Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 111 (1993)
Heft: 22

Artikel: Schutz von Beton durch Beschichtungen
Autor: Flückiger, Dieter / Elsener, Bernhard / Studer, Werner
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-78189

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: 15.07.2025

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

Schutz von Beton durch Beschichtungen

Verschiedene Schutz- und Sanierungsmöglichkeiten von Stahlbetonbauwerken sind denkbar. Nachfolgend wird auf den Korrosionsschutz mit Beschichtungen näher eingegangen. Ausgehend von einer Typisierung der Materialien wird die Charakterisierung der Beschichtungen mit Laborprüfungen diskutiert. Mit Hilfe der Ergebnisse aus Feldversuchen wird die Wirkung einer Beschichtung bei einer Sanierung erörtert und Schlussfolgerungen für den generellen Einsatz von Beschichtungen als Korrosionsschutz für Stahlbeton gezogen.

Erweiterte Fassung des Vortrages «Schutz des Betons», gehalten an der Arbeitstagung für Brückeningenieure am 22. und 23. Oktober 1992 in Montana (VS).

VON DIETER FLÜCKIGER, BERNHARD ELSENER, WERNER STUDER UND HANS BÖHNI, ZÜRICH

Die Korrosion der Bewehrung stellt zweifellos eine der Hauptursachen für die Schäden an Stahlbetonbauwerken dar. Ob chloridinduzierter Lochfrass (an Tiefbauten) oder Abplatzungen infolge Korrosion im karbonatisierten Beton, immer spielen elektrochemische Prozesse eine entscheidende Rolle (Bild 1).

Bei einem lokalen Korrosionsangriff liegen korrodierende Bereiche (Anode) neben intakten, passiven Bereichen und bilden ein Makroelement, ähnlich einer kurzgeschlossenen Batterie. Der Stromfluss lässt sich vereinfacht mit dem Ohmschen Gesetz berechnen. ΔU ist dabei die Potentialdifferenz zwischen aktiven und passiven Bereichen, R_B der elektrische Widerstand des Betons und R_A bzw. R_K die Reaktionswiderstände an Anode bzw. Kathode.

Die Darstellung der Korrosionsvorgänge als kurzgeschlossenes galvanisches Element ermöglicht es auch, die prinzipiellen Möglichkeiten des Korrosionsschutzes bei Stahlbeton aufzuzeigen. Dem Widerstand des Betons kommt dabei eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Die Herstellung eines dichten Betons (geringe Porosität) ist im allgemeinen das wirksamste (und wirtschaftlichste) Mittel, um das Eindringen von Chloriden, die Karbonatisierung sowie den Korrosionsprozess an sich im günstigen Sinn zu beeinflussen. Ebenso ist eine ausreichende Überdeckung der Bewehrung eine wichtige Voraussetzung, um Korrosionsschäden zu vermeiden.

Um die Korrosionsgefährdung beurteilen zu können, müssen neben der Dichtigkeit des Betons (Porosität) und der Grösse der Überdeckung stets auch der jeweilige Feuchtigkeitsgehalt des Betons und vor allem auch die Expositionsbedingungen berücksichtigt werden.

Der Korrosionsschutz der Bauwerke beginnt schon während der Projektierungsphase. Eine ausführungsgerechte und unterhaltsfreundliche konstruktive Gestaltung kann die Dauerhaftigkeit und damit auch die Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken ganz erheblich verbessern. Für aussergewöhnlich hohe Beanspruchungen gewinnen heute neben den betontechnologischen Massnahmen zusätzliