



Elektrischer Betonwiderstand

**Mittel zur Überwachung und Erfolgskontrolle von
Instandsetzungen an Stahlbetonbauten**

Dr. F. Hunkeler, TFB, 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]

- $U_{Korr,K}$ Korrosionspotential der Kathode [V]
- F_A Fläche der Anode [m²]
- F_K Fläche der Kathode [m²]
- r_A spezifischer elektrochemischer Widerstand der Anode [Ωm^2]
- r_K spezifischer elektrochemischer Widerstand der Kathode [Ωm^2]
- ρ_C spezifischer elektrischer Widerstand des Betons [Ωm]
- L systemabhängige Grösse [m]

hängigen Maximalwert) und mit zunehmender Temperatur.

Aus Gl. (1) können drei Grenzfälle abgeleitet werden:

- Grenzfalle 1: anodische Kontrolle $R_A \gg R_K, R_E$
- Grenzfalle 2: kathodische Kontrolle $R_K \gg R_A, R_E$
- Grenzfalle 3: ohmsche Kontrolle $R_E \gg R_A, R_K$

Für ein gegebenes Makroelement ist der Parameter L eine charakteristische Grösse und hängt vom Betonvolumen um den Bewehrungsstab (Überdeckung), von der anodisch (korrodierenden) und kathodisch (nicht korrodierenden oder passiven) wirksamen Fläche wie auch vom Abstand zwischen Anode (z.B. Lochfrassstelle) und Kathode sowie vom spezifischen elektrischen Betonwiderstand ρ_C ab.

Die Parameter in Gl. (1) sind teilweise voneinander abhängig. So hängen z.B. die elektrochemischen Widerstände von der Stromdichte, die treibende Kraft des Makroelementes ΔU und die kathodisch wirksame Fläche vom Betonwiderstand ab. In sehr definierten Laborversuchen kann der Einfluss der einzelnen Parameter isoliert werden. Aus solchen Messungen konnten z.B. folgende allgemeine Schlüsse gezogen werden [2]:

- die Treibspannung ΔU sinkt mit abnehmender Betonfeuchtigkeit oder zunehmendem spez. Widerstand des Betons.

- die elektrochemischen Widerstände (r_A, r_K) und der ohmsche Widerstand (ρ_C) steigen mit abnehmender Betonfeuchtigkeit. Der Reaktionswiderstand an der Kathode r_K wächst mit abnehmender Betonfeuchtigkeit schneller als r_A . Das Verhältnis r_K/r_A beträgt im nassen Beton etwa 10, im trockenen Beton weit über 100.

- die Fläche der im Makroelement wirksamen Kathode (Einzugsgebiet des kathodischen Stromes) steigt mit abnehmender Betonfeuchtigkeit.

- der Reaktionswiderstand an der Anode r_A ist flächenabhängig und wird mit zunehmender Ausdehnung der Korrosionsstelle kleiner.

- die durch das Makroelement bewirkte galvanische Stromdichte nimmt zu:

- mit zunehmender Betonfeuchtigkeit (abnehmenden Widerständen),
- mit zunehmender Fläche der Korrosionsstelle, falls F_K/F_A konstant ist,
- mit zunehmendem Verhältnis F_K/F_A (bis zu einem hauptsächlich von r_A und von der Betonfeuchtigkeit ab-

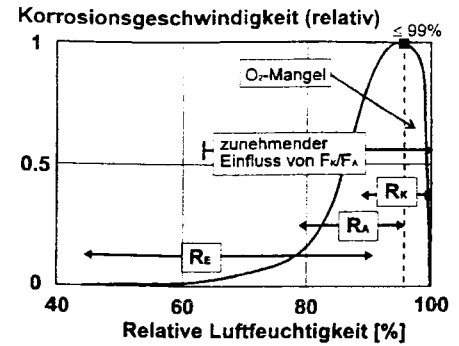
Diese Grenzfälle treten allerdings im realen System fast nie ein. Abgesehen von sehr trockenem oder durchnässtem Beton mit O₂-Mangel, sind es mindestens zwei Faktoren, die die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmen (Bild 1). In Bild 2 sind beispielhaft die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen an Proben mit karbonatisiertem Mörtel dargestellt [4].

Die Lage des Maximums von i_{Korr} bzgl. der Luftfeuchtigkeit (x-Achse in Bild 1) ist abhängig von R_A und F_K/F_A ; das Maximum liegt um so höher, je kleiner R_A und je grösser F_K/F_A ist und umgekehrt. Aufgrund der Abhängigkeit des O₂-Diffusionskoeffizienten von der Betonfeuchtigkeit kann angenommen werden, dass das Maximum bei Luftfeuchtigkeiten unter 99% erreicht wird. Bei einem realen Bauteil ist aber zu beachten, dass die kathodisch wirksame Bewehrung oft eher im trockenen Beton, die Korrosionsstelle hingegen eher im feuchten bis nassen Beton liegt, so dass sich die O₂-Verarmung nicht oder nur wenig auf die Korrosionsgeschwindigkeit auswirkt.

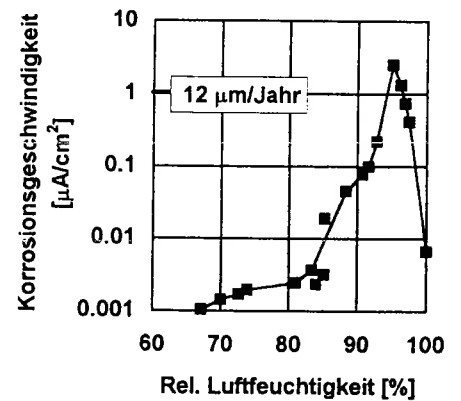
Sauerstoff-Mangel

Bei höheren Betonfeuchtigkeiten dominiert die kathodische Reaktion den Korrosionsprozess wegen des Mangels an Sauerstoff (Grenzfalle 2). Sauerstoff ist der Reaktionspartner bei der kathodischen Reaktion, und wenn er fehlt, kann die kathodische Reaktion nicht mehr ablaufen. Dies bedeutet dann auch, dass die anodische Reaktion, d.h. die Auflösung des Stahls, zum Erliegen kommt.

