

Monitoring nach der Sichtbetoninstandsetzung mit Inhabitoren: Ingenieurschule Yverdon

Autor(en): **Rota, Aldo / Flückiger, Dieter**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **117 (1999)**

Heft 26

PDF erstellt am: **06.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79759>

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.

Eindringtiefe: Der Wirkstoff drang bis in Tiefen von mehr als 40 mm und damit weit über die Bewehrungslage hinaus ein.

Inhibitorkonzentration: Der Lieferant gab die für die Wirkung von MFP notwendige Konzentration bei karbonatisiertem Beton mit 0,05 Massenprozent (bezogen auf den Beton) an, wobei er sich auf Ergebnisse eigener und in Auftrag gegebener Laborversuche stützte [6,7]. Im Bereich der Bewehrung lag die MFP-Konzentration in der Regel deutlich über dieser erforderlichen Konzentration.

Die grosse Bandbreite der MFP-Profile und der Karbonisierungstiefe ist auf die unterschiedliche Betonqualität (Permeabilität) zurückzuführen. Tendenziell enthalten Stellen mit grosser Karbonisierungstiefe auch eine höhere Konzentration an Inhibitoren; kleine MFP-Konzentrationen treten bei vergleichsweise dichtem Beton mit wenig fortgeschrittener Karbonisierung auf. Inhibitoren sind folglich vor allem dort vorhanden, wo es am notwendigsten ist.

Hauptmengen und Kosten

Gesamtfläche der Fassaden:	7200 m ²
Gesamtkosten:	156 Fr./m ²
Aufteilung:	
Betonreparaturen	37%
Inhibitoren	32%
Gerüste	15%
Honorare	10%
Monitoring	2,7%
Diverses	3,3%

Die Ergebnisse der Qualitätsprüfungen waren somit positiv, und es kann eine erfolgreiche Instandsetzung erwartet werden, d.h. die Bewehrungskorrosion sollte nun durch die Inhibitoren gestoppt oder wenigstens stark verlangsamt sein. Da jedoch keine eindeutigen und wirklich schlüssigen Nachweise der Wirkungsweise von Inhibitoren an Bauwerken vorliegen, wurde entschieden, die Erfolgskontrolle mit einem fest installierten Messsystem zur In-situ-Erfassung der Korrosionsparameter zu ergänzen. Dieses Monitoring hat zum Ziel, die Wirksamkeit des Inhibitors über mehrere Jahre hinaus zu verfolgen und den Zustand der Sichtbetonfassaden im Rahmen der Überwachung zu erkennen (siehe folgenden Beitrag).

Folgerung

Die Sichtbetonfassaden der Gebäude der Ingenieurschule in Yverdon-les-Bains wurden nach dem Verfahren «Lokale Betonreparatur und Behandlung mit Inhibitoren» instandgesetzt. Das gewählte Verfahren, das sich in der Ausführung als problemlos erwies, beeinträchtigte die Ästhetik und die Nutzung der Gebäude nur minimal. Mit Hilfe des Monitoring wird die Wirksamkeit der Inhibitoren über mehrere Jahre hinaus verfolgt. Es ist zu hoffen, dass dieses elegante, weil sanfte, bausubstanzschonende und kostengünstige Instandsetzungsverfahren zum Durchbruch gelangt.

Aldo Rota und Dieter Flückiger, Horgen

Monitoring nach der Sichtbetoninstandsetzung mit Inhibitoren

Ingenieurschule Yverdon

Da über die Instandsetzung mit Korrosionsinhibitoren erst wenige Erfahrungswerte vorliegen, wird das Objekt überwacht, um zusammen mit Messwerten anderer Objekte die Inhibitorwirkung möglichst frühzeitig quantifizieren zu können.

Das auf S. 583 ff. beschriebene Instandsetzungskonzept der Sichtbeton-Fassadenelemente mit Inhibitoren ist gegenwärtig

noch eine neuartige und wenig erprobte Technologie, zu der wenige Erfahrungswerte bezüglich der Dauerhaftigkeit vorliegen. Das Risiko des erneuten Auftretens von Korrosionsschäden während der Restnutzungsdauer des Gebäudes soll daher mit dem im Folgenden beschriebenen Monitoring-System langfristig abgeschätzt werden können.

