Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 115 (1997)

Heft: 5

Artikel: Chloridsensoren: Bestimmung der korrosionsauslösenden Chloride im Beton

Autor: Flückiger, Dieter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79198

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Dieter Flückiger, Horgen

Chloridsensoren

Bestimmung der korrosionsauslösenden Chloride im Beton

Am Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion wurde im Rahmen des Forschungsprojekts «Chloride im Beton: Transport und Erfassung» ein neuartiger Sensor entwickelt und erprobt, der die zerstörungsfreie Erfassung der Chloride im Porenwasser des Zementsteins erlaubt. Nachstehend werden der Aufbau des Sensors beschrieben und die wichtigsten Erkenntnisse aufgezeigt.

In der Bauwerkserhaltung steht man bei der Zustandsuntersuchung insbesondere von Kunstbauten oft vor der Aufgabe, die Korrosionsgefährdung der Bewehrung infolge Chlorideinwirkung einschätzen zu müssen. Zur Beurteilung des Schadenausmasses wird heute im allgemeinen kein Unterschied zwischen der Korrosionsauslösung (Depassivierung) und dem Korrosionsfortschritt gemacht. In Ermangelung klarer Kenntnisse wird dabei häufig von vereinfachenden Grenzwerten wie dem kritischen Chloridgehalt ausgegangen. Wenn das elektrochemische System nicht richtig eingeschätzt wird, können solcherart angeordnete Instandsetzungsmassnahmen vom Gesichtspunkt der Dauerhaftigkeit aus sogar kontraproduktiv sein.

Aus früheren Untersuchungen weiss man, dass nur Teile der eingedrungenen Chloride jeweils korrosiv wirken und dass dabei insbesondere der Feuchtigkeitshaushalt eine zentrale Rolle spielt. Einen definierten, für alle Fälle der Praxis gültigen Chloridgrenzwert, bei dessen Erreichen Korrosion stattfindet, wird es daher kaum geben. Hinsichtlich der korrosionsfördernden Wirkung der Chlorionen gilt, dass für das Auftreten lokaler Korrosionsangriffe das Verhältnis der im Porenwasser gelösten Chlor- und inhibierenden Hydroxylionen $^{c}Cl^{-}/^{c}OH^{-}$ entscheidend ist. Dieses Verhältnis wird häufig mit 0,6 angegeben [1, 2]. Da die im Bauwesen üblicherweise verwendeten Portlandzementsorten in der Lage sind, Cl^{-} zu binden, sind Korrosionsangriffe meist erst nach Überschreiten bestimmter Cl-Konzentrationen möglich. Diese Bindekapazität macht es sinnvoll, die Chloridkonzentration auf das Zementgewicht bezogen anzugeben. Zur Bestimmung des Chloridgehalts ist man heute weitgehend auf zerstörende Methoden angewiesen. Um allerdings Aufschluss über die korrosionsauslösenden Konzentrationen erhalten zu können, ist die zerstörungsfreie Erfassung der freien Chloride im Porenwasser des Zementsteins unabdingbar. Dies erfordert den Einsatz geeigneter Sensorelemente, welche die freien Chloride zerstörungsfrei in situ erfassen.

Theoretische Grundlagen

Chloridsensitive Elektroden sind aus der chemischen Analytik und zahlreichen anderen Gebieten gut bekannt. Sie werden sowohl zur quantitativen Chloridgehaltsbestimmung als auch zur kontinuierlichen Überwachung des Chloridgehalts von Wasser, Abwasser und anderen Medien eingesetzt. In der Regel wird Silberchlorid (AgCl) in Form von Einkristallen oder abgeschieden auf Silberdrähten als Elektrodenwerkstoff verwendet. Aufgrund der sehr geringen Löslichkeit von AgCl in wässrigen Lösungen wird das Grenzflächenpotential E einer potentiometrischen Messkette, bestehend aus reinem Silber (Ag) / Silberchlorid (AgCl) // wässrige Chloridlösung, durch das Nernst'sche Gesetz bestimmt:

$$E\,(AgCl/Cl^{-}) = E_0 + RT/nF \ln([Cl^{-}]/[AgCl]) \qquad \text{Gl. (1)}$$

Darin bedeuten:

- E_0: Normalpotential der Elektrode [V]
- R: Universelle Gaskonstante
- T: Absolute Temperatur [K]
- n: Ladungszahl (Anzahl umgesetzter Elektronen)
- F: Faraday-Konstante
- [ ]: Konzentrations- bzw. Aktivitätsangaben [Mol/l]

Für Raumtemperatur (T = 298 K) und n = 1 ergibt sich die bekannte vereinfachte Form:

$$E\,(AgCl/Cl^{-}) = E_0 + 0.059 \log[Cl^{-}] \qquad \text{Gl. (2)}$$

Zwischen dem Elektrodenpotential E und der Konzentration der Chloridionen in wässriger Lösung besteht ein eindeutiger Zusammenhang (E_0 ist nur von den verwendeten Elektrodenmaterialien abhängig). Dieses Potential E kann gegen eine stabile, mit derselben Lösung verbundene (im einfachsten Fall darin eingetauchte) Bezugselektrode, beispielsweise eine gesättigte Kalomelelektrode (SCE), gemessen werden. Im allgemeinen Fall bezieht sich der Term $[Cl^{-}]$ in den Gleichungen (1) und (2) nicht auf die Konzentration c_{Cl} der Chloridionen, sondern auf deren Aktivität a_{Cl}, die durch den Aktivitätskoeffizienten γ_{Cl} mit der Konzentration verknüpft ist:

$$a_{Cl} = c_{Cl} \cdot \gamma_{Cl} \qquad \text{Gl. (3)}$$

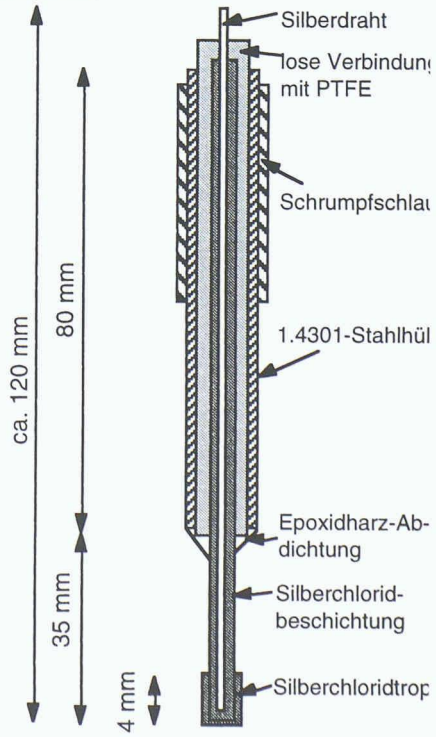
Mit Hilfe geeigneter Eichlösungen kann der Aktivitätskoeffizient γ_{Cl} zweckmässigerweise gleich 1 gesetzt werden, so dass die Chloridkonzentration direkt aus Gleichung (2) bestimmt werden kann.

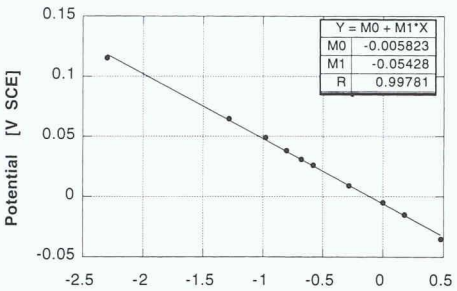
Methodik

Aufbau der Sensorelemente

Der Aufbau eines Sensorelements ist in Bild 1 schematisch dargestellt. Das zentrale chloridsensitive Element ist ein Silberdraht, der mit elektrolytisch abgeschiedenem, schwarz erscheinendem Silberchlorid (AgCl) beschichtet ist. Der beschichtete Draht ist mittels eines dünnen, elektrisch isolierenden flexiblen Teflonrohrs in einem etwas grösseren Rohr aus nichtrostendem Stahl (DIN 1.4301) fixiert. Eine Epoxidharzdichtung verhindert das Eindringen von Flüssigkeit in das Stahl- oder Teflonrohr. Jedes Sensorelement verfügt über zwei Verbindungen zu den Messgeräten: Ein Messkabel ist mit dem Silber-

