

# Zur Notwendigkeit von Beschichtungen auf KKS-Systemen

Dr.-Ing. Sascha Lay, Eric Neufeld  
concrete concepts Ingenieurgesellschaft mbH, München, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Christoph Dauberschmidt  
Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Baustoffkunde, München, Deutschland

## Zusammenfassung

Es ist gängige Praxis, KKS-Systeme zu beschichten: a) um den Feuchtegehalt und damit den Elektrolytwiderstand im Beton zu vergleichmäßigen, b) als Verschleiß- bzw. Schutzschicht für eine Einbettung und c) aus Gründen der Optik. Es stellt sich allerdings die Frage, ob es bei Anwendung von KKS in Hinblick auf die Gleichmäßigkeit des Elektrolytwiderstands zwingend einer rissüberbrückenden Beschichtung bedarf, insbesondere bei gerissenen Bodenflächen. Zur Beantwortung dieser Frage wurden praxisnahe Versuche durchgeführt. Hierzu wurden die Fälle „trocken“, „Pfütze“ und „Riss in Pfütze“ simuliert. Die Versuche und weitergehende theoretische Überlegungen zeigen, dass in den meisten praxisrelevanten Fällen keine Beschichtung bzw. kein Gefälle auf einem KKS-System erforderlich sind. Eine mögliche Unterversorgung kann ebenso wie eine Überspannung sicher vermieden werden, wenn einfache Planungsgrundsätze beachtet werden. Allerdings sind die jeweiligen Verhältnisse von Elektrolytwiderstand und Durchtrittswiderständen und die damit einhergehende Übertragbarkeit der hier dargelegten Zusammenhänge im Einzelfall zu prüfen.

## 1 Problemstellung

Bodenplatten und Zwischendecken von Tiefgaragen werden im Rahmen einer Instandsetzung mittels Kathodischem Korrosionsschutz (KKS) (mit Einsatz einer Titanmischoxid-Anode und eines Einbettungsmörtel) derzeit meist nach Aufbringung des Einbettungsmörtels beschichtet. Diese Beschichtung erfolgt, um a) den Feuchtegehalt und damit den Elektrolytwiderstand im Beton zu vergleichmäßigen, b) als Verschleiß- bzw. Schutzschicht für eine Einbettung und c) aus optischen Gründen. Es stellt sich die Frage, ob es zur Sicherstellung der Funktion des KKS-Systems zwingend einer rissüberbrückenden Beschichtung oder eines Gefälles zum Abführen von Wasser erfordert, insbesondere bei gerissenen Bodenplatten oder Zwischendecken. Denn ein Fehlen einer Beschichtung könnte zu signifikanten Unterschieden des Elektrolytwiderstands zwischen sehr feuchten (Risse und/ oder Pfützen) und trockenen Bereichen führen. Dies könnte je nach Steuerung der Anlage zu einem Überschutz in feuchten Bereichen und/ oder einer Unterversorgung auf trockenen Flächen führen (Bild 1). Diese Problematik der Unterschiede des Elektrolytwiderstandes wird sich verstärkt bei nicht im Grundwasser stehenden Bodenplatten und bei Zwischendecken ergeben, bei denen der Beton außerhalb des Risses bzw. der Pfütze über die Zeit austrocknet.

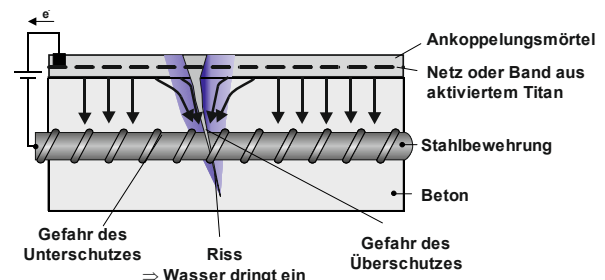


Bild 1: Schematische Darstellung der Problematik von Rissen und/ oder Pfützen auf einem KKS-System ohne Beschichtung

## 2 Konzept

Die Fragestellung wurde zunächst im Rahmen einer Bachelorarbeit [1] über Versuche angegangen. Es wurde ein KKS-geschützter Stahlbetonprüfkörper mit drei verschiedene Schutz zonen erstellt, welche jeweils unterschiedliche Randbedingungen simulierten. Die erste Schutzzone diente durch den dauerhaft unveränderten trockenen Zustand der Vergleichsmessung. Die zweite simuliert eine Pfütze. Hierzu wurde ein Ring aus dem Einbettungsmörtel um die Schutzzone profiliert und permanent mit Wasser gesättigt. Im dritten Bereich wurde ein wassergefüllter Riss hergestellt. Dieser sollte den Extremfall einer Wassereinwirkung widerspiegeln. Neben den nachfolgend beschriebenen Versuchen an einem Prüfkörper werden theoretische Betrachtungen zur Stromverteilung durchgeführt.

### 3 Versuche

#### 3.1 Versuchsaufbau

Den gewählten Versuchsaufbau des Stahlbetonprüfkörpers mit KKS zeigt (Bild 2).

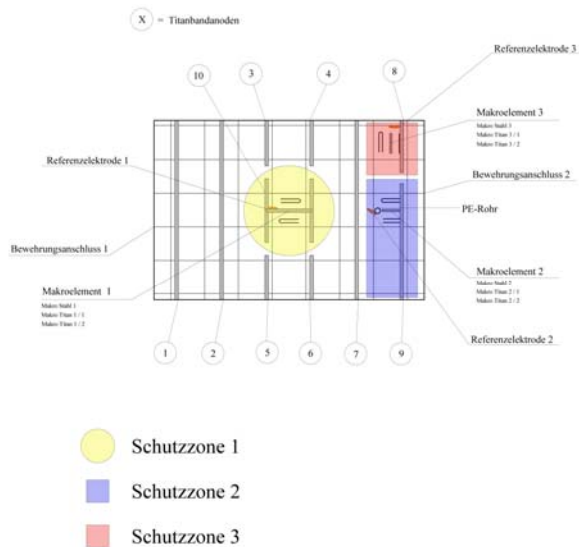


Bild 2: Versuchsaufbau zur Simulation des Einflusses von Rissen und/ oder Pfützen auf einem KKS-System ohne Beschichtung

In jeder Schutzzone wurde ein Makroelement installiert, (Bild 3). Diese Makroelemente bestanden aus einem Bewehrungsstab mit Messanschluss, das gemeinsam mit der Matte in chloridhaltigen Beton einbetoniert wurde. Dadurch lag am Mattenstahl als auch dem Makroelement die gleiche Korrosivität (Chloridkonzentration) vor. Der Korrosionsstrom wurde zwischen diesem Betonstahl und einer künstlichen Kathode (Titanband) gemessen. Ferner wurde in jeder Schutzzone eine Referenzelektrode (Typ ERE20) eingebaut, (Bild 3).

Ein Riss entlang der Bewehrung wurde durch Einbettung eines PVC-Rohres simuliert, welches nach Betonage mit Wasser gefüllt wurde, (Bild 2).

Als Beton wurde bewusst ein nach heutigen Maßstäben praxisunüblicher „schlechter“ Beton mit hohem w/z-Wert und geringem Elektrolytwiderstand gewählt, um ein rasches Austrocknen des Betons nach Herstellung zu realisieren und im Bereich der simulierten Pfütze und des Risses eine rasche und starke Absenkung des Elektrolytwiderstands gegenüber der trockenen Referenzzone zu erhalten. Zum Einsatz kam ein Beton mit  $400 \text{ kg/m}^3$  CEM III/A-LL, Wasser-Zement-Verhältnis  $w/z = 0,65$  mit einer rechnerischen Frischbetonrohddichte von rd.  $2.240 \text{ kg/m}^3$  und einem Größtkorn von 8 mm. Dieser wurde mit 2 M.-% Chlorid bezogen auf die Zementmasse im

Anmachwasser versetzt. Der an eigens hergestellten Probekörpern bestimmte Elektrolytwiderstand betrug im Alter von 28 Tagen:  $5,6 \text{ k}\Omega\text{cm}$  bei 80% r.F. und  $3,5 \text{ k}\Omega\text{cm}$  unter Wassersättigung.

Als Bewehrung kam eine handelsübliche Betonstahlmatte Q257A zum Einsatz.



