

Zeitschrift: Cementbulletin
Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)
Band: 60-61 (1992-1993)
Heft: 21

Artikel: Elektrochemische Realkalisierung und Entsalzung
Autor: Hermann, Kurt
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-153784>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 28.05.2025

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

CEMENTBULLETIN

SEPTEMBER 1993

61. JAHRGANG

NUMMER 21

Elektrochemische Realkalisierung und Entsalzung

Instandsetzung von carbonatisierten bzw. chloridverseuchten Stahlbetonstrukturen unter Verwendung elektrochemischer Prozesse.

Stahlbetonbauwerke, die stark mit Chloridionen belastet sind, aber noch keine grösseren Schäden (Lochfrasskorrosion und Abplatzungen) aufweisen, lassen sich durch kathodischen Korrosionsschutz (KKS) dauerhaft vor Korrosion schützen [1, 2]. Auf ähnlichen elektrochemischen Prinzipien wie der KKS basieren die beiden NCT-Verfahren der Firma Norwegian Concrete Technologies A/S in Oslo. Diese erlauben die Entfernung von Chloridionen bzw. die Realkalisierung von carbonatisiertem Beton. Seit rund zwei Jahren werden sie auch in der Schweiz eingesetzt. Erstmals praktisch erprobt wurde die Realkalisierung im Jahr 1987 in Tromsø (Norwegen).

Carbonatisierung und Korrosion

Beton enthält immer Poren, in die Gase und Flüssigkeiten eindringen. Kohlenstoffdioxid (CO_2 , «Kohlensäure») aus der Luft reagiert mit Hydratationsprodukten des Zements an diesen Porenwänden sowie mit dem im Porenwasser gelösten stark alkalischen Calciumhydroxid. In beiden Fällen wird Calciumcarbonat (Kalkstein) gebildet, das sich an den Porenwänden ablagert. Daraus resultieren in der Regel ein Anstieg der Druckfestigkeit und eine Abnahme des Porenvolumens des Betons, beides durchaus erwünschte Effekte. Gleichzeitig aber sinkt der pH-Wert von ursprünglich über 12,5 auf unter 9,5 (bei vollständiger Carbonatisierung).

In Beton entsteht an der Oberfläche der Bewehrung spontan eine dünne Schicht aus Eisenoxiden, die vor Korrosion schützt. Sinkt der

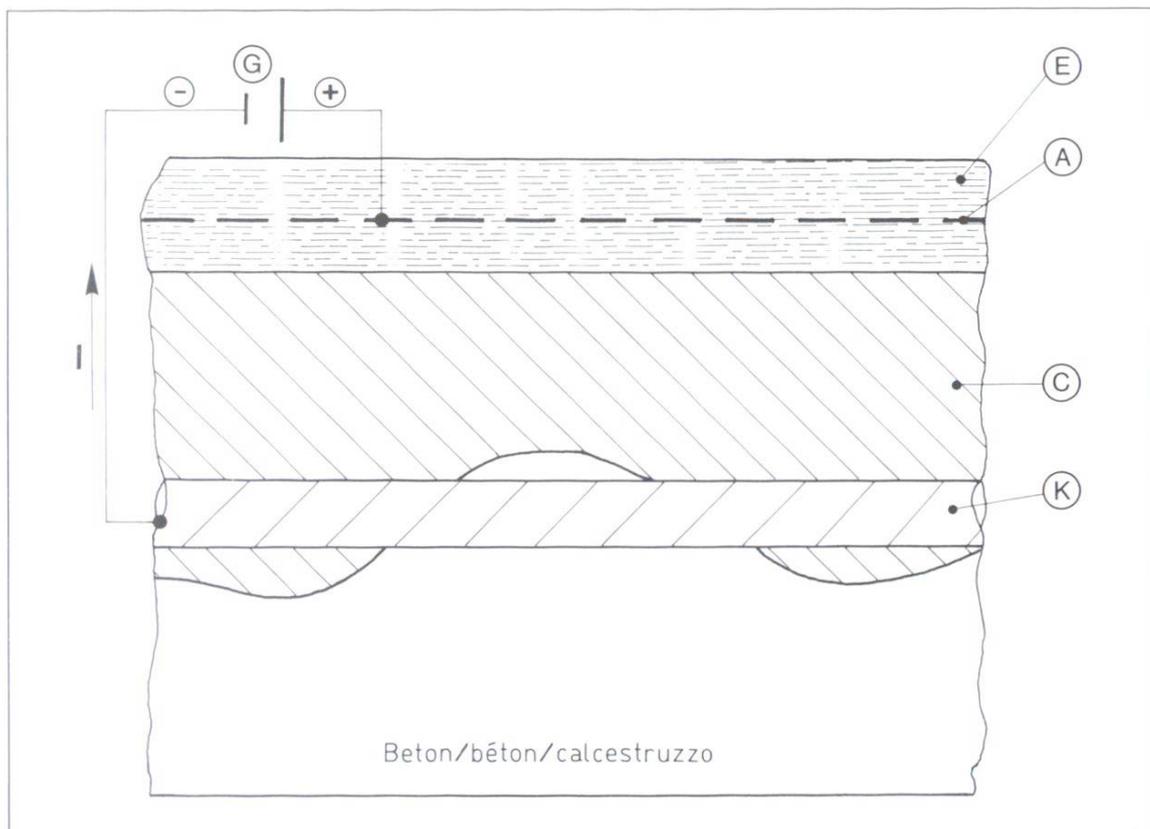
2 pH-Wert um die Bewehrung durch Carbonatisierung unter 9,5, wird diese Schutzschicht zerstört, und Korrosion kann einsetzen, wenn genügend Sauerstoff und Feuchtigkeit vorhanden sind [1].