1
Aufbau eines Chloridsensors (Gesamtlänge rund 12 cm)





2
Eichgerade der Chloridsensoren in synthetischer Porenflüssigkeit, hergestellt gemäss der Porenwasseranalyse eines Mörtels mit W/Z = 0,75. Die Messpunkte stellen Mittelwerte aus Messungen an 8 Sensorelementen dar. Oben rechts sind die Werte für Achsenabschnitt, Steigung und Korrelationskoeffizient angegeben

draht als chloridsensitives Element verbunden. Das zweite, mit dem nichtrostenden Stahlrohr verbundene Messkabel ermöglicht zusammen mit anderen Sensoren die Messung von Korrosionspotentialen und elektrischen Betonwiderständen.

Eichung der Sensorelemente

Die Eichung der Sensorelemente wurde mit einer synthetischen Porenflüssigkeit durchgeführt. Diese Lösung wurde aufgrund der Analyse von Porenwässern aus ausgepressten Mörtelprüfkörpern mit W/Z = 0,75 hergestellt. Die Potentiale der Sensorelemente wurden gegen eine in die Eichlösung eingetauchte gesättigte Kalomelelektrode (SCE) gemessen. Im Verlauf der Kalibrierungen wurden den Lösungen Chloridionen in Form von Kochsalz (NaCl) im Konzentrationsbereich von 0,001 bis 4 Mol/l zugegeben.

Ein Beispiel für die erhaltenen Eichkurven ist in Bild 2 dargestellt. Das Potential der Chloridsensoren nimmt linear mit dem Logarithmus der Chloridkonzentration in der Lösung gemäss der folgenden allgemeinen Funktion ab:

$$E = M_0 + M_1 \log [Cl^-] \qquad \text{Gl. (4)}$$

Darin bedeuten:

E: Gemessenes Potential gegen gesättigte Kalomelelektrode in Volt

M_0: Achsenabschnitt

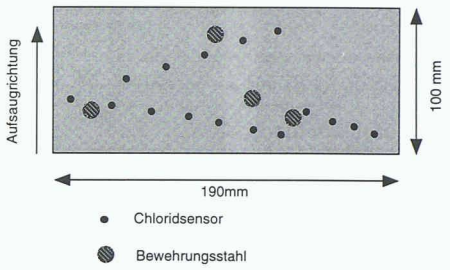
M_1: Steigung der Eichgeraden

Die Messungen in synthetischen Porenflüssigkeiten ergaben übereinstimmende Steigungen der Eichgeraden dE/dlog [Cl⁻] von 0,054 V/Dekade. In [3] bzw. [4] ist eine detaillierte Beschreibung der Kalibrierungen der Chloridsensoren zu finden.

Messungen an Mörtelprüfkörpern

Der Aufbau der für die Aufsaugversuche verwendeten Mörtelprüfkörper mit Aussenabmessungen von etwa 190·150·100 mm geht aus dem schematischen Querschnitt in Bild 3 hervor. Für die Herstellung der Mörtelprüfkörper wurde ein PC-Mörtel mit W/Z = 0,75 und einem Sand/Zement-Verhältnis von 2 verwendet. Nach 28 Tagen Feuchtlagerung und anschliessender Trocknung wies dieser Mörtel eine Gesamtporosität von 20 ± 1% auf. In den Mörtelprüfkörpern waren 16 der oben beschriebenen Chloridsensoren leiterartig angeordnet, deren Überdeckungen (in Aufsaugrichtung von der Unterseite aus gemessen) zwischen 5 und 80 mm abgestuft waren. Für die Beurteilung des Korrosionszustands waren vier Bewehrungsstäbe (Baustahl S500, ∅ 8 mm) mit Überdeckungen von jeweils 15, 20, 30 und 75 mm parallel zu den Sensorelementen eingebettet. Als Referenzelektrode für die Potentialmessung an den Sensorelementen und Bewehrungsstäben diente eine in die Aufsauglösung eingetauchte gesättigte Kalomelelektrode (SCE).

Die Versuche an Mörtelprüfkörpern wurden analog dem bekannten Vorgehen bei Aufsaugversuchen zur Ermittlung der



3
Schematischer Schnitt durch einen Mörtelprüfkörper

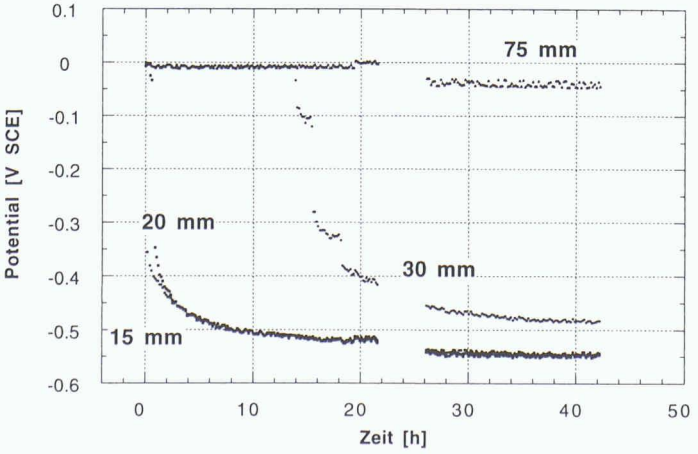
Porenkennwerte durchgeführt: Die Prüfkörper wurden an den senkrechten Flächen mit einer Epoxidharz-Beschichtung abgedichtet und mit ihrer Unterseite etwa 3 mm tief in die Aufsauglösung eingetaucht, so dass sich während des Aufsaugens eine eindimensionale Strömung einstellte. Zusätzlich wurden die Oberseiten der Prüfkörper mit trockener Luft überströmt, um die Ausbildung des Feuchtigkeitsgradienten zu unterstützen. Als Aufsauglösungen wurden ein- und dreimolare NaCl-Lösungen verwendet. Während der Aufsaugversuche wurden die Potentiale der eingebetteten Sensorelemente in Intervallen von acht Minuten gemessen und registriert.

Ergebnisse und Diskussion

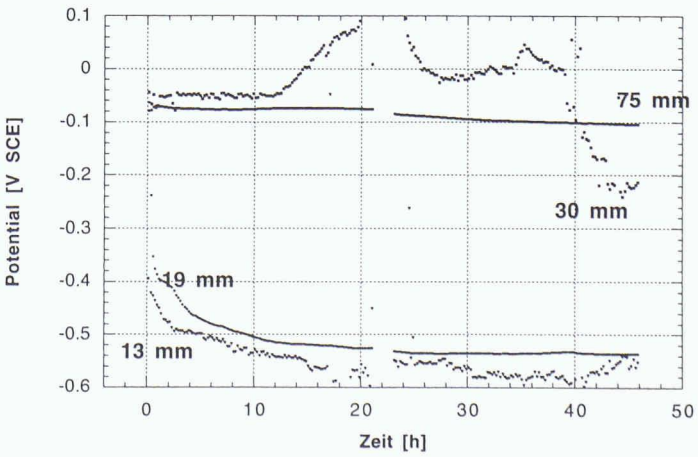
Korrosionszustand der Bewehrung

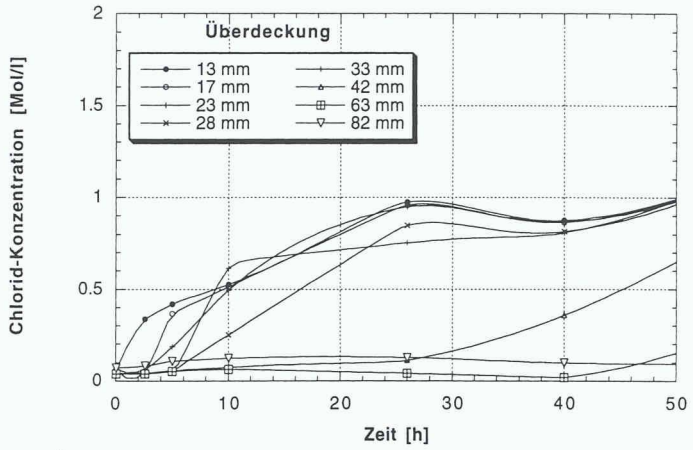
Während der Aufsaugversuche wurde das Korrosionspotential der Bewehrung verfolgt. Alle Stäbe zeigen zu Beginn ein passives Verhalten (Bilder 4 und 5). Beim Eintreffen von genügend freien Chloriden auf der Höhe der Bewehrung fällt das Potential ab in den aktiven Bereich. Bilder 4 und 5 zeigen die Resultate für Mörtelprüfkörper in Aufsauglösungen mit NaCl-Konzentrationen von 1 beziehungsweise 3

