

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111 (1993)
Heft: 33/34

Artikel: Kathodischer Korrosionsschutz: Schutz der Betonbewehrung, Langzeitbeständigkeit der Anodenmaterialien und Mörtel
Autor: Müller, Reinhard O. / Holtzhauer, Klaus
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78224>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 15.05.2025

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

Kathodischer Korrosionsschutz

Schutz der Betonbewehrung, Langzeitbeständigkeit der Anodenmaterialien und Mörtel

Viele unserer Betonkunstbauten sind durch die Verwendung von Tausalzen und Chloriden im Winterdienst gefährdet. Daher wird nach Methoden gesucht, die Bewehrung durch kathodischen Korrosionsschutz in ihrer Funktion zu erhalten. Nachfolgend sind die Ergebnisse zusammengefasst, die aufgrund einer vom Bundesamt für Strassenbau finanzierten grundsätzlichen Untersuchung über die Langzeitwirkungen gewonnen wurden.

Veranlassung

Von Stahlbetonbauwerken, deren Bewehrung sich im alkalischen Beton befindet und damit eine passivierte Oberfläche aufweist, kann eine lange Nutzungsdauer erwartet werden. In vielen Bauwerken wie Brücken, Brückenpfeilern, Tunnels und Galerien sind aber durch Spritzwasser, wegen der im Winterdienst verwendeten Tausalze, Chloride in den Beton eingedrungen.

VON REINHARD O. MÜLLER,
ZÜRICH, UND KLAUS
HOLTZHAUER, WILDEGG

Sobald der Chloridgehalt im Bereich der Bewehrung einen bestimmten Wert überschreitet, tritt auch im alkalischen Beton Korrosion auf. Viele Bauwerke

wurden deshalb schon durch Korrosion beschädigt. Die konventionelle Instandsetzungsmethode basiert auf dem vollständigen Austausch des chloridhaltigen Betons. Bei tragenden Bauteilen können wegen der Querschnittsverminderung Probleme auftreten. Auch müssen Vorkehrungen getroffen werden, dass in Zukunft keine weitere Chloridkontamination des Betons mehr eintritt.

In den letzten Jahren wurde daher nach einer Methode gesucht, welche erlaubt, die Bewehrung auch im chloridhaltigen Beton sicher zu schützen. Es wurden Versuche unternommen, den kathodischen Korrosionsschutz, der zum Schutz metallischer Schiffshüllen in Meerwasser schon lange den Stand der Technik darstellt, auch für die Armierung in salzhaltigem Beton einzusetzen. Seitdem dimensionsstabile und beständige Anodenmaterialien auf der Basis aktivierter Titanetze relativ preisgünstig erhältlich sind, besteht die Möglichkeit des kathodischen Korrosionsschutzes der Bewehrung. Weil diese Methode relativ neu ist, stellten sich Fragen bezüglich der Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln.

Das Bundesamt für Strassenbau finanzierte im Rahmen der Forschung im Strassenwesen die Arbeit «Kathodischer Korrosionsschutz der Betonbewehrung, Langzeitbeständigkeit der Anodenmaterialien und Mörtel» [3], [4]. Um eine wissenschaftlich fundierte Basis zur Beurteilung der Langzeitverhaltens des Korrosionsschutzsystems zu erhalten, sollten Korrosionsversuche an Prüfkörpern unter definierten Bedingungen durchgeführt werden.

Dazu waren die Potentiale der Bewehrung, ohne und mit Schutzstrom, mit unterschiedlichen Chloridgehalten und bei verschiedenen relativen Feuchtigkeiten zu erfassen. Gleichzeitig war der Einfluss der unterschiedlichen Randbedingungen auf das Korrosionsverhalten

Legende der benützten Abkürzungen

U1e	Einschaltpotential der oberen Stahlprobe, mV (mit Schutzstrom)
U1a	Ausschaltpotential der oberen Stahlprobe, mV (ohne Schutzstrom)
U2e	Einschaltpotential der unteren Stahlprobe, mV (mit Schutzstrom)
U2a	Ausschaltpotential der unteren Stahlprobe, mV (ohne Schutzstrom)
UAe	Einschaltpotential des Anodennetzes, mV (mit Schutzstrom)
UAa	Ausschaltpotential des Anodennetzes, mV (ohne Schutzstrom)
dU1	Depolarisationspotential der oberen Stahlprobe (mV/4h)
dU2	Depolarisationspotential der unteren Stahlprobe (mV/4h)

der Bewehrungsstähle sowie auf Anoden- und Mörtelmaterialien zu untersuchen.

