Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 112 (1994)

Heft: 18

Artikel: Elektrochemische Verfahren zur Betoninstandstellung: dauerhafte zerstörungsfreie Lösung des Korrosionsproblemes in karbonatisiertem Stahlbeton

Autor: Roti, Jan A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78428

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.01.2026

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

Elektrochemische Verfahren zur Betoninstandstellung

Dauerhafte zerstörungsfreie Lösung des Korrosionsproblemes in karbonatisiertem Stahlbeton

Die häufigsten Schäden in Stahlbeton haben ihre Ursache in der Korrosion der Bewehrungsstähle. Die sichtbaren Schäden treten als Abplatzungen auf, wenn die Korrosion so weit fortgeschritten ist, dass die Volumenvergrösserung der Korrosionsprodukte eine genügend hohe Sprengkraft im Beton erzeugt. Noch nicht so weit entwickelte Korrosionsstellen sowie Stellen, an denen die Hauptbedingung für künftige Korrosion erfüllt ist, sind an der Betonoberfläche nicht erkennbar (Bild 1).

Die bisher üblichen Betoninstandsetzungsverfahren bestehen hauptsächlich darin, zum einen dass der Beton dort, wo die Korrosion erkennbar ist, abgetragen und zum anderen die Betonoberfläche ganzflächig beschichtet wird. Das Korrosionsproblem wird also nur teilweise gelöst.

Ein in den 80er Jahren in Norwegen entwickeltes elektrochemisches Vefahren (NCT-Verfahren) für die Betoninstandsetzung bietet hingegen eine zerstörungsfreie Lösung des Korrosionsproblems an, indem es alle Stähle vollflächig behandelt, ohne dass tragfähiger Beton abgetragen werden muss.

Korrosion: «Batterie» im Beton

Bewehrungskorrosion ist ein elektrochemischer Prozess. Sie kann nur dann auftreten, wenn die im frischen Beton durch chemische Reaktionen natürlich gebildete alkalische Schutzschicht («Passivschicht») um den Bewehrungs-

VON JAN A. ROTI, ALLSCHWIL

stahl zerstört wird. Zwei Vorgänge sind in der Lage, diese Schutzschicht zu zerstören:

- die Karbonatisierung, hervorgerufen durch das Eindringen von CO_2 aus der Luft in die Betonporen.
- das Eindringen von Tausalz (Chloride).

Nach der stellenweisen Zerstörung der Schutzschicht bestehen unterschiedliche Materialeigenschaften entlang der Oberfläche der Bewehrungsstähle. Der Beton ist durch die Feuchtigkeit in den Betonporen elektrisch leitfähig. Zwischen den unterschiedlichen Materialarten an der Stahloberfläche bildet sich ein Stromkreis, eine sogenannte Makrozelle im Beton, vergleichbar mit einer Batterie [1]. Die Anode korrodiert. Die Korrosionsgeschwindigkeit ist von der Feuchtigkeit des Betons abhängig, da sie für die Leitfähigkeit massgebend ist. In Betonkonstruktionen, welche – mit oder ohne Oberflächenschutz – im Freien stehen, oder in Bauten, welche nicht beheizt werden (z.B. Parkhäuser), beträgt die relative Feuchtigkeit in den Betonporen meist 75% bis 90%. Dies reicht immer für die Leitfähigkeit und damit die Korrosion [2–3].

Ausführungs- und Wirkungsweise des neuen elektrochemischen Verfahrens

Die neuen norwegischen Verfahren (NCT-Verfahren) zielen auf die Beseitigung der Ursache der Korrosion [3-4]. Die Korrosion soll vollflächig wirksam und dauerhaft gestoppt werden. Beide Verfahren, die elektrochemische Realkalisierung des karbonatisierten Betons und der elektrochemische Entzug von Chloriden aus chloridverseuchtem Beton, beruhen grundsätzlich auf den gleichen elektrochemischen Prozessen, obwohl die zu lösenden Probleme unterschiedlich sind. Die Ziele der Behandlung sind:

☐ *Beide Verfahren*: Wiederherstellung der zerstörten Schutzschicht um den Bewehrungsstahl; dadurch Beseitigung weiterer Korrosion und Verminderung des Korrosionsrisikos

☐ *Realkalisierung:* Gewährleisten einer dauerhaften alkalischen Umgebung für die Bewehrung, um weiteres Korrosionsrisiko durch CO_2-Einwirkung zu vermeiden.

☐ *Chloridentzug:* Entfernung der lösbaren Chloride aus dem Beton, um das Risiko für weitere Korrosion zu vermeiden.

Die praktische Vorgehensweise (Bild 2) ist für die beiden Verfahren grundsätzlich gleich. An der Betonoberfläche wird vorübergehend eine aussenseitige Speicherschicht mit einem Elektrolyt angelegt. Für die Realkalisierung wird eine wässrige Lösung von Natriumkarbonat verwendet und für die Chlorid-

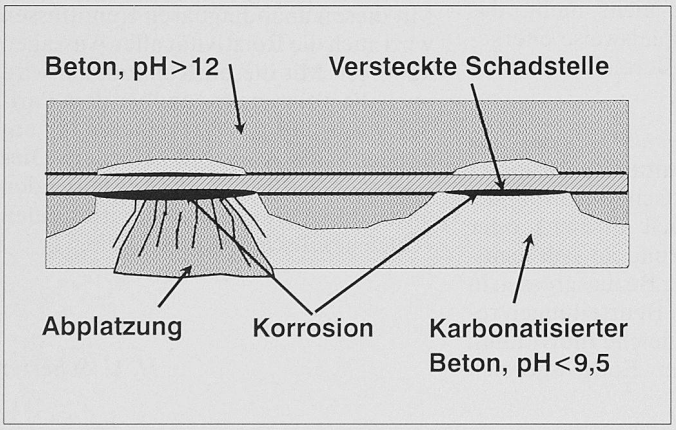


Bild 1. Schadensbild Korrosion: Bei fortgeschrittenen Korrosionsstellen hat die Korrosion Abplatzungen bewirkt. Bei anderen Korrosionsstellen ist der Schaden noch nicht erkennbar

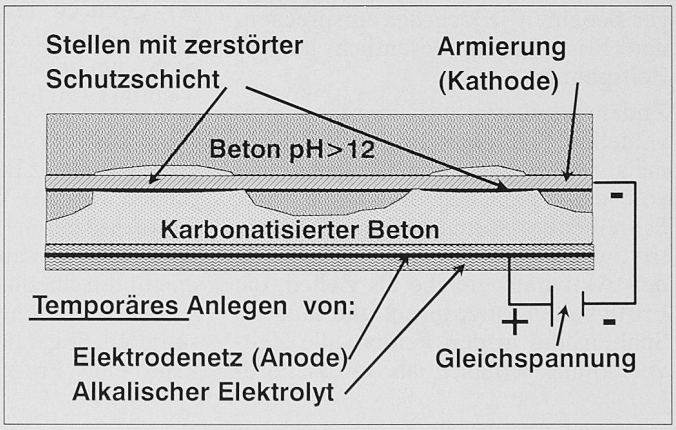


Bild 2. Das neue Verfahren (NCT-Verfahren): Zwischen einem temporär auf der Oberfläche angebrachten Metallnetz in einem Elektrolyt und der im Beton liegenden Bewehrung werden die elektrochemischen Prozesse in Gang gebracht

entfernung meist Wasser, eventuell versehen mit Alkalien. In die Speicherschicht ist ein Elektrodennetz eingebettet. Die elektrischen Verbindungen zum Elektrodennetz und zur Bewehrung werden mit den Polen einer Gleichstromquelle verbunden. Zwischen der aussen angelegten Elektrode (Anode +) und der Bewehrung als Kathode - fliesst ein Strom von 0.5–1.0 A/m² Betonfläche bei einer Spannung von bis zu 40 V. Mit Stromstärken dieser Intensität und der angewendeten Behandlungsdauer entstehen keine schädlichen Nebenwirkungen im Beton. Durch Einschalten des elektrischen Stromes finden im Prinzip drei Vorgänge statt (Bild 3):

☐ Die Elektrolyse spielt an der Bewehrung eine wichtige Rolle. Es werden negative OH-Ionen produziert, und dadurch wird die passivierende Schutzschicht wiederhergestellt.

☐ Es findet eine Ionenwanderung im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden statt. Die gelösten und lösbaren (dissoziierbaren) Ionen bewegen sich im elektrischen Kraftfeld:

- Negative Ionen wie Cl- und OH-Ionen bewegen sich in Richtung Anode (Aussennetz).
- Positive Ionen, wie die für die Realkalisierung wichtigen Alkali-Metall-Ionen Na^+ und K^+, bewegen sich in Richtung Kathode (Bewehrung).

☐ Mit der Elektroosmose wird der alkalischen Elektrolyt als Lösung in die Betonporen transportiert.

Die Re-Passivierung des Bewehrungsstahles durch die Elektrolyse kann durch anodische Polarisationsversuche analysiert werden [7]. Beispielhafte Ergebnisse (vgl. Bild 4 und 5) zeigen, dass die Re-Passivierung entscheidend von der Stromstärke und Behandlungsdauer abhängig ist. Nach genügender Behandlungsdauer und Stromstärke verhält sich bei diesen Versuchen die Oxidhaut des re-passivierten Stahles wie diejenige des Stahles in frischem, nicht-karbonatisiertem Beton.

Bei der *Chloridentfernung* werden die negativen Chloridionen durch die Ionenmigration aus dem Beton wegtransportiert und bei der Anode in der vorübergehend angelegten Speicherschicht abgelagert. Im Beton befinden sich Chloridionen zum Teil gelöst im Porenwasser und zum Teil gebunden am Zementgestein. Es besteht ein chemisches Gleichgewicht zwischen den gebundenen und den gelösten Chloriden. Das Gleichgewichtsverhältnis der gebundenen zu den gelösten Chloridionen ist u.a. von der Alkalinität des Betons abhängig. Der Strom verursacht zudem eine Auflösung und Wegtransport von gebundenen Chloriden [5]. Nach Aus-

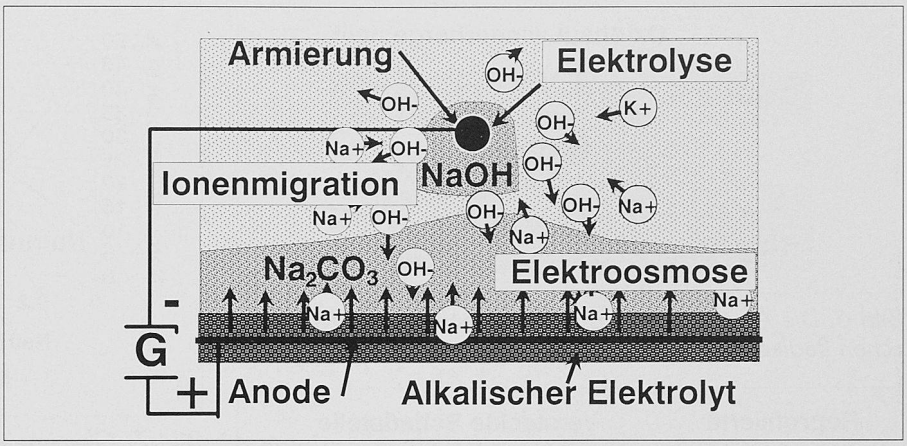


Bild 3. Drei Prozesse, Elektrolyse, Ionenmigration und Elektroosmose, finden während der Behandlung statt

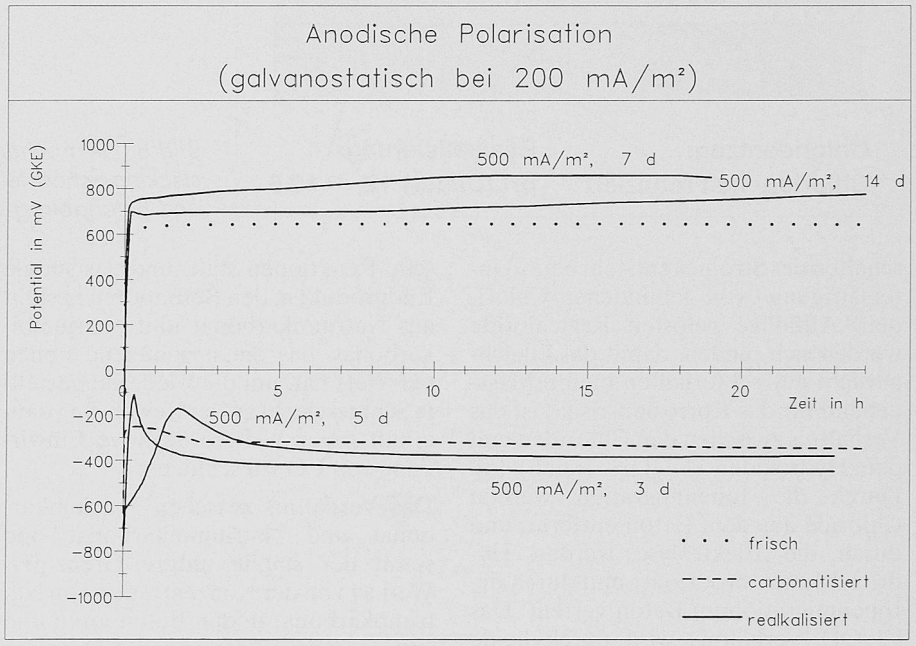


Bild 4. Anodische, galvanostatische Polarisation an realkalisierten Proben [7]

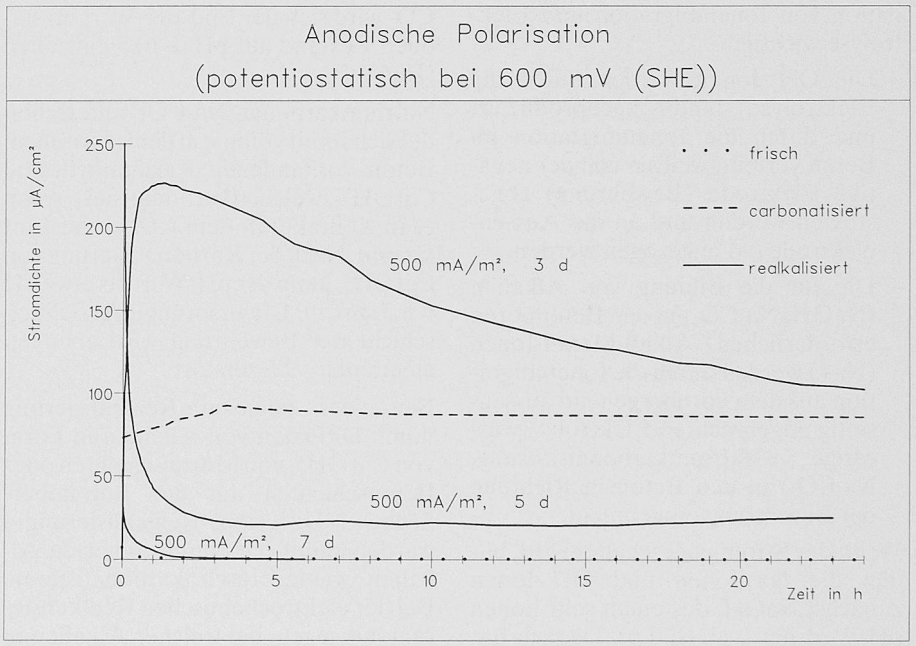


Bild 5. Anodische, potentiostatische Polarisation an realkalisierten Proben [7]

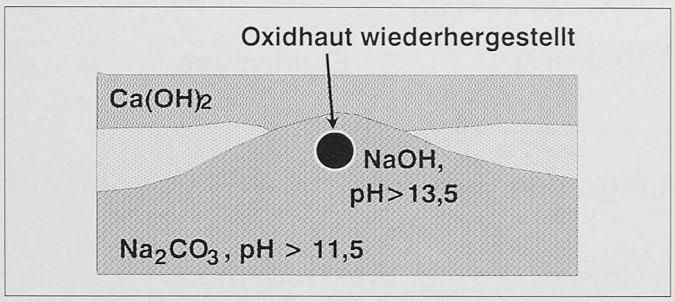
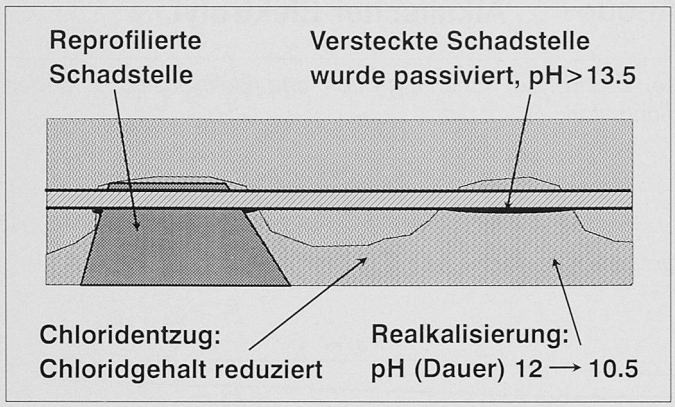


Bild 6. Die Alkalien im Beton gleich nach der elektrochemischen Realkalisierung



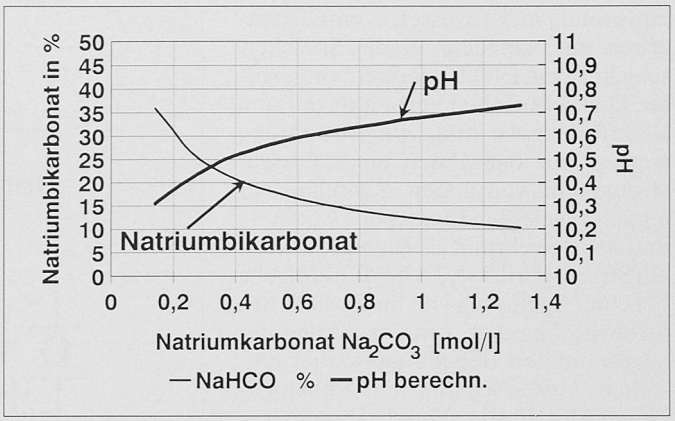


Bild 7. Gleichgewicht Natriumkarbonat-Natriumbikarbonat bei atmosphärischer Konzentration von CO_2. pH_{Dauer} ist abhängig von Na_2CO_3-Konzentration [8]

Bild 8. Elektrochemische Betoninstandsetzung: Auch die versteckten Schadstellen werden alle ohne vorherige Erkennung und Betonabtrag erfasst

schalten des Stromes entsteht eine «Untersättigung» von gebundenen Chloriden. Allfällige gelösten Restchloride werden sich binden, damit das Gleichgewicht aufrechterhalten bleibt. Massgebend für das Korrosionsrisiko ist das Verhältnis zwischen den Chloriden und den Hydroxiden (Cl^-/OH^--Ionen) [6]. Durch die Ionenmigration werden Chloride aus dem Beton entfernt, und durch die Elektrolyse werden Hydroxyl-Ionen produziert und durch die Ionenmigration im Beton verteilt. Das Cl^-/OH^--Verhältnis wird durch beide Prozesse entscheidend günstig beeinflusst.

Bei der *Realkalisierung* ist die Kombination von Ionenmigration und Elektrolyse wichtig:

- Die OH^--Jonen werden durch die Elektrolyse ständig nachproduziert und durch die Ionenmigration im Beton verteilt, weil sie von der negative Elektrode (Bewehrung) abgestossen werden und an die Aussenelektrode (+) angezogen werden.
- Die für die Bildung von Alkalien (NaOH, Na_2CO_3) in den Betonporen erforderlichen Alkali-Metall-Ionen (Na+) werden durch die Ionenmigration aus dem vorübergehend aussenseitig angebrachten Elektrolyt (wässerige Natriumkarbonat-Lösung, Na_2CO_3) in den Beton in Richtung der Bewehrung eingebracht.

Wenn der Strom abgeschaltet wird, bilden die Na^+-Ionen und OH^--Ionen zunächst NaOH, das einen sehr hohen pH-Wert hat (vgl. Bild 6). Danach finden mit der Zeit verschiedene chemische Reaktionen statt, und das stabile Endprodukt in den Betonporen besteht aus Natriumkarbonat und Natriumbikarbonat, das einen genügend hohen pH-Wert hat, um die wiederhergestellte Schutzschicht an der Bewehrung dauerhaft gegen weitere negative Einwirkung von CO_2 zu schützen.

Das Verhältnis zwischen Natriumkarbonat und Natriumbikarbonat und somit der stabile untere Grenz-pH-Wert ist von der Konzentration von Natriumkarbonat in den Betonporen und von der Konzentration von CO_2 in der Luft abhängig [8]. Bei einer Lösung von 0.4 Mol/l_{Poren} Na_2CO_3 in den Poren und bei atmosphärischer Konzentration von CO_2 wird sich der End-pH-Wert im stabilen Zustand auf pH > 10.5 einstellen (Bild 7).

Natriumkarbonat Na_2CO_3 unterscheidet sich somit völlig von dem in frischem Beton vorhandenen Kalziumhydroxid $Ca(OH)_2$, welches karbonatisiert, wenn es in Kontakt mit dem CO_2 in der Luft kommt. Nach der Karbonatisierung von $Ca(OH)_2$ kann der pH-Wert bis etwa pH = 8.3 sinken. Die ursprüngliche Schutzschicht der Bewehrung wird aber bei einem pH = 9.5 zerstört.

Bei einer passiven Realkalisierung durch Diffusion von Alkalien in Form von $Ca(OH)_2$ von Mörtelschichten oder Betonschichten auf der Betonoberfläche («Diffusions-Realkalisierung») werden somit die eindiffundierten Alkalien wieder rasch karbonatisieren. Bei der elektrochemischen Realkalisierung hingegen, bei welcher Alkalien in Form von Na_2CO_3 in den Beton eingebracht werden, werden die Alkalien nicht in einem Ausmass karbonatisieren, dass die durch Elektrolyse wiederhergestellte Schutzschicht (Oxidhaut) an der Bewehrung gefährdet würde.

Merkmale der elektrochemischen Betoninstandsetzung

Bei der elektrochemischen Betoninstandsetzung (Bild 8) wird die Bewehrung nur an Stellen mit bereits zerstörtem Beton freigespitzt. Der erforderliche Betonabtrag wird daher wesentlich geringer als bei den bisherigen konventionellen Verfahren. Die gesamten Bewehrungsstähle werden aber behandelt und passiviert. Die möglichen Stellen mit zerstörter oder abgeschwächter Schutzschicht werden alle erfasst.

Die Dauerhaftigkeit der elektrochemischen Realkalisierung ist gesichert, solange das Natriumkarbonat in wässeriger Lösung in den Betonporen um die Bewehrung eine Konzentration > 0.3 Mol/l_{Poren} hat. Die Erfahrungen zeigen, dass ein Auswaschen von Natriumkarbonat nur in Oberflächennähe stattfindet. Bei einem normal dichten Beton ist die Bewehrung mit einer Betonüberdeckung von > 5 mm noch dauerhaft geschützt.

Bei der elektrochemischen Realkalisierung fliesst der Strom meist eine Woche. Bei Chloridentzug dauert die Behandlung 3 bis 9 Wochen. Nach der elektrochemischen Realkalisierung, bzw. nach dem Chloridentzug, werden die Aussenelektrode und der Elektrolyt mit dem Speichermaterial wieder entfernt.

Die Betonoberfläche wird mit Wasser (200 bar) gereinigt. Die Fläche kann entweder als Sichtbeton belassen werden oder mit einem Anstrich oder einer Beschichtung versehen werden .

Die Vorteile dieses elektrochemischen Instandsetzungsverfahrens sind zusammenfassend:

☐ Die Behandlung ist zerstörungsfrei, erfolgt ohne Abtrag von ungeschädigtem Beton.

☐ Die elektrochemische Realkalisierung erlaubt das Erhalten der gewünschten Betonstruktur oder die Bewahrung der speziellen Sichtbetonflächen. Es ist kein nachträglicher Oberflächenschutz notwendig.

☐ Die beschriebenen Verfahren sind kostengünstig, insbesondere wenn sie rechtzeitig eingesetzt werden .

☐ Es sind einfache Verfahren, die wenig Zeitaufwand erfordern und wenig störende Auswirkungen auf Umwelt und Verkehr haben. Es werden keine umweltbelastenden Produkte oder Chemikalien verwendet.

☐ Die Ausführung erzeugt wenig Lärm.

☐ Die Ausführung ist umweltfreundlich, indem der Energiebedarf bei der Materialherstellung (Altpapier wird verwendet) und auf der Baustelle (kein Betonabtrag) minimal ist.

☐ Der Materialbedarf (Zement, Sand, Kies, bauchemische Stoffe) ist minimal, somit auch die Transportbelastung auf den Strassen.

Gibt es unerwünschte Nebenwirkungen?

Verschiedene Forschungsarbeiten berichten seit den 70er Jahren über die Verwendung von elektrischem Strom zwecks Behebung von Korrosionsschäden im Stahlbeton. Diese Arbeiten beeinhalten, gesamthaft gesehen, grosse Variationen der angewendeten elektrischen Spannung, Stromstärken, Behandlungsdauer und Materialien im Beton. Frühere Arbeiten zeigen, dass Nebenwirkungen in vier Bereichen unter gewissen Bedingungen entstehen können. Neuere Forschungsarbeiten und speziell untersuchte Arbeitsausführungen zeigen folgende Ergebnisse:

Änderungen der Mikrostruktur des Betons: Bei Ausführungsbedingungen, wie sie bei den neuen Verfahren angewendet werden, zeigen die Analysen, dass keine oder nur vernachlässigbare Änderungen in der Mikrostruktur oder in anderen Eigenschaften wie Permeabilität, Frostwiderstand, Chloriddiffusion, Betonchemie oder Feuchtigkeit im Beton entstehen [6,9,10]

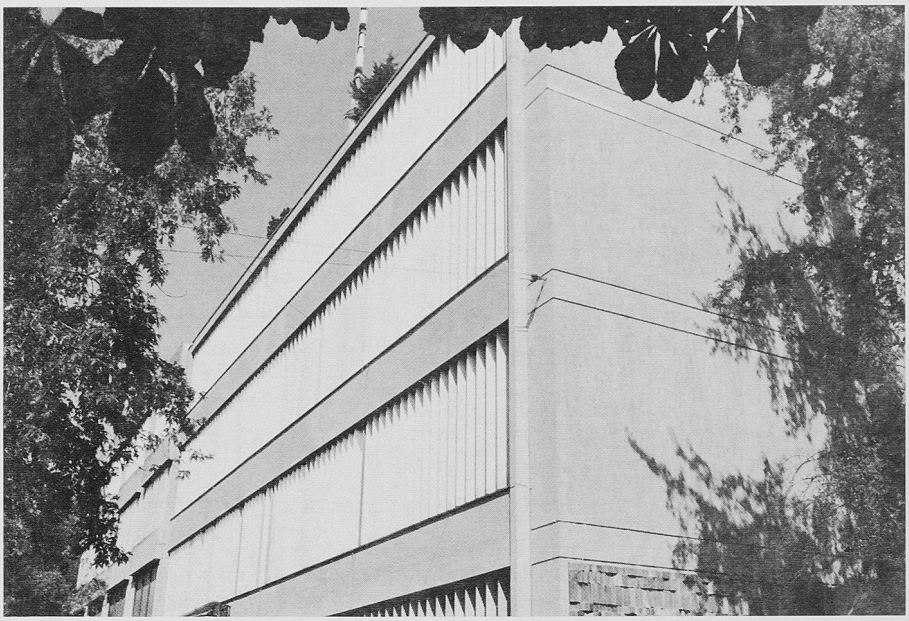


Bild 9. Realkalisierung von etwa 1500 m² der Fassade der PTT-Zentrale Haslerstrasse in Bern. Sichtbeton kann Sichtbeton bleiben

Änderung der Haftung zwischen der Bewehrung und dem Beton: Verschiedenen Untersuchungen zeigen, dass die Haftung unter bestimmten Bedingungen beeinflusst werden kann. Massgebende Parameter sind Spannung, Stromstärke, Strommenge (Behandlungsdauer), Versuchsanordnung, Chloridgehalt, Bewehrungsart. Zusammenfassend zeigen diese Untersuchungsergebnisse, dass der Einfluss auf der Haftung bei den Ausführungsbedingungen des neuen Verfahrens ohne praktische Bedeutung ist [6, 9-11]

Alkali-Silikate-Reaktionen (ASR) im Beton: Bei Vorhandensein von gewissen Zuschlagsmaterialien im Beton können unter Umständen Reaktionen zwischen diesen Zuschlagsmaterialien und Alkali-Metall-Ionen wie Na^+ und K^+ entstehen [9,12]. Diese Reaktionen ergeben unter gewissen Randbedingungen eine Expansion des Betons. Es bestehen zwei Hauptgruppen von ASR-aktiven Materialien, die schnell-reagierende und die langsam-reagierende. Bei Vorhandensein von schnell-reagierenden ASR-Zuschlagsmaterialien muss das Risiko von ASR sowie geeignetem Elektrolyt und Ausführungsbedingungen bei der Anwendung der elektrochemischen Verfahren von Fall zu Fall überlegt werden. Wenn keine schnellreagierenden Zuschlagsmaterialien vorhanden sind, besteht kein Risiko für ASR bei den normal angewendeten Alkalien-Typen und -Mengen. In der Schweiz gibt es keine schnellreagierenden Zuschlagsmaterialien, und in Deutschland gibt es diese nur ganz im Norden. Das Problem besteht also nur in Nord-Deutschland im deutschsprachigen Bereich.

Wasserstoffversprödung des Bewehrungsstahles: Das Risiko für Wasserstoffversprödung wegen der Erzeugung von Wasserstoff H^+ bei der Bewehrung ist nur bei den hochwertigen Vorspannstählen vorhanden, und zwar unterschiedlich, u.a. je nach Legierung und Herstellungsform des Stahles und je nach Lage der Spannkabel. Bei schlaffen Bewehrungseisen ergibt sich keine Risiko [6,9,10]. Bei vorgespannten Konstruktionen hingegen muss die Tragbarkeit des Verfahrens von Fall zu Fall geprüft werden.

Praktische Anwendungen

Die ersten praktischen Anwendungen dieser norwegischen Entwicklung gab es 1987. Die Fassade der Niederlassung Tromsö der Norwegischen Nationalbank wurde elektrochemisch realkalisiert, und dem Beton in einer Schwimmhalle in Trondheim wurden Chloride entzogen. Seitdem sind viele Objekte behandelt worden, wie Fassaden aller Arten von Gebäuden, Parkdecks, Kirchtürme, Wassertürme, Widerlager, Stützmauern, Brückenplatten, Brückenpfeiler usw. Die behandelten Betonflächen beliefen sich bis September 1993 auf etwa 120 000 m², wovon 53 000 m² in 1993. Bild 9 zeigt als Beispiel eine elektrochemisch realkalisierte Sichtbetonfassade in der Schweiz. Die Fläche wurde nachher als Sichtbeton belassen.

Realkalisierung

Bei einigen Realkalisierungsobjekten wird der Zustand nachkontrolliert. Drei frühe Objekte wurden 1993 genauer untersucht:

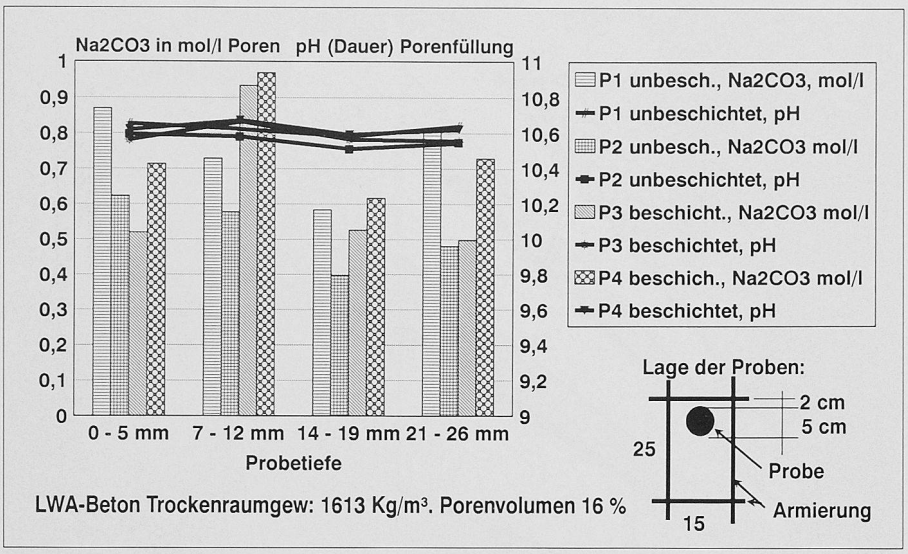


Bild 10. Natriumgehalt in realkalisiertem LWA-Beton, 4 Jahre nach Realkalisierung, angenommen überall 16% Porenvolumen, Sichtbeton, Kirche Bettlach (SO), Schweiz

Kirche Bettlach (SO), Schweiz: Eine Probefläche wurde im September 1989 elektrochemisch realkalisiert. Die Kirche ist aus Beton mit Leichtgewichtszuschlagsmaterialien, «Leca»-Beton gebaut worden. Die Oberfläche ist grobporiger Sichtbeton. Die Porosität ist unterschiedlich, aber hoch zwischen 10-16%. Eine Auswaschung des Natriumkarbonates wurde befürchtet. Die eine Hälfte der Fläche wurde mit einem farblosen Anstrich nach der Realkalisierung geschützt, die andere Hälfte wurde unbehandelt belassen. Zwei und vier Jahre nach der Realkalisierung wurden Bohrkerne entnommen und der Natriumgehalt bestimmt.

Die Analysen zeigen, dass das eingebrachte Natrium sich dort befindet, wo es eingebracht wurde. Bis zu einer Tiefe von 5 mm von der Oberfläche könnte ein Tendez eines Auswaschens nach 4 Jahren schwach spürbar sein. Eine Diffusion seitlich oder nach innen ist nicht feststellbar. Die Minimalanforderung war durchschnittlich Na_2CO_3 > 0,4 Mol/l_{Poren}. Eingebracht wurde 0,4 bis 1 mol/l. Bild 10 zeigt die Resultate von 4 Bohrkernen 4 Jahre nach der Realkalisierung. Innerhalb der Streuungen in Porenvolumen und Abstand von der Bewehrungseisen zur Probe bestehen keine merkbare Änderung gegenüber dem Zustand kurz nach der Realkalisierung. Der berechnete pH_{Dauer} ist überall grösser als 10,5. Die erreichte Realkalisierung ist dauerhaft.

Norwegische Nationalbank, Niederlassung Stavanger: Die Sichtbetonfläche, gestockter (von Hand gemeisselt) mit sehr grober Struktur, wurde 1988 elektrochemisch realkalisiert. Die Fläche wurde ohne zusätzlichen Schutz belassen. Untersuchungen 5 Jahre nach der Realkalisierung zeigen, dass das Natriumkarbonat in geringer Tiefe aus einer Teilfläche etwas ausgewaschen worden ist. Diese Teilfläche war dem Schlagregen stark ausgesetzt, und die Karbonatisierungstiefe war gering (meist 5 mm) [13].

Norwegische Technische Hochschule, NTH, Trondheim: Das «Zentralgebäude 1», 13 Stockwerke, wurde 1989 elektrochemisch realkalisiert. Der Beton wurde mit einem Schutzanstrich nachbehandelt. Untersuchungen 4 Jahre nach der Behandlung, bestehend aus Kernbohrungen und Bestimmung des Natriumsgehaltes sowie Potentialmessungen mittels eingebauten Referenzelektroden zeigen einwandfreie Ergebnisse. Es wurden keine Veränderungen im Passivzustand der Bewehrung festgestellt [14]. In der Folge wurde 1993 auch das «Zentralgebäude 2» auf Grund der Erfahrungen bei «Zentralgebäude 1» elektrochemisch realkalisiert.

Chloridentfernung

Die ausgeführten Chloridentfernungs-Arbeiten sowie eine Reihe von Feld und Laborversuchen zeigen die Wirksamkeit der elektrochemischen Chloridentfernung [6,10,15]. Bild 11 zeigt ein Beispiel der Resultate einer Chloridentfernung einer Widerlagerwand einer Autobahnunterführung in der Schweiz. Die Erfahrung zeigt, dass zwischen 40% und 85% der im Beton total vorhandenen Chloride entfernt werden. Es bleibt eine gewisse Menge Restchloride, die sich nicht mehr entfernen lässt. Alle die ausgeführten Objekte, die nach der Chloridentfernung periodisch kontrolliert wurden, zeigen, dass keine Anzeichen von neuen Korrosionsaktivitäten entstanden sind. Das älteste derartige Objekt ist etwa 4 Jahre alt (per Okt. 1993). Keine im Beton vorhandenen

Literatur

[1] *H. Böhni*, 1988: Korrosion und Korrosionsschutz von Stahl in Beton. Studientagung Korrosion und Korrosionsschutz. SIA-Dokumentation D 020.

[2] *Comité Euro-International du Beton, CEB*, 1985: Bulletin d'information No.166, «Draft» CEB-Guide to Durable Concrete Structures, May 1985, p.119–128.

[3] *Roti, J. A.* 1990: WTA-Berichte 6, p. 131–147: Elektrochemische Realkalisierung und Entsalzung von Beton

[4] *Nustad, G., Miller, J.B., Kennedy, D.* 1993: Review of Chloride extraction and Realkalisiatition of Reinforced Concrete. UK Corrosion '93. London.

[5] *Tritthart, J., Petterson, K., Sorensen, B.* 1993: Cement and Concrete Research (Akzeptiert für Publizierung)

[6] *Bennett, J. & al.* 1993: Electrochemical Chloride Removal an Protection of Concrete Bridge Components. Laboratory Studies. Strategic Highway Research Program (SHRP-S-657), National Research Council, Washington DC. USA

[7] *Mietz, J., Isecke, B. & al.* 1992: Werkstoffwissenschaft und Bausanierung, Teil 1. Technische Akademie Esslingen.

[8] *Freier, R.K.* 1978: Aqueous Solutions, Vol.2 Walterde Greuyter, Berlin.

[9] *Miller, J. & al*, 1994: Electrochemical Chloride Removal and Realkalisation. The Effects of Side Effects. A Research Upate. To be published at the Int. Conf. on Corrosion Prevention in Sheffield, July 1994.

[10] *Bennet, J. and Schue, T.J.* 1992: Evalution of NORCURE™ Process for Electrochemical Chloride Removal from Steel Reinforced Concrete Bridge Components. Strategic Highway Research Program, Washington DC. SHRP-C/URF.

[11] *Buenfeld, N.*, 1994: Completed research work at Imperial College, London. To be publisched.

[12] *Bredsdorf, P., Poulsen, E., Spöhr, H.* 1966: Experiments on mortar bars prepared with selected Danish aggregates. Committee on alkali reactions in concrete. Progress report 12, Copenhagen.

[13] *Odden, L.* 1993: Bericht anlässlich NCT-Seminar Okt. 1993.

[14] *Vennesland, O.* 1993: Ergebnisse aus Diplomarbeiten mehrerer Studenten an der NTH. Diese werden im Frühjahr 1994 publiziert.

[15] *Elsener, B., Molina, M.* 1992: Elektrochemische Chloridentfernung an Stahlbetonbauwerken. Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsamt. Bundesamt für Strassenbau. Bericht über Forschungsauftrag.

[16] *Manning, D.G.* 1990: Electrochemical Removal of Chloride Ions from Concrete. Elektrochemische Schutzverfahren für Stahlbetonbauwerke. SIA-Dokumentation D65, Zürich.