Bild 3: Makroelement (Betonstahl = Anode, Titanband = Kathode)

Nach der Betonage und Austrocknung des Probekörpers für rd. 4 Wochen wurde die Oberfläche des Betons mit einer Stahlbürste und einem Schleifgerät aufgeraut. Daraufhin wurden Titananodenbänder „HISEO Mesh Ribbon MMO anode 20 mm“ aufgedübelt, vgl. (Bild 2 und 4).

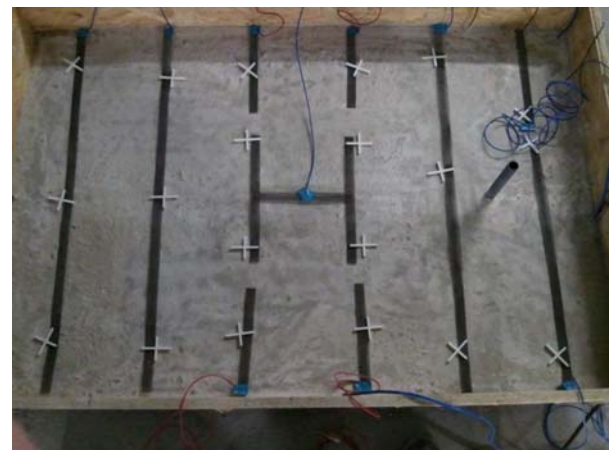


Bild 4: Versuchsaufbau, Anodenbänder

Die Anodenbänder wurden in 20 mm PCC mit Haftbrücke eingebettet. Hierzu kamen handelsübliche Produkte mit nachgewiesener Eignung für KKS-Maßnahmen zum Einsatz. In der Probekörpermitte wurde eine Mulde mit Rand ausgeformt, um hier eine permanente Pfütze zu realisieren, (Bild 4).

Der für die Messungen am Prüfkörper verwendete Datenlogger war ein Almemo 2890-9 (Ahlborn) mit 9 Messanschlüssen und 2 Ausgangsan-

schlüssen. Sechs dieser Anschlüsse wurden für die Strommessung zwischen Bewehrung und Titanbändern benutzt. Sie haben einen Messbereich von -32 mA bis +32 mA und eine Genauigkeit von 1  $\mu$ A. An den restlichen drei Anschlüssen wurde die Spannung zwischen Referenzelektrode und Betonstahlbewehrung mit den Messsteckern ZA9000FS3 gemessen. Sie besitzen einen Messbereich von -2,6 mV bis +2,6 mV mit einer Genauigkeit von 0,1 mV. Die Schutzspannung wurde mit einem Labornetzgerät erzeugt.

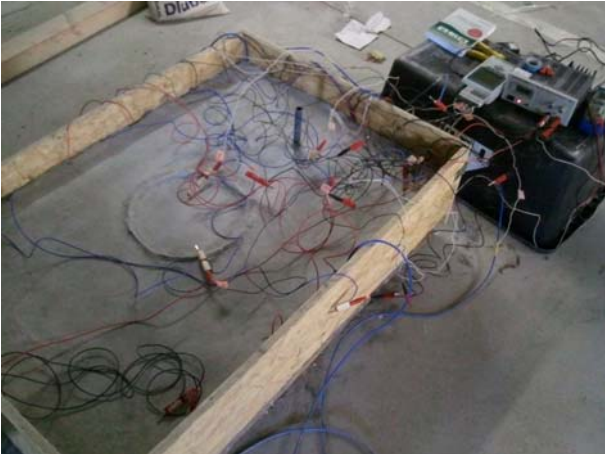


Bild 5: Versuchsaufbau, nach Fertigstellung

### 3.2 Prüfablauf

Es wurden 4 Messreihen durchgeführt:

- 1) Trocken: Die Messung erfolgte ohne Veränderung des Feuchtegehalts der PCC-Einbettung
- 2) Feucht (Pfüte in Zone 1, Riss in Pfüte in Zone 2, weiterhin trocken in Zone 3) mit Steuerung über Referenz in trockener Zone 3
- 3) Feucht wie vor mit Steuerung über Referenz in feuchter Zone 1 (Pfüte)
- 4) Feucht wie vor mit Steuerung über Referenz in feuchter Zone 2 (Riss in Pfüte)