Ziel

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit bestand darin, den Bewehrungsstahl in chloridhaltigem Beton kathodisch vor Korrosion zu schützen und dabei die Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörtelüberdeckungen sowie das Korrosionsverhalten der Stahlproben zu überprüfen.

In Laborprüfkörpern aus Stahlbeton sollten verschiedene kommerzielle Anodensysteme bezüglich

- Wirksamkeit
- Langzeitstabilität
- Betriebsverhalten

untersucht werden.

Dabei waren die Parameter

- Chloridgehalt
- Feuchtigkeit
- Stromdichte
- Mörteltyp

zu berücksichtigen.

Alle angegebenen Potentiale wurden dabei auf die gesättigte Kupfer/Kupfersulfatelektrode (CSE) bezogen.

Versuchsanordnung

Versuchsaufbau

Prüfkörper

Die Prüfkörper bestanden aus Betonprismen gemäss Bild 1. Bei der Herstellung wurden zuerst 2 Stahlproben und

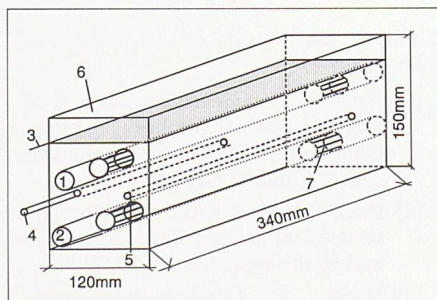


Bild 1. KKS-Prüfkörper aus Beton mit Anodennetz und Mörtelüberdeckung. – Beton: TFB-Standardbeton 0-16 mm, W/Z= 0.5, 300 kg PC/m³, 0.8% Sikament 300 (HBV), 0-4% Chlorid bezüglich Zement; – Mörtel: Labormörtel 0-5 mm (Normsand TFB), W/Z= 0.4, 450 kg PC/m³, 1.0% Sikament 300 oder Fertigmörtel mit und ohne Kunststoffzusatz; Legende: 1 – Stahlprobe Nr. 1, freie Länge: 300 mm, 2 – Stahlprobe Nr. 2, 3 – Anodennetz mit Anschluss, 4 – Bezugselektrode, 5 – Reserve Öffnung für Bezugselektrode, 6 – Mörtel zum Einbetten der Anode, 7 – Kunststoff-Isolation, je 20 mm.

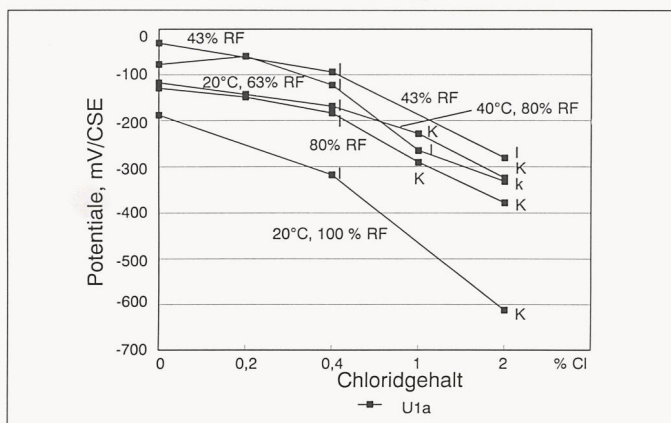
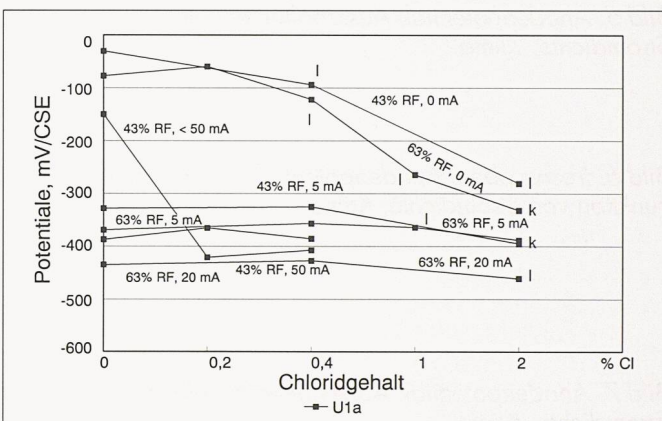
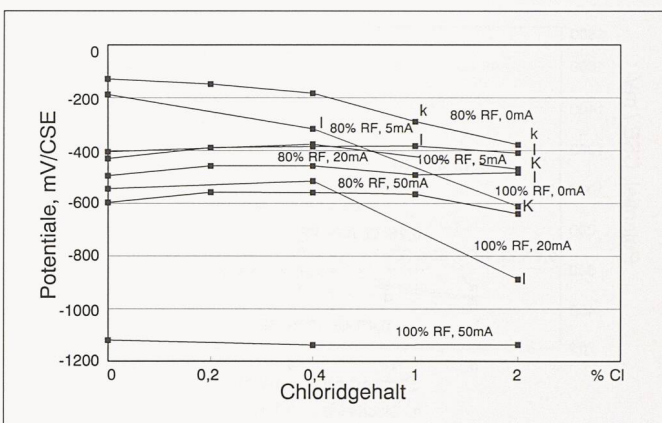


