

Korrosion an Bewehrungsstählen: Versuche in chloridfreiem und chloridhaltigem Beton ohne und mit kathodischem Schutz

Autor(en): **Müller, R.O. / Wolter, H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **106 (1988)**

Heft 44

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-85837>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Korrosion an Bewehrungsstählen

Versuche in chloridfreiem und chloridhaltigem Beton ohne und mit kathodischem Schutz

Das Verhalten von Stahlproben in chlorhaltigem Beton sollte unter verschiedenen Randbedingungen aufgezeigt und die Wirkung eines kathodischen Schutzes untersucht werden. Durch Einhalten vorgegebener elektrischer Spannungen, Temperaturen und Luftfeuchtigkeit waren reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen.

Es ist bekannt, dass die Stahlbewehrung in chloridhaltigem Beton korrodiert, wodurch schwerwiegende Schäden ent-

VON R. O. MÜLLER,
ZÜRICH UND
H. WOLTER,
WILDEGG

stehen können [1...6]. Es ist aber nicht genau bekannt, wie schnell die Korrosion unter definierten Bedingungen abläuft und wie sie beeinflusst werden kann. Mit den vorliegenden Versuchen soll das Verhalten des Bewehrungsstahles in Gegenwart von Chlorid und unter Anwendung eines kathodischen Schutzes durch einfache Versuche untersucht werden [7]. Ausserdem soll mit den Resultaten abgeschätzt werden, ob mit einer Wasserstoffversprödung, die besonders Spannstähle gefährden könnte, zu rechnen ist.

Wesen der Korrosion und des kathodischen Schutzes

Wenn man von Korrosion spricht, meint man im allgemeinen Sprachgebrauch eine Zerstörung metallischer oder nichtmetallischer Werkstoffe durch äussere Einflüsse, die oberflächlich beginnen und nach innen fortschreiten.

Nach DIN 50 900 wird Korrosion als Reaktion eines metallischen Werkstoffs mit seiner Umgebung verstanden, die eine messbare Veränderung des Werkstoffs bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion eines metallischen Bauteils oder eines ganzen Systems führen kann.

Die elektrochemische Korrosion benötigt immer einen Ionenleiter (Elektrolyten). Die Oxidation und Reduktion erfolgt hier nicht unmittelbar zwischen den Atomen, sondern örtlich getrennt, teilweise sogar an weit auseinanderliegenden Stellen. Man spricht hier auch von Lokalelementbildung, Kontaktkor-

rosion (galvanische Zelle), die zur Zerstörung des Materials führt. Diese Art der Korrosion ist die weitaus häufigste, zu der auch die Rostbildung auf der Bewehrung zählt.

Schematisch lässt sich ein Korrosionsvorgang in eine Anoden- und Kathodenreaktion unterteilen, wobei an der Anode das atomare Eisen Elektronen abgibt und unter Bildung von positiv geladenen Kationen in Lösung geht, während an der Kathode der Sauerstoff durch die an der Anode freigesetzten Elektronen in Gegenwart von Wasser zu OH-Anionen reduziert wird. Die Leitung der Elektronen von der Anode zur Kathode erfolgt hierbei über den metallischen Leiter, während das Gesamtsystem über die Elektrolytlösung kurzgeschlossen ist (vgl. Kästchen):

Anodenreaktion

Oxidation des Eisens
 $2 \text{Fe} \rightarrow 2 \text{Fe}^{2+} + 4 \text{e}^-$

Kathodenreaktion

Reduktion des Sauerstoffs
 $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$

Gesamtreaktion

$2 \text{Fe} + \text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}(\text{OH})_2$

Ob und unter welchen Bedingungen die vorgenannten Reaktionen ablaufen, ist aus dem Pourbaix-Diagramm ersichtlich (Bild 1).

In einem feuchten, noch nicht carbonatisierten Beton befindet sich der Bewehrungsstahl in einer Umgebung, die etwa einen pH-Wert von 12 aufweist. In diesem Milieu können in Abhängigkeit des Potentials zwei Schutzmechanismen auftreten, nämlich Korrosionsschutz durch Passivierung bzw. durch thermodynamische Stabilität. Bei der Passivierung, die unter der genannten Alkalität bei einem Potential von $> -1000 \text{ mV}$ gegenüber den Kupfersulfatelektroden auftritt, ist das Eisen durch eine dichte Oxidschicht ge-

Tabelle 1. Parameter für Versuche 1-6

Abmessungen der Probekörper

36 cm × 12 cm × 12 cm

Betonqualität:

TFB-Standardbeton, jedoch mit Körnung 0-16 mm
 Zement = 300 kg/m³
 Wasser = 150 kg/m³
 Wasser/Zement-Wert = 0,5
 Temperatur: 50 °C
 Luftfeuchtigkeit: 80% r.F.

Versuche 1-3: ohne Chlorid

1: Ohne Schutzstrom
 2, 3: Mit kathodischem Schutz

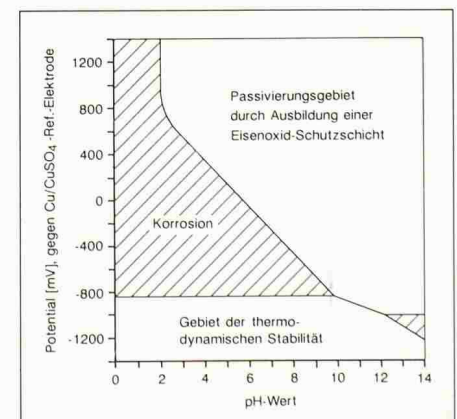
Versuche 4-6: mit Chlorid

Chlorid: 2% bezügl. Zement (3,3% NaCl)
 Chlorid: 2,5% bezügl. Beton
 4: Ohne Schutzstrom
 5, 6: Mit kathodischem Schutz

schützt, während bei einer Potentialabsenkung auf $< -1000 \text{ mV}$ eine Elektronenabgabe aufgrund thermodynamischer Reaktionen nicht mehr möglich ist.

Wirken nun auf das soeben beschriebene System Chloride ein, kommt es, wenn sich der Bewehrungsstahl auf einem Potential befindet, das deutlich über -800 mV (Cu/CuSO₄) liegt, zur gefürchteten chloridinduzierten Lochkorrosion, während im Gebiet der Stabilität Chloride keinen Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit der Bewehrung haben. Und genau dieses Verfahren der Potentialabsenkung macht man sich beim kathodischen Korrosionsschutz (KKS) dadurch zunutze [7], dass man in den Beton eine Anode einbaut und den Bewehrungsstahl durch Anlegen einer Fremdspannung kathodisch auf das entsprechende Niveau absenkt (vgl. Bild 1.)

Bild 1. Pourbaix-Diagramm, vereinfacht



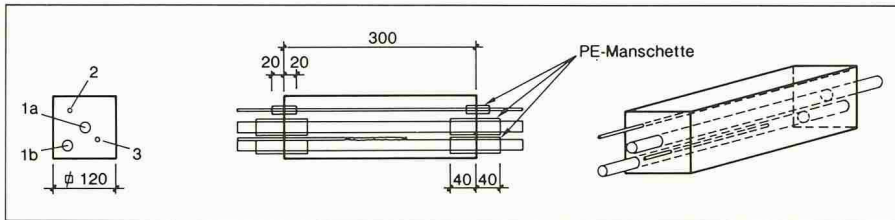


Bild 2. Probekörper mit Elektrodenanordnung; 1a, 1b: Betonbewehrung, \varnothing 20 mm, sandgestrahlt; 2: Anode; 3: Ag/AgCl-Referenz-Elektrode

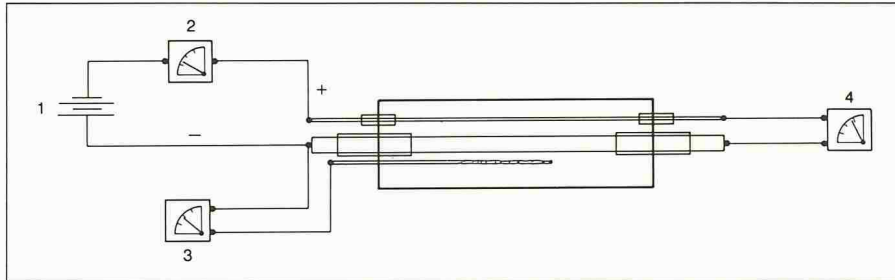


Bild 3. Elektrische Schaltung; 1: Stromquelle, max. 6,4 V = ; 2: mA-Meter für Speisestrommessung; 3: mV-Meter für die Messung des Fe-Potentials; 4: mV-Meter für Speisespannungsmessung

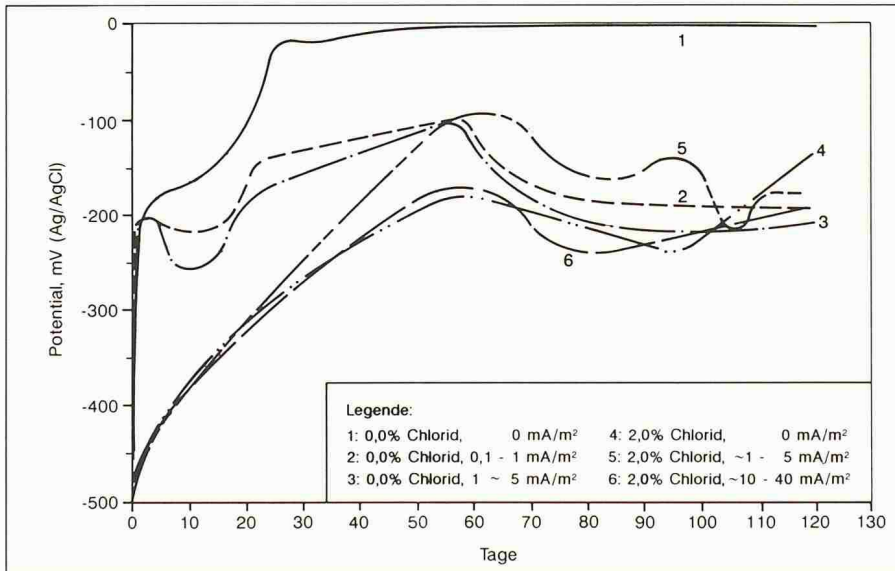


Bild 4. Proben 1-6, Ausschalt-Potential Innenbewehrung

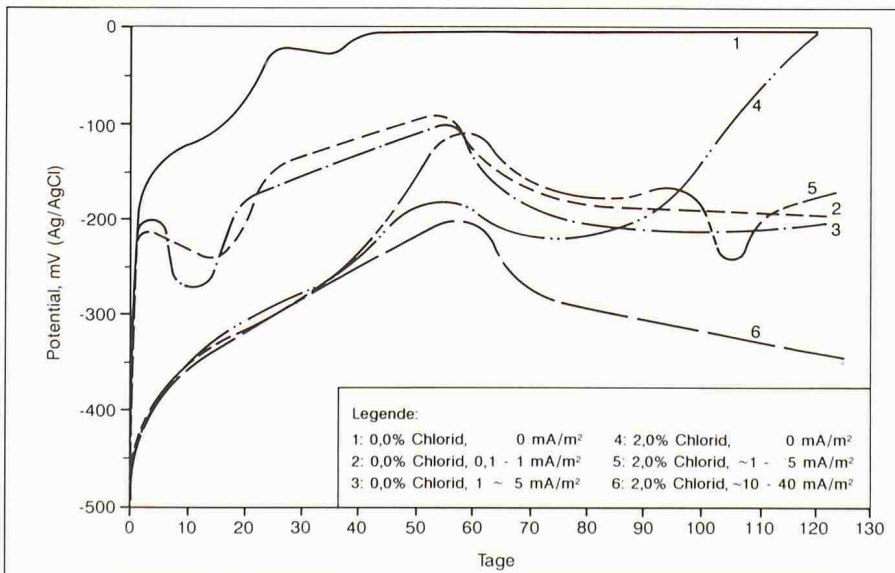


Bild 5. Proben 1-6, Ausschalt-Potential, Aussenbewehrung

Versuchsaufbau

Für diese Untersuchungsreihe wurden total sechs Betonprismen ($PC = 300 \text{ kg/m}^3$, $d_{max} = 16 \text{ mm}$, $W/Z = 0,50$) mit den Abmessungen von $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm} \times 36 \text{ cm}$ hergestellt, wovon drei mit 2% Chlorid (bezogen auf Zement) versetzt und drei chloridfrei waren. Die genaue Anordnung der Komponenten sowie des Messschemas für die elektrischen Grössen sind aus den Bildern 2 und 3 ersichtlich. Die in jedes Prisma einbetonierte Bewehrungsstäbe hatten einen Durchmesser von 20 mm und wurden vor dem Einbringen oberflächlich auf die Güte Sa 3.0 sandgestrahlt. Zur Abnahme der elektrischen Grösse waren sie stirnseitig mit 4-mm-Bohrungen von 20 mm Tiefe versehen.

Die Lagerung erfolgte nach einer 24stündigen Erhärtungsphase bis zum Versuchsende (starke Rissbildung im Beton nach 128 Tagen) im Klimaschrank bei 50°C und 80% relativer Feuchte. Dabei wurden die Prismen mit unterschiedlichen Stromdichten geschützt.

Versuchsdurchführung

Unmittelbar nach der Betonprismenherstellung wurden die Bewehrungsstäbe mit der vorgesehenen Gleichspannung kathodisch geschützt, die nur kurzfristig nach 24 Stunden beim Transferieren der Probekörper in den Klimaschrank unterbrochen wurde. Anschliessend wurde der Korrosionsvorgang durch regelmässige Messungen folgender Grössen verfolgt:

- Schutzstrom der Bewehrung: I (mA)
- Schutzstromdichte der Bewehrung: i (mA/m²)
- Speisespannung: U_{sp} (mV)
- Einschaltpotential gegen Ag/AgCl: U_e (mV)
- Ausschaltpotential gegen Ag/AgCl nach 3 s: U_a (mV)

Durch zeitlich versetzte Absenkungen der Feuchtigkeit konnten zudem noch wertvolle Aufschlüsse über den Einfluss des Austrocknens auf den elektrischen Widerstand des Betons sowie auf die Rekonvaleszenz bei der Wiederbefeuchtung gewonnen werden.

Resultate der Versuche

Potentialverhalten

In den Bildern 4 und 5 sind die Ausschaltpotentiale der Innen- und Aussenbewehrung gegen die Zeit darge-

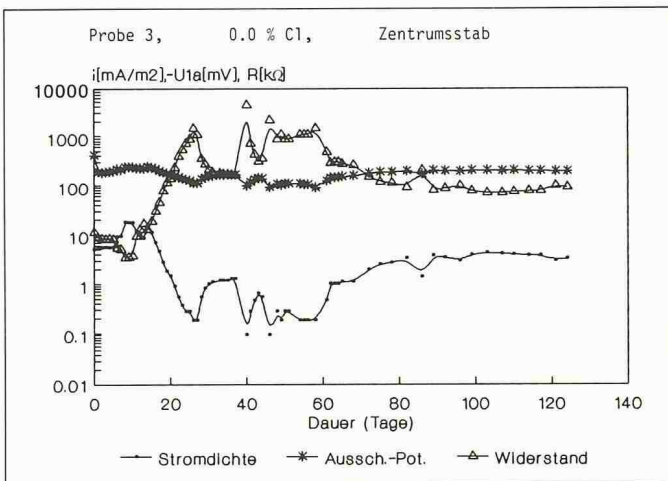


Bild 6. Probe 3, 0,0% Cl, Zentrumsstab
 — Stromdichte —* Aussch.-Pot. —△ Widerstand

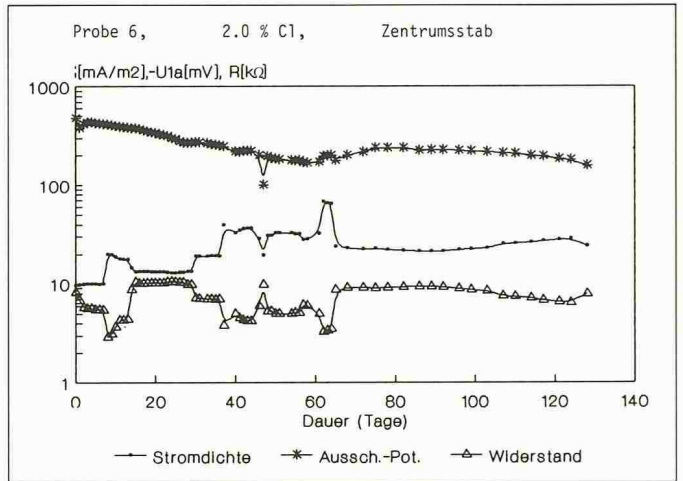


Bild 7. Probe 6, 2,0% Cl, Zentrumsstab



Bild 8. Die Betonprismen 1-3 (ohne Chloridzusatz) waren am Versuchsende noch intakt