### 4 Ergebnisse

Vorversuche hatten gezeigt, dass im trockenen Zustand eine Ausgangsspannung von 2V zweckmäßig ist. Bei Prüfung im trockenen Zustand an allen Stellen ergaben sich hierbei nach 24h Polarisation IR-drop-freie Potentiale zwischen  $E_{ERE20} = -660$  mV bis  $-770$  mV (bezogen auf ERE20 Elektrode). Bezogen auf die Silber-/Silberchloridelektrode Ag/AgCl/0,5 M KCL (kurz AgCl-Elektrode) entspricht dies Werten von rd.  $E_{AgCl} = -465$  mV bis  $-575$  mV. Die Obergrenze in [2] eines IR-freien Abschaltpotentials von  $E_{AgCl} \leq -720$  mV wurde also unterschritten, weil hier auf die Depolarisation abgestellt wurde. So ergaben sich 24h nach Abschaltung Potentialdifferenzen (Depolari-

sationen) zwischen 145 bis 225 mV. Das 100 mV-Kriterium wurde also eingehalten.

Anschließend wurden die künstliche Pfüte und der künstliche Riss gewässert. Die Steuerung des Systems erfolgte weiter über die Referenzelektrode der trockenen Stelle. Die Schutzspannung wurde bei 2 V belassen. Es stellten sich sehr ähnliche Potentiale bzw. Depolarisationswerte ein. Trotz Pfüte bzw. nassem Riss bei sehr porösem Beton wurde also die Untergrenze in [2] eines IR-freien Ausschaltpotentials von  $E_{AgCl} \geq -1.100$  mV bei weitem eingehalten. Ein Überschutz stellte sich also trotz Steuerung über die trockene Messstelle nicht ein.

Die nächste Messung war ebenfalls eine Messung unter Feuchtigkeitseinwirkung, jedoch mit einer anderen Eingangsspannung. Dieser Versuch diente im Speziellen der Überprüfung des 100 mV-Kriteriums. Diese Messung sollte der Frage auf den Grund gehen, ob die Kriterien nach [2] an einer trockenen Stelle des Prüfkörpers genauso eingehalten werden können, wenn dieses Mal die Spannung über die Pfüte reguliert wird. Dabei wurde das Potential im Pfütenbereich der Referenzelektrode so eingestellt, dass die Polarisation hier gerade das 100-mV-Kriterium erfüllt. Daraus ergab sich eine Ausgangsspannung von rd. 1,44 V. Die IR-freien Ausschaltpotentiale waren in der Pfüte rd.  $E_{AgCl} = -650$  mV, im Riss rd.  $E_{AgCl} = -620$  mV und an der weiterhin trockenen Stelle  $E_{AgCl} = -590$  mV. Die trockene Stelle wurde also erwartungsgemäß leicht schwächer polarisiert. Die erzielten Depolarisationswerte waren 137 mV in der Pfüte, 110 mV im Riss und nur 84 mV an der trockenen Stelle. Es ergab sich also der erwartete Zusammenhang, dass bei Steuerung über eine nasse Stelle, welche knapp das 100-mV-Kriterium einhält, trockene Bereiche unterversorgt sein können.

Die letzte Messung begann unter veränderten Bedingungen. Die Stelle des Risses wurde zusätzlich zum eingebetteten Rohr mit Hilfe einer Säge geöffnet, so dass der Bewehrungsstahl und die umliegenden Titanbändern freilagen. Das anschließend hinzugefügte Wasser stellte somit eine unmittelbare elektrolytische Verbindung der beiden Elemente her. Die Ausgangsspannung wurde erneut auf 2V eingestellt. Dies stellte das „worst case Szenario“ in Bezug auf eine etwaige Überversorgung dar. Dieses Mal stellte sich ein Ausschaltpotential an dieser Stelle von  $E_{ERE20} = -780$  mV bzw.  $E_{AgCl} \leq -585$  mV ein. Auch unter diesen widrigen Bedingungen wurde die Untergrenze in [2] bei weitem eingehalten.