Durch die permanente Überwachung des Korrosionszustands der Bewehrung und der korrosionsrelevanten Parameter

Literatur

- [1] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Empfehlung SIA 162/5 «Erhaltung von Betontragwerken». Zürich 1997
- [2] Brühwiler E.: Etude d'interventions (Massnahmenplanung), FBH/FEB-Tagung «Erhaltung von Betontragwerken». SIA-Dokumentation D 0144, 1997, S. 27-36
- [3] Hunkeler F.: op. cit. [2], S. 37-53
- [4] Elsener B., Büchler M. and Böbni H.: Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete. In: Corrosion of Reinforcement in Concrete - Monitoring, Prevention, Rehabilitation. EFC Series 25, The Institute of Materials, London, 1998
- [5] Malric B.: MFP inhibiteurs, Fiche technique, MFP AG, F-Divonne, juin 1996
- [6] Alonso C., Andrade C., Argiz C. and Malric B.: Na₂PO₃F as Inhibitor of Corroding Reinforcement in Carbonated Concrete. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No 3, p. 405-415, 1996
- [7] Rabavinaivo R.: Action des Mono fluorophosphates sur la corrosion des armatures dans le béton. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport DT/OAM/AR81-96

Adresse der Verfasser :

Eugen Brühwiler, dipl. Bauing. ETH/SIA, Prof. Dr. sc. techn., MCS - Erhaltung und Sicherheit von Bauwerken, ISS - Institut für Statik und Tragwerke, ETH Lausanne, Pierre Plancherel, Arch. HTL, P. Plancherel et A. Schmid, Architectes associés SA, 1041 Dommartin

in repräsentativen Fassadenelementen werden langfristig folgende Zielsetzungen verfolgt:

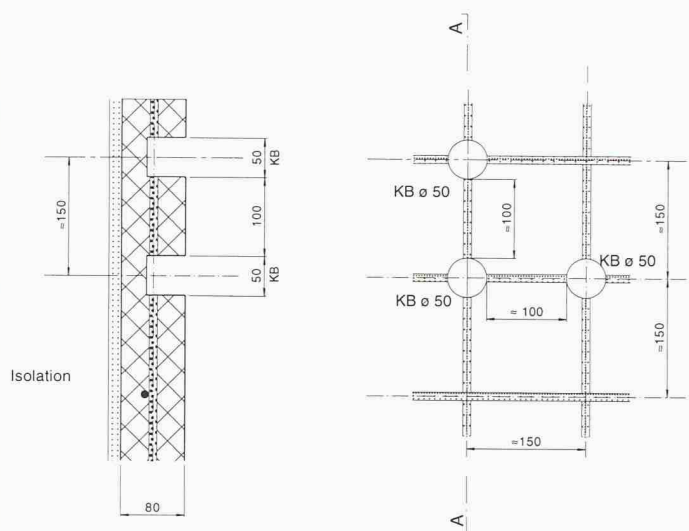
Fassadenerhaltung: Entwicklungen, die zu erneuter Bewehrungskorrosion führen, können vor dem Auftreten von Schäden erkannt, und die erforderlichen Massnahmen im optimalen Zeitpunkt ergriffen werden.

Gewinnung von experimentellen Daten über die Dauerhaftigkeit der Korrosionsschutzwirkung des Inhibitors unter praktischen Einsatzbedingungen: Die instandgesetzten Fassadenelemente dienen dem Feldversuch, der eine intensive und langjährige Beobachtung der Korrosionsschutzwirkung im Massstab 1:1 ermöglicht.



1

Messstelle Typ «reprofilierte Bereiche» vor der Reprofilierung



2

Schematische Darstellung der Ausführung der Messstellen Typ «nicht reprofilierte Bereiche» (KB: Kernbohrung)

Die wenigen bisher in der Schweiz realisierten Monitoring-Systeme wurden an Kunstbauten im Strassenbereich installiert (z.B. Europabrücke in Zürich [2], Überführung Haldenstein N13a). Bei der erstmaligen Anwendung dieser Technologie an Hochbauten im Allgemeinen und an vorgefertigten Fassadenelementen im Besonderen traten spezifische Probleme und Unsicherheiten, insbesondere aufgrund der kleinen Dimensionen der einzelnen Bauteile, der schwachen, unregelmässig angeordneten Bewehrung und der teilweise minimalen Überdeckungen, auf. Während der Installation und der ersten Betriebsphase standen daher praktische Fragestellungen im Vordergrund: Machbarkeit, Ausführungsart, Funktionsweise, Zuverlässigkeit und Aussagekraft von Monitoring-Systemen an Sichtbeton-Fassaden.