Bild 2. Ruhepotentiale in Funktion des Chloridgehaltes. I = Schwache Lochkorrosion (Rostgrad 2, < 0,2 mm); k = Lochkorrosion (Korrosionsgrad 3, 0,2 bis 1 mm); K = Loch- und Flächenkorrosion (Rostgrad 4,5, > 1 mm).

Bild 3. (rechts oben) Ruhe- und Ausschaltpotentiale. Potentiale bei 20°C, in Funktion von Chlorid, relativer Feuchtigkeit und Stromdichte. I = Schwache Lochkorrosion (Rostgrad 2, < 0,2 mm); k = Lochkorrosion (Korrosionsgrad 3, 0,2 bis 1 mm); K = Loch- und Flächenkorrosion (Rostgrad 4,5, > 1 mm).

Bild 4. Ruhe- und Ausschaltpotentiale: Potentiale bei 20°C, in Funktion von Chlorid, Feuchte und Stromdichte. I = Schwache Lochkorrosion (Rostgrad 2, < 0,2 mm); k = Lochkorrosion (Korrosionsgrad 3, 0,2 bis 1 mm).



eine Bezugselektrode in TFB-Standardbeton eingegossen. Auf den frisch vibrierten Beton wurde das Anodenetz gelegt und flächendeckend mit 3 cm Labormörtel aufgefüllt.

Beton:

TFB-Standardbeton 0 – 16 mm

W/Z = 0,5, 300 kg PC/m³

0,8% Sikament 300 (HBV)

0 - 4% Chlorid bezüglich Zement

Der Labormörtel wies folgende Zusammensetzung auf:

Mörtel:

Labormörtel 0 – 5 mm (Normsand, TFB) W/Z = 0,4, 450 kg PC/m³, 1% Sikament 300 oder Fertigmörtel mit oder ohne Kunststoffzusatz

Neben dem PC-Mörtel fanden auch kommerzielle Mörtelmischungen Verwendung.

Ausser diesen Normprüfkörpern wurden auch grössere Prüfkörper untersucht, um das Verhalten der Prüfkörper bei inhomogener Versalzung genauer zu untersuchen.

Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung 28 Tage bei 95% relativer Feuchtigkeit nachbehandelt. Anschliessend gelangten sie in die Klimakammern, die die relativen Feuchtigkeiten aufwiesen, die zwischen 43% und 100% lagen. Für jedes Klima, d.h. für jede Kombination von Temperatur und rela-

tiver Feuchtigkeit, wurde eine separate Klimakammer verwendet.

Die in den Kammern befindlichen Prüfkörper wurden elektrisch an den computerunterstützten Messplatz angeschlossen.

Potential- und Strommessungen

Der Versuchsbeginn bestand darin, die Ruhepotentiale der 2 Probestähle sowie das Potential der eingegossenen Anode zu messen und zu registrieren (Null-Messung).

Darauf wurde der für die Probe typische Schutzstrom eingestellt und konstant gehalten.

In regelmässigen Zeitabständen von 12 Stunden wurden die aufgegebenen Schutzströme sowie die Ein- und Ausschaltpotentiale der Stahlproben sowie des Anodennetzes gemessen und registriert.

Im Regelfall wurden die Prüfkörper zwischen einem halben Jahr bis über einem Jahr unter den gegebenen Auslagerungsbedingungen gehalten, regelmässig gemessen und überwacht.

Mit der Zeit stellten sich in der Regel konstante Potentialwerte ein.

Die eingebauten Bezugselektroden wurden etwa zweimal im Monat durch Auflegen einer geeichten externen Bezugselektrode vom Typ Kupfer/Kupfersulfat (CSE) geeicht. Alle Potentialwerte wurden bei der Auswertung auf das CSE-Potential umgerechnet.