## 5 Diskussion

Die Untersuchungen wurden bewusst mit einem Beton durchgeführt, der einen geringen Elektrolytwiderstand bzw. eine hohe Porosität aufwies, um die Probeplatte in möglichst kurzer Zeit austrocknen zu lassen. Gleichfalls ist einschränkend darauf hinzuweisen, dass die Probeplatte zum Zeitpunkt der Prüfungen relativ jung (ca. 6 Wochen alt) und damit vermutlich noch nicht die Ausgleichsfeuchte und damit max. Elektrolytwiderstand erreicht hatte.

Bei höheren Elektrolytwiderständen des Betons (trockener, dichteres Gefüge) wäre eine größere Ausgangsspannung notwendig gewesen, um die gleiche Polarisierung (Schutzwirkung) an der maßgebenden trockenen Stelle zu erzielen. An den feuchten Stellen und insbesondere im feuchten Riss hätte sich aber auch bei längerer Wartezeit (höherem Elektrolytwiderstand des Betons) vermutlich keine wesentliche Änderung ergeben. Eine Erhöhung der Ausgangsspannung hätte also zwangsläufig eine stärkere Polarisierung der feuchten Stellen zur Folge gehabt. Dies könnte theoretisch dazu führen, dass bei entsprechend großen Unterschieden des Elektrolytwiderstands zwischen „trocken“ und „feucht“ sehr wohl unzulässige Polarisierungen auftreten können, die durch den gewählten Versuchsaufbau nicht abgebildet wurden. Zur Klärung dieser Frage werden hierzu folgende stark vereinfachenden überschlägigen Berechnungen angestellt:

Der Gesamtwiderstand setzt sich vereinfacht betrachtet aus dem Elektrolytwiderstand  $R_E$  des Betons und dem Durchtrittswiderstand  $R_{ct}$  des Stahls zusammen. Der spezifische Elektrolytwiderstand belief sich im trockenen Zustand auf ca.  $\rho_E = 5,6 \text{ k}\Omega\text{cm}$ . Geht man nun sehr stark vereinfachend von einem geradlinigen Stromverlauf zwischen Anodenband und Bewehrung aus, dann ergibt sich aus den geometrischen Verhältnissen (Betondeckung: 1,5 cm; Breite Anodenband ca. 2,0 cm) ein Widerstand von  $R_E = 5,6 \text{ k}\Omega\text{cm} \times 1,5 \text{ cm} / (2,0 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}) \approx 4 \text{ k}\Omega$  bezogen auf 1 cm Stahllänge. Im Versuch kann im ungerissenen Beton grob überschlagen (hier nicht im Detail ausgeführt) von einer freien Chloridkonzentration im Porenwasser von 1 mol/l ausgegangen werden. Der Durchtrittswiderstand von Betonstahl in einer solchen Lösung kann mit etwa  $\rho_{ct} = 150 \text{ k}\Omega\text{cm}^2$  abgeschätzt werden [3, 4]. Daraus ergibt sich bezogen auf 1 cm Länge und einem Umfang von 2 cm ein Widerstand von ca.  $R_{ct} = 150/2 = 75 \text{ k}\Omega$ . Der Gesamtwiderstand belief sich im betrachteten Segment auf grob  $R = R_E + R_{ct} = 4 + 75 \approx 80 \text{ k}\Omega$ .

Betrachten wir weiter die Verhältnisse im mit Wasser gefüllten Riss. Geht man davon aus, dass sich im Riss in etwa die gleiche Konzentration im Riss durch diffusiven Ausgleich wie im ungerissenen Beton einstellt, dann lässt sich die hier vorliegende Leitfähigkeit abschätzen:

Eine Lösung mit  $\text{pH} = 12,6$  und ca. 1 mol Chlorid weist eine Leitfähigkeit von etwa  $100 \text{ mS/cm}$  [3] also einen spezifischen Widerstand von etwa  $0,01 \text{ k}\Omega\text{cm}$  auf. Bei einer Rissweite von hier ca. 0,5 cm, einer Tiefe von ca. 1,5 cm und einer betrachteten Segmentlänge von 1 cm ergibt sich ein vernachlässigbar kleiner Elektrolytwiderstand von nur  $R_C = 0,01 \text{ k}\Omega\text{cm} \times 1,5 \text{ cm} / (0,5 \times 1,0 \text{ cm}^2) \approx 0,03 \text{ k}\Omega$ . Die Summe aus Elektrolyt- und Durchtrittswiderstand läge bei grob  $R \approx 0,03 + 75 \approx 75 \text{ k}\Omega$ . Das Verhältnis des Widerstands an der trockenen und feuchten Messstelle lag im Versuch also vermutlich bei ca.  $80/75 \approx 1$ , weil der Durchtrittswiderstand der bestimmende Faktor ist. Das IR-drop-freie Potential war im trockenen Zustand und im Riss nahezu gleich. Das bestätigt letztlich die obige grobe Abschätzung, wonach die Widerstände an der trockenen und nassen Stelle sehr ähnlich waren, weil der Durchtrittswiderstand der bestimmende Faktor war.