In sehr feuchtem oder nassem Beton ist der Diffusionskoeffizient von Sauerstoff sehr niedrig, weil die Diffusion in wasser-gefüllten Poren ein sehr viel langsamerer Prozess ist als die Diffusion in luftgefüllten Poren. Die Diffusionsgeschwindigkeit von Sauerstoff ist im Wasser etwa vier Zehnerpotenzen tiefer als in der Luft. Leider gibt es praktisch keine systematischen Untersuchungen zum Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf den Diffusionskoeffizienten von Sauerstoff im Beton $D(O_2,C)$. Deshalb wurde versucht, mit Gl. (2) den Einfluss der Betonfeuchtigkeit $D(O_2,C)$ abzuschätzen [2].



1 Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit bzw. Betonfeuchtigkeit und dominierender Einflussbereich der verschiedenen Teilwiderstände [2]



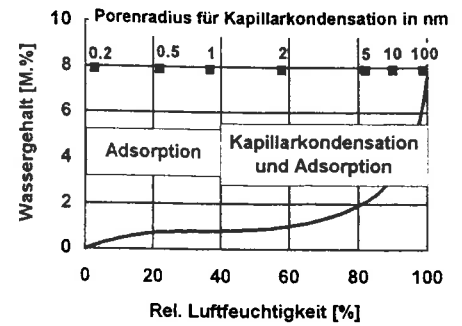
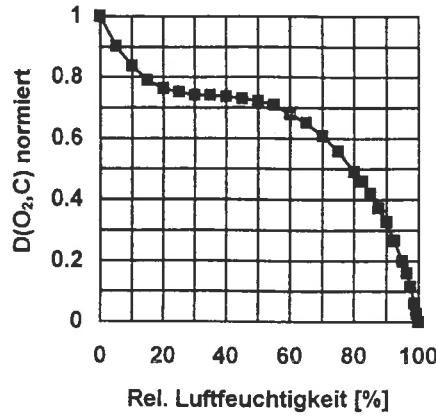
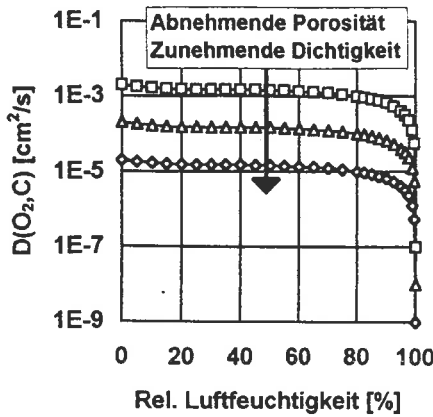
2 Korrosion von Stahl in karbonatisiertem Mörtel in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit [4]

$$D(O_2,C) = \frac{D_L \left(\frac{D_L}{D_w} W - \frac{D_L}{D_w} + 3 \right)}{2W \left(\frac{D_L}{D_w} - 1 \right) + \frac{D_L}{D_w} + 2} \quad \text{Gl. (2)}$$

Dabei bedeuten:

- $D(O_2,C)$ Diffusionskoeffizient von Sauerstoff im Beton [cm²/s]
- D_L Diffusionskoeffizient von Sauerstoff im trockenen Beton [cm²/s]
- D_w Diffusionskoeffizient von Sauerstoff im wassergesättigten Beton [cm²/s]
- W Wassergehalt des Betons [Vol.-%]

Die berechneten Kurvenverläufe in den Bildern 3a und b sind grundsätzlich im Einklang mit experimentellen Ergebnissen [5-8]. Sie werden zur Hauptsache von der Adsorptionsisotherme des Betons bestimmt [2]. Die Adsorptionsisotherme (Bild 3c) wiederum ist im wesentlichen vom Porenvolumen und von der Porenradialverteilung des Betons abhängig. Um derartige Berechnungen für einen bestimmten Beton durchzuführen, muss deshalb die Adsorptionsisotherme für genau diesen Beton bekannt sein. Die Messung des elektrischen Betonwiderstands kann hier eine gewisse Hilfe bieten.



3

a) Diffusionskoeffizient von Sauerstoff $D(O_2,C)$ in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit [2],

b) Normierter Diffusionskoeffizient $D(O_2,C)$ in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit [2],

c) Typische Adsorptionsisotherme von Beton [2]

Der elektrische Betonwiderstand als reaktionskontrollierender Faktor

Bei tieferen relativen Luft- und damit tieferen Betonfeuchtigkeiten ist der Elektrolytwiderstand R_E bzw. der spezifische elektrische Betonwiderstand ρ_c der den Korrosionsprozess kontrollierende Faktor (Grenzfall 3). In diesem Fall kann Gl. (1) vereinfacht werden. Die Korrosionsgeschwindigkeit i_{kor} ist dann gemäss Gl. (3) umgekehrt proportional zu R_E oder ρ_c bzw. direkt proportional zur spezifischen elektrischen Leitfähigkeit des Betons σ_c ($= 1/\rho_c$).

$$i_{kor} \approx \frac{1}{R_E} \equiv \frac{1}{\rho_c} = \sigma_c \quad \text{Gl. (3)}$$

Die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen [9-11] sind in Bild 4 dargestellt und befinden sich in Übereinstimmung mit einer anderen Arbeit [12]. Es ist ersichtlich, dass die Korrosionsgeschwindigkeit erst ab einer Leitfähigkeit unter 10^3 bis $10^4 \Omega^{-1}m^{-1}$ (1000 bis 10000 Ωm) auf Werte unter 0,1 bis 0,01 $\mu A/cm^2$ abfällt. Dies entspricht einer Abtragsrate von 1,2 bis 0,12 $\mu m/Jahr$. Trotz des relativ grossen Streubandes stellen derartige Informationen für die Praxis eine Hilfe dar, wenn z.B. das Korrosionsrisiko oder der Korrosionsfortschritt sowie die Wirkung einer Instandsetzung, z.B. nach der Applikation einer Betonbeschichtung, beurteilt werden sollen.

Gl. (3) führt zu eher konservativen Aussagen bezüglich der Korrosionsgeschwindigkeit, da die elektrochemischen Widerstände vernachlässigt werden und die Treibspannung ΔU zudem mit abnehmender Betonfeuchtigkeit abnimmt.

Um mittels Gl. (3) eine relative Aussage über die Korrosionsgeschwindigkeit zu machen, genügen Angaben zur Betonfeuchtigkeit nicht, da der Betonwiderstand

nicht nur von der Betonfeuchtigkeit, sondern auch von der Betonqualität abhängt.

Der elektrische Betonwiderstand ist auch beim kathodischen Korrosionsschutz eine wichtige Grösse für die Stromverteilung zwischen der Bewehrung und der Anode [13, 14].

Obwohl die Bedeutung des elektrischen Betonwiderstands allgemein anerkannt ist, gibt es nur eine geringe Zahl von Langzeitstudien über den Betonwiderstand und dessen Abhängigkeit von der Betonfeuchtigkeit.

Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf den elektrischen Betonwiderstand

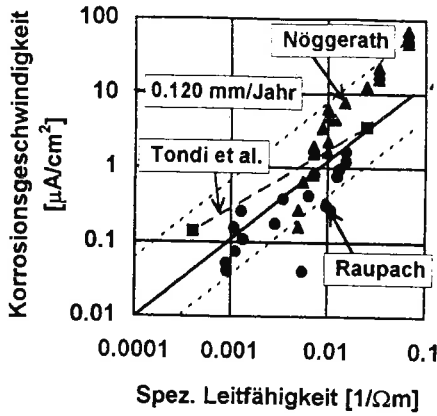
Der spezifische Widerstand von Beton und Mörtel hängt von der Mikrostruktur des Zementsteins (Porenvolumen und -radienverteilung), vom Feuchtigkeits- und Salzgehalt (z.B. Alkaligehalt des Zements und Chloridgehalt) wie auch von der Porosität der Grenzfläche Zuschlag/Zementstein und von der Temperatur ab [2, 15]. Die Mikrostruktur des Zementsteins wird durch verschiedene Faktoren, wie z.B. W/Z-Wert, Zementart und -menge, Typ und Gehalt an mineralischen Betonzusatzstoffen (z.B. Mikrosilika, Flugasche) beeinflusst.

In einer umfangreichen Arbeit wurde der spezifische elektrische Widerstand von Mörtel und Beton untersucht. Die Resultate wurden in dieser Zeitschrift bereits publiziert [15]. Dabei hat es sich gezeigt, dass die spez. Leitfähigkeit des Betons σ_c erst ab einer gewissen relativen Luftfeuchtigkeit (RL) merklich ansteigt und dass die σ_c -RL-Kurven das unterschiedliche Adsorptionsverhalten von Mörtel und Beton reflektieren [17, 19]. Der Verlauf der σ_c -RL-Kurven ist bei $RL < 80\%$ flach, ab $RL > 80\%$ zunehmend steiler.

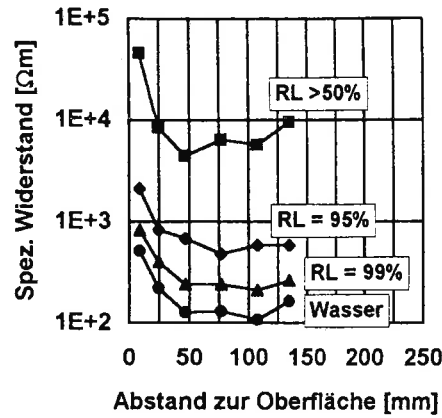
Im Zusammenhang mit der Instandsetzung von über 30jährigen Brückenpfeilern wird zur Zeit an Bohrkernen aus den Pfeilern der Betonwiderstand in Abhängigkeit von RL bestimmt. Die Bohrkern wurden mit Messelektroden so ausgerüstet, dass der Widerstand in verschiedenen Betontiefen gemessen werden kann. Die Widerstandsmessungen werden mit einem handelsüblichen Wechselspannungs-Widerstandsmessgerät und bei tieferen Betonfeuchtigkeiten parallel auch mit einer selbstgebauten Messvorrichtung [15, 18] durchgeführt. Die Nullmessung erfolgte nach einer etwa viermonatigen Auslagerung in Laborluft (RL ~50%), die erste eigentliche Messung nach einer einwöchigen Lagerung unter Wasser. Danach wurden die Proben bei abnehmender RL ausgelagert.

Mit abnehmender RL nimmt die erforderliche Zeit für das Einstellen des Gleichgewichts zwischen Luft- und der Betonfeuchtigkeit stark zu. Deshalb müssen während der Auslagerung bei $RL < 100\%$ mehrere Messungen durchgeführt werden, um den Endwert zu extrapolieren [15]. Diese zeitraubenden Messungen an den erwähnten Bohrkernen sind noch nicht abgeschlossen. In den Bildern 5 bis 7 sind die bisherigen, vorläufigen Resultate dargestellt.

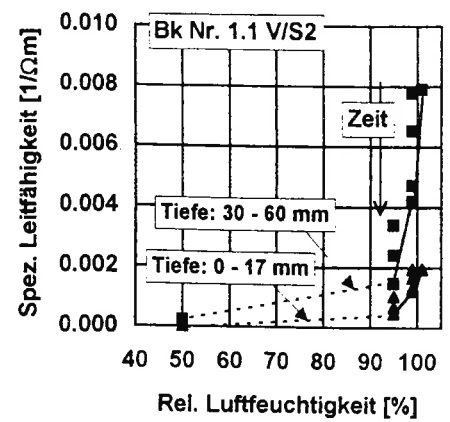
Bild 5 zeigt das Widerstandsprofil eines Bohrkerns nach Auslagerung bei unterschiedlichen Bedingungen. Der Widerstand ist an der äusseren Oberfläche wegen der Karbonatisierung des Betons deutlich höher als in grösserer Tiefe. In Bild 6 sind die σ_c -RL-Kurven für zwei Betontiefen dargestellt. Der unterschiedliche Verlauf der σ_c -RL-Kurve für die Tiefe 0-17 mm und 30-60 mm ist gut ersichtlich und ein Ausdruck des unterschiedlichen Adsorptionsverhaltens.



4 Korrosionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der spezifischen elektrischen Leitfähigkeit von Beton und Mörtel [2]



5 Spezifischer elektrischer Widerstand des Betons eines Bohrkerns in Abhängigkeit von Tiefe und Art der Auslagerung



6 Spezifische elektrische Leitfähigkeit des Betons eines Bohrkerns in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit

Bei höheren Betonfeuchtigkeiten ist zwischen der Leitfähigkeit und dem Gewicht des Bohrkerns eine mehr oder weniger lineare Abhängigkeit vorhanden (Bild 7). Aus der Steigung der Geraden in Bild 7 kann die Leitfähigkeit des Porenwassers errechnet werden. In grösserer Betontiefe beträgt die spezifische Leitfähigkeit des Porenwassers etwa 0,25 bis 0,3 $\Omega^{-1}m^{-1}$ (spez. Widerstand 3 bis 4 Ωm), an der Oberfläche ungefähr 0,05 bis 0,07 $\Omega^{-1}m^{-1}$ (spez. Widerstand 15 bis 20 Ωm). Diese Werte sind gut vergleichbar mit jenen von früheren Untersuchungen [17, 19].

Im übrigen ist (abgesehen von einer Messtiefe bei einem Bohrkern) die Korrelation zwischen den zwei eingesetzten Messtechniken ausgezeichnet, wie aus Bild 8 mit über 500 Messwerten hervorgeht.

Messung des spezifischen elektrischen Betonwiderstands am Bauwerk

Elektrochemische Methoden, Widerstands- und Feuchtigkeitsmessgeräte

Der elektrische Widerstand des Überdeckungsbetons und dessen relative Veränderung können mit verschiedenen elektrochemischen Methoden, wie z.B. der galvanostatischen Transientenmesstechnik [3] bestimmt werden. Für die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands des Überdeckungsbetons sind auch spezielle Widerstandsmessgeräte, die auf der Vier-Punkt-Methode nach Wenner basieren, kommerziell erhältlich. Derartige Widerstandsmessgeräte sind mit einer gewissen Vorsicht zu benutzen, da die Bewehrung im Beton die Resultate verfälschen kann. Zudem stellen die ermittelten spezifischen Widerstände Mittelwerte

über eine vom Abstand der Messelektroden abhängigen Betontiefe dar. Die Resultate der galvanostatischen Transientenmesstechnik korrelieren mit jenen der Vier-Punkt-Methode nach Wenner [3, 20].

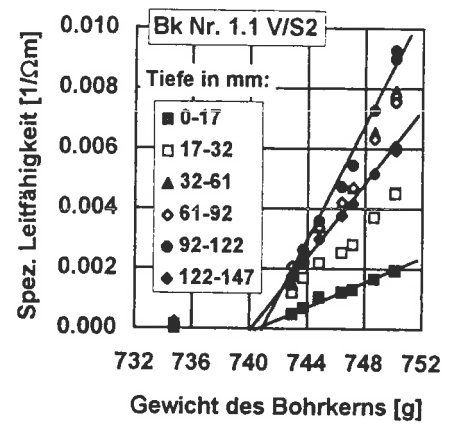
Die Anwendung dieser Methoden setzt zugängliche und elektrisch leitende Oberflächen voraus. Sie können daher bei Betonoberflächen mit schlecht oder nicht leitendem Oberflächenschutzsystem, wie z.B. bei Betonbauteilen mit einer elektrisch isolierenden Beschichtung, nicht angewendet werden. Weiterhin können hochohmige Oberflächenfilme, z.B. im Falle von trockenem und/oder karbonatisiertem Beton, zu falschen oder nicht repräsentativen Ergebnissen führen.

Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit in Bohrlöchern mit Feuchtigkeitsmessgeräten erlaubt nur dann einen Rückschluss auf den spezifischen Betonwiderstand, wenn entsprechende Eichkurven aus vorgängigen Laborversuchen vorhanden sind (Bilder 5 und 6 und [15]). Für die Feuchtigkeitsmessung ist ein mindestens 30 bis 40 mm tiefes Bohrloch im Bauteil notwendig. Dies bedeutet, dass die äusserste Betonrandschicht nicht gemessen werden kann. Kommerzielle Luftfeuchtigkeitsmess-Sonden haben sich im übrigen für den Langzeiteinsatz in vielen Fällen als untauglich erwiesen.