Da die Rostbildung mit einer starken Volumenvergrößerung einhergeht, kann es zu Abplatzungen von Beton kommen. Ursache der Abplatzungen ist meist eine zu geringe Überdeckung der Bewehrung, denn Carbonatisierungstiefen von mehr als 30 mm werden nur selten beobachtet [3].

Elektrochemische Realkalisierung

Bei der elektrochemischen Realkalisierung [4, 5] von carbonatisiertem Beton wird ein Metallnetz auf der Betonoberfläche in eine Papierfasermasse eingebettet, die als Speicher für eine 1,0 molare Natriumcarbonatlösung (Sodalösung) dient. Sowohl das Metallnetz als auch die Bewehrung werden mit einer Gleichstromquelle verbunden (*Schema 1*). Die Bewehrung dient als Kathode, das Metallnetz als Anode. Bei Gleichspannungen bis 40 V werden Stromdichten zwischen 0,5 und 1,0 A/m² beobachtet.

Unter dem Einfluss des elektrischen Stroms (*Elektrolyse*) bilden sich an der Bewehrungsoberfläche Hydroxylionen, durch die die zerstörte Schutzschicht wieder hergestellt und Rost in passive Eisenverbindungen umgewandelt wird. Gleichzeitig finden *Ionenwanderungen* statt: Hydroxylionen bewegen sich von der negativ geladenen



Schema 1. Elektrochemische Realkalisierung von carbonatisiertem Beton (C): Die Gleichstromquelle (G) wird während einige Tage mit dem Anodennetz (A) (in elektrolythaltigen Papierfasern [E] eingebettet) und der Bewehrung (K) verbunden. (Zeichnung: TFB)

3 Bewehrung (Kathode) in Richtung Aussennetz (Anode), und Natrium- sowie andere positiv geladene Ionen wandern von der Betonoberfläche in Richtung Kathode. Zudem dringt unter dem Einfluss des elektrischen Feldes Natriumcarbonatlösung in den Beton ein (*Elektroosmose*).

Nach dem Ausschalten des Gleichstroms spielen sich in den Betonporen verschiedene Reaktionen ab, an deren Ende die Bildung von Natriumcarbonat und Natriumbicarbonat stehen. Diese beiden Verbindungen schützen die Bewehrung vor erneuter Depassivierung und nachfolgender Korrosion: Sie bilden ein sogenanntes «Puffersystem», das den pH-Wert oberhalb von 10,0 hält, auch bei weiteren Angriffen durch CO_2 aus der Luft.

Praktische Durchführung elektrochemischer Realkalisierungen

Als erstes wird die Betonoberfläche gereinigt. Lose Teile werden anschliessend entfernt und durch farblich angepassten Mörtel ersetzt. Alle 50 m^2 wird ein Elektroanschluss zwischen der Bewehrung und der Stromquelle erstellt. Mit einem einfachen Fördergerät wird trockene Papierfasermasse zusammen mit der wässrigen Natriumcarbonatlösung auf die Betonoberfläche gespritzt. Über der etwa 2,5 cm dicken, feuchten Schicht wird ein Metallnetz angebracht, das mit einer weiteren 2,5 cm dicken Schicht aus Papierfasern und Natriumcarbonatlösung überdeckt wird. Der Verbrauch an Papierfasern beträgt etwa 5 kg/m^2 .

Die Bewehrung und das Metallnetz werden mit der Gleichstromquelle verbunden. Während der Strombehandlung wird die Papierfasermasse feuchtgehalten. Nach ungefähr vier Tagen werden erstmals Bohrkerne mit 20 mm Durchmesser zur Kontrolle der Realkalisierung gezogen. Bei einer genügenden Realkalisierung des Betons kann die Stromquelle abgestellt werden. Erfahrungsgemäss ist dies nach vier bis acht Tagen der Fall.

Die Papierfasern und das Anodennetz werden entfernt, die Oberfläche wird gründlich mit Wasser (150 bar) gereinigt. Die Löcher, die vom Elektroanschluss der Bewehrung sowie von der Entnahme von Bohrkernen stammen, werden mit Mörtel gefüllt.

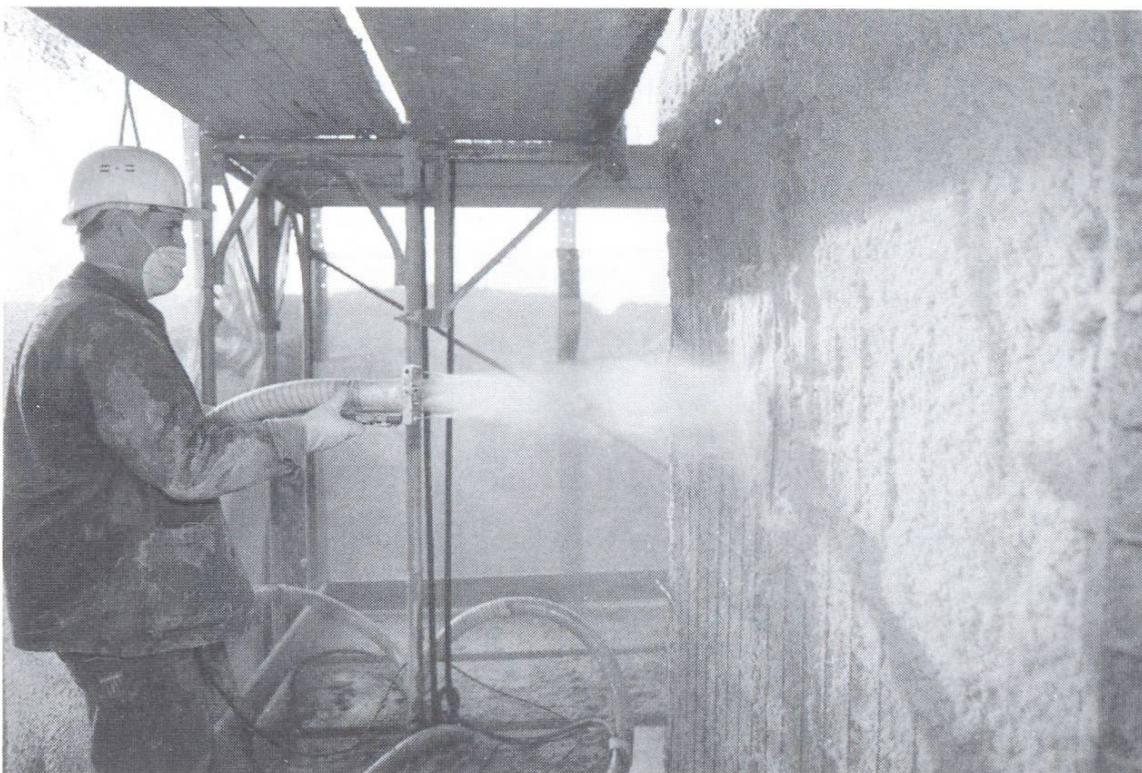
Angewendet wurde die elektrochemische Realkalisierung beispielsweise in London: Die Aussenmauern der 1932 erbauten Hoover-Fabrik waren im Mittel etwa 30 mm und maximal 70 mm tief carbonatisiert, und die Bewehrung war korrodiert. Da die zuständigen Behörden die Erhaltung des ursprünglichen Betons verlangten, wurde das NCT-Verfahren für die Sanierung ausgewählt. Bis zu 400 m^2 grosse Flächenabschnitte wurden in durchschnittlich vier Tagen realkalisiert. Insgesamt wurden 4500 m^2 behandelt [6].