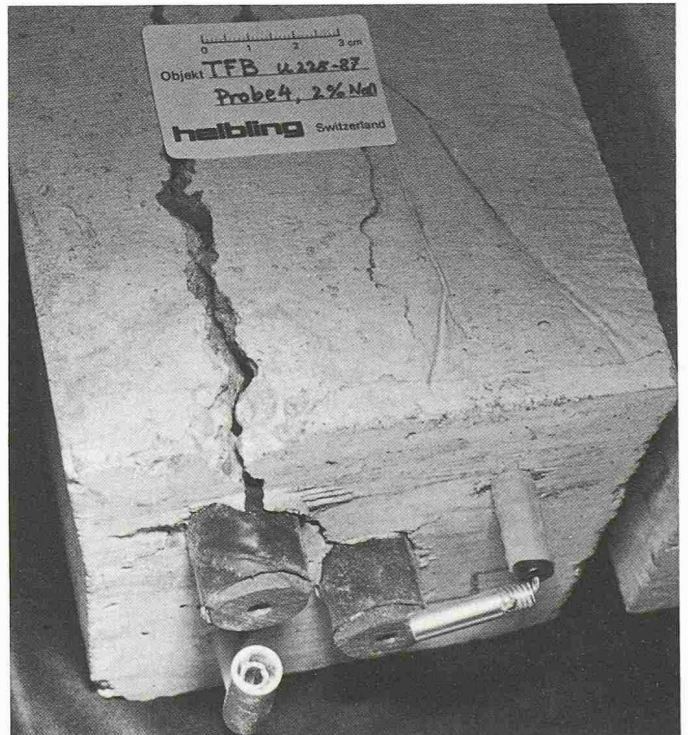


Bild 9. Prisma 4, wie Prisma 5, jedoch ohne Schutzstrom (starke Rissbildung)



Bild 10. Betonprisma 5 mit 2% Chlorid und einem Schutzstrom von 5 mA/m² (geringere Rissbildung gegenüber Bild 9)

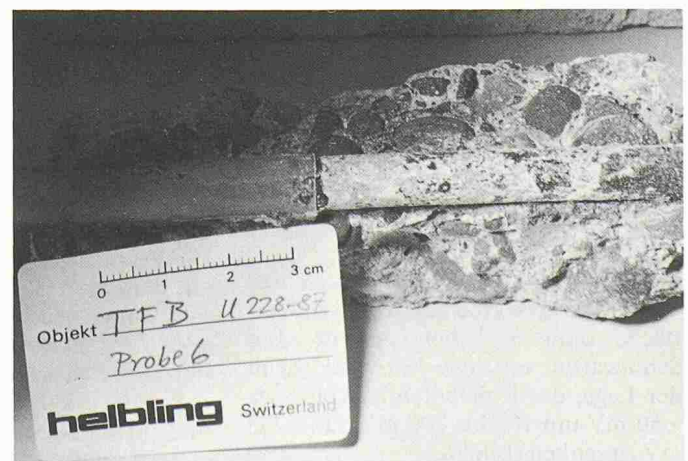


Bild 11. Anode von Versuch 6 mit 20 bis 40 mA/m² Schutzstromdichte. Die geringe Ph-Absenkung um die Anode konnte durch die Farbreaktion des Indikators nachgewiesen werden

stellt. Wie sich hieraus entnehmen lässt, steigen bei den chloridfreien Proben die Potentiale innerhalb des ersten Tages von -450 mV auf -200 mV an (immer gegen Ag/AgCl gemessen). Diese Werte stabilisieren sich bei den kathodisch geschützten Proben (Nr. 2 und 3) in den nächsten 25 Tagen auf -100 mV.

Die erneute Potentialänderung von -100 auf -200 mV ab dem 60. Tag lässt sich durch Erhöhung der Speisespannung erklären, während die zwischenzeitlichen Variationen durch eine vorübergehende Absenkung der Luftfeuchtigkeit und somit durch einen Austrocknungsvorgang mit Veränderung des elektrischen Betonwiderstandes verursacht worden sind. Das Potential der Probe Nr. 1 ohne Fremdstrom stieg dagegen von -400 mV kontinuierlich bis zum 45. Tag auf rund -5 mV an, um anschliessend bis Versuchsende nach 128 Tagen diesen Bereich zu halten.