Depolarisationsmessungen

Zur Beurteilung der Güte des KKS dienten Depolarisationsmessungen. Dabei wurde der Schutzstrom für eine Dauer von 4 Stunden unterbrochen und der Anstieg des Ausschaltpotentials, d.h. die Depolarisation der Stahlelektroden bestimmt. In der Literatur [1] wird dieser Messwert auch 100 mV-Kriterium genannt.

Die grafische Darstellung der Ausschaltpotentiale in Funktion der Depolarisationspotentiale zeigt Bild 8.

Korrosionszustand

Zur Beurteilung der elektrochemischen Messungen wurden die Proben nach der Versuchszeit systematisch demontiert und ihr Zustand untersucht.

Die Tiefe der Angriffe wurde gemessen und mit einem Buchstaben (I, k, K) charakterisiert. Diese Werte wurden in die Bilder 2 – 4 und 8 eingetragen, sodass neben den Potentialen auch die Angriffsintensitäten ersichtlich sind.

Leitfähigkeit der Mörtel

Zur Untersuchung der Leitfähigkeit der eingesetzten Mörtel in Funktion der relativen Umgebungfeuchtigkeit wurden Probestücke von 4 x 4 x 16 cm hergestellt. In diese wurden mit Leitsilber Elektroden plziert. Zwei davon befanden sich auf den 4 x 4 cm Endflächen, die andern zwei in Bohrungen, je 5,3 cm voneinander entfernt.

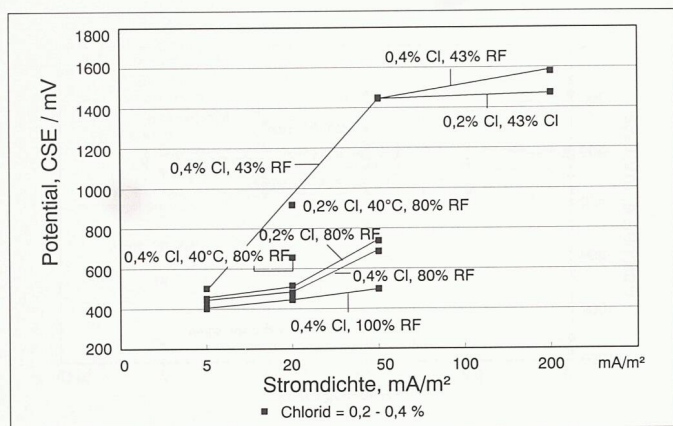


Bild 5. Anodenpotential: Ausschaltpotentiale in Funktion von Stromdichte, Klima.

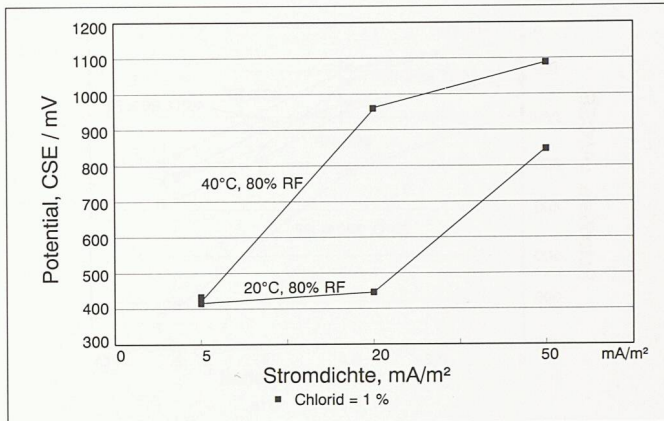


Bild 6. (rechts oben) Anodenpotential: Ausschaltpotentiale in Funktion von Stromdichte, Klima

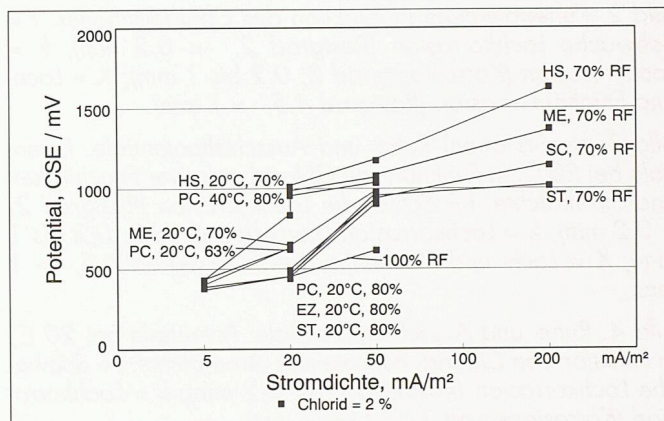


Bild 7. Anodenpotential: Ausschaltpotentiale in Funktion von Stromdichte, Klima

Mit der sogenannten Vierpunkt-(Wenner) Widerstandsmessmethode konnte somit der elektrische Widerstand unter Wechselstrombeanspruchung genau gemessen werden.