- 4 In der Schweiz wurden unter anderem Kirchtürme in Bottmingen und Münchenstein sowie 1400 m² Sichtbeton mit Carbonatisierungstiefen bis zu 40 mm an einem PTT-Gebäude in Bern realkalisiert. Eine weitere Anwendung ist die Realkalisierung von Fassadenelementen an einem Gebäude in Brig im Auftrag des Amts für Bundesbauten.

Wann ist elektrochemische Realkalisierung sinnvoll?

Carbonatisierter Beton ist «guter» Beton, dem jedoch die Fähigkeit fehlt, die Bewehrung dauerhaft gegen Korrosion zu schützen. Wenn die Carbonatisierungsfront in einem Stahlbetonbauwerk die Bewehrung noch nicht erreicht hat, kann es genügen, die weitere Carbonatisierung zu bremsen. Dafür eignen sich verschiedene Beschichtungen, die von dünnen Kunststoffüberzügen bis zu einer zusätzlich aufgetragenen möglichst dichten Schicht aus Spritzbeton reichen können. Die elektrochemische Realkalisierung wird in diesem frühen Stadium dann eingesetzt werden, wenn Sichtbetonflächen nicht verändert werden dürfen (Denkmalschutz!) oder Zusatzgewichte aus statischen Gründen nicht zulässig sind.

Sobald sichtbare Korrosionsschäden vorhanden sind, wird das Realkalisierungsverfahren mit dem aufwendigen vollständigen Abtragen des Betons bis zur Bewehrung, gefolgt vom Entrosten des geschädigten Stahls und Reprofilierung, meist mit Spritzbeton, in Konkurrenz treten. Statisch heikle Stahlbetonbauten mit kleinen Querschnitten, beispielsweise Silobauten, Kühltürme oder Wassertürme, sind weitere Sanierungsfälle, bei denen elektrochemische Realkalisierungen erwogen werden können.



Überdecken des Anodennetzes mit feuchten Papierfasern.

(Foto: Ecbis, Allschwil)

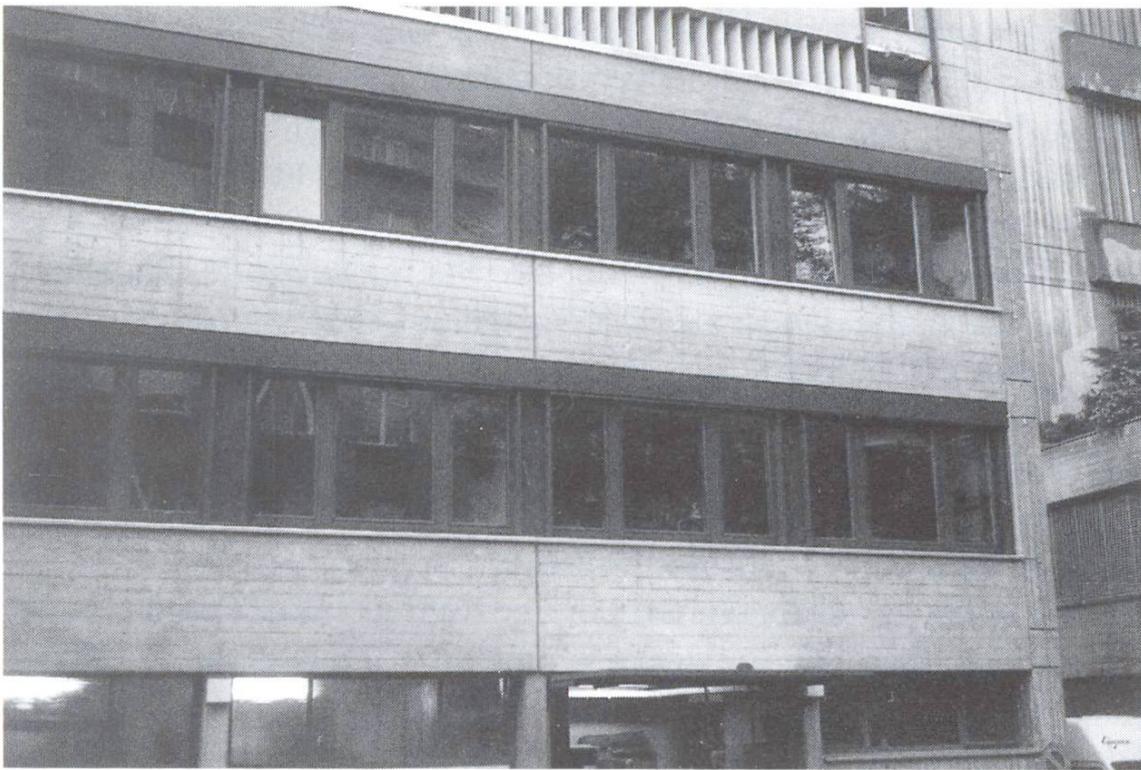
5 Erwähnenswert ist auch die Realkalisierung von carbonatisierten Betonbauteilen durch hydraulisch gebundene Reparaturmörtel. Calciumhydroxid, das aus dem Mörtel stammt, bewirkt im Porenwasser des carbonatisierten Betons einen Anstieg des pH-Wertes auf etwa 12,5. Unmittelbar nach dem Entfernen des Reparaturmörtels setzt jedoch die Carbonatisierung wieder ein. Der realkalisierte Beton lässt sich nur dann über längere Zeit vor erneuter Carbonatisierung schützen, wenn der Reparaturmörtel auf der Betonoberfläche belassen wird oder die Oberfläche mit einer Carbonatisierungsbremse versehen wird [11].

Elektrochemische Chloridentfernung

Auf die Rolle der Chloridionen bei der Korrosion der Bewehrung in Stahlbetonbauten wurde bereits im letzten «Cementbulletin» eingegangen [1]. Festzuhalten ist, dass Chloridionen unter ungünstigen Bedingungen die Passivierungsschicht der Bewehrung auch bei hohen pH-Werten ($> 12,0$) durchbrechen und die Korrosion einleiten können.

Abhilfe kann mit der elektrochemischen Entsalzung nach dem NCT-Verfahren geschaffen werden [4, 5, 10]. Im Prinzip laufen die gleichen Vorgänge wie bei der Realkalisierung ab. Dies bedeutet, dass die korrodierenden Bereiche der Bewehrung wieder passiviert werden. Entscheidend ist, dass sich zudem die nicht im Zementstein gebundenen Chloridionen wie die Hydroxylionen von der Bewehrung weg in Richtung Anode bewegen; sie gelangen in die feuchte Papiermasse, mit der sie nach Beendigung der Entsalzung entfernt werden. Die elektrochemische Chloridentfernung unterscheidet sich auch in der Durchführung nur wenig von der elektrochemischen Realkalisierung. Ein alkalischer Elektrolyt ist nicht erforderlich; die Papierfaser-masse wird in der Regel mit Wasser feuchtgehalten. Gelegentlich wird auch verdünnte Calciumhydroxidlösung verwendet. Die Spannungen (10 bis 40 V) und Stromdichten (0,5 bis 1,0 A/m²) sind gleich. Das Fortschreiten der elektrochemischen Chloridentfernung lässt sich anhand von Chloridanalysen aus laufend entnommenen Bohrkernen überwachen. Meistens dauert sie drei bis neun Wochen, je nach Chloridgehalt und -verteilung, Betonqualität, Betonfeuchtigkeit sowie Anordnung und Überdeckung der Bewehrung. Vorzugsweise sollte die Entsalzung während der warmen Jahreszeit ausgeführt werden.

