

Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton: vom Labor zur Bauwerkerhaltung

Autor(en): **Elsener, Bernhard**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 5

PDF erstellt am: **04.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79196>

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.

Bernhard Elsener, Zürich

Korrosionsgeschwindigkeit von Stahl in Beton

Vom Labor zur Bauwerkerhaltung

Immer mehr Bauwerke aus Stahlbeton müssen aufgrund zunehmender Umwelt- und Verkehrsbelastung oder Altersgründen erneuert werden [1]. Angesichts der hohen Kosten für die Instandsetzung einer Brücke (Fr. 1500.-/m² [2]) und der gleichzeitig knapper werdenden Gelder ist ein effizienter Einsatz der Mittel zwingend. Voraussetzung, dass die heute ausgeführten Arbeiten nicht zu den Schäden von morgen geraten, ist ein vertieftes Verständnis der Dauerhaftigkeit von Baustoffen, vor allem der Korrosion der Bewehrung.

Das Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) der ETH Zürich arbeitet seit mehr als 10 Jahren mit Erfolg an der Erforschung materialtechnologischer Zusammenhänge bei der Korrosion von Stahl in Beton. Grundlagenforschung im Labor, Testen und Anwenden der Methoden auf Bauwerken sowie das Umsetzen in die Praxis der Bauwerkerhaltung gingen stets Hand in Hand. Erwähnt seien insbesondere die wegweisenden Arbeiten zur Potentialfeldmessung, die dem Ingenieur ein nicht mehr wegzudenkendes Hilfsmittel bei der Zustandserfassung von Bauwerken liefert, die kritische Begleitung der ersten Anwendungen elektrochemischer Schutz- und Instandsetzungsverfahren in der Schweiz, die Studien zum Transportverhalten von Wasser und Chloriden in Beton, zum elektrischen Widerstand des Betons sowie die laufenden Arbeiten zum Monitoring von alten und von instandgesetzten Bauwerken.

Der vorliegende Artikel konzentriert sich auf einen bei der Zustandserfassung und der Beurteilung des Erfolgs von Instandsetzungsmassnahmen wichtigen Aspekt, die Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung in Beton. Im Sinne eines «State of the Art»-Berichts werden die Bedeutung, die Möglichkeiten und Grenzen der heute zur Verfügung stehenden Verfahren aufgezeigt. Die Arbeiten wurden im Rahmen eines ASB-Forschungsprojekts durchgeführt und kürzlich publiziert [3].

Bedeutung

An exponierten Bauteilen wie Stützen, Schrammborden oder Teilen der Brückenplatte kommen oft sehr hohe Chloridkonzentrationen im Überdeckungsbeton vor. Diese stellen bei gleichzeitigem Vorliegen von Feuchtigkeit und Sauerstoff auch in ansonsten guter Bausubstanz ein grosses Korrosionsrisiko dar. Der zeitliche Verlauf der Korrosion kann in eine Initiierungsphase und eine Phase des Korrosionsfortschritts eingeteilt werden (Bild 1). Der Zeitpunkt der Depassivierung des Stahls hängt - neben den Expositionsbedingungen - vom Eindringen der Schadstoffe in den Beton, d.h. von der Dicke der Betonüberdeckung sowie der Qualität des

Polarisationswiderstand

Die elektrochemische Kennlinie des Stahls in Beton kann experimentell mit geeigneten Geräten erfasst werden [3, 7]. Die reziproke Steigung der Kennlinie am Korrosionspotential E_{korr} ist der Widerstand gegen den (Korrosions-) Stromdurchtritt durch die Grenzfläche Stahl/Porenlösung und wird als Polarisationswiderstand R_p bezeichnet. Die Korrosionsgeschwindigkeit i_{korr} ist für gleichmässigen Angriff umgekehrt proportional zu R_p :

$$i_{korr} = B / R_p \quad [\mu A/cm^2]$$

Ein sehr grosser Wert von R_p (im Bereich von $M\Omega cm^2$) ist gleichbedeutend mit vernachlässigbar geringer Korrosion (passiver Stahl), kleine Werte von R_p (im Bereich von $k\Omega cm^2$) entsprechen hohen Korrosionsgeschwindigkeiten (Tabelle). Die Konstante B wurde vielfach im Bereich von 0,025 bis 0,030 V gemessen.