Messprinzip und -konzept

Das Messprinzip beruht auf dem Konzept der regelmässigen Messung der korrosionsrelevanten Parameter an isolierten Bewehrungsstäben [1, 2, 3]. Pro Messstelle wurden zwei isolierte Bewehrungsstäbe (1. und 2. Lage) als Sensorstäbe eingesetzt. Zwischen diesen und der vermaschten Bewehrung sowie zwischen den beiden isolierten Sensorstäben selbst können die folgenden elektrochemischen Grössen gemessen werden:

- elektrischer Widerstand (Ausbreitungswiderstand)
- Potentialdifferenz
- Stromfluss (Stromstärke).

Die Messungen wurden sowohl in Bereichen mit Betoninstandsetzung (Abtrag und Reprofilierung) als auch in Bereichen ohne Eingriffe am Beton vorgenommen, was zwei verschiedene Ausführungen der Messstellen bedingte:

▪ **Reprofilierte Bereiche:** Die für die Fassadeninstandsetzung festgelegten Reprofilierungsbereiche waren für die Einrichtung von Monitoring-Messstellen nicht geeignet. Sie wurden deshalb an Positionen mit geeigneten Bewehrungsanordnungen in Form von grösseren, eigens zu diesem Zweck ausgeführten Reprofilierungsflächen von $0,25 \text{ m}^2$ angelegt. Nach dem Betonabtrag wurden je ein vertikaler und ein horizontaler Bewehrungsstab von 100 bis 150 mm Länge elektrisch von der vermaschten Bewehrung getrennt (Bild 1). Nach Anschluss der Messkabel wurden die Messstellen in gleicher Weise wie die übrigen Instandsetzungsbereiche reprofiliert. Um die elektrochemischen Messungen zu ermöglichen, wurde jedoch keine Korrosionsschutzbeschichtung auf die Bewehrungen aufgebracht.

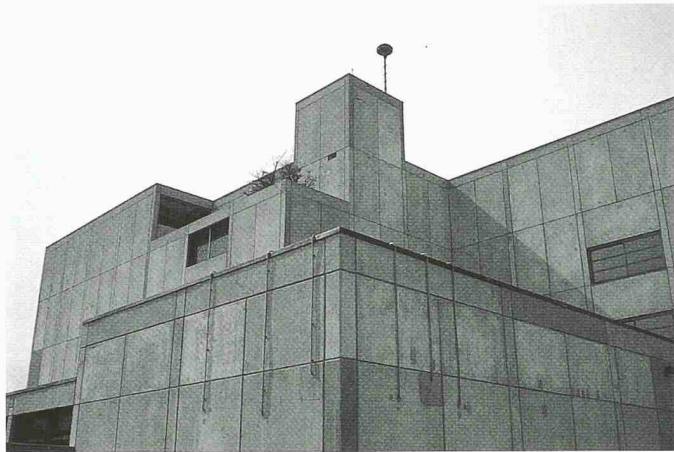
▪ **Nicht reprofilierte Bereiche:** In nicht reprofilierten Bereichen wurden durch Kernbohrungen an drei Kreuzungspunkten der äusseren Bewehrungslagen je ein vertikaler und ein horizontaler Bewehrungsstab auf einer Länge von 100 bis 150 mm elektrisch von der vermaschten Bewehrung getrennt (Bild 2). Nach Anschluss der Messkabel wurden die Kernbohrungen mit einem elektrisch isolierenden, polymergebundenen Reparaturmörtel verfüllt.

Der geringe Bewehrungsdurchmesser von rund 5 mm erforderte besondere Sorgfalt beim Anschluss der Messkabel (Querschnitt: 1 mm^2). Der elektrische Kontakt wurde durch auf die Kabel aufgepresste Kabelschuhe hergestellt, die in feine Bohrungen in den Bewehrungen eingepresst wurden. An jeder Messstelle wurde neben den zwei isolierten Bewehrungsstäben ein Anschluss an die vermaschte Bewehrung hergestellt. Die sieben reprofilierten Messstellen wurden mit in Bewehrungstiefe angeordneten Temperatursensoren (Pt100 Platinwiderstände in Keramikgehäuse) ausgerüstet. Damit kann die Betontemperatur im Bereich der vorhandenen geringen Bewehrungsüberdeckungen erfasst werden.

Das Monitoring-System ermöglicht vergleichende Messungen für verschiedene Parametersätze:

- Instandsetzungsverfahren: Reprofilierung mit Inhibitorapplikation / nur Inhibitorapplikation
- Exposition: Südfassade / Ostfassade, Höhe über Terrain
- Differenzierung der Inhibitorwirkung: An zwei Fassadenelementen des südöstlichen Vorbaus wurden je zwei Messstellen (jeweils mit und ohne Reprofilierung) in Referenzflächen ohne Inhibitorbehandlung angelegt.