Darstellung der Resultate

Ruhepotentiale

Bei allen, nicht mit Schutzstrom beaufschlagten Proben konnten Ruhepotentiale unter gegebener relativer Feuchtigkeit und im gegebenen chloridhaltigen Beton in Funktion der Zeit gemessen und beobachtet werden.

Dabei stellte sich heraus, dass die Potentiallage in der Regel nach einigen Monaten konstant war. Diese konstanten Endwerte sind in Bild 2: «Ruhepotentiale in Funktion des Chloridgehaltes» dargestellt.

Die Ruhepotentiale waren vor allem vom Chloridgehalt des Betons abhängig und sanken im Bereich von 0 bis 2% Chlorid um etwa 300 mV.

Als zweite Einflussgrösse hat sich die relative Luftfeuchtigkeit erwiesen, die sich mit der im Beton befindlichen relativen Feuchtigkeit im Gleichgewicht befand. Deren Einfluss betrug im Bereich von 43% bis 80% relativer Feuchtigkeit etwa 100 mV. Im Bereich von 80% bis 100% relativer Feuchtigkeit trat ein Abfall von ca. 80 mV bis 230 mV ein.

Diese relative Feuchtigkeit des Betons würde sich an realen Strukturen gut

messen lassen und wäre einzig von der Temperatur abhängig.

Die Kombination von hohem Chloridgehalt und hoher Feuchtigkeit, die in realen Strukturen oft auftritt, hatte bezüglich einer trockenen, unversalzten Probe einen Ruhepotentialabfall von ca. 600 mV zur Folge.

Gleichzeitig wurde in das Diagramm auch der Rostgrad eingezeichnet, der auf der visuellen Beurteilung des Korrosionszustandes der Stahlproben nach Ablauf der Versuche basiert.

Der Rostgrad und damit auch die Korrosionsgeschwindigkeit waren vor allem vom Chloridgehalt abhängig. Bei Gehalten von $\geq 0,4\%$ traten deutliche Korrosionserscheinungen auf. Bei höheren relativen Feuchtigkeiten (70%) waren sie stärker ausgeprägt.

Ruhe- und Ausschaltpotentiale der mit Schutzstrom beaufschlagten Prüfkörper

Durch die Wirkung der Schutzströme wurden die Potentiale der Bewehrungsstähle in den Prüfkörpern gesenkt. In den Bildern 3 und 4 sind die Ruhe- und Ausschaltpotentiale der Prüfkörper ohne und mit Schutzstrombeaufschlagung eingetragen.

Als Parameter diente die Gleichgewichtsfeuchtigkeit der Umgebungsluft der Prüfkörper.

Wie aus den Bildern 3 und 4 hervorgeht, wurden praktisch alle Proben, die sich im belüfteten Beton befanden, auf den

Bereich zwischen -400 bis -600 mV polarisiert.

Damit lagen die Ausschaltpotentiale der Stahlproben in der Grössenordnung der Ausschaltpotentiale von Stahlproben, die sich in chloridhaltigem Beton in Korrosion befanden.

Im Vergleich zu den Ruhepotentialen zeigte sich, dass die Ausschaltpotentiale bei einer Beaufschlagung mit einer Stromdichte von 5 bis 20 mA/m² bei mittleren Feuchtigkeiten in derselben Grössenordnung lagen wie die Ruhepotentiale von stark korrodierenden Proben bei hohem Chloridgehalt und hohen Feuchtigkeiten.

Durch Messen der Ausschaltpotentiale konnte somit nicht mehr auf den Korrosionszustand sowie die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrungsstähle geschlossen werden, wie dies bei der Ruhepotentialmessung von Stahlproben ohne Strombeeinflussung möglich ist.

Die Messung des Korrosionszustandes kathodisch geschützter Stahlproben gelingt aber durch Überprüfen der Depolarisationspotentiale.

