierung der Stahloberfläche möglich sein (infolge Karbonatisierung oder Chlorid). Der kathodische Teilprozeß kann aber auch in Bereichen ablaufen, die noch mit einer Passivschicht ausgestattet sind.
- Letztendlich muß ausreichend Sauerstoff an der Kathode vorhanden sein und dieser Sauerstoff muß kontinuierlich von der Betonoberfläche zur Stahloberfläche nachdiffundieren können. In Unterwasserbauteilen ist deshalb praktisch keine Korrosionsgefahr gegeben, auch wenn Chloridgehalte sehr hoch sind.

Die Erscheinungsformen von Korrosion von Stahl in Beton können in gleichmäßige Korrosion und örtliche Lochfraßkorrosion eingeteilt werden. Im Fall der Lochfraßkorrosion treten kraterförmige, tiefgehende Abrostungen auf, an deren Rändern die Stahloberflächen blank bleiben.

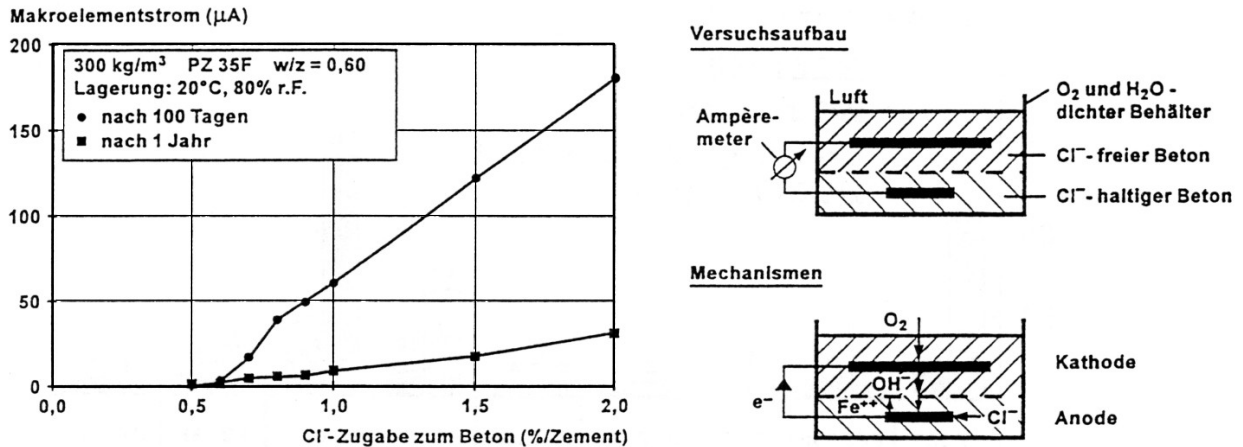
Gleichmäßige Korrosionsabtragung tritt i. d. R. bei Karbonatisierung des Betons auf, wenn die Karbonatisierung über größere Flächen die Oberfläche des Stahls erreicht hat. Auch bei sehr hohen Chloridgehalten kann gleichmäßige Korrosion auftreten. In diesem Fall bilden sich sogenannte Mikrozellen, bei denen anodisch und kathodisch wirkende Oberflächenbereiche unmittelbar nebeneinander liegen.

Lochfraßkorrosion tritt grundsätzlich bei chloridinduzierter Korrosion auf. In diesem Fall bilden sich sogenannte Makrozellen, bei denen die Lochfraßstellen als Anoden wirken und die Nachbarbereiche der Bewehrung als Kathoden. Anoden und Kathoden können auch sehr weit auseinander liegen. In /6/ wird über eine Makrokorrosionszelle in einer Stützwand berichtet, wo Anoden und Kathoden mehrere Meter auseinander lagen.