Neben den vorstehend erwähnten Verfahren kann eine der nachfolgend beschriebenen Methoden eingesetzt werden, um die zeitliche Entwicklung der Betonfeuchtigkeit zu verfolgen.

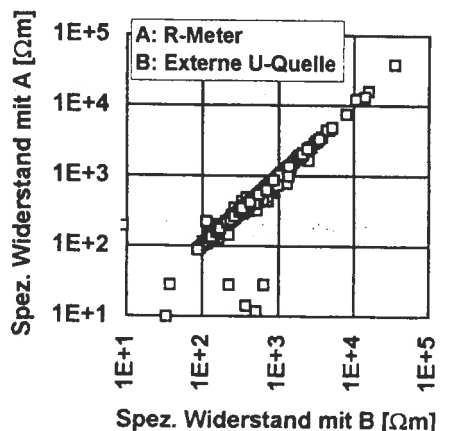
Künstliche Makroelemente

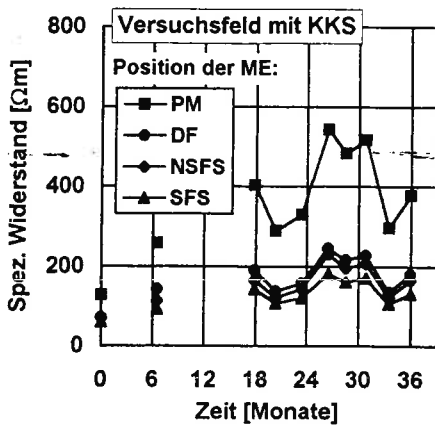
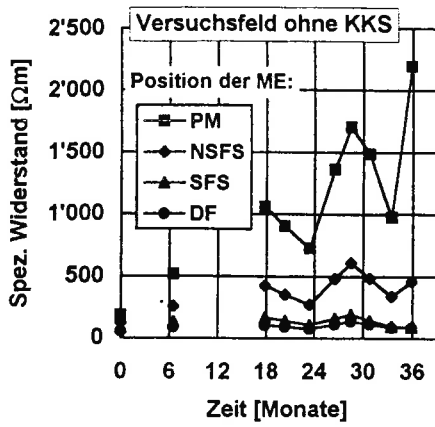
Ein künstliches Makroelement besteht aus einem Bewehrungsstab, der in eine chloridfreie oder chloridhaltige Mörtelhülle eingebettet ist. Am Bewehrungsstab ist ein kunststoffummantelter Kupferdraht als elektrischer Anschluss für die Messung



7 Spezifische elektrische Leitfähigkeit in Abhängigkeit vom Gewicht des Bohrkerns

8 Gegenüberstellung der mit einem kommerziellen Wechselspannungs-Widerstandsmessgerät (Methode A) und mit der eigenen Messeinrichtung mit einer externen Spannungsquelle (Methode B) ermittelten spezifischen elektrischen Widerstände





Spezifischer elektrischer Widerstand von künstlichen Makroelementen (ME) in Versuchsfeldern ohne bzw. mit kathodischem Korrosionsschutz [13]

befestigt. Die Elemente haben einen Durchmesser von etwa 20 bis 30 mm und eine Länge von etwa 100 bis 150 mm. Künstliche Makroelemente wurden zuerst für die Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes verwendet [13, 14, 21]. Sie werden meistens während der Ausführung der Instandsetzung in Bereichen von besonderem Interesse in das Bauteil eingebaut.

Mittels eines kommerziellen Wechselspannungs-Widerstandsmessgeräts wird der Widerstand des Bewehrungsstabs des Makroelements gegen die Bewehrung des Bauteils gemessen. Aus dem gemessenen Widerstand (in Ω) kann der spez. elektrische Betonwiderstand (in Ωm) gemäss Gl. (4) [13] berechnet werden.

$$R_{\Omega} = \rho_c \frac{\ln\left(\frac{l^2}{td}\right)}{2\pi l} \quad \text{Gl. (4)}$$

Dabei bedeuten:

- ρ_c spezifischer elektrischer Betonwiderstand [Ωm]
- l Länge des Bewehrungsstabs [m]
- t Betonüberdeckung des Bewehrungsstabs [m]
- d Durchmesser des Bewehrungsstabs [m]
- R_{Ω} gemessener Widerstand [Ω]

Die Bilder 9a und b zeigen beispielhaft den Verlauf des spezifischen Betonwiderstands bei einem Versuchsfeld mit bzw. ohne kathodischen Korrosionsschutz über einen Zeitraum von etwa drei Jahren. Die künstlichen Makroelemente wurden in trockenem, chloridfreiem und in nass-feuchtem, chloridverseuchtem Beton eingebaut. Während des ersten Jahres war aus verschiedenen Gründen ein Anstieg des Widerstands zu beobachten: fortschreitende Hydratation der Mörtelhülle der Makroelemente und des für die Einbettung der Makroelemente verwendeten Mörtels sowie das Austrocknen der Mörtel und des Altbetons. Die späteren Veränderungen des Widerstands sind hauptsächlich auf saisonale Temperaturschwankungen zurückzuführen Gl. (5) [13].

$$\rho_c = \rho_{c,0} e^{b_p \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad \text{Gl. (5)}$$

Dabei bedeuten:

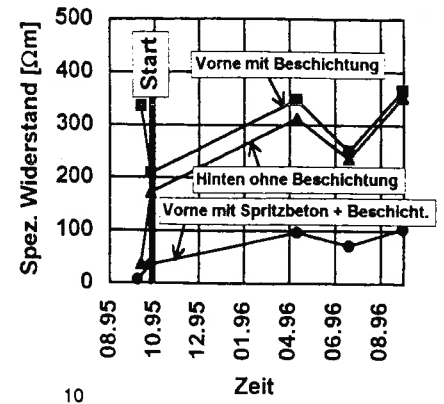
- $\rho_{c,0}$ spezifischer elektrischer Betonwiderstand bei T_0 (T_0 zwischen etwa -25 und -40°C) [Ωm]
- T, T_0 absolute Temperatur [K]
- b_p Konstante [K] (2100 bis 5500 K)

Ein Nachteil von künstlichen Makroelementen ist darin zu sehen, dass diese in das Bauteil eingebaut werden müssen, was das Feuchtigkeitsgleichgewicht des Betons stört und frühe Messungen fragwürdig macht. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Adsorptionsisotherme der für die Herstellung und Einbettung der Makroelemente verwendeten Mörtel sich von jener des Altbetons erheblich unterscheiden kann.

Um die ermittelten spezifischen Betonwiderstände mit der relativen Luftfeuchtigkeit zu korrelieren, sind entweder Luftfeuchtigkeitsmessungen in Bohrlöchern oder entsprechende Eichkurven notwendig.

Elektrisch isolierte Bewehrungsstäbe

Die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands kann auch an einzelnen, elektrisch isolierten Bewehrungsstäben aus der vorhandenen Bewehrung bestimmt werden. Nach der Lokalisierung der Bewehrung wird ein Bewehrungsstab zwischen den nächstliegenden Kreuzungspunkten mit einer Betonsäge durchgeschnitten. Als Alternative zum Schneiden können im Bereich der Kreuzungspunkte Bohrkerngebohrt werden. Danach wird der Beton am einen Ende des Bewehrungsstabs vorsichtig weggespitzt, ein elektrischer Anschluss am Bewehrungsstab erstellt und die Öffnung danach wieder verschlossen, wozu ein geeigneter Mörtel zu verwenden ist. Das Erstellen von



Zeitlicher Verlauf des spezifischen elektrischen Widerstands dreier elektrisch isolierter Bewehrungsstäbe in Brückenpfeilern nach der Instandsetzung mit Spritzbeton und nach der Applikation einer zementösen Betonbeschichtung

elektrisch isolierten Bewehrungsstäben wird zweckmässigerweise während der Instandsetzungsarbeiten ausgeführt.

Die Störung des Betons ist bei elektrisch isolierten Bewehrungsstäben wesentlich geringer als beim Einbau von künstlichen Makroelementen.

Eine quantitative Korrelation zwischen Widerstand und relativer Luftfeuchtigkeit setzt wie bei den künstlichen Makroelementen entweder die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit in Bohrlöchern oder entsprechende Eichkurven voraus.

In letzter Zeit wurden elektrisch isolierte Bewehrungsstäbe für verschiedene Zwecke, wie z.B. für die Untersuchung der Wirkung eines Inhibitors oder von Oberflächenschutzsystemen, eingesetzt.

Als Beispiel zeigt Bild 10 vorläufige Resultate von Messungen im Rahmen der Instandsetzung der bereits oben erwähnten Brückenpfeiler. Bei zwei von sechs Pfeilern waren im Spritzwasserbereich an der Vorderseite und den Seitenflächen wie auch an den Ecken viele Abplatzungen bis auf eine Höhe von etwa 1,5 m vorhanden. Verursacht wurden die Abplatzungen durch korrodierende Bewehrungsstäbe. Die Oberflächen der anderen Pfeiler zeigten nur einige wenige Anzeichen von Rost und nur vereinzelte Abplatzungen. Obwohl auch sie deutlich erhöhte Chloridgehalte aufwiesen, war die Korrosionsintensität wegen der etwas höheren Überdeckung geringer.

Im Rahmen der Instandsetzung wurde der untere Bereich der zwei stark geschädigten Pfeiler teilweise bis hinter die Bewehrung abgetragen. Danach wurde mit Spritzbeton reprofiliert und gleichzeitig die Betonüberdeckung um 20 mm erhöht. Um eine bezüglich des Aufwands minimale Instandsetzungsvariante auszutesten, wurden die übrigen Pfeiler nur mit Hochdruckwasserstrahlen gereinigt und die ein-

zelen lokalen Abplatzungen ausgebessert. Danach wurden die Vorder- und Seitenflächen wie auch ein Teil der Rückseite aller Pfeiler mit einer zementösen Beschichtung versehen. Leider lag deren Schichtdicke zunächst mit etwa 1 mm deutlich unter dem geforderten Wert von ≥ 2 mm. Im Mai 96 wurde dann eine weitere Schicht aufgetragen, so dass heute die geforderte Schichtdicke erreicht ist.

Da die Bewehrungsstäbe mit einer Säge herausgeschnitten wurden, muss der Stromfluss zwischen den Schnittflächen als zusätzlicher Strompfad (Abstand a zwischen den Schnittflächen) bei der Berechnung des spez. elektrischen Betonwiderstandes berücksichtigt und Gl. (4) deshalb modifiziert werden. Dies führt zur Gl. (6).

$$R_a = \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right]^{-1}; R_1 = \rho_c \frac{\ln \left(\frac{l^2}{td} \right)}{2\pi l}; R_2 = \rho_c \frac{4a}{\pi d^2}$$

Gl. (6)

Aus Bild 10 und aus dem Vergleich von Bild 10 mit Bild 5 ergeben sich folgende Folgerungen:

Die Beschichtung der Pfeiler hat bisher (noch) zu keinem signifikanten Anstieg des Betonwiderstandes bzw. zu einer drastischen Abnahme der Betonfeuchtigkeit geführt.

Der Widerstand auf der Vorderseite hat sich jenem der Rückseite angeglichen. Dies kann bereits schon als deutliche Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Zustand vor der Instandsetzung betrachtet werden.