Stromdichte: Ausschaltpotential und elektrischer Widerstand

In den Bildern 6 und 7 sind in Analogie zu den vorgängigen Ausführungen unter «Potentialverhalten» ergänzend die wichtigsten Kenndaten zusammengefasst. Berücksichtigt wurden jedoch nur die Werte des Zentrumsstabes im chloridfreien sowie chloridkontaminierten Beton bei einer Soll-Speisespannung von 1200 mV.

Wie sich im Versuchsverlauf zeigte, reichte die vorgegebene Speisespannung von 1200 mV nur für den Anfang der Versuchsphase aus, um die geforderte Stromdichte von $10...20$ mA/m² zu erreichen. Daher wurde dieser Wert beim chloridfreien Betonprisma ab dem 15. Tag auf 4500 mV und ab dem 60. Tag auf 6000 mV erhöht. Entsprechende Veränderungen nahm man auch beim chloridhaltigen Beton vor. Hier wurde die Speisespannung am 14. Tag auf 2500 mV und am 40. Tag auf etwa 3300 mV erhöht.

Diskussion der Resultate

Chloridfreie Betonproben

Die Prismen 1 bis 3 ohne Zusatz von Chlorid zeigten eine passive Eisenoberfläche ohne jeglichen Angriff. Ein Schutzstrom von etwa 1 mA/m² war in der Lage, das Ruhepotential von etwa -50 mV um 100 bis 200 mV auf -200 mV zu senken (Bild 8).

Auf das Aussehen der Proben hatte dieser Schutzstrom aber keinen Einfluss. Trotz der bei Versuch 3 relativ hoch an-

gelegten Speisespannung von $6,4$ Volt ($i = 1...3$ mA/m²) gelang es nicht, das Ausschaltpotential auf tiefere Werte als rund -250 mV zu senken. Stahloberflächen, die sich in chloridfreiem Beton befinden, weisen somit einen tiefen Schutzstrombedarf auf.

Durch die beobachtete Potentialabsenkung kann die korrosive Wirkung passiver Stahloberflächen auf Oberflächenbereiche, die sich in chloridhaltiger oder neutraler Umgebung befinden, aufgehoben werden. Das heisst, die Kontaktkorrosion von Bewehrungsstahl in inhomogen versalztem Beton wird vermieden, falls eine Potentialabsenkung auf Werte < -300 mV oder -400 mV erfolgt.

Chloridkontaminierte Betonproben

Bei den Prismen 4–6, die bezüglich Zement 2% Chlorid enthielten, ergab sich eine vom Schutzstrom abhängige, mehr oder weniger heftige Korrosion des Bewehrungsstahles, wobei sich an der Grenzfläche zwischen Stahl und Beton eine schwarze Magnetitschicht bildete. Diese war auf der Unterseite viel stärker ausgeprägt als auf der Oberseite und erreichte bei der Probe 4 eine Dicke von $2,6$ mm (Bild 9). Offensichtlich war der Kontakt zwischen dem passivierenden Kalziumhydroxid und der Stahloberfläche unten ineffizienter als oben. Ein Schutzstrom von 5 mA/m² konnte die Korrosionsgeschwindigkeit um einen Faktor von etwa 4 verlangsamen, so dass nur wenig Eisenoxid entstand. Trotzdem trat auf der Unterseite der Bewehrung bei Versuch 5 eine dünne, bis zu $0,65$ mm dicke Magnetitschicht auf, die den Beton nach einer Versuchszeit von etwa $3\frac{1}{2}$ Monaten zu sprengen vermochte (Bild 10). Ein erhöhter Schutzstrom in der Grössenordnung von etwa 20 bis 40 mA/m² konnte das Ruhepotential des Prismas 6 auf Werte von etwa -300 mV senken. Die Korrosion wurde drastisch verlangsamt und trat nur noch unbedeutend auf. Die Dicke der Magnetitschicht war geringer als $0,01$ mm. Dadurch wurde die Betonprobe 6 (Rand) in der Versuchszeit von 4 Monaten nicht gesprengt (Bild 11); um die Anode konnte eine geringe pH-Absenkung nachgewiesen werden.

Die Versuche zeigen klar, dass in Beton mit hohem Versalzungsgrad die Korrosion durch geringe Schutzströme von etwa 5 bis 10 mA/m² wohl stark reduziert, aber je nach Potentiallage nicht ganz vermieden wird. Zu diesem Zweck sind Stromdichten von etwa 20 – 40 mA/m² und eine Absenkung des Potentials auf Werte < -300 oder -400 mV (je nach Chloridkonzentration) notwendig.

Tabelle 2. Elektroden

Bewehrungsstahl:
20 mm Durchmesser, freie, nicht abgedeckte Länge: 30 cm Oberfläche sandgestrahlt, Sa 3,0
Zentrumselektrode: 1
Randelektrode: 2
Bezugselektroden:
Ag/AgCl, Durchmesser: 8 mm
Anoden:
Leitfähiger Kunststoff, Ferex 100 (Raychem) Durchmesser 8 mm, freie, nicht abgedeckte Länge: 30 cm

Tabelle 3. Abkürzungen

I: Schutzstrom in mA
U_{sp}: Speisespannung zwischen der Anode und den zwei Stahlproben
U_{1e}: Einschaltpotential der Zentrumsstahlprobe bezüglich den zwei Stahlproben
U_{2e}: Einschaltpotential der Randprobe bezüglich der Ag/AgCl-Bezugselektrode
U_{1a}: Ausschaltpotential der Zentrumsprobe bezüglich der Ag/AgCl-Bezugselektrode
U_{2a}: Ausschaltpotential der Randprobe bezüglich der Ag/AgCl-Bezugselektrode

Literaturverzeichnis

- [1] H. Böhni: SIA-Dokumentation DO 20, 1988, S. 9 ff.
- [2] H. Böhni, B. Elsener: Korrosionsbeständigkeit von Armierungen, SIA-Dokumentation 72, 1984, S. 355 ff.
- [3] R.O. Müller: Crevice Corrosion Test for Stainless Steels in Chloride Solutions, Passivity of Metals and Semiconductors, edited by M. Froment Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam - Printed in the Netherlands
- [4] B. Hope, A. Jp: Chloride Corrosion Threshold in Concrete, ACI Mat. J., July-Aug. 1987, S. 306 ff.
- [5] P. Rechberger: Elektrochem. Vorversuche zur Sauerstoffreduktion an Stahl- und Betonelektroden, Zement und Beton, 4, 1987, S. 154 ff.
- [6] R. Scheidegger, R.O. Müller: Loch- und Spaltkorrosion von Chrom- und Chromnickelstählen in chloridhaltigen Lösungen, Werkstoffe und Korrosion, 31, 1980, S. 387 ff.
- [7] C.J. Mudd, G.L. Mussinelli, M. Tetramanti, P. Pedferri: Cathodic Protection of Steel in Concrete with Mixed Metal Oxide Activated Titanium Anode Net, Corrosion 88, Cervantes Convention Center, St. Louis, Missouri, March 21–25, 1988, Paper Number 229

Die bei diesen Versuchen gemessenen hohen Stromstärken gelten nur für belüftete Betonstrukturen mit hohem Chloridgehalt und homogener Chloridverteilung. Bei inhomogen versalztem Beton wird der mittlere Schutzstrombedarf geringer, weil die passiven Oberflächenanteile der Bewehrung des höheren Oberflächenwiderstandes wegen viel weniger Strom aufnehmen.

Der Spannungsanstieg des gesprungenen Versuchsprismas 4 war darauf zu-

rückzuführen, dass die im Kontakt mit Beton befindliche Magnetitoberfläche selbst als Elektrode wirkte und ein viel höheres Potential aufwies als Stahl. Dieser Effekt muss bei der Beurteilung von gerissenen Stahlbetonstrukturen berücksichtigt werden, um Fehlbeurteilungen zu vermeiden.

Der bei den vorliegenden Versuchen eingesetzte Bewehrungsstahl ist unempfindlich auf Wasserstoffversprödung. Aber auch hochfeste Spannstähle wä-

ren unter den erreichten Potentialbedingungen vor Wasserstoffversprödung geschützt worden.

Adressen der Verfasser: Dr. R.O. Müller, dipl. Ing. Chem. ETH, Helbling Ingenieurunternehmung AG, Hohlstrasse 610, 8048 Zürich, und H. Wolter, Chem. Ing. (grad.), Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz, Zementindustrie, TFB, 5103 Wildegg.

Korrosion durch Mikroorganismen

Korrosion an einem Dach aus sendzimir-verzinkten Stahltrapezprofilen durch Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen

Mikroorganismen, welche auf Kunststoffrahmen von Dachaufbauten oder an der Kunststoffbeschichtung von Stahltrapezprofilen leben, können durch Stoffwechselprodukte Korrosion auf im Wasserlauf unterhalb liegenden verzinkten Stahlblechteilen verursachen.