Meistens wurden eine reprofilierte und eine nicht reprofilierte Messstelle in einem Fassadenelement angeordnet. Die Messgrössen können für alle isolierten Sensorstäbe eines Fassadenelements sowohl untereinander als auch gegen die vermaschte Bewehrung erfasst werden. Die Berücksichtigung aller Parameter und Randbe-



3
Schutzrohre für die Messkabel am Nebengebäude Südost, Ebene F (Bild: E. de Lainsecq, Yvorne)

dingungen erforderte die Installation von 16 Messstellen in 10 Fassadenelementen auf verschiedenen Ebenen des Gebäudes.

Die Messkabel wurden in offen verlegten PE-Schutzrohren über die Fassaden und Dächer zu drei Anschlusskästen im Gebäudeinneren geführt. Der Architekt begrüßte, dass durch die sichtbaren Schutzrohre das Monitoring visualisiert wird (Bild 3).

Die Monitoring-Installation wurde am 2. Oktober 1997, einen Monat nach Ausführung der Reprofilierungen und nach der Applikation des Inhibitors, in Betrieb genommen. Seither werden in Abständen von 14 oder 28 Tagen die elektrochemischen Daten gemessen und die meteorologischen Parameter Lufttemperatur und -feuchtigkeit registriert. Während des

bisherigen Messbetriebs waren die isolierten Sensorstäbe von der restlichen Bewehrung getrennt.

Erste Ergebnisse

Funktionstüchtigkeit der Messstellen

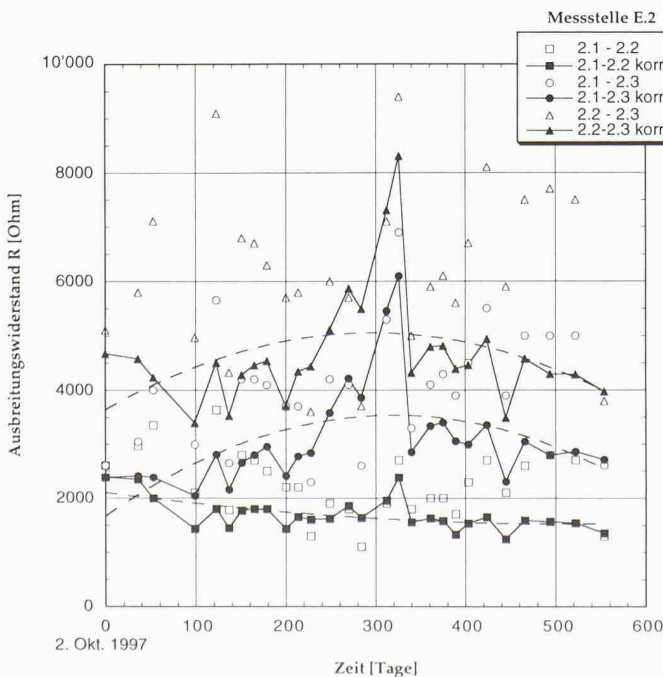
Aufgrund der bauteilspezifischen Unsicherheiten und der erschwerten Installation während der Instandsetzungsarbeiten war damit zu rechnen, dass nicht alle Sensorstäbe für die Messungen verwendet werden können. In einem ersten Auswertungsschritt wurde anhand der im ersten Betriebsjahr gemessenen Widerstandswerte festgestellt, welche isolierten Bewehrungsstäbe aussagekräftige Ergebnisse liefern. Ursachen für den Ausfall ein-

zelner Sensorstäbe waren zu geringe Widerstände gegen die vermaschte Bewehrung (Widerstand permanent < 1 kΩ) oder Unterbrüche im Messkreis. Von den insgesamt 32 angeschlossenen isolierten Bewehrungsstäben können die Messwerte an 26 Sensoren ausgewertet werden.