Die ermittelten spezifischen Betonwiderstände während des Sommers 96 und die daraus abgeleitete Betonfeuchtigkeit entsprechen einer relativen Luftfeuchtigkeit von mehr als 95%. Dieser Wert scheint relativ hoch zu sein und muss mit zusätzlichen Messungen überprüft werden.

Erwartungsgemäss weist der junge Spritzbeton einen deutlich tieferen Betonwiderstand auf als der Altbeton.

Instrumentierte Bohrkerne eingebettet in Betonbauteilen

Eine weitere Möglichkeit von Widerstandsmessungen vor Ort wurde bereits früher vorgeschlagen [2]. Betonbohrkerne mit einem Durchmesser von 80 bis 100 mm, die aus einem Betonbauteil entnommen werden, können analog der Laboruntersuchungen mit Messelektroden so ausgerüstet werden, dass der Betonwiderstand in verschiedenen Tiefen gemessen werden kann. Der Abstand zwischen den Elektroden ist abhängig von der Zielsetzung der Untersuchung und könnte

Literatur

- [1] Hunkeler, F.: Praktische Erfahrungen mit der Potentialmessung bei Brücken: Erhaltung von Brücken - Aktuelle Forschungsergebnisse, FBH-FEB-ASB-Tagung vom 14. März 1996, SIA-Dokumentation D 0129, S. 31-46, 1996
- [2] Hunkeler, F.: Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauwerken. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 510, 1994
- [3] Elsener, B., Flickiger, D., Wojtas, H. und Böbni, H.: Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 521, 1996
- [4] Parrott, L.J.: Damage caused by carbonation of reinforced concrete. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, Vol. 23, p. 230-234, 1990
- [5] Performance criteria for concrete durability. A state of the art report prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Editors: J. Kropp and H.K. Hilsdorf, E & FN Spon, London 1995
- [6] Ebnenberg, F. und Diederichs, U.: Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts von Beton auf seine Porosität und seine Transportparameter. Institut für Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Forschungsarbeiten 1990-1994, Heft 109, S. 25-28, 1994
- [7] Houst, Y.F.: Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie. Ph.D. Thesis, EPFL Lausanne, Thesis No. 1108, 1992
- [8] Houst, Y.F. and Wittmann, F.H.: Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, p. 1165-1176, 1994
- [9] Nöggerath, J.: Zur Makroelementkorrosion von Stahl in Beton - Potential- und Stromverteilung in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen. Diss. ETH Nr. 9310, 1990
- [10] Tondi, A., Polder, R.B. and Cigna, R.: Concrete resistivity and corrosion rate of reinforcement in atmospheric concrete after one year. TNO Building and Construction, Delft, TNO-Report 93-BT-R0170, 1993
- [11] Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. DAfStb Heft Nr. 433, 1992
- [12] Gonzalez, J.A., Lopez, W. and Rodriguez, P.: Effects of moisture availability on corrosion kinetics of steel embedded in concrete. *Corrosion*, Vol. 49, p. 1004-1010, 1993
- [13] Hunkeler, F.: Untersuchungen zum kathodischen Korrosionsschutz von Stahlbeton im Tunnel San Bernardino. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 508, 1992
- [14] Hunkeler, F.: The essentials for reinforced concrete monitoring - particular emphasis on CP onset and future responses. Conference on Structural Improvement through Corrosion Protection of Reinforced Concrete, 2-3 June 1992, Institute of Corrosion, London
- [15] Hunkeler, F.: Elektrischer Widerstand von Mörteln und Beton. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Nr. 43, S. 767-772, 1993
- [16] Polder, R.B. and Ketelaars, M.B.G.: Electrical resistance of blast furnace slag cement and ordinary Portland cement concretes. Proc. Int. Conf. on Blended Cements in Construction, Sheffield UK, Sept. 1991, Editors: R.N. Swamy, Elsevier Applied Science, London 1991
- [17] Hunkeler, F. und Holtzbauer, K.: Mörtel und Beton - Wassergehalt, Porosität und elektrischer Widerstand. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, Nr. 27/28, S. 534-541, 1994
- [18] Müller, R.O. und Holtzbauer, K.: Kathodischer Korrosionsschutz von Bewehrungsstählen, Langzeitstabilität von Anodenmaterialien und Mörteln, EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 503, 1992
- [19] Hunkeler, F.: The resistivity of pore water solution - a decisive parameter of rebar corrosion and repair methods. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 5, p. 381-389, 1996
- [20] Elsener, B.: Korrosion in Stahlbetontragwerken - Einflussgrößen und Möglichkeiten der Überwachung, Erhaltung von Brücken - Aktuelle Forschungsergebnisse. FBH-FEB-ASB-Tagung vom 11. März 1993, SIA-Dokumentation D 099, S. 45-53, 1993
- [21] Hunkeler, F.: Kathodischer Schutz - Wissensstand, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen, Schutz- und Sanierungsmethoden von Stahlbetonbauwerken. SIA-Dokumentation D 021, 1988
- [22] Breit, W., Souchon, T. und Schiessl, P.: Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren. Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, Bericht Nr. F389, 1994
- [23] Schiessl, P.: Neue Sensortechnik zur Überwachung von Bauwerken. *International Journal for Restoration of Buildings*, Vol. 2, No. 3, S. 189-209, 1996

etwa zwischen 15 und 30 mm liegen. Nach der Instrumentierung und Verkabelung werden die Bohrkerne wieder an den Entnahmestellen im Bauteil eingebaut.