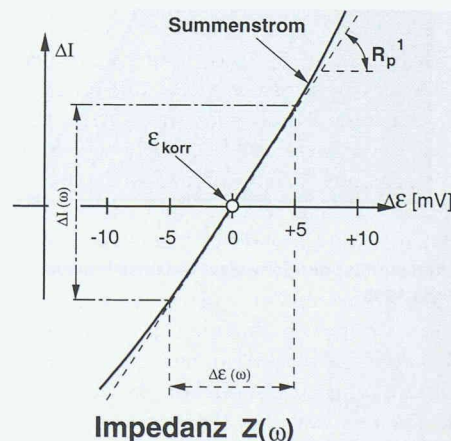
Der experimentell gemessene Polarisationswiderstand R_p' ist flächenabhängig, um eine korrekte Aussage über die Korrosionsstromdichte

Äquivalente Werte des Polarisationswiderstands, der Korrosionsstromdichte, des Gewichtsverlusts und des Querschnittsverlusts für Eisen

Polarisationswiderstand [kΩ cm ²]	Stromdichte [μA/cm ²]	Gewichtsverlust [g/m ² d]	Querschnittsverlust [μm/Jahr]
≥ 1000	< 0,03	< 0,01	< 0,4
250 - 300	0,1	0,025	1,2
25 - 30	1	0,25	11,6
2 - 3	10	2,5	116
0,2 - 0,3	100	25	1160

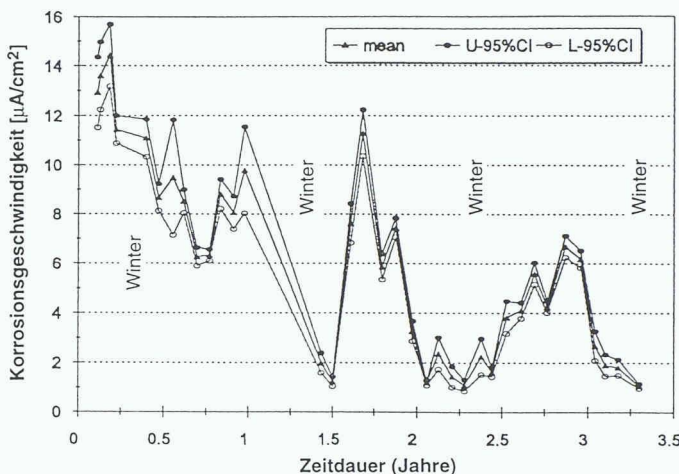
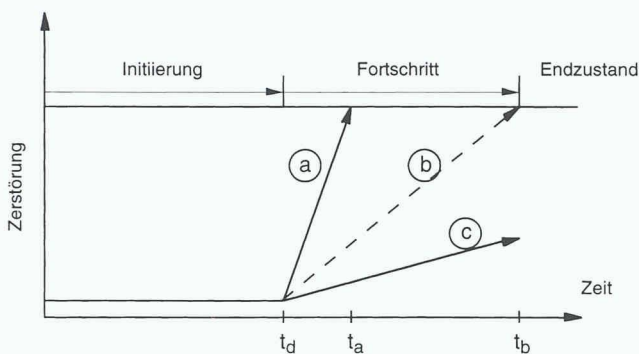
MG. Die vier Artikel des Hauptteils, die sich alle mit Aspekten des Korrosionsschutzes befassen, sind von den jeweiligen Autoren aus Anlass des 60. Geburtstages von Prof. Dr. Hans Böbni verfasst worden. Eine Würdigung seiner Person findet sich auf Seite 98.

Überdeckungsbetons ab. Die folgende Phase des Korrosionsfortschritts ist insbesondere von der Art der Feuchtigkeitseinwirkung, den mikroklimatischen Verhältnissen sowie vom Sauerstoffzutritt abhängig. Bis heute kann weder die Dauer der Initiierungsphase noch die Intensität des Korrosionsfortschritts theoretisch vorausgesagt werden. Eine effiziente Bauwerkerhaltung erfordert daher eine organisierte Überwachung. Nach der neuen Norm SIA E469 «Erhalten von Bauwerken» (im Entwurf) müssen in regelmässigen Abständen Inspektionen (mit einfachen Mitteln) durchgeführt werden. Liefert eine solche Inspektion keine zuverlässige Zustandsbewertung, so ist eine Überprüfung mit weitergehenden Untersuchungsmetho-



zu erhalten, muss $R_p' [\Omega]$ mit der Fläche der gemessenen Stahloberfläche $[cm^2]$ multipliziert werden.