Allgemeines Schadenbild

Dach und Lichtkuppeln

Das Dach besteht aus verzinktem Eisenblech (gerippt) und hat eine Neigung von etwa 6°. In das Dach sind

VON FRANK ESCHER UND
HANS MOOR,
WINTERTHUR

mehrere Lichtkuppeln eingesetzt, welche mit glasfaserverstärktem Polyester eingefasst sind. Von diesen Einfassungen geht eine intensive Korrosion auf das untenliegende verzinkte Eisenblech aus (Bild 1).

Auf der Polyestereinfassung sind starke Schmutzablagerungen vorhanden. Diese hängen offensichtlich mit der Korrosionsursache zusammen (Bild 2).

Dach und First

Wie die Skizze (Bild 3) zeigt, hat das Dach eine ca. 2 m hohe senkrechte Wand, die in den First übergeht (sog. versetzte Dachfläche). Das Material dieser Wand ist ein blaubeschichtetes, geripptes Eisenblech. Die chemische Zusammensetzung der Beschichtung wurde nicht bestimmt. Es dürfte sich um eine Polyesterbeschichtung handeln, wie sie für solche Zwecke oft ver-

wendet wird. Die Dicke dieser Schicht beträgt ca. 0,025 mm. Das Firstblech ist aus architektonischen Gründen ebenfalls blau beschichtet.

Man sieht auch hier, dass die Korrosion überall dort ihren Anfang nimmt, wo Tropfwasser vom Firstblech oder der senkrechten Wand auf das verzinkte Dachblech gelangt. Ferner sind deutliche Verfärbungen des Firstbleches zu erkennen (Bild 4).

Untersuchungsergebnisse

Die Untersuchung der Lichtkuppelneinfassung und der Blaubeschichtung des Dach- und Firstbleches hat folgendes ergeben:

Wie bereits erwähnt, wurden starke Ablagerungen von Schmutz- und Russpartikeln auf dem Dach und insbesondere auf der Kunststoffeinfassung der Lichtkuppeln festgestellt. Die Partikel haften auf dem Kunststoff, während sie vom verzinkten Blechdach weggeschwemmt werden. Die Partikel sind Agglomerate von Russ, Sand bzw. Quarz und flechtenartigen Gebilden (Bild 5). Die genaue chemische Zusammensetzung konnte nicht bestimmt werden. Es war nur möglich, eine qualitative Aussage zu machen.

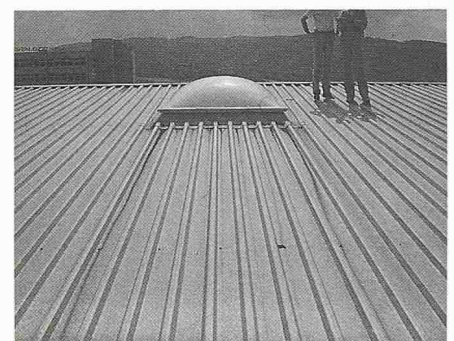


Bild 1. Lichtkuppel mit Polyestereinfassung. Korrosion auf dem verzinkten Eisenblech

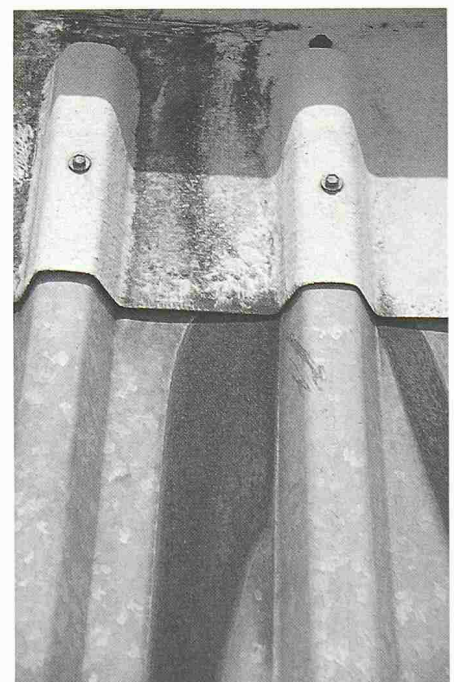


Bild 2. Wie Bild 1, vergrössert