Nehmen wir nun beispielhaft den Fall eines in der Vergangenheit „üblichen“, vergleichsweise leitfähigen Betons hergestellt mit Portlandzement (CEM I) und  $w/z = 0,50$  an. Ein solcher Beton ließe etwa einen spezifischen Widerstand in der Größenordnung von ca.  $\rho_E = 8 \text{ k}\Omega\text{cm}$  bei Wassersättigung erwarten [5]. Bei im langfristigen Mittel üblicher relativer Luftfeuchte von ca. 80% im Freien oder auch in Tiefgaragen wäre grob mit einer Verdopplung des Widerstands zu rechnen, also mit ca.  $\rho_E = 16 \text{ k}\Omega\text{cm}$ .

Nehmen wir weiter übliche Betondeckungen von im Mittel 5,5 cm und im Maximum etwa 7,0 cm an. Dann wäre analog zur obigen Berechnung mit einem maximalen Widerstand an der trockenen Prüfstelle von maximal ca.  $R_E = 16 \text{ k}\Omega\text{cm} \times 7 \text{ cm} / (1,5 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}) \approx 75 \text{ k}\Omega$  zu rechnen. Gegenüber den Versuchsbedingungen läge also ein 10-fach höherer spezifischer Elektrolytwiderstand vor. Der Elektrolytwiderstand  $R_E$  hätte also die gleiche Größenordnung wie der hier zu Grunde gelegte Durchtrittswiderstand  $R_{ct}$ .

Dann ergäbe sich etwa eine Verdopplung des Verhältnisses der Widerstände von trockener Stelle und Riss:  $(75 + 75)/75 = 2$ . In grober Näherung ergäbe sich damit auf der sicheren Seite liegend auch etwa eine Verdopplung der Polarisierung, (Bild 6). Im Riss wurde ausgehend von ca.  $E_{ERE20} = -480 \text{ mV}$  (stromlos) auf ein IR-dropfreies Potential bei Abschaltung von ca.  $E_{ERE20} = -810 \text{ mV}$ , also um ca.  $-310 \text{ mV}$ , polarisiert. Folg-



lich wäre das zu erwartende Potential bei Polarisation etwa  $E_{ERE20} = -480 - 2 \times 310 \approx -1.000$  mV bzw. etwa  $E_{AgCl} = -800$  mV. Die Vorgabe von  $E_{AgCl} \geq -1.100$  mV [2] wäre demnach noch immer sicher eingehalten.