4
Verlauf des Korrosionspotentials der Bewehrung in einem Mörtelprüfkörper mit unterschiedlicher Überdeckung während eines Aufsaugversuchs mit 3 Mol/l NaCl-Lösung

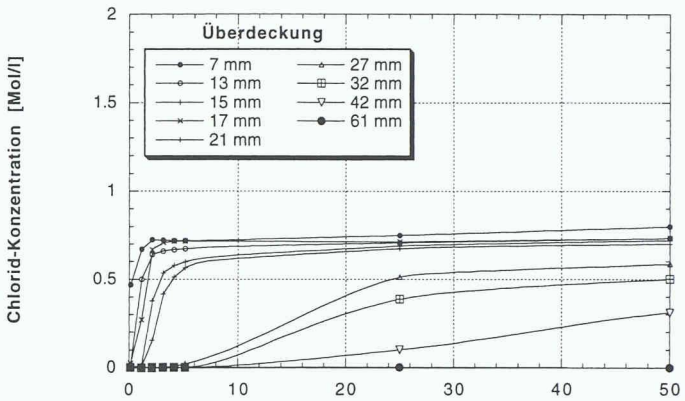


5
Verlauf des Korrosionspotentials der Bewehrung in einem Mörtelprüfkörper mit unterschiedlicher Überdeckung während eines Aufsaugversuchs mit 1 Mol/l NaCl-Lösung





6
Zeitlicher Verlauf der Konzentration der freien Chloride im Porenwasser in verschiedenen Tiefenlagen eines Mörtelprüfkörpers während eines Aufsaugversuchs mit 3 Mol/l NaCl-Lösung



7
Zeitlicher Verlauf der Konzentration der freien Chloride im Porenwasser in verschiedenen Tiefenlagen eines Mörtelprüfkörpers während eines Aufsaugversuchs mit 1 Mol/l NaCl-Lösung

Mol/l. Dies äussert sich erwartungsgemäss unter anderem in einem unterschiedlichen zeitlichen Verlauf des Potentials bei grösseren Überdeckungen. Die Angabe der Distanz bezieht sich jeweils auf die Bewehrungs-Stabachse, so dass sich die effektive Überdeckung um rund 4 mm reduziert. Bei den beiden untersten, der Lösung am nächsten liegenden Bewehrungslagen lässt sich praktisch kein Unterschied zwischen den beiden Aufsauglösungen ausmachen. Der Übergang vom passiven zum aktiven Zustand findet in einer Tiefe von etwa 10 mm (Stabachse 15 bzw. 13 mm, Radius 4 mm) unmittelbar nach Versuchsstart statt. Nach rund einer Stunde verlieren die Stäbe mit einer Überdeckung von 15 mm (20 mm bzw. 19 mm bez. Stabachse) ihren Passivfilm.

Bei einer Überdeckung von 25 mm (Stabachse 30 mm) zeigt sich der Einfluss der unterschiedlichen Konzentration der Aufsauglösung. Während bei der stärker konzentrierten Lösung die Depassivierung etwa 15 Stunden nach Versuchsbeginn erfolgt, ist das gleiche Phänomen bei der schwächeren Lösung erst nach rund 40 Stunden zu beobachten. Dabei stellt sich die Frage nach der jeweiligen Konzentration zum Zeitpunkt der Depassivierung.

Chlorideintrag und Chloridprofil

Die Bilder 6 und 7 zeigen den zeitlichen Verlauf der Konzentration der freien Chloride im Porenwasser für die untersuchten Mörtelprüfkörper, wie sie mit Hilfe der Sensoren aufgenommen worden sind. Für die Kalibrierung wurde die Eichgerade in Bild 2 verwendet.