Ausschaltpotentiale der Anoden

Bilder 5, 6 und 7 zeigen Potentiale der untersuchten Anodennetze. Aus den Diagrammen geht hervor, dass die Ausschaltpotentiale der Anoden bei geringen Stromdichten und relativ hohen Feuchtigkeiten im Bereich von $+500$ mV lagen. Bei hohen Anodenstrom-

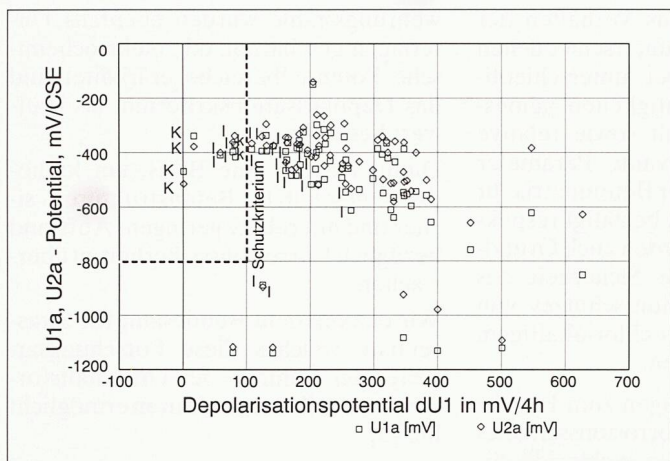


Bild 8. Depolarisationspotential dU_1 in Funktion der Ausschaltpotentiale U_{1a} , U_{2a} . I = Schwache Lochkorrosion (Rostgrad 2, $< 0,2$ mm); k = Lochkorrosion (Korrosionsgrad 3, $0,2$ bis 1 mm); K = Loch- und Flächenkorrosion (Rostgrad 4,5, > 1 mm).

ichten (es wurde bis zum Zehnfachen des zulässigen Grenzwertes eingespiessen), bei relativ geringen Feuchtigkeiten und bei hohen Temperaturen hatten die Ausschaltpotentiale der Anoden mit der Zeit die Tendenz, auf Werte von über 1000 mV bis in den Bereich von 1500 mV anzusteigen.

Dieser Anstieg war darauf zurückzuführen, dass die Mörtel-Umhüllung der Anode mit der Zeit sauer wurde. In solchen Fällen bestand die Anodenumgebung somit hauptsächlich aus sauren Lösungen von Calciumchlorid.

Die Messung der Haftzugfestigkeit der Mörtel an ausgesuchten Proben, ohne und mit Strombeaufschlagung, zeigte keine Beeinträchtigung der Haftung durch den elektrischen Strom.

Depolarisationspotentiale der Stahlproben

Bild 8 zeigt die Ausschaltpotentiale der beiden Stahlproben in Funktion der Depolarisationswerte der oberen Stahlprobe.

Ebenso ist der schon erwähnte Rostgrad, der auf der nach der Versuchszeit gemessenen, maximalen Angriffstiefe basiert, enthalten.

Das Diagramm zeigt eindeutig, dass bei Depolarisationswerten von deutlich unter 100 mV/4h starke Korrosion auftrat. Bei Depolarisationswerten über 150 mV trat keine Korrosion mehr auf.

Auch aus Bild 8 geht klar hervor, dass korrodierende sowie geschützte Proben ähnliche Potentiale aufwiesen. Ausschaltpotentiale können nur dann als Bewertungskriterium für die Korrosionsgeschwindigkeit dienen, wenn sie unter -850 mV lagen. Dann waren die Stahloberflächen kathodisch geschützt, unabhängig von den Depolarisationswerten.

Somit wurde gezeigt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit kathodisch geschützter Strukturen mit Depolarisationsmessungen beurteilt werden kann.

Depolarisationswerte > 100 mV/4 h waren ausreichend, um Korrosionsangriffe zu vermeiden.

Dieser Befund ist äusserst interessant und steht im Gegensatz zum klassischen kathodischen Korrosionsschutz, wo als Schutzkriterium Ausschaltpotentiale von > -900 mV gelten.

Aus diesem Verhalten muss geschlossen werden, dass der Schutzmechanismus des kathodischen Korrosionsschutzes von Bewehrungsstählen in Beton ein anderer ist als derjenige von kathodisch geschützten, erdverlegten Systemen.

Im klassischen kathodischen Korrosionsschutz werden Stahloberflächen in einen Potentialbereich gebracht, bei dem sie aus thermodynamischen Gründen nicht mehr korrodieren können. Beim kathodischen Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen wird die Repassivierung der Stahloberfläche durch Realkalisierung und durch Chloridentzug ermöglicht.

Zur Beurteilung von Korrosionsangriffen sowie von Korrosionsschutzmassnahmen ist es wichtig, diesen unterschiedlichen Schutzmechanismus zu kennen und ausreichend zu berücksichtigen.

Leitfähigkeit von Mörtelsystemen

Die untersuchten Mörteltypen wurden mit Hilfe der Wenner-Methode auf die spezifische Leitfähigkeit der Mörtelmasse untersucht.