Diese Methode, die das Tiefenprofil des Widerstands, und mit entsprechenden Eichkurven die Betonfeuchtigkeit zu be-

stimmen erlaubte, wurde bisher noch nicht realisiert. Das Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) der ETH Zürich und die Techn. Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie (TFB) konnten kürzlich ein neues Forschungsprojekt starten, in dem

unter anderem auch diese Möglichkeit ausgelotet und unter praktischen Verhältnissen geprüft werden soll. Dieses Projekt wird vom Bundesamt für Strassenbau im Rahmen der Arbeitsgruppe Brückenunterhaltsforschung finanziell unterstützt.

Multiring-Elektroden

Das Konzept und die Ausgestaltung der Multiring-Elektroden (MRE) wurde an der TH Aachen entwickelt und ist an anderer Stelle beschrieben worden [22]. MRE wurden bereits für Laboruntersuchungen, z.B. zur Prüfung der Wirksamkeit von Betonbeschichtungen und für die Korrosionsüberwachung in verschiedenen, hauptsächlich neuen Betonbauten eingesetzt [22, 23].

Eine MRE besteht aus einer Reihe von elektrisch isolierten, 2,5 mm breiten Ringen aus nichtrostendem Stahl. Gemessen wird der elektrische Widerstand zwischen je zwei benachbarten Ringen. Der gemessene Widerstand stellt ein Mass für die Feuchtigkeit im Beton dar.

Für die Messung vor Ort an alten Betonbauten wird für die Aufnahme der MRE zunächst ein Loch in den Beton gebohrt. Danach wird die MRE in das Bohrloch eingeführt und so positioniert, dass der verbleibende Ringspalt zwischen MRE und Bohrlochwand rundum möglichst gleich gross ist. Zuletzt wird der Ringspalt von zwei bis drei Millimetern mit schwindkompensiertem Zementleim oder einem sehr feinen Zementmörtel ausinjiziert.

MRE erlauben eine recht genaue Bestimmung des Widerstandsprofils des Betons und sind damit ein sehr empfindliches Mittel, um zeitliche Änderungen der Feuchtigkeit, vorab des Überdeckungsbetons, zu verfolgen. Zur Zeit gibt es keine mathematische Gleichung, um aus den gemessenen Widerständen (in Ω) die spezifischen elektrischen Betonwiderstände (in Ωm) zu berechnen.

Im folgenden soll ein Beispiel der Anwendung von MRE kurz erläutert werden. Für die Instandsetzung der 130 Mittelstützen einer etwa 25jährigen Galerie wurde ein neuartiges Instandsetzungsverfahren gewählt, für das noch kaum vergleichbare Erfahrungen vorliegen. In einem ersten Schritt wurde der Beton bis unter den kritischen Chloridgehalt abgetragen. Danach wurden verzinkte Stahlhüllen um die Stützen montiert. Nach der Montage und der Fixierung der Stahlhüllen wurde der Spalt zwischen Hülle und Altbeton ausbetoniert.

Die Stahlhüllen dienten einerseits als Schalung. Andererseits sollen sie den weiteren Eintrag von chloridhaltigem Wasser in den Beton verhindern. Die Stahlhüllen verbleiben deshalb an den Stützen. Wegen der unsicheren Entwicklung des Feuchtigkeitsgehalts des Betons hinter den Stahlhüllen wurden MRE zur Überwachung der Betonfeuchtigkeit eingesetzt. Zu diesem Zweck wurden vor dem Betonieren MRE in drei verschiedenen Höhen und Tiefen im neuen bzw. im alten Beton zweier ausgewählter Stützen eingebaut. Die Resultate der Widerstandsmessung an den MRE und der Potentialmessung in einzelnen Öffnungen in den Stahlhüllen von fünf Stützen sollen zusammen eine ausreichende Basis abgeben, um das zukünftige Korrosionsrisiko zu beurteilen.

Zusammenfassung

Die Feuchtigkeit und der elektrische Widerstand des Betons stellen in sehr vielen Fällen dominierende Faktoren für die durch die Karbonatisierung oder durch die Chloridverseuchung des Betons verursachte Korrosion der Bewehrung dar. Trotzdem besteht hier eine Lücke an Grundlagenarbeiten über die Einflüsse auf den spezifischen elektrischen Betonwider-

stand, über die Betonfeuchtigkeit und den Betonwiderstand von Bauteilen unter natürlichen Bedingungen und deren saisonale Schwankungen. Diese Lücke ist dann sehr unangenehm, wenn Vorhersagen zur Entwicklung der Korrosion der Bewehrung gemacht werden sollten oder wenn die bestmöglichen Elemente zur Überwachung von instandgesetzten Betonbauten bestimmt werden müssen. Derartige Situationen sind typisch in Fällen, in denen die Betonoberfläche mittels wenig durchlässiger oder elektrisch isolierender Beschichtungen gegen die Karbonatisierung oder den Chlorideintrag geschützt werden. Oft ist aber gerade das Ausmass der Änderung der Betonfeuchtigkeit entscheidend für den Erfolg oder Misserfolg der Instandsetzung. Die Messung des (spezifischen) elektrischen Widerstands kann hier eine Hilfe darstellen, die zeitliche Änderung der Betonfeuchtigkeit zu verfolgen.

In dieser Arbeit wurden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen dem spezifischen elektrischen Betonwiderstand und der Korrosion wie auch die Einflüsse auf den Betonwiderstand zusammenfassend beschrieben. Im weiteren wurden verschiedene Möglichkeiten zur Messung der Betonfeuchtigkeit bzw. des Betonwiderstands an instandgesetzten Bauteilen vor Ort erläutert und illustriert.

Adresse des Verfassers:

Fritz Hunkeler, Dr. sc. techn., TFB, Technische Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz, Zementindustrie, Lindenstr. 10, 5103 Wildegg