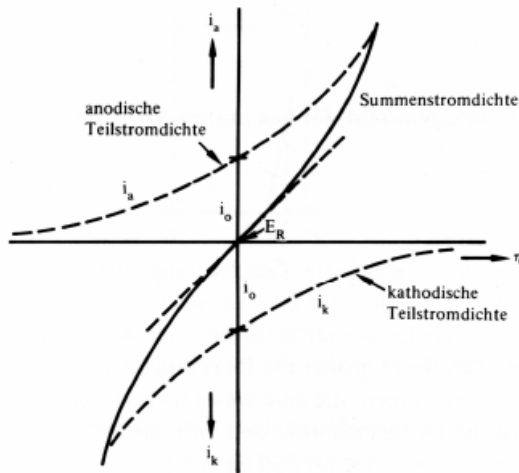


Bild 6: Strom-Spannungs-Beziehung

Nehmen wir in diesem Sinne nun das extreme Beispiel eines sehr hochohmigen Betons der z.B. mit einem Zement CEM III/B und mit  $w/z = 0,45$  hergestellt worden wäre. Hier wäre bei 80% r.F. etwa ein spezifischer Elektrolytwiderstand von  $\rho_E = 100$  k $\Omega$ cm zu erwarten [5]. Bei derartig gegenüber Chloriden dichten Betonen wäre bei Betondeckungen von mehr als 4 cm kaum noch mit einer Korrosion zu rechnen [6]. Für diesen Grenzfall ergäbe sich also ein Elektrolytwiderstand zwischen Anode und Bewehrung von grob ca.  $R_E = 100$  k $\Omega$ cm  $\times$  4 cm / (1,5 cm  $\times$  1 cm)  $\approx$  265 k $\Omega$ . Es ergäbe sich bei gleichbleibendem Durchtrittswiderstand ein Gesamtwiderstand von etwa  $R = 265 + 75 = 340$  k $\Omega$ cm, der durch den Elektrolytwiderstand dominiert wäre. Dies ergäbe etwa ein Verhältnis der Widerstände von trockener Stelle und Riss von  $340/75 \approx 5$ . Selbst unter Berücksichtigung eines nicht-linearen Charakters der Strom-Spannungs-Beziehung wird qualitativ diesem Fall klar, dass man außerhalb des Bereichs der zulässigen Potentialgrenzen gelangen kann.

## 6 Fazit, Praxisfolgerungen

Die Auswertung der Messergebnisse ergab, dass es für die meisten praxisrelevanten Fälle keine Beschichtung bzw. kein Gefälle erfordert, wenn eine gerissene Bodenfläche durch Pfützen belegt wird. Dies gilt, solange der Durchtrittswiderstand und der Elektrolytwiderstand an ungestörten Stellen in etwa im gleichen Verhältnis stehen. Bei ungünstigen Konstellationen (hochohmige Betone, hohe Betondeckung, hohe Chloridbelastungen an der Bewehrung und damit geringem Durchtrittswiderstand) können diese Zusammenhänge

nicht mehr übertragen werden. Dann empfiehlt es sich, Vorversuche durchzuführen, um die Notwendigkeit einer Beschichtung fallspezifisch zu überprüfen oder eine ebensolche Beschichtung zur Vergleichmäßigung des Elektrolytwiderstands einzuplanen.

Gleichsam ist es ohne Beschichtung aus unserer Sicht zweckmäßig, Referenzelektroden in nassen und trockenen Stellen (Hoch- und Tiefpunkten) anzuordnen. So lässt sich eine übermäßige Polarisation ausschließen. Da aufgrund des nachträglichen Einbaus der Anodeneinbettung die endgültige Lage etwaiger Hoch- und Tiefpunkte nicht genau vorhergesehen werden kann, ist es zweckmäßig, im Bedarfsfall nachträglich weitere Elektroden nachzurüsten oder bewusst entsprechende Hoch- und Tiefpunkte (trockene und nasse Stellen) mit entsprechenden Referenzelektroden zu schaffen.

## Quellenverzeichnis

- [1] Neufeld, E.: Funktionsuntersuchungen von unbeschichteten, mit kathodischem Korrosionsschutz geschützten Bodenplatten bei Feuchteinwirkung, Bachelorarbeit, FH München, Wintersemester 2013
- [2] DIN EN ISO 12696: Kathodischer Korrosionsschutz von Stahl in Beton, 2012
- [3] Eichler, T.: Zu den sekundären Schutzmechanismen beim kathodischen Korrosionsschutz von Stahl in alkalischen Medien, Dissertation an der RWTH-Aachen, 2012
- [4] Schießl, P.; Brameshuber, W.; Lay, S.; Gehlen, C.: Korrosionsmechanismen bei der Unterrostung von Betonstählen mit Beschichtungen auf organischer und mineralischer Basis. Forschungsbericht F 3002/00, Deutsche Forschungsgemeinschaft Projekt Nr. Schi 253/25-1, München, August, 2000
- [5] Schießl, P.; Lay, S.: Corrosion in Concrete Structures (Ed.: H. Böhni), Chapter 4, "Influence of Concrete Composition", ISBN 1 85573 768 X, Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, 2005, pp. 91-134
- [6] Lay, S.: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken, Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU-München, März 2006