Polarisationswiderstand als Steigung der Summenstromdichte/Potentialkurve am Korrosionspotential E_{korr}



1
Allgemeines Schema des zeitlichen Ablaufs der Korrosion von Stahl in Beton [4]. t_d : Zeitpunkt der Depassivierung; t_a , t_b : Erreichen des Endzustands bei Korrosionsgeschwindigkeit a, b; a, b, c: Korrosionsgeschwindigkeiten $a > b > c$

2
Korrosionsgeschwindigkeit, berechnet aus dem gemessenen Polarisationswiderstand R_p , als Funktion der Zeit. Bewehrte Probenplatte, 2% Chloride zugemischt, Aussenlagerung. Zeit 0 = Herbst [8]. Deutlich ersichtlich sind die Minima der Korrosionsgeschwindigkeit im Winter

den zur Abklärung der Schadenursache durchzuführen.

Sinnvollerweise werden zunächst zerstörungsfreie, erst dann zerstörende Methoden eingesetzt. Die wichtigste zerstörungsfreie Methode, die Potential(feld)messung [5, 6], ist heute Stand der Technik und wird von vielen Ingenieuren bei der Zustandserfassung eingesetzt. Korrodierende Bereiche können rasch, zerstörungsfrei, flächendeckend und präzise lokalisiert werden. Aus den gemessenen Potentialwerten lässt sich bauteilspezifisch auf den Korrosionszustand der Bewehrung schliessen, eine Aussage über die Korrosionsgeschwindigkeit lässt sich aus den Potentialwerten jedoch nicht ableiten. Um eine Zustandsbeurteilung vornehmen zu können bzw. im Rahmen der Erhaltungsstudie verschiedene Instandsetzungsvarianten vergleichen zu können, ist die weitere Entwicklung der Korrosion, also die Korrosionsgeschwindigkeit, von zentraler Bedeutung (Bild 1). Sie bildet einen wichtigen Baustein in der Entscheidungsfindung über Zeitpunkt, Ausmass und Art von Instandsetzungsmaßnahmen.

Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit

Beim Begriff Korrosionsgeschwindigkeit müssen zwei Bedeutungen klar unterschieden werden:

▪ **Durchschnittswerte**

Korrosionsgeschwindigkeiten können als Durchschnittswerte über eine längere Zeit durch Gewichts- oder Quer-

schnittsverlustmessungen im Labor oder - durch Freilegen der Bewehrung - auch auf Bauwerken gemessen werden. Ist der Zeitpunkt der Depassivierung, d.h. der Beginn der Korrosion, nicht bekannt, so werden zu kleine Angriffsgeschwindigkeiten berechnet. Weiter kann sich der so bestimmte Durchschnittswert aus Perioden mit viel höheren und viel geringeren Korrosionsgeschwindigkeiten zusammensetzen (Bild 2) [8].

▪ **Momentane Werte**

Mit elektrochemischen Verfahren kann (über die Bestimmung des sog. Polarisationswiderstands, Kasten) die momentane Korrosionsgeschwindigkeit rasch, zerstörungsfrei und «in situ» bestimmt werden. Die erhaltenen Werte gelten jedoch nur für die klimatischen Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) zum Zeitpunkt der Messungen.

Im folgenden wird die Bestimmung momentaner Werte der Korrosionsgeschwindigkeit i_{kor} im Labor und auf Bauwerken vorgestellt und diskutiert. Die verschiedenen elektrochemischen Methoden zur Erfassung von i_{kor} [3, 7] beruhen alle auf der experimentellen Bestimmung des Polarisationswiderstands R_p (Kasten). Der erforderliche Messaufbau ist schematisch in Bild 3 dargestellt: zwischen der Bewehrung (Arbeitslektrode) und der auf der Betonoberfläche aufgesetzten Gegenelektrode wird eine kleine Spannung ΔE angelegt und der resultierende Strom ΔI gemessen, und das Potential der Bewehrung wird über die Bezugslektrode gemessen und über den Potentiostaten geregelt. Der Unterschied zwischen Messun-

gen im Labor bzw. an grossen Prüfkörpern und Messungen auf Bauwerken liegt in der geometrischen Anordnung (Bild 4):

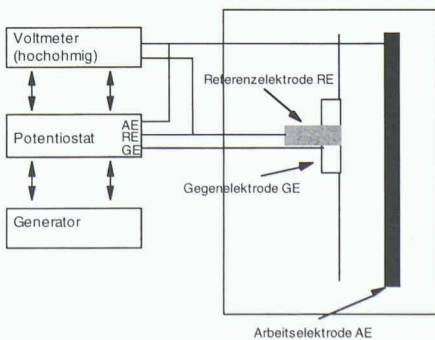
▪ An Prüfkörpern kann die Gegenelektrode der Grösse der Arbeitselektrode angepasst werden, es resultiert ein homogenes elektrisches Feld (Bild 4a).