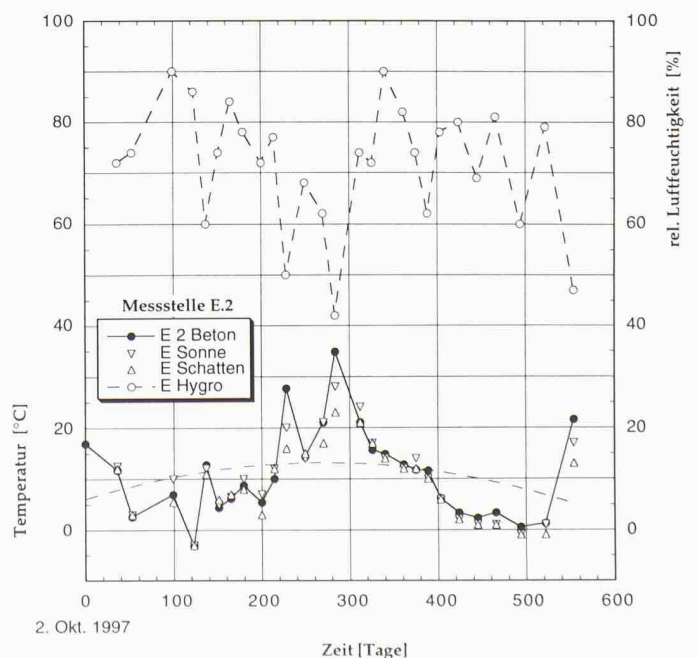
Elektrischer Widerstand

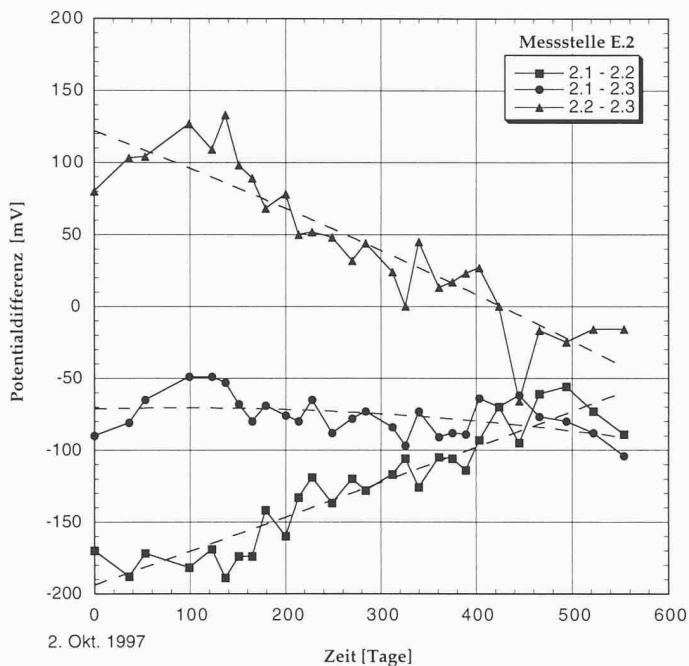
An den Anschlussklemmen wurde mit einem kommerziellen Wechselspannungswiderstandsmessgerät der Ausbreitungswiderstand der isolierten Stäbe gemessen. Dieser wird durch den spezifischen Beton- bzw. Mörtelwiderstand sowie die Dimensionen und die Position des Sensorstabs bestimmt. Für einfache geometrische Verhältnisse können der Ausbreitungswiderstand berechnet und sekundäre Strompfade zwischen den Schnittflächen der Bewehrung berücksichtigt werden [3, 7]. Bei den installierten Messstellen sind die geometrischen Bedingungen (isolierte Stablänge, Betonüberdeckung, Abstand und Verlauf der benachbarten vermaschten Bewehrung) sowie die möglichen sekundären Strompfade individuell verschieden und somit nicht vollständig erfassbar. Die Summe dieser Unsicherheiten ermöglicht keine genaue Ableitung der spezifischen Betonwiderstände, so dass im gegenwärtigen Versuchsstadium nur die gemessenen absoluten Ausbreitungswiderstände, die zu den jeweiligen spezifischen Betonwiderständen proportional sind, registriert wurden. Die gemessenen Ausbreitungswiderstände sind von der Betonfeuchtig-

4
Zeitlicher Verlauf der Ausbreitungswiderstände an der Messstelle E.2 mit (korr) und ohne Temperaturkorrektur (Bezugstemperatur +20 °C)