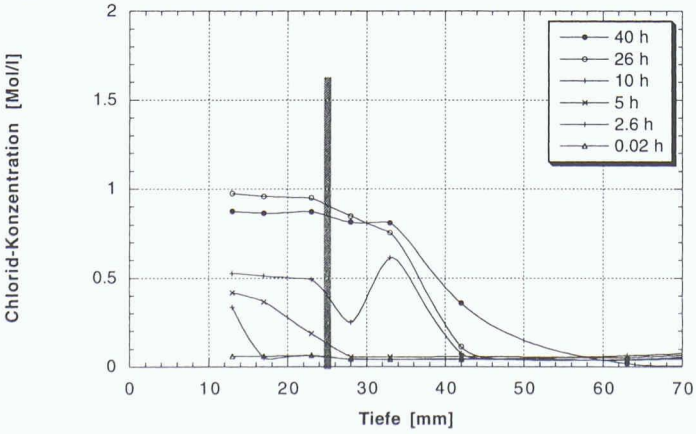
Bemerkenswert ist die Tatsache, dass sich die gemessenen Konzentrationen im Porenwasser für den dargestellten Zeitbereich in derselben Grössenordnung bewegen, obwohl die Konzentrationen der Aufsauglösungen stark verschieden sind. Erst nach rund 60 Stunden beginnt die Konzentration im Porenwasser beim Mörtelprüfkörper in der Lösung mit 3 Mol/l NaCl anzuwachsen, bis sie schliesslich bei Versuchsabbruch nach rund 600 Stunden die Grösse von etwa 3 Mol/l erreicht. Aus dem Verlauf der Konzentration lässt sich ein Tiefenprofil für die freien Chloride konstruieren. Bilder 8 und 9 zeigen die entsprechenden Entwicklungen und belegen die Ausbildung der Transportzone.

Kritische Chloridkonzentration

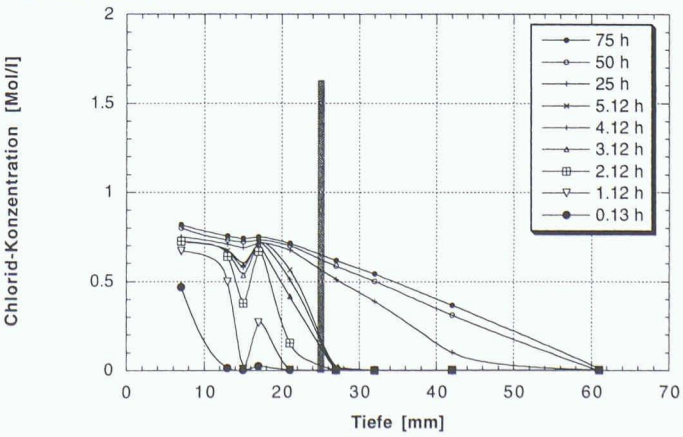
Die Zeit bis zur Auslösung der Bewehrungskorrosion bei einer Überdeckung von 25 mm beträgt beim Mörtelprüfkörper in der Aufsauglösung mit 3 Mol/l NaCl 15 Stunden, beim Mörtelprüfkörper in der Aufsauglösung mit 1 Mol/l NaCl dagegen 40 Stunden (Bilder 4 und 5).

Aus den Bildern 6 bis 9 lässt sich die jeweilige Konzentration der freien Chloride ableiten. Sie liegt für beide Aufsauglösungen trotz unterschiedlicher Konzentrationen (3 bzw. 1 Mol/l NaCl) im Bereich von 0,6 bis 0,7 Mol/l.

8
Zeitlicher Verlauf der Tiefenprofile für die Konzentration der freien Chloride im Porenwasser in einem Mörtelprüfkörper mit der Aufsauglösung 3 M NaCl. Nach 15 Stunden beträgt die Konzentration in 25 mm Tiefe rund 0,6 bis 0,7 Mol/l (vgl. auch Bild 6)



9
Zeitlicher Verlauf der Tiefenprofile für die Konzentration der freien Chloride im Porenwasser in einem Mörtelprüfkörper mit der Aufsauglösung 1 M NaCl. Nach 40 Stunden beträgt die Konzentration in 25 mm Tiefe rund 0,6 bis 0,7 Mol/l (vgl. auch Bild 7)



Von besonderem Interesse ist die Angabe der auslösenden kritischen Chloridkonzentration im Verhältnis zum Zementgewicht zum Zeitpunkt der Depassivierung. Diese kann nicht direkt angegeben werden, sondern muss indirekt über Massen-/Volumenbilanzen bestimmt werden. Der folgende Rechnungsgang soll als Hinweis dienen, wie solche Abschätzungen im Prinzip vorgenommen werden können.

Annahmen:

- Die Verteilung der Porenlösung (Feuchtigkeitsverteilung) im Mörtelprüfkörper zum Zeitpunkt der Depassivierung des Bewehrungsstabes mit 25 mm Überdeckung ist bis zu jener Tiefe rechteckförmig.
- Der kapillar füllbare Porenraum ist bis zu jener Tiefe zu 80% gesättigt.

Berechnungsgrundlagen:

- Volumen Mörtel bis 25 mm
  $25 \cdot 190 \cdot 150\ mm^3 = 0{,}7125 \cdot 106\ mm^3 = 0{,}7125\ l$
- Volumen Poren (20%)
  $0{,}2 \cdot 0{,}7125\ l = 0{,}1425\ l$
- Dichte Mörtel: 1900 kgm^{-3}
- Molgewicht Chlorid: 35,453g Cl^-/Mol

Daraus können die folgenden Angaben für eine kritische Chloridkonzentration im Porenwasser von 0,6 Mol/l abgeleitet werden:

- Menge Porenlösung (80%)
  $0{,}8 \cdot 0{,}1425\ l = 0{,}114\ l$
- Menge Chlorid [Mol]
  $0{,}114\ l \cdot 0{,}6\ Mol/l = 0{,}0684\ Mol$
  $= 68{,}4\ mMol$
- Menge Chlorid [mg Cl^-]
  $68{,}4\ mMol \cdot 35{,}453\ g\ Cl^-/Mol$
  $= 2425\ mg\ Cl^-$
- Menge Mörtel
  $0{,}7125 \cdot 10^{-3}\ m^3 \cdot 1900\ kg/m^3 = 1354\ g$
- Menge Zement (26,4%)
  $0{,}264 \cdot 1354\ g = 357{,}4\ g$ Zement
- Chloridkonzentration
  2425 mg Cl^-/357,4 g Zement [‰]
  = 6,8‰ = 0,68 [M-%/Z]

Wenn zudem die bis zu jenem Zeitpunkt gebundenen Chloride hinzugezählt werden, ergibt dies einen kritischen Chloridgehalt, der deutlich über dem in der Praxis häufig verwendeten «Grenzwert» von 0,4 [M-%/Z] liegt.

Bei der Übertragung dieser Erkenntnisse auf Betone gilt es zu berücksichtigen, dass die Menge an gebundenen Chloriden keineswegs als feste Grösse in Rechnung gestellt werden kann. Durch den Bezug der Chlorid- auf die Zementmenge werden zwar die Mengenverhältnisse berücksichtigt. Entgegen der häufig zitierten Meinung, die Chloridbindung erfolge in Form von Salzen (Stichwort Friedel'sches Salz), scheint sich heute in der Fachwelt die Meinung durchzusetzen, dass vorab Adsorptionsprozesse an den Porenwänden des Zementsteins für die Immobilisierung der Chloride verantwortlich sind [5]. Die Chloridbindung ist somit nicht nur eine Funktion der Zementdosierung, sondern insbesondere auch eine der inneren Oberfläche des Porensystems und somit abhängig von der Porengrössenverteilung. Diese weist eine Verschiebung zu kleineren Radien auf in der Reihenfolge Beton - Mörtel - Zementstein. Je kleiner der mittlere Porenradius ist, desto grösser wird die innere Oberfläche bei gleichem Porenvolumen. Daraus folgt, dass der prozentuale Anteil der möglichen gebundenen Chloride für Betone kleiner sein dürfte als jener für Mörtel.