Aus Diagramm Bild 9 geht hervor, dass die spezifische Leitfähigkeit der Mörtel vorzugsweise von der relativen Feuchte

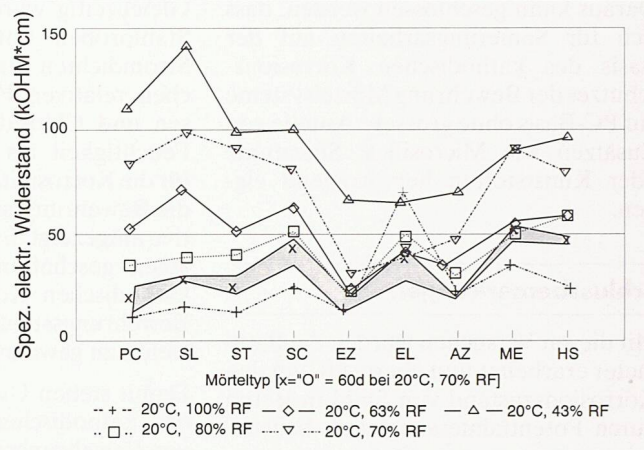


Bild 9. KKS-Mörtel, spezifische elektrische Widerstände nach 307 Tagen

der Umgebung, die mit der Probe im Gleichgewicht stand, abhing.

Im weiteren wurde festgestellt, dass PC-Mörtel ohne spezielle Zusätze wie kollidale Kieselsäure oder grössere Mengen von Kunststoff die niedrigsten Widerstände und somit die besten Leitfähigkeitswerte aufwiesen.

Bei relativen Feuchtigkeiten von 80% und höher blieben die relativ guten Leitfähigkeiten über die ganze Versuchszeit erhalten.

Bei trockener Umgebung, bei $< 60\%$ relativer Feuchtigkeit trockneten die Proben im Verlauf von Monaten langsam aus und erreichten spezifische Widerstände, die etwa dem Doppelten bis dem Vierfachen des ursprünglichen Wertes entsprachen.

Literatur

- [1] NACE-Standard RP 0 290-90, Item No. 53072: Cathodic Protection of Reinforcing Steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures
- [2] SIA-Merkblatt 2006: Durchführung und Interpretation der Potentialmessung an Stahlbetonbauten
- [3] Forschungsbericht Nr. 503 der Brückenunterhaltsforschung des Bundesamtes für Strassenbau: «Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen. Langzeitbeständigkeit von Anodenmaterialien und Mörteln», Helbling Ingenieurunternehmung AG, Zürich; TFB, Techn. Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie, Wildeg, R.O. Müller und K. Holtzhauer, August 1992.
- [4] D 099, Erhaltung von Brücken SIA-Informationstagung FBH GPC vom 11. März 1993, ETH Zürich, R.O. Müller und K. Holtzhauer, Tagungsunterlagen Seite 139

Daraus kann geschlossen werden, dass sich für Sanierungsarbeiten auf der Basis des kathodischen Korrosionsschutzes der Bewehrung Mörtelsysteme auf PC-Basis ohne grössere Anteile von Zusätzen wie Microsilica, Silicafume oder Kunststoffen hervorragend eignen.

Schlussbemerkungen

Mit diesen Versuchen wurden die Parameter erarbeitet und überprüft, um den Korrosionszustand von Stahl in Beton durch Potentialmessungen zu beurteilen.

Die klaren Zusammenhänge zwischen Chloridgehalt, relativer Feuchtigkeit und Potentiallage ergibt eine Basis, die zur Ermittlung von «Ist-Zuständen» bezüglich des Korrosionszustandes gemäss SIA-Merkblatt 2006 [2] verwendet werden kann.

Gleichzeitig wurde das Verhalten der Stahlproben unter unterschiedlichen Stromdichten und bei unterschiedlichen relativen Feuchtigkeiten gemessen und Chloridgehalt sowie relative Feuchtigkeit als relevante Parameter für die Korrosivität der Betonmatrix für die Bewehrungsstäbe bestätigt respektive aufgezeigt. Es wurden auch Grundlagen geschaffen, die Sicherheit des kathodischen Korrosionsschutzes von Bewehrungsstählen in chloridhaltigem Beton zu gewährleisten.

Damit stehen Unterlagen zum Einsatz des kathodischen Korrosionsschutzes von Bewehrungsstählen in chloridhaltigem Beton zur Verfügung. Somit wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, chloridhaltige Strukturen ohne Ersatz des chloridkontaminierten Betons sicher instand zu stellen.

Zur Beurteilung des Korrosionsschutzes kathodisch geschützter Be-

wehrungsstäbe wurden ebenfalls Unterlagen geschaffen, d.h. elektrochemische Potentialbereiche erarbeitet und das Depolarisationskriterium als Prüfwert bestätigt.

Damit besteht eine Basis, um kathodisch geschützte Betonstrukturen sicher und mit relativ geringem Aufwand bezüglich Korrosionssicherheit zu überwachen.

Wir danken dem Bundesamt für Strassenbau, welches diese Forschungsarbeiten im Rahmen der Unterhaltsforschung von Betonstrukturen ermöglicht hat [3].

Adressen der Verfasser: Dr. R.O. Müller, Helbling Ingenieurunternehmung AG, Hohlstrasse 610, 8048 Zürich; und Dr. K. Holtzhauer, Techn. Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie, Lindenstrasse 10, 5103 Wildegg.

Überwerfung von Eisenbahnlinien

Für die Autobahnen haben sich kreuzungsfrei verflochtene Verkehrsknoten durchgesetzt. Die Gründe liegen bei der guten Leistungsfähigkeit und kleinen Unfallhäufigkeit dieser Verknüpfungsanlagen. Es stellt sich die Frage, ob Überwerfungen bei Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnlinien ähnliche Vorteile bieten. Die Frage ist in der Schweiz aktuell, da mit «Bahn 2000» und den neuen Alpentransversalen grosse Investitionsprogramme bevorstehen, die zu einem eng verflochtenen Hochgeschwindigkeitsnetz mit grosser Zugdichte führen.

Problemstellung

Aus der Sicht des Verkehrsingenieurs weisen Strassen- und Eisenbahnknoten wenig Gemeinsamkeiten auf, was bei

VON PETER GIGER UND
MARKUS MONTIGEL,
ZÜRICH

allfälligen Analogieüberlegungen zur Vorsicht mahnt:

- Aus Adhäsionsgründen liegt bei der konventionellen Eisenbahn die maximal zulässige Steigung in der Grössenordnung von 1 bis 3%. Fahrleitungen erfordern lichte Höhen von 6.50 m, während bei der Strasse 4.50 m genügen. Ferner benötigt die Bahn grössere Kurvenradien als das Automobil. Aus diesen Gründen entstehen aufwendige Gleisüberwerfun-

gen, die viel Kapital binden und bei der benachbarten Bevölkerung häufig zu Widerständen aus Gründen des Landschaftsschutzes führen.

- Im Gegensatz zur Strasse spielen für die Eisenbahn Sicherheitsüberlegungen bei der Knotengestaltung keine Rolle. Kollisionsrisiken werden an höhengleichen Kreuzungsstellen durch die Stellenwerkanlagen mit ausreichender Sicherheit unterbunden.
- Bezüglich Leistungsfähigkeit sind kaum Analogien zwischen Strasse und Eisenbahn gegeben. Automobile verkehren in grosser Zahl nach stochastischen Gesetzmässigkeiten, während Züge seltener auftreten und nach konstruierten Fahrplänen verkehren.

Der Fahrplan stellt ein kostengünstiges Steuerungsinstrument dar, das bei der Eisenbahn zur Vermeidung von Behin-

derungssituationen an höhengleichen Gleisverflechtungen eingesetzt werden kann. Somit ist ein Hilfsmittel gesucht, das der Quantifizierung des Nutzens von Gleisüberwerfungen bei gegebenen Fahrplänen dient. Hier spielt das Problem der Zugverspätungen eine massgebende Rolle, was mit der mathematischen Statistik untersucht werden kann.

Häufigkeitsverteilung von Zugverspätungen

Für die Häufigkeitsverteilung von Zugverspätungen wurden in der Fachliteratur verschiedene Ansätze vorgeschlagen. Für das vorliegende Problem wird ein Ansatz gewählt, der die empirisch festgestellten Häufigkeitsverteilungen befriedigend genau beschreibt und eine einfache mathematische Bearbeitung der Fragestellung ermöglicht. Es handelt sich um die Exponentialverteilung mit folgender Dichtefunktion:

$$h(t) = \frac{e^{-(t/m)}}{m} (1)$$

Hier bedeutet h die Häufigkeit einer Zugverspätung der Grösse t , e die Basis der natürlichen Logarithmen und m den Mittelwert aller Verspätungen. Bild 1 zeigt ein Beispiel einer Häufigkeitsverteilung der Zugverspätungen als Histogramm mit dazugehöriger Näherung als Exponentialverteilung.

Bei der Exponentialverteilung lässt sich die Häufigkeit durch den Mittelwert m