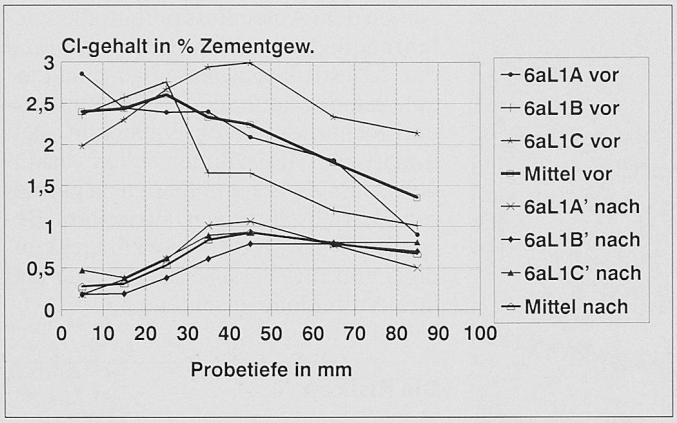


Bild 11. Chloridentfernung einer Widerlagerwand einer Autobahnunterführung der N5, S108, ausgeführt mit dem norwegischen Verfahren 1989/90

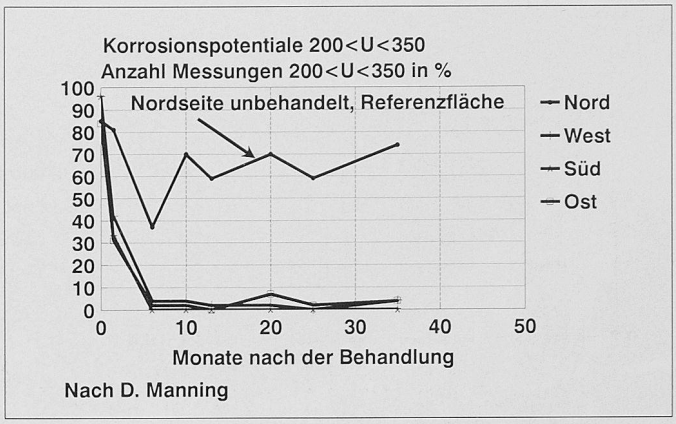


Bild 12. Potentialfeldmessungen an einem Brückenpfeiler der Burlington Bay Skyway, Ontario, Canada. Die drei behandelten Flächen sind immer noch passiv [16]

Restchloride sind in dieser Zeit an die Bewehrungseisen angelangt oder haben Korrosion verursacht.

Bild 12 zeigt die Resultate von Potentialfeldmessungen bei Nachkontrollen der Chloridentfernung eines Pfeilers der Burlington Bay Skyway, welche 1989 ausgeführt wurde. Diese Resultate sowie Messungen von Korrosionsströme zeigen, dass keine Änderung in der erzeugten Passivierung des Stahles seit der Behandlung eingetreten ist, obwohl eine Restchloridmenge von bis zu 0.18%, auf Totalmasse bezogen, (entspricht etwa 1,5% bezogen auf Zement) nach 8-wöchiger Chloridentfernung noch vorhanden war [16].

Das Chloridentfernungsverfahren wurde im Rahmen des Strategic Highway Research Program, SHRP, in den USA und Kanada vom Staat eingehend geprüft. Die Zusammenfassung dieser Prüfung drückt aus, dass das Verfahren unter den geprüften Ausführungsbedingungen technisch einwandfrei und wirtschaftlich rentabel ist [6].

Adresse des Verfassers: *Jan A. Roti*, Dipl. Ing. ETH, ECBIS AG, CH-4123 Allschwil.

Sicherheitssysteme für den Ärmelkanal-Tunnel

Der Kanaltunnel, der die britische Insel mit dem europäischen Festland verbindet, wird am 6. Mai 1994 von der britischen Königin Elisabeth II. und dem französischen Staatspräsidenten François Mitterrand offiziell eingeweiht. Die Sicherheitssysteme dieses 50,5 km langen Tunnels sind auch für zukünftige grosse Tunnelprojekte von Interesse.

Die Sicherheitsphilosophie des Kanaltunnels beruht auf seiner Konzeption als reinem Schienenverkehrssystem, d.h. ohne die bekannten Risikofaktoren des Motorfahrzeugverkehrs. Fahrzeuge und Insassen werden mit Pendelzügen zwischen den Terminals in Folkestone und Coquelles bei Calais befördert, und die Reise- und Güterzüge nutzen denselben Gleisweg. Bei voller Kapazitätsauslastung durchfahren in jeder Richtung zwölf Züge gleichzeitig die beiden parallelen Eisenbahntunnels.

Schienenfahrzeuge sind als besonders sichere Verkehrsmittel anerkannt. Dennoch wurden besonders strenge Sicherheitsvorkehrungen gefordert wegen der grossen Anzahl von Personen, die sich jeweils gleichzeitig im Tunnel befinden, wegen der verhältnismässig grossen Entfernungen zwischen den Tunnelausgängen auf beiden Seiten des Kanals und wegen des Kraftstoffs in den beförderten Fahrzeugen.

Alle Vorkehrungen müssen von einer besonders hierfür berufenen Kommission der britischen und der französischen Regierung (Intergovernmental Commission, IGC) genehmigt werden.

Sicherheit im Planungsprozess

Grundvoraussetzung für den Erfolg des Kanaltunnels ist die absolute Sicherheit und Zuverlässigkeit des Pendelzugsystems «Le Shuttle» und der von den nationalen Eisenbahngesellschaften betriebenen Reise- und Güterzüge. Bei der Planung des Tunnels und der Züge hatte die Sicherheit der Passagiere und Mitarbeiter daher allerhöchste Priorität. Diese Philosophie bestimmte die Auswahl der verwendeten Materialien, der installierten Systeme und der Rettungsverfahren bei Notfällen.

Für das gesamte System wurde eigens eine umfassende Sicherheitsstrategie entwickelt. Dazu gehörte die Vermeidung von Risiken und Gefahren bereits während der Konstruktionsphase, die Festlegung von Betriebsabläufen, die Risiken und Gefahren systematisch ausschliessen, und die Entwicklung von Strategien für die Schadensbegrenzung bei Betriebsstörungen.

Zunächst wurden alle massgeblichen Risiken ermittelt. Die Bandbreite reichte dabei von Erdbeben und Überschwemmungen über Stromausfälle und Gefahrgut bis hin zu Zusammenstössen, Entgleisungen, Bränden und Anschlägen sowie Kombinationen dieser Risiken. Danach waren Sicherheitsanforderungen für die gesamte Ausrüstung und Ausstattung zu bestimmen. Diese gingen in die Qualitätssicherung ein, nachdem entsprechende Normen für Zuverlässigkeit, Leistung und anschliessende Wartung festgeglegt waren.