Typische Chloridreduktionen bewegen sich um 50 bis 60 %. Werden weitgehendere Verminderungen des Chloridgehaltes verlangt, kann die NCT-Behandlung nach einer Ruhezeit von ein bis zwei Wochen durch erneutes Einschalten des elektrischen Stroms fortgesetzt werden. Wenn das sanierte Bauwerk voraussichtlich auch künftig durch



Sichtbeton nach der Realkalisierung am mehr als 25 Jahre alten PTT-Gebäude an der Haslerstrasse in Bern.
(Foto: Ecbis, Allschwil)

Chloride belastet sein wird, sollte es mit einer geeigneten Beschichtung versehen werden.

Feldversuche zur elektrochemischen Chloridentfernung, die im Auftrag des Bundesamtes für Strassenbau in der Schweiz [9] bzw. im Rahmen des Strategic Highway Research Program in Kanada [8] durchgeführt wurden, gaben keine Hinweise auf chemische oder physikalische Veränderungen im behandelten Beton. Sicherheitshalber sollte bis zum Vorliegen von Forschungsergebnissen auf die Sanierung von Spannbetonbauwerken mit dem NCT-Verfahren verzichtet werden, da Wasserstoffversprödungen (Spannungsrissskorrosionen) nicht vollständig auszuschliessen sind. (Aus dem gleichen Grund ist auch die Anwendung des KKS bei Spannbetonbauwerken eingeschränkt [1].)

Hauptanwendungen der elektrochemischen Chloridentfernung sind mit Tausalz verseuchte Betonbauten wie Brückenpfeiler, Stützmauern oder Parkdecks, chloridverseuchte Betonbauteile in der chemischen Industrie oder chloridbelastete Betonbauteile nach einem PVC-Brand. Berichtet wird beispielsweise über eine 1968 fertiggestellte Bogenbrücke mit 210 m Bogenspannweite in Vorarlberg. Auf der Bogenoberfläche betrug die Chloridmenge 2 % (bezogen auf den Zementgehalt). In einem fünfwöchigen Modellversuch konnte der Chloridgehalt in 0 bis 10 mm Tiefe um 67 % und in 15 bis 25 mm Tiefe um 54 % reduziert werden [5].

Erfolgreich abgesenkt wurde auch der Chloridgehalt in vier Rundstützen einer 20 Jahre alten Mainbrücke in Frankfurt. Erschwert wurde dabei die Durchführung durch den dichten Beton aus Hochofenzement.

7 ment, der einen zehn- bis zwanzigfach höheren elektrischen Widerstand aufweist als Portlandzement. Dennoch gelang es nach rund 60 Tagen Behandlungszeit, den Chloridgehalt (bezogen auf den Zementgehalt) im äusseren Bereich von 1,3 % auf etwa 0,3 % und in Bewehrungsnähe von 0,7 % auf 0,1 % zu reduzieren. Zum Schutz vor erneutem Eindringen von Chloridionen wurden die Stützen nach Abschluss der Sanierung mit einem pigmentierten Anstrich versehen [7].

Elektrochemische Entsalzung oder kathodischer Korrosionsschutz?