Ein weiterer Umstand erschwert die Interpretation auf praktische Verhältnisse ganz wesentlich. Während auf der einen Seite die kurze Versuchsdauer die Möglichkeit zur Chloridbindung einschränkt, verringert sich auch die Einwirkungszeit der Chloride auf die Stahloberfläche. Diese beiden Effekte sind konkurrierend und relativieren die erhaltenen Aussagen zur korrosionsauslösenden Konzentration. Diesbezüglich sind weitere Forschungsanstrengungen angezeigt.

Folgerungen

- Für die Korrosionsgefährdung der Bewehrung durch Chloride ist die Konzentration der freien Chloride im Porenwasser massgebend.
- Da in der Regel der totale Chloridgehalt bestimmt wird, muss dieser für die Abschätzung der Korrosionsgefährdung auf den Zementsteinanteil bezogen werden. In Anbetracht der grossen Streuung der in der Praxis vorkommenden Betone kann die Anwendung fixer Volumenverhältnisse Zementstein/Beton zu einer Fehleinschätzung führen. Die Umrechnungsfaktoren für die in der Praxis vorkommenden Betone können sich im Bereich zwischen 5 und 10 bewegen.
- Die kritische Chloridkonzentration des Porenwassers für die Auslösung der Korrosion wurde auf Grund von Aufsaugversuchen mit Mörtelprüfkörpern auf 0,6 Mol/l abgeschätzt. Eine Umrechnung auf den Gehalt der totalen Chloride setzt die Kenntnis der Bindemechanismen (physikalisch durch Adsorption an den Porenwänden bzw. chemisch) voraus und kann nicht angegeben werden. Sie kann aber für die nachträgliche Einwanderung, je nach Randbedingung (Porosität, Exposition) teilweise deutlich über dem Wert 0,4 [M-%/Z] liegen. Als orientierende Richtgrösse kann dieser Wert aber durchaus angewendet werden. Massgebend ist die korrekte Einschätzung des elektrochemischen Systems (Makroelemente) und der Transportverhältnisse.
- Mit Hilfe der neuentwickelten Chloridsensoren ist es möglich, in situ korrosionsauslösende Chlorid-Konzentrationen (bzw. -Aktivitäten) zu messen. Für eine Anwendung in der Praxis steht die Entwicklung von Monitorsystemen zur Instrumentierung und Überwachung von Bauwerken im Vordergrund. Diesbezüglich müssen die Fragen der Beständigkeit der Sensoren allerdings noch untersucht werden.

Ausblick

Für die zukünftige Nutzung unserer Bausubstanz besteht ein ausgewiesener Bedarf nach einem zuverlässigen, anerkannten und wirtschaftlichen Verfahren zur kontinuierlichen Überwachung der Korrosionsgefährdung der Bewehrung. Gegenwärtig steht eine Reihe von methodischen Ansätzen, darunter die beschriebenen Chloridsensoren, nach der Erprobung im Labor und in Pilotprojekten an der Schwelle zur Anwendung in der Praxis. Welches dieser Verfahren sich durchsetzen und für die Bauwerksüberwachung vielleicht einen ähnlichen Stellenwert einnehmen wird, wie ihn heute die Potentialfeldmessung für die Zustandsuntersuchung erlangt hat, ist beim gegenwärtigen Stand der Forschung noch weitgehend offen. Auf die Entwicklungen, nicht zuletzt durch das IBWK, darf man gespannt sein.

Literatur

[1]
Hausmann, D.A.: Steel Corrosion in Concrete. Materials Protection 6, 1967

[2]
Tuuti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. CBI fo 4-82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982

[3]
Flückiger, D., Elsener, B. und Böhni, H.: Chloride im Beton: Transport und Erfassung. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 520, 1996

[4]
Elsener, B., Zimmermann, L., Flückiger, D., Bürchler, D. und Böhni, H.: Chloride Penetration - Non Destructive Determination of the Free Chloride Content in Mortar and Concrete. Proc. RILEM Paris, 1995

[5]
Frey, R.: Neuere reaktionskinetische Erkenntnisse zum Mechanismus der Chloriddiffusion im Zementstein von Betonen. Habilitationsschrift Universität Stuttgart, 1990

Adresse des Verfassers:
Dieter Flückiger, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH/SIA/ASIC, Flückiger Ingenieure AG, Neugasse 10, 8812 Horgen