Die Korrosionsraten in den anodischen Bereichen von Makrozellen sind grundsätzlich sehr viel größer als bei der Mikrozellenkorrosion, da die Anoden der Makrozellen i. d. R. sehr klein im Verhältnis zu den Kathoden sind, was zu hohen Stromdichten im Anodenbereich und somit zu hohen Korrosionsraten führt. Die mögliche Größe von Makrokorrosionselementen hängt hauptsächlich von der elektrolytischen Leitfähigkeit des Betons, d. h., von seinem Wassergehalt und von der Permeabilität des Betons sowie der chemischen Zusammensetzung des Porenwassers ab. In trockenen oder extrem undurchlässigen Betonen bleiben Makrokorrosionselemente klein. Makrokorrosionselemente können auch im Fall der karbonatisierungsinduzierten Korrosion auftreten, wenn ungleiche Durchfeuchtung oder ungleiche Belüftung auftreten oder wenn nur sehr lokalisiert, z. B. im Bereich von Rissen oder Kiesnestern in Beton, örtliche Depassivierungen auftreten. Auch in diesem Fall sind die Korrosionsraten höher als

bei gleichmäßig abtragender Korrosion, weil die Kathodenflächen sehr viel größer werden können als die Anodenflächen.

Erwartungsgemäß hat der Chloridgehalt im Beton einen wesentlichen Einfluß auf die Korrosionsgeschwindigkeit. Wenn der Chloridgehalt einen kritischen, korrosionsauslösenden Grenzwert überschritten hat, stellt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Korrosionsgeschwindigkeit und Chloridgehalt ein (s. Bild 3).



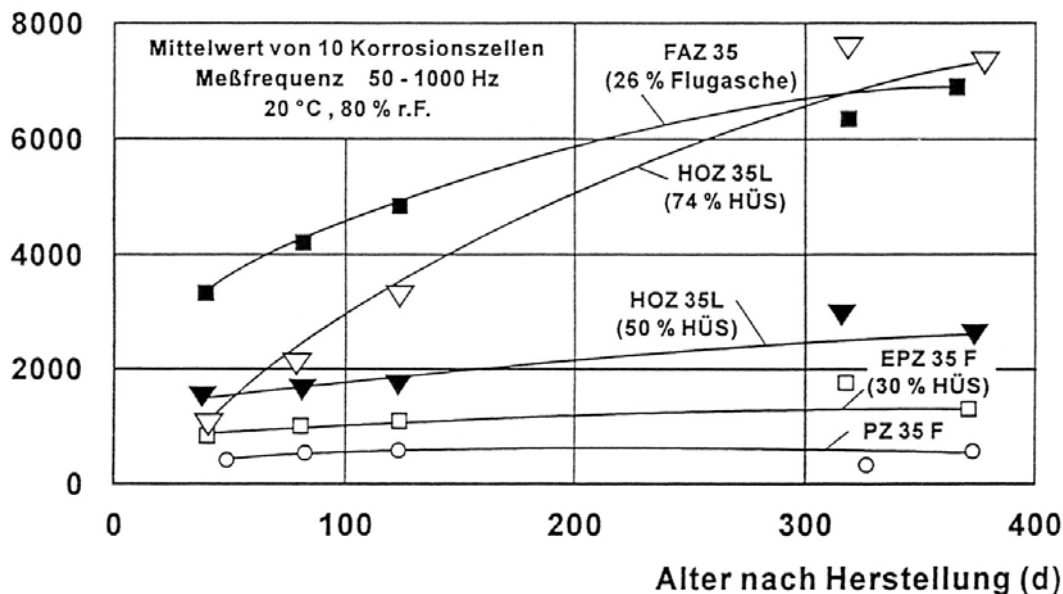
L915R039/Rau/Ka

Bild 3: Einfluß des Chloridgehaltes des Betons auf die Korrosionsgeschwindigkeit in Betonkorrosionszellen nach /7/