Sowohl die elektrochemische Entsalzung als auch der im letzten «Cementbulletin» behandelte kathodische Korrosionsschutz [1] können zur Sanierung von stark mit Chloridionen belasteten Stahlbetonbauwerken eingesetzt werden [4]. Allerdings dürfen weder der tragende Querschnitt der Bewehrung beträchtlich abgemindert noch grossflächige Schäden an der Betonüberdeckung aufgetreten sein. Derartige Schädigungen erfordern ein Abtragen der Betonüberdeckung bis zur Bewehrung, gefolgt von einer Reprofilierung. Möglicherweise muss die Bewehrung ergänzt oder teilweise ersetzt werden.

Für den kathodischen Korrosionsschutz spricht die längere Erfahrung, die damit gemacht worden ist. Allerdings erfordert dieses Verfahren im Gegensatz zum NCT-Verfahren eine periodische Überwachung während der ganzen Lebensdauer des Bauwerks. An vielen Bauwerken sind zudem Veränderungen am Aussehen und/oder zusätzliche Belastungen durch die für die Einbettung der Anoden für den KKS benötigten Spritzbetonschichten unerwünscht.

Anhänger der beiden Verfahren werden weitere Argumente anführen. Letztlich kommt es aber in allen Fällen darauf an, eine optimale Problemlösung zu finden. Und dies erfordert den Einsatz von Spezialisten, die später auch die Sanierung durchführen oder begleiten können.

Kurt Hermann

8 Literatur

- [1] *Hermann, K.*, «Kathodischer Korrosionsschutz», «Cementbulletin» **61** [20] (1993).
- [2] «Richtlinie für Projektierung, Ausführung und Überwachung des kathodischen Korrosionsschutzes von Stahlbetonbauwerken» (C7d), herausgegeben von der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz (1991).
- [3] *Neisecke, J.*, «Karbonatisierung von Stahlbeton – wirklich ein Problem?», Beton-Informationen **31** [3/4], 27–31 (1991).
- [4] *Jungwirth, D., Grübl, P., und Windisch, A.*, «Elektrochemische Schutzverfahren für bewehrte Bauteile aus baupraktischer Sicht», Beton- und Stahlbetonbau **86**[7], 167–171 (1991) und **86**[8], 190–192 (1991).
- [5] *Kaltenegger, W.*, «Sanfte Technologie für zerstörungsfreie Beton-Instandsetzung», Zement und Beton **1993** [2], 14–15.
- [6] «News from NCT», Februar 1993, Seiten 2–3.
- [7] *Eichert, H.-R., Wittke, B., und Rose, K.*, «Elektrochemischer Chloridentzug», Beton **42**[4], 209–213 (1992).
- [8] *Bennett, J., and Schue, T. J.*, «Evaluation of Norcure process for electrochemical chloride removal from steel-reinforced concrete bridge components», Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC (1992).
- [9] *Elsener, B., und Molina, M.*, «Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken, Schlussbericht zum Forschungsauftrag 97/92 Brückenunterhaltforschung, ASB.
- [10] *Roti, J. A.*, «Elektrochemische Realkalisation und Entsalzung von Beton», SIA-Dokumentation **D 065**, 1–21 (1990).
- [11] *Wittmann, F. H., und Lunk, P.*, «Beeinflussung des Feuchtigkeits- und Ionentransports in Beton durch oberflächentechnologische Massnahmen», SIA-Dokumentation **D 099**, 27–35 (1993).

Redaktion

Dr. Kurt Hermann
TFB, Lindenstrasse 10
5103 Wildeggen
Telefon 064 57 72 72
Telefax 064 53 16 27

Das «Cementbulletin»

erscheint einmal monatlich
Jahresabonnement:
Schweiz: Fr. 25.–
Übriges Europa: Fr. 50.–
Restliches Ausland: Fr. 80.–

Vertrieb/Abonnemente

Frau M. Winter
Zürichsee Medien AG
Seestrasse 86, 8712 Stäfa
Telefon 01 928 52 23
Telefax 01 928 52 00

Herausgeber

TFB, Lindenstrasse 10
5103 Wildeggen
Telefon 064 57 72 72

Druck

Zürichsee Druckereien AG
Seestrasse 86
8712 Stäfa

Copyright

TFB
Lindenstrasse 10
5103 Wildeggen