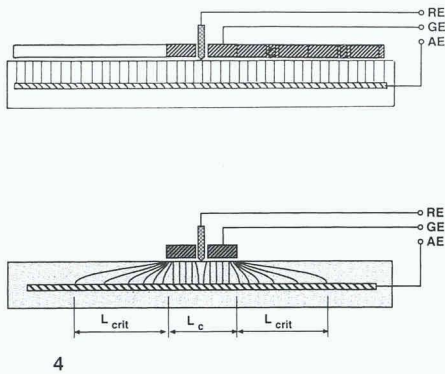
▪ Auf Bauwerken ist die auf der Betonoberfläche aufgesetzte Gegenelektrode stets viel kleiner als die (praktisch unendlich ausgedehnte) Bewehrung, das elektrische Feld breitet sich aus (Bild 4b), die Fläche der vom Strom erreichten Bewehrung ist nicht a priori bekannt.

Messungen an Probekörpern – homogene Geometrie

Zahlreiche Untersuchungen im Labor zeigten die sehr gute Übereinstimmung des aus Messungen von R_p bestimmten

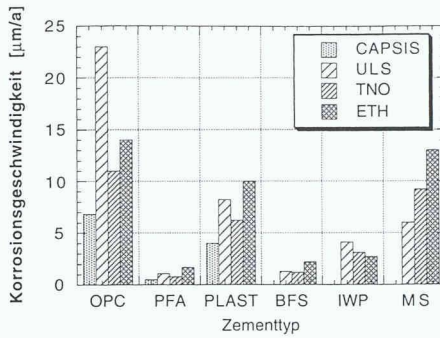
3
Schematische Darstellung der Messanordnung für elektrochemische Messungen. AE: Arbeitslektrode (Bewehrung), RE: Referenzelektrode, GE: Gegenelektrode





4 Die geometrische Anordnung von Arbeitselektrode (AE) und Gegenelektrode (GE) bestimmt das elektrische Feld: a) homogene Stromverteilung, b) inhomogene Stromverteilung

Korrosionsabtrags mit Gewichtsverlustmessungen [8]. Im weiteren sind die im Labor gemessenen Werte des Polarisationswiderstands R_p weitgehend unabhängig von der angewandten Messmethode [3, 9]. Im Rahmen der internationalen Forschungszusammenarbeit COST 509 (Corrosion of Metals in Contact with Concrete) wurden R_p -Messungen an grossen Betonblöcken durchgeführt. Die armierten Betonblöcke, hergestellt mit verschiedenen Zementen, waren über acht Jahre dem Meer- bzw. Spritzwasser ausgesetzt und zeigten teilweise bereits erhebliche Abplatzungen über den äussersten Bewehrungsstählen ($d=10\text{mm}$). Wie die Resultate zeigen (Bild 5), bestehen zwischen verschiedenen Messgeräten, -methoden und Anwendern verfahrensbedingte Unterschiede von bis zu einem Faktor 2: Drei der teilnehmenden Forschungsstellen (ULS, Università la Sapienza, Rom, Italien, TNO Building and Construction



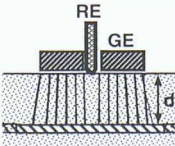
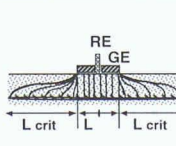
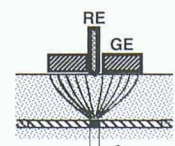
5 Vergleich der Messwerte der Korrosionsgeschwindigkeit an unterschiedlichen Zementtypen, ausgeführt von den verschiedenen Forschungsstellen

Research, Delft, Holland, und CAPSIS, Manchester, England) benützten zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit Geräte, die auf der LPR-Technik (Linearer Polarisationswiderstand) beruhen. Die Messungen des Instituts für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) wurden mit der Galvanostatischen Puls-Methode [3, 9, 10] durchgeführt. Die Umrechnungen von R_p zur Korrosionsgeschwindigkeit in $\mu\text{m/a}$ wurden mit der Bewehrungsfläche von 500cm^2 und dem Faktor $B=0,026\text{V}$ vorgenommen. Trotz der verfahrensbedingten Streuungen bleibt der Einfluss der verschiedenen Zementtypen in den verschiedenen Prüfkörpern klar ersichtlich.

Messungen auf Bauwerken – Stromausbreitung

Auf Bauwerken wird der experimentell gemessene Polarisationswiderstand R_p' von der inhomogenen Stromausbreitung

6 Situation bei der Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit aus R_p -Messungen. Betonüberdeckung d , Gegenelektrodenradius L , kritische Länge L_{crit} , Gegenelektrode GE, Referenzelektrode RE

	aktiv	passiv	lokal
elektrisches Feld Gleichstrom (DC)			
exper. Messwert	R_p aktiv	R_p' passiv	R_p' lokal
Feld-Ausdehnung	$L / d > 3$	$L / d = 2.5$	$L / d = 2.5, d = 3\text{ cm}$
L_{crit} feucht	L_{crit} ca. 1 cm	L_{crit} ca. 40 cm	Konzentration
L_{crit} trocken	$L_{crit} < 1\text{ cm}$	L_{crit} ca. 15 cm	
Berechnung der Fläche A	$A = \pi * L^2$	$A = \pi (L+L_{crit})^2$	$A = \pi * r^2$
spezifischer R_p mit GE-Fläche	$R_p = R_p' \text{ aktiv} * A$ korrekt	viel zu klein	zu gross
Geschwindigkeit	korrekt	viel zu gross	zu klein

v_{korr}

zwischen Gegenelektrode auf der Betonoberfläche und der Bewehrung bestimmt (Bild 4b). Ein Mass für die Ausbreitung ist die kritische Länge L_{crit} , definiert als diejenige Distanz, innerhalb der mehr als 90% des Gesamtstroms konzentriert sind [3, 11]. Die Stromausbreitung bzw. L_{crit} wird durch geometrische Faktoren (Betonüberdeckung d , Radius der Gegenelektrode L), die Betonleitfähigkeit und den Korrosionszustand der Bewehrung beeinflusst. Mittels Simulationsrechnungen zur Stromausbreitung kann L_{crit} für typische Fälle abgeschätzt werden (Bild 6):

■ Aktiv korrodierende Bewehrung

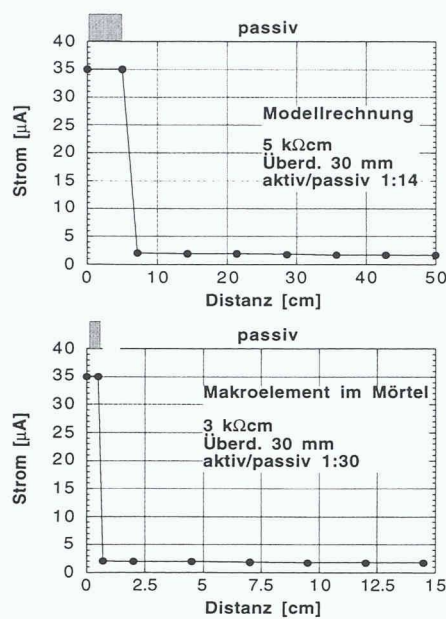
Im Fall gleichmässig korrodierender Bewehrung (entspricht einem kleinen spezifischen Polarisationswiderstand R_p) wird der Strom praktisch vollständig unter der Gegenelektrode konzentriert. Für eine Betonüberdeckung von 3 cm und einen Durchmesser der Gegenelektrode von 14 cm ($L=7\text{ cm}$) liegt L_{crit} bei 1 cm. Eine Vergrösserung der Überdeckung d erhöht L_{crit} , eine geringere Betonleitfähigkeit verkleinert L_{crit} . Daraus lässt sich schliessen, dass im Fall aktiv korrodierender Bewehrung korrekte Polarisationswiderstände bestimmt werden, die in Korrosionsgeschwindigkeiten umgerechnet werden können.

■ Passive Bewehrung

Passive Bewehrung weist einen sehr hohen spezifischen Polarisationswiderstand R_p auf, d.h. dem Eintritt des Stroms wird ein grosser Widerstand entgegengesetzt. Dies führt zu einer sehr starken Stromausbreitung (Bild 4b). Simulationsrechnungen zeigten, dass L_{crit} in der Grössenordnung von 40 cm oder mehr liegt, d.h. die vom Strom erreichte und damit für die Berechnung von R_p massgebende Fläche der Bewehrung ist rund 70 mal grösser als die Fläche der Gegenelektrode. Die auf passiven Flächen experimentell gemessenen Polarisationswiderstände R_p' sind bezogen auf die Fläche der Gegenelektrode stets viel zu klein. Ein Guard Ring, wie er z.B. im kommerziell erhältlichen Gerät GECOR6 eingesetzt wird [3], kann die Stromausbreitung stark reduzieren.

■ Lokal korrodierende Bewehrung

Im (wohl häufigsten) Fall lokal korrodierender Bewehrung liegen aktive Bereiche neben passiven vor. Der von der Gegenelektrode zur Bewehrung fliessende Strom konzentriert sich in den aktiven Bereichen (hot spots). Dies konnte sowohl durch Simulationsrechnungen als durch Messungen an Makroelementen im Labor nachgewiesen werden (Bild 7).