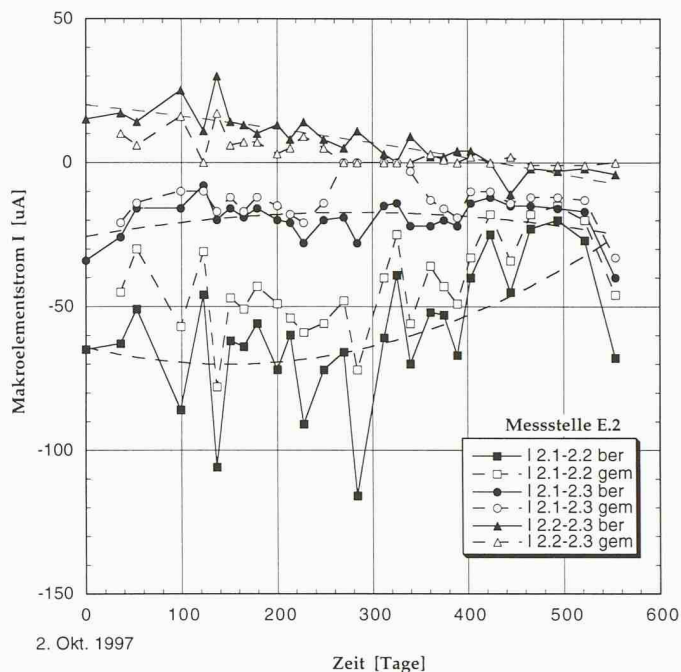


5
Zeitlicher Verlauf der Betontemperatur. Zusätzlich sind die Lufttemperaturen an der Sonne und im Schatten sowie die relative Luftfeuchtigkeit (Hygro) vor der Südfassade aufgezeichnet





6
Zeitlicher Verlauf der Potentialdifferenzen



7
Zeitlicher Verlauf der gemessenen (gem) und der berechneten (ber) Makroelementströme

keit und -temperatur abhängig. Zur Kompensation des Temperatureinflusses wurden die gemessenen Ausbreitungswiderstände mit der folgenden Beziehung auf eine Bezugstemperatur von +20 °C umgerechnet [2 bis 6].

Die Konstante b hängt von den Eigenschaften des Betons ab und ist für die einzelnen Messstellen unterschiedlich. Für eine erste Übersicht wurden die gemessenen Ausbreitungswiderstände mit dem in der Literatur gebräuchlichen b -Wert von 2400 K auf die Bezugstemperatur von +20 °C umgerechnet [4]. An den intakten Messstellen wurden drei Ausbreitungswiderstände gemessen: Je ein Wert zwischen den Sensorstäben und der vermaschten Bewehrung sowie ein Wert zwischen den beiden isolierten Stäben. Als typisches Beispiel ist in Bild 4 der zeitliche Verlauf der Ausbreitungswiderstände während der ersten Betriebsphase für die Messstelle E.2 (Erdgeschoss Südfassade, nicht reprofiliert, mit Inhibitor), jeweils unkorrigiert und auf +20 °C umgerechnet, dargestellt. Der Verlauf der zugehörigen Beton- und Lufttemperaturen in Bild 5 zeigt, dass die grössten Differenzen zwischen den gemessenen und den temperaturkorrigierten Ausbreitungswiderständen bei tiefen Betontemperaturen auftreten. Im Verlauf der ersten Betriebsphase (Werte bis 554 Tage registriert) konnten für die verschiedenen Typen von Messstellen unterschiedliche Entwicklungen (Trends, als Polynome 2. Grades dargestellt) der Ausbreitungswiderstände beobachtet werden:

- Reprofilierten mit Inhibitorapplikation: Anfängliche Zunahme der Widerstände, Maximum nach 350 ± 50 Tagen (Erhöhung um bis zu 100%), anschliessend kontinuierliche Abnahme bis auf aktuelle Werte von rund 10% über den Anfangswerten.

- Nicht reprofilierte Bereiche mit Inhibitorapplikation (Bild 4): Meist ähnliches Verhalten wie reprofilierte Bereiche, wobei das Maximum etwas früher erreicht wird (nach 300 ± 50 Tagen) und die aktuellen Werte innerhalb einer Bandbreite von 10% den Anfangswerten entsprechen. An etwa einem Viertel dieser Anschlüsse trat während der Beobachtungsperiode kein Widerstandsmaximum auf (Kurve 2.1 - 2.2 in Bild 4).

- Reprofilierten ohne Inhibitorapplikation: Stetige Zunahme der Widerstände, aktuelle Werte bei 125% der Anfangswerte.

- Nicht reprofilierte Bereiche ohne Inhibitorapplikation: Keine relevanten Veränderungen des Widerstands, wenig ausgeprägtes Maximum nach 350 ± 50 Tagen.