### 3.2 Einfluß der Betonzusammensetzung

Untersuchungen zum Einfluß des Korrosionsverhaltens von Stahl in Beton mit Hilfe von Polarisationswiderstandsmessungen haben gezeigt, daß die Korrosionsgeschwindigkeit für Hochofenzemente kleiner ist als für Portlandzemente, wenn die Betonzusammensetzung ansonsten unverändert ist /8, 9/. Betonkorrosionszellenmessungen haben dieses Ergebnis bestätigt; bei einer Zugabe von 2 % Chlorid, bezogen auf den Zementgehalt, ist die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich kleiner, wenn Hochofenzement verwendet wird und wenn der Hüt tensandgehalt zunimmt /7/. Ein Grund für diesen Einfluß ist die Zunahme des elektrolytischen Widerstandes des Betons (s. Bild 4). In gleicher Weise können Flugaschezusätze die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich reduzieren. Bild 4 zeigt, daß infolge der langsamen puzzolanischen Reaktion im Falle eines Flugaschezementes mit 26 % Flugasche der elektrolytische Widerstand innerhalb eines Jahres in etwa die gleiche Größenordnung erreicht hat als ein Hochofenzement mit 74 % Hüt tensand. Neben dem elektrolytischen Widerstand hat aber vermutlich auch der anodische Polarisationswiderstand eine entscheidende Rolle gespielt, wo hingegen davon ausgegangen werden kann, daß der kathodische Polarisationswiderstand von der Betonzusammensetzung nur unwesentlich beeinflußt wird /10/. Bezüglich des Einflusses der Betonzusammensetzung auf die anodische Reaktionsgeschwindigkeit (Chloriddiffusion zu den Korrosionsnarben, Beweglichkeit der Korrosionsprodukte usw.) ist allerdings weiterer Forschungsbedarf gegeben.