7

Stromausbreitung bei lokaler Korrosion: Vergleich der Resultate am Modell-Makroelement mit Simulationsrechnungen

Diese Stromkonzentration (self confinement) wird mit zunehmender Überdeckung d sowie kleinerem Radius L der Gegenelektrode stärker [12]. Weiter konnte gezeigt werden, dass der von aussen mit der Anordnung in Bild 3 gemessene Polarisationswiderstand R_p proportional zum im aktiv/passiv-Makroelement fließenden Korrosionsstrom ist [12]. Damit konnte die prinzipielle Eignung der R_p -Messtechnik auch für lokal korrodierende Bewehrung gezeigt werden – eine echte Korrosionsgeschwindigkeit kann jedoch nur berechnet werden, wenn die korrodierende Fläche ermittelt werden kann; entsprechende Forschungsarbeiten sind am IBWK im Gange.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die gemessenen R_p -Werte nur im Falle gleichmässiger Korrosion direkt in momentane Korrosionsgeschwindigkeiten umgerechnet werden können. Im Falle der häufig vorliegenden lokalen Korrosion wird wegen der inhomogenen Stromausbreitung die Korrosionsgeschwindigkeit mit sämtlichen heute kommerziell oder zu Tests eingesetzten Geräten unterschätzt.

Monitoring von instandgesetzten Bauwerken

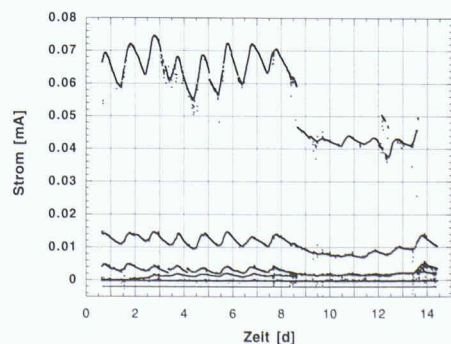
Häufig stellt sich das Problem, Bauwerke an kritischen Bereichen vor oder nach der Instandsetzung zu überwachen, sei es um den Korrosionsfortschritt quantifizieren zu können oder um den Erfolg einer Instandsetzung zu überprüfen. Dazu wurden am IBWK in den letzten Jahren eine Kom-

Literatur

- [1] Donzel, M.: Erhaltung von Brücken – Aktuelle Forschungsergebnisse. SIA-Dokumentation D0129, S. 7, Schweiz. Ingenieur und Architektenverein, Zürich, 1996
- [2] Figi, H.: Erhaltung der N13-Brücken im Kanton Graubünden, wie [1], S. 13
- [3] Elsener, B., Flückiger, D., Wójtas, H. und Böhni, H.: Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton. ASB-Forschungsbericht Nr. 521, EVED Bern, 1996
- [4] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. CBI forskning 4/82, Cement och Betonginstitutet, Stockholm, 1982
- [5] Elsener, B. und Böhni, H.: Lokalisierung von Korrosion in Stahlbeton. Schweizer Ingenieur und Architekt 19/87, S. 528-533, 1987, und Elsener, B.: Einsatz der Potentialmessung – Möglichkeiten und Grenzen. SIA-Dokumentation D 0126, S. 11-18, Schweiz. Ingenieur und Architektenverein Zürich, 1995
- [6] Hunkeler, F.: Grundlagen der Korrosion und Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. ASB-Forschungsbericht Nr. 510, EVED Bern, 1994, und Schweizer Ingenieur und Architekt, 12/91, S. 272 ff., 1991
- [7] Elsener, B.: Elektrochemische Methoden zur Bauwerksüberwachung. SIA-Dokumentation D020: Zerstörungsfreie Prüfung an Stahlbetonbauwerken, S. 27-37, Schweiz. Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1988, und Elsener, B. und Böhni, H.: Electrochemical Methods for Inspection of Reinforcement Corrosion in Concrete Structures – Field Experience. 4th Int. Symposium on Electrochemical Methods in Corrosion Research, EMCR 91, Helsinki, Materials Science Forum 111/112, S. 635-646, 1991
- [8] Liu, Y. and Weyers, R.E.: Time to cracking for chloride induced corrosion in reinforced concrete. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p. 88, ed. C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, SCI The Royal Society of Chemistry, London, 1996
- [9] Elsener, B. und Böhni, H.: Korrosion in Stahlbetontragwerken – Einflussgrößen und Möglichkeiten der Überwachung. SIA-Dokumentation D099, S. 45-53, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 1993
- [10] Elsener, B.: Corrosion Rate on Reinforced Concrete Structures Determined by Electrochemical Methods. Materials Science Forum 192-194, p. 857-866, 1995, and Elsener, B., Wójtas, H. and Böhni, H.: Galvanostatic Pulse Measurements – Rapid on site corrosion monitoring. Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete, ed. by R.N. Swamy, Sheffield Academic Press Vol. 1, p. 236-246, 1994
- [11] C. Andrade, C., Castelo, V., Cruz Alonso, M. and Gonzales, J.: Corrosion Effect of Stray Currents and the Techniques for Evaluating Corrosion of Rebars in Concrete. ASTM STP 906, V. Chaker ed., ASTM Philadelphia, p. 43, 1986
- [12] Elsener, B., Hug, A., Büchler, D. and Böhni, H.: Evaluation of localized corrosion rate on steel in concrete by galvanostatic pulse technique. Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, p.264, ed. C.L. Page, P.B. Bamforth and J.W. Figg, SCI The Royal Society of Chemistry, London, 1996
- [13] Elsener, B., Zimmermann, L., Flückiger, D., Büchler, D. and Böhni, H.: Chloride penetration – Non destructive determination of the free chloride content in mortar and concrete. Proc. RILEM International workshop on chloride penetration in concrete, 15.-18. 10. 95, St. Rémy-les-Chevreuse, paper Nr. 13
- Flückiger, D.: dieses Heft, weiter unten

8

Makroelementstrom, gemessen zwischen abgetrennten, elektrisch isolierten Bewehrungsabschnitten und dem Bewehrungsnetzwerk. Die Stromschwankungen sind auf die Witterungsverhältnisse (v.a. Temperaturschwankungen) zurückzuführen. Zunehmende Stromstärke der einzelnen Kurven korrespondiert mit höherem Chloridgehalt am Bewehrungsabschnitt



ination von Monitoring-Instrumenten und Sensoren entwickelt, im Labor getestet und bereits auf Bauwerken eingesetzt:

■ Makrozellen

Einzelne korrodierende oder passive Bewehrungsstäbe werden vom Rest der Bewehrung elektrisch isoliert. Mittels geeigneter Messanordnung kann der Makroelementstrom kontinuierlich und widerstandsfrei gemessen werden. Bild 8 zeigt beispielhaft, wie der Korrosionsstrom mit der Temperatur des Bauteils variiert.

■ Instrumentierte Bohrkerne – Chloridsensoren

Herausgebohrte sowie neu betonerte (standardisierte) zylindrische Bohrkerne werden mit kombinierten Chlorid- und Widerstandssensoren [13] instrumentiert

und wieder am Bauwerk eingesetzt. Damit lässt sich unter realen Einwirkungen die Veränderung des freien Chloridgehalts sowie des elektrischen Betonwiderstands im Tiefenprofil mit der Zeit verfolgen.

Mit diesen Verfahren wird das Monitoring von Bauwerken in bezug auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Messgrößen (Korrosion, Chloridgehalt, Feuchtigkeit) möglich. Aus der Kombination der Monitoringmethoden und den daraus resultierenden Messdaten werden für die Forschung wichtige Zusammenhänge zu den Einflussgrößen auf die Korrosionsgeschwindigkeit erwartet. Diese sollen - zusammen mit der vorgestellten Erfassung der momentanen Korrosionsgeschwindigkeit - zu besseren Prognosen der Schadenentwicklung bzw. des Verhaltens instandgesetzter Bauteile beitragen.

Schlussfolgerungen

Die aus dem Labor bekannte elektrochemische Polarisationswiderstandsmessung kann auch auf Bauwerken angewandt werden. Die gemessenen R_p -Werte können jedoch nur im Fall aktiver Korrosion direkt in Korrosionsgeschwindigkeiten bzw. Abtragsraten umgerechnet werden. Aufgrund der inhomogenen Stromausbreitung wird die Korrosionsgeschwindigkeit auf passiven Flächen stark über-, bei lokal korrodierender Bewehrung dagegen unterschätzt.

Aus R_p -Werten bestimmte Korrosionsgeschwindigkeiten sind stets momentane Werte. Die Ermittlung der massgeblichen Korrosionsgeschwindigkeit setzt bessere und quantifizierbare Kenntnisse der Einwirkungen, insbesondere von Tempera-

tur- und Feuchtigkeitsschwankungen, auf die momentane Korrosionsgeschwindigkeit voraus. Dazu läuft gegenwärtig am IBWK der ETH Zürich ein ASB-Forschungsprojekt.

An Bauwerken kann die Korrosionsgeschwindigkeit kritischer Bereiche vor und nach der Instandsetzung mittels direkter Korrosionsstrommessung in Makrozellen (Monitoring) kontinuierlich verfolgt werden.

Adresse des Verfassers:

Bernhard Elsener, Dr. sc. techn., dipl. Werkstoffing., ETH/SIA, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Fritz Hunkeler, Wildegg

Elektrischer Betonwiderstand

Mittel zur Überwachung und Erfolgskontrolle von Instandsetzungen an Stahlbetonbauten

Betonfeuchtigkeit und Betonwiderstand sind für die Korrosion der Bewehrung von Stahlbeton entscheidende Grössen. Verschiedene Methoden zur Zustandserfassung und -beurteilung sind heute verfügbar. Eine Lücke besteht jedoch bei den Überwachungsmethoden von instandgesetzten Betonbauten, vorab bei Bauten mit wenig durchlässigen oder sogar elektrisch isolierenden Oberflächen, wo Potentialmessungen deshalb nur beschränkt eingesetzt werden können. In solchen Situationen kann die Messung des elektrischen Betonwiderstands ein geeignetes Hilfsmittel zur Beurteilung des Korrosionsrisikos darstellen.

In den letzten 15 Jahren wurden viele Stahlbetonbauten, die durch Korrosion an der Bewehrung geschädigt waren, mit verschiedenen Verfahren instandgesetzt (z.B. lokales Ausbessern, ganzflächiger Mörtelauftrag zur Erhöhung der Betonüberdeckung, Beschichten der Betonoberfläche, kathodischer Korrosionsschutz, elektrochemische Entsalzung). Dabei konzentrierte man sich auf die Methoden der

Zustandserfassung und -beurteilung. Weit geringere Anstrengungen wurden im Bereich der Überwachung von instandgesetzten Stahlbetonbauten unternommen. Diesbezüglich ist ein Defizit hinsichtlich anerkannter Methoden und Erfahrungen auszumachen.

In den letzten Jahren konnte an verschiedenen Bauwerken gezeigt werden, dass die Potentialmessung ein taugliches Mittel ist, um die Korrosion der Bewehrung nach einer Instandsetzung zu verfolgen [1, 2]. Leider kann sie nicht immer und überall angewendet werden. Zudem liefert sie keine quantitativen, sondern vielmehr nur halbquantitative bis qualitative Aussagen.

Neben der Potentialmessung oder zusätzlich zu ihr wurden verschiedene elektrochemische Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung entwickelt [3]. Obwohl in den letzten Jahren grosse Fortschritte zu verzeichnen waren, sind diese Methoden aber noch nicht ausgereift genug, um in die Praxis überführt zu werden. Wesentliche Probleme sind vorher noch zu lösen, wie z.B. die Bestimmung von sehr kleinen Korrosionsgeschwindigkeiten im Falle von karbonatisiertem und/oder eher trockenem Beton, die Ermittlung der korrodierenden

Flächen im Messbereich bei lochfrassartigen Angriffen oder die Bestimmung der Abhängigkeit der elektrochemischen Parameter von der Betonfeuchtigkeit.

Als Ergänzung oder als Alternative zu den oben genannten Methoden bietet sich der elektrische Betonwiderstand zur Überwachung und zur Erfolgskontrolle von Instandsetzungen an Stahlbetonbauten an. Im folgenden wird versucht, die Bedeutung des elektrischen Betonwiderstands für die Korrosion und dessen Abhängigkeiten darzustellen. Danach werden die Möglichkeiten für Widerstandsmessungen vor Ort aufgezeigt.

Einflüsse auf die Korrosionsgeschwindigkeit

Allgemeine Aspekte

Bei der Korrosion der Bewehrung in Stahlbetonbauten spielt die Makroelementkorrosion eine wichtige Rolle. Die Korrosionsgeschwindigkeit in einem Makroelement kann mit Hilfe von Gl. (1) berechnet werden [2].

$$i_{\text{korr}} = \frac{I_{\text{Korr}}}{F_A} = \left(\frac{\Delta U}{R_A + R_K + R_E} \right) \frac{1}{F_A} = \frac{U_{\text{Korr,K}} - U_{\text{Korr,A}}}{r_A + \frac{r_K F_A}{F_k} + \frac{\rho_C F_A}{L}} \quad \text{Gl. (1)}$$

Dabei sind:

I_{Korr}	Korrosionsstrom [A]
ΔU	Treibspannung (=Differenz der Korrosionspotentiale [V])
$U_{\text{Korr,A}}$	Korrosionspotential der Anode [V]