Potentialdifferenz

Die gemessenen Potentialdifferenzen wurden unverändert gespeichert und ausgewertet. Negative Potentiale bedeuten anodisches Verhalten der isolierten Stäbe gegenüber der vermaschten Bewehrung. In der Regel wiesen die Potentialdifferenzen geringere Streuungen und eindeutiger Trends auf als die entsprechenden Widerstände, wie der Vergleich der Bilder 6

und 4 für die Messstelle E.2 zeigt. Bild 6 zeigt ein Beispiel, bei dem die Absolutwerte der Potentialdifferenzen im Laufe der Zeit abnahmen, d.h. die Potentiale der anodischen und kathodischen Bereiche näherten sich an. Im Verlauf der ersten Betriebsphase zeichneten sich die folgenden Trends ab:

- Reprofilierten mit Inhibitorapplikation: Meist kontinuierliche Zunahme der Potentialdifferenzen, aktuelle Absolutwerte rund 100 mV grösser als Anfangswerte. An einzelnen Sensoren mit relativ hohen Anfangswerten (Grössenordnung ± 200 mV) traten keine relevanten Veränderungen der Potentialdifferenzen auf.

- Nicht reprofilierte Bereiche mit Inhibitorapplikation: An etwa 50% dieser Messstellen kontinuierliche Abnahme der (absoluten) Potentialdifferenzen, aktuelle Werte im Bereich 0 ± 50 mV (Bild 6). An den anderen 50% der Messstellen kontinuierliche Zunahme der (absoluten) Potentialdifferenzen, aktuelle Maximalwerte im Bereich ± 200 mV.

- Reprofilierten ohne Inhibitorapplikation: Anfängliche Zunahme der (absoluten) Potentialdifferenzen, Maximum nach 350 bis 400 Tagen, anschliessend kontinuierliche Abnahme (aktuelle Werte bis 100 mV grösser als Anfangswerte).

- Nicht reprofilierte Bereiche ohne Inhibitorapplikation: Keine relevanten Veränderungen.

Makroelementstrom

Für die Auswertung der ersten Versuchsphase wurden die Makroelementströme I zwischen den isolierten Stäben und der vermaschten Bewehrung als Stromstärken in μA gemessen und registriert. Negative Ströme bedeuten anodisches Verhalten der isolierten Stäbe gegenüber der vermaschten Bewehrung. Nebst der direkten Messung wurden die Makroelementströme mittels des ohmschen Gesetzes aus den gemessenen (temperaturabhängigen) Ausbreitungswiderständen (Bild 4) und den gemessenen Potentialdifferenzen (Bild 6) berechnet. Für alle Messstellen waren die Absolutwerte der berechneten Ströme um 10 bis 25% grösser als die direkt gemessenen Werte. Im Laufe der ersten Betriebsphase entwickelten sich die Makroelementströme für die verschiedenen Typen von Messstellen gemäss den folgenden Trends:

- Reprofilierungen mit Inhibitorapplikation: Anfängliche Zunahme der (absoluten) Makroelementströme, Maximum von teilweise über $200 \mu\text{A}$ nach 350 ± 50 Tagen, anschliessend kontinuierliche Abnahme. An rund 75% der Sensoren liegen die aktuellen Werte im Bereich 10 bis $50 \mu\text{A}$, die restlichen 25% weisen deutlich höhere Ströme in der Grössenordnung von 100 bis $200 \mu\text{A}$ auf.

- Nicht reprofilierte Bereiche mit Inhibitorapplikation (Bild 7): Stetige Abnahme der (absoluten) Makroelementströme von Anfangswerten in der Grössenordnung von 100 bis $200 \mu\text{A}$ auf aktuelle Werte unter $50 \mu\text{A}$.

- Reprofilierungen ohne Inhibitorapplikation: Ähnliches Verhalten wie reprofilierte Bereiche mit Inhibitorapplikation, relativ hohe Ströme in der Grössenordnung von 100 bis $200 \mu\text{A}$.

- Nicht reprofilierte Bereiche ohne Inhibitorapplikation: Näherungsweise konstante, kleine Makroelementströme $< 20 \mu\text{A}$.

Für einen isolierten Sensorstab von 10 cm Länge entspricht ein Makroelementstrom von $10 \mu\text{A}$ bei gleichmässiger Korrosion einem Querschnittsverlust von $7,5 \mu\text{m}$ pro Jahr [1]. Dieser Wert liegt im Bereich der Passivstromdichte (Querschnittsverlust $< 1 \mu\text{m}/\text{Jahr}$) und ist im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit vernachlässigbar. Die grössten momentanen Einzelwerte lagen im Bereich von $400 \mu\text{A}$, was bei dauerndem Stromfluss einem Querschnittsverlust von $300 \mu\text{m}$ pro Jahr entspräche. Wird für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ein maximaler Querschnittsverlust von 1 mm to-

leriert, muss der Makroelementstrom langfristig $< 25 \mu\text{A}$ betragen. Gegenwärtig liegen die Makroelementströme bei rund 75% der mit dem Inhibitor behandelten reprofilierten Messstellen und beim Grossteil der nicht reprofilierten Messstellen (mit und ohne Inhibitor) unterhalb oder in der Nähe dieses (hypothetischen) Grenzwertes. Demgegenüber liegen die Makroelementströme der reprofilierten Bereiche ohne Inhibitorbehandlung (und von etwa 25% deren mit Inhibitorbehandlung) deutlich höher, wobei die Trends im letzten Halbjahr kleinere Werte zeigen.