## Elektrolytwiderstand ( $\Omega$ )

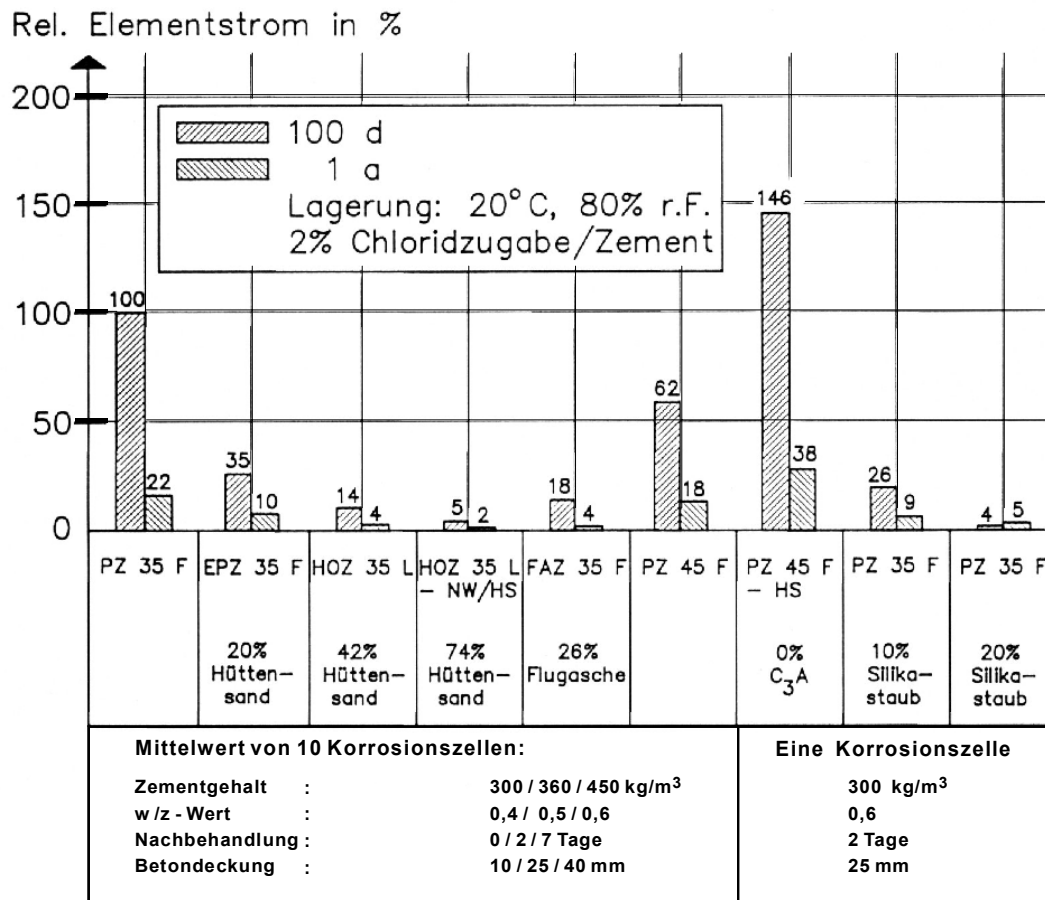


L915R040/Rau/Ka

Bild 4: Einfluß von Hüttensand und Flugasche auf den Elektrolytwiderstand von Beton nach /14/

Die Zugabe von Silica-Staub unter Einsatz von Fließmittel reduziert ebenfalls die Permeabilität des Betons. Verglichen zu Portlandzement ohne Silica-Staub kann der Elektrolytwiderstand des Betons mit 20 % Silica-Staub bis zu einem Faktor von 40 zunehmen /7/. Bei hohen Silica-Staub-Gehalten ist die Korrosionswahrscheinlichkeit deshalb gering, weil die geringe elektrolytische Leitfähigkeit höhere Korrosionsraten praktisch ausschließen. Aber auch schon mit kleinen Mengen an Silica-Staub im Beton wird das Korrosionsverhalten nach der Depassivierung sehr günstig beeinflusst /15/.

Neben den obengenannten Einflußparametern spielt der  $C_3A$ -Gehalt des Betons eine wichtige Rolle. Wie bereits erläutert, nimmt die Chloridbindekazität mit abnehmendem  $C_3A$ -Gehalt deutlich ab. Der Elektrolytwiderstand wird dagegen vom  $C_3A$ -Gehalt nicht in gleichem Maße beeinflusst wie beispielsweise die Verwendung von Hüttensand, Flugasche oder Silica-Staub /11, 12/. Wie infolge der Diskussion um die Chloridbindefähigkeit zu erwarten, nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich ab, wenn der  $C_3A$ -Gehalt des Zements zunimmt /9, 13, 14/. Bei gleichzeitigem Chlorid- und Sulfatangriff ist deshalb die Verwendung von hütten-sandreichen Hochofenzementen einer Verwendung von  $C_3A$ -armen Portlandzementen vorzuziehen. Ergebnisse von Korrosionszellenuntersuchungen mit unterschiedlichen Beton-zusammensetzungen sind in Bild 5 zusammengefaßt.



L915R042/Rau/Ka

Bild 5: Versuchsergebnisse zum Einfluß der Zementart und von Betonzusatzstoffen auf den Makrokorrosionsstrom /7/

Die Korrosionsraten bei chloridinduzierter Korrosion werden auch vom Wasserzementwert, den Zuschlägen, der Betondeckung und der Nachbehandlung beeinflusst. Auslagerungsversuche /16/ und Elementstrommessungen /17/ haben gezeigt, daß die Korrosionsgeschwindigkeit mit abnehmendem Wasserzementwert kleiner wird, was mit der bekannten Reduktion der Permeabilität des Betons erklärt werden kann.

Während der Auslagerungsversuche, die in /16/ beschrieben sind, wurde beobachtet, daß die Korrosion infolge Chlorideindringung signifikant mit zunehmender Betondeckung abnahm. Dies kann z. T. mit dem abnehmenden Chloridkonzentrationsprofil von der Betonoberfläche zum Betoninneren erklärt werden. Allerdings wird das gleiche Phänomen auch beobachtet, wenn Chloride direkt dem Frischbeton zugegeben werden, d. h., wenn eine gleichmäßige Chloridverteilung vorliegt /10/. Die Ursache für diesen Effekt sind bislang noch nicht eindeutig nachgewiesen, die Belüftung an der Anode kann u. U. eine entscheidende Rolle spielen. Durch rechnerische Nachweise und entsprechende Versuche konnte gezeigt werden, daß die Sauerstoffversorgung zur Kathode als Ursache ausgeschlossen werden kann, wenn nicht praktisch wassergesättigter Beton vorliegt.

Versuche, die sich mit dem Einfluß der Nachbehandlung auf die Korrosionsgeschwindigkeit von chloridinduzierter Korrosion beschäftigen, sind bislang nicht bekannt geworden. Da allerdings die Permeabilität des Betons in der Oberflächenzone bekanntermaßen mit zuneh-



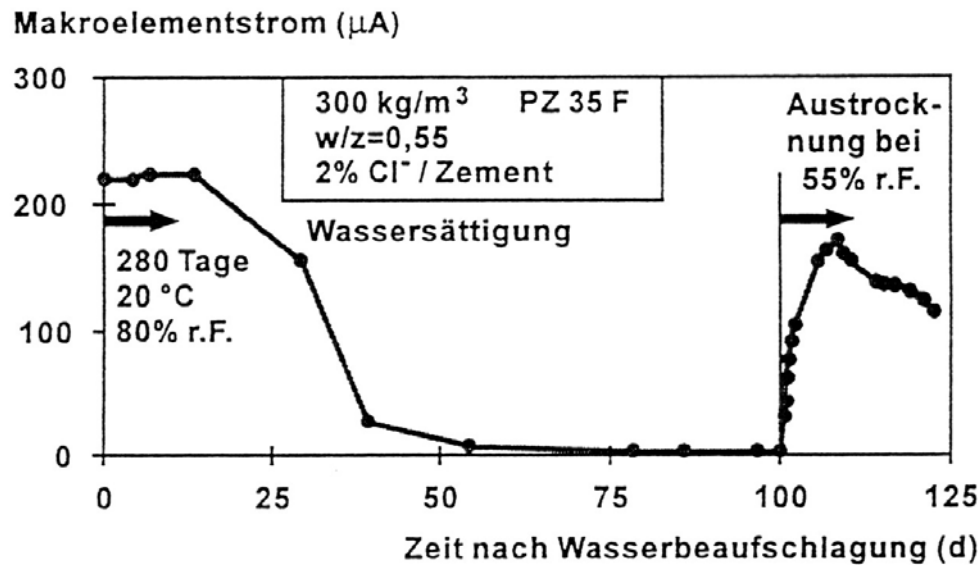
mender Nachbehandlungsdauer abnimmt, kann man aufgrund von Versuchsergebnissen zum Wasserzementwert annehmen, daß sich gut nachbehandelte Betone besser verhalten werden als schlecht nachbehandelte Betone, wenn chloridinduzierte Bewehrungskorrosion einsetzt.

### **3.3 Einfluß des Mikroklimas an der Betonoberfläche**

In /18/ wurde nachgewiesen, daß der Einfluß der Temperatur auf die Korrosionsgeschwindigkeit mit der Arrhenius-Gleichung beschrieben werden kann. Dabei wirkt sich die Temperatur in unterschiedlicher Weise auf den Elektrolytwiderstand, den anodischen und den kathodischen Polarisationswiderstand aus. Den maßgebenden Einfluß hat die Temperaturabhängigkeit des Elektrolytwiderstandes. Bei einer Erhöhung der Temperatur von 20 °C auf 30 °C kann maximal mit einer Verdoppelung der Korrosionsgeschwindigkeit gerechnet werden.

Erwartungsgemäß zeigen Untersuchungen zum Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes des Betons, daß die Korrosionsgeschwindigkeiten auch bei chloridinduzierter Korrosion mit zunehmender Feuchtigkeit erheblich zunehmen (z. B. /7/). Allerdings kann eine Wassersättigung des Betons zu einem Sauerstoffmangel führen, der die Korrosionsgeschwindigkeit auf vernachlässigbar kleine Werte reduziert. Wenn der im Beton befindliche Sauerstoff aufgebraucht ist, werden die Korrosionsgeschwindigkeiten von wassergesättigtem Beton vom Sauerstoffdiffusionswiderstand der Betondeckung und dem Sauerstoffangebot an der Betonoberfläche bestimmt.

In /10/ wurden potentiostatische Untersuchungen zum kathodischen Teilprozeß von einbetonierten Bewehrungsstäben mit unterschiedlichen Betonen, Betondeckungen und äußeren Feuchtigkeitsgehalten durchgeführt. Die Versuche haben gezeigt, daß die kathodische Reaktionsgeschwindigkeit bis praktisch unmittelbar vor Wassersättigung etwa gleich groß waren als bei 65 % r. F.. Sauerstoffmangel, der zu einer Reduktion der kathodischen Teilreaktion führt, wurde erst nach mehreren Wochen Wasserlagerung der Versuchskörper festgestellt (s. Bild 6). Der Zeitraum zwischen der ersten Wasserlagerung und dem Auftreten eines Sauerstoffmangels hängt von der Betondeckung, der Betonqualität und der Korrosionsgeschwindigkeit ab, da der Beton an der Stahloberfläche erst wassergesättigt und der im Beton befindliche Sauerstoff erst verbraucht werden muß. Für normal feste Betone, die in der Baupraxis üblicherweise verwendet werden und Betondeckungen über 25 mm ist ein Zeitraum von einigen Wochen nötig /10/. Das bedeutet, daß ein wesentlicher Einfluß der Sauerstoffdiffusion durch die Betondeckung auf außergewöhnliche Fälle beschränkt ist, z. B. dauernd unter Wasser befindliche Konstruktionen oder extrem hochdichte Betone. Grundsätzlich kann aus den Versuchen geschlossen werden, daß die Korrosionsgeschwindigkeiten deshalb mit steigender relativer Luftfeuchte oder zunehmenden Befeuchtungszyklen des Betons zunehmen.



L915R041/Rau/Ka

Bild 6: Einfluß des Wassergehaltes des Betons auf die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung in Betonkorrosionszellen /7/

## 4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt ist kein Festwert, sondern hängt von zahlreichen Einflußgrößen ab. Während er für die Auslösung der Korrosion (Depassivierung) etwa zwischen 0,25 und 0,8 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, liegt, können bis zum Auftreten eines Schadens (Riß, Abplatzung) u. U. deutlich höhere Werte erforderlich sein.
- Mit steigendem Chloridgehalt nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit erheblich zu.
- Mit steigendem Hüttensandgehalt des Zements (Eisenportland-Hochofenzement) und bei Verwendung von Flugaschezement oder Silica-Staub als Betonzusatzstoff anstelle von Portlandzement sinkt bei ausreichender Nachbehandlung des Betons die elektrolytische Leitfähigkeit des Betons und damit auch die Geschwindigkeit der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion erheblich.
- Die Korrosionszellen mit C<sub>3</sub>A-freiem Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand wiesen im Vergleich mit den übrigen untersuchten Zementen die größten Korrosionsgeschwindigkeiten auf. Er sollte nur zur Erhöhung des Widerstandes gegen Sulfatangriff verwendet werden, wenn nicht zusätzlich ein Chloridangriff erfolgt. Bei kombiniertem Angriff wirkt der hüttensandreiche Hochofenzement HOZ 35 L-NW/HS wesentlich günstiger.
- Mit steigender Temperatur steigt die Korrosionsgeschwindigkeit unter sonst gleichen Bedingungen erheblich an.
- Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit nimmt die Korrosionsgeschwindigkeit zu. Die Versuche zeigen, daß das Maximum vermutlich oberhalb von 95 % r. F. liegt.
- Bei Bauwerken im Freien tritt i. d. R. bei kurzzeitiger Wasserbeaufschlagung (z. B. Regenschauer) keine Reduzierung der Korrosionsgeschwindigkeit infolge Sauerstoffmangels an der Bewehrung auf, sondern im Gegenteil sogar eine Beschleunigung der Korrosion durch die verbesserte elektrische Leitfähigkeit des Betons.

## 5 Literatur

- /1/ Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. CBI forskning/research, 04, 1982
- /2/ Virmani, Y. P.; Clear, K. C.; Pasko, T. J.: Federal Highway Administration (ED): Time-To-Corrosion of reinforcing steel in concrete slabs. Washington: Federal Highway Administration, 1983
- /3/ Lukas, W.: Zusammenhang zwischen Chloridgehalt im Beton und Korrosion in schlaffer Bewehrung an österreichischen Brücken und Betonfahrbahnbrücken. Betonwerk + Fertigteil-Technik 51 (1985), N. 11, pp. 730-734
- /4/ Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung, Zement-Kalk-Gips 58 (1969), Nr. 10, pp. 447-456
- /5/ Breit, W.: Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt – Sachstand (Teil 1). Neuere Untersuchungsergebnisse (Teil 2). In: Beton 48 (1998), Nr. 7, S. 442-449, Nr. 8, S. 511-514, 516-520
- /6/ Laase, H.; Stichel, W.: Stützwandsanierung in Berlin: Spezielle Aspekte der Korrosion an der Rückwand. Bautechnik 60 (1983), Nr. 4, pp. 124-129
- /7/ Schießl, P.; Raupach, M.: Influence on concrete composition and microclimate on the critical chloride content in concrete. London: Elsevier, 1990. Corrosion of Reinforcement in Concrete, International Symposium, Wishaw, Warwickshire, UK, 21-24 May 1990, pp. 49-58
- /8/ Hope, B. B.; IP, A. K. C.: Corrosion of steel in concrete made with slag cement. ACI Materials Journal 84 (1987), Nr. 6, pp. 525-521
- /9/ Page, C. L.; Short, N. R.; Holden, W. R.: The influence of different cements on chloride induced corrosion of reinforcing steel. Cement and Concrete Research 16 (1986), Nr. 1, pp. 79-86
- /10/ Raupach, M.: Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Aachen, Technische Hochschule, Fachbereich 3, Dissertation, 1992
- /11/ Buenfeld, N. R.; Newman, J. R.: Permeability of marine concrete. London: Marine Concrete, Papers for the International Conference on Concrete in the Marine Environment, 22-24 September 1986
- /12/ Hansson, I. L. H.; Hansson, C. M.: Electrical resistivity measurements of Portland cement based materials. Cement and Concrete Research 13 (1983), Nr. 5, pp. 675-683
- /13/ Rasheeduzzafar; Al-Saadoun, S. S.; Al-Gahtani, A. S., Dakhil, F. H.: Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete. Cement and Concrete Research 20 (1990), Nr. 5, pp. 723-738
- /14/ Schießl, P.; Raupach, M.: Influence of the type of cement on the corrosion behaviour of steel in concrete. New Delhi: National Council for Cement and Building Materials, 1992. 9<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, New Delhi, 22-28 November 1992, Vol. 5, pp. 296-301
- /15/ Wolsiefer, J. T.: Silica fume concrete: A solution to steel reinforcement corrosion in concrete. Detroit: American Concrete Institute. ACI SP-126, 1991. Durability of Concrete, Second International Conference, Montreal, Canada (12991), Vol. 1, pp- 527-558
- /16/ Atimtay, E.; Ferguson, M.: Early chloride corrosion of reinforced concrete – A test report. Materials performance 13 (1974), Nr. 12, pp. 18-21

- /17/ Schießl, P.; Schwarzkopf, M.: Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton: Herrn Professor Dr.-Ing. Herbert Kupfer zum 60. Geburtstag 1987 gewidmet. Betonwerk + Fertigteil-Technik 52 (1986), Nr. 10, pp. 626-635
- /18/ Schießl, P.; Raupach, M.: Influence of temperature on the corrosion rate of steel in concrete containing chlorides. Proceedings of the ACI-sponsored First International Conference on Reinforced Concrete Materials in Hot Climates. April 24-27, 1994, United Arab Emirates University, Dubai, Vol. II, pp. 537-549