Erste Beurteilung – Ausblick

- Die Installation eines Monitoring-Systems an vorgefertigten Sichtbeton-Fassadenelementen ist mit vertretbarem Aufwand durchführbar. Die installierten Messstellen sind grösstenteils intakt und können für die weitere Überwachung verwendet werden.

- Die kleinen Dimensionen und die unregelmässige Anordnung der Bewehrungen erschweren in Verbindung mit den geringen Überdeckungen die Instrumentierung sowie die Auswertung und Interpretation.

- Die Messwerte der ersten Betriebsphase weisen bei den reprofilierten Bereichen ohne Inhibitorbehandlung auf ein Austrocknen des Betons/Mörtels und ein Einstellen der elektrochemischen Gleichgewichte an den Bewehrungen hin. An den unbehandelten, nicht reprofilierten Messstellen sind keine relevanten Veränderungen der elektrochemischen Parameter erfolgt.

- Die Entwicklung der Ausbreitungswiderstände in den mit dem Korrosionsinhibitor behandelten Bereichen (mit und ohne Reprofilierung) kann nicht allein auf Austrocknungseffekte oder Witterungseinflüsse zurückgeführt werden. Nach einer anfänglichen Austrocknungsphase hat der Korrosionsinhibitor einen deutlichen Abfall der Ausbreitungswiderstände zur Folge. Die Fortsetzung der Messreihen wird zeigen, ob es sich dabei um einen singulären Anfangseffekt handelt oder ob die Ausbreitungswiderstände durch den Korrosionsinhibitor dauerhaft beeinflusst werden.

- Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass der verwendete Korrosionsinhibitor in den meisten Fällen die Makroelementströme in den reprofilierten Bereichen gegenüber den unbehandelten Reprofilie-

Literatur

- [1] *Elsener B., Flückiger D., Wojtas H. und Böbni H.*: Methoden zur Erfassung der Korrosion von Stahl in Beton. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 521, Bern, Februar 1996
- [2] *Bindschedler D., und Hunkeler F.*: Europabrücke: Korrosionsuntersuchungen. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 19, 1997, S. 374-378
- [3] *Hunkeler F.*: Elektrischer Betonwiderstand. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 5, 1997, S. 82-88
- [4] *Bürchler D.*: Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen. Diss. ETH. Nr. 11876, 1996, ETH Zürich
- [5] *Hunkeler F.*: Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauwerken. EVED/ASB, VSS-Bericht Nr. 510, Bern, Mai 1994
- [6] *Hunkeler F.*: Elektrischer Widerstand von Mörteln und Beton. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 43, 1993, S. 767-772
- [7] *v. Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W.*: Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes. VCH Verlagsgesellschaft mbH, D-6940 Weinheim, 1989

rungen signifikant reduziert. Die für die Praxis entscheidende Frage nach der Dauerhaftigkeit dieser Inhibitorwirkung kann nur durch die Fortsetzung der Messreihen über mehrere Jahre beantwortet werden.

Die vorliegenden Messwerte und die daraus abgeleiteten Trends beschreiben lediglich das Systemverhalten während der ersten, wesentlich durch Trocknungs- und Hydratationsprozesse bestimmten Nutzungsphase der instandgesetzten Fassade. Zuverlässige Folgerungen bezüglich des Langzeitverhaltens können erst nach einer Messdauer von einigen Jahren gezogen werden. Insbesondere müssen die Zusammenhänge zwischen den klimatischen Bedingungen und den elektrochemischen Kennwerten aufgrund einer statistisch ausreichenden Anzahl Messungen bekannt sein, um zwischen Inhibitorwirkungen und externen Einflüssen differenzieren zu können.

Adresse der Verfasser:

Aldo Rota, Dr. sc. techn., dipl. Werkstoffing. ETH, *Dieter Flückiger*, Dr. sc. techn., dipl. Bauing. ETH, Flückiger + Bosshard AG, Neugasse 10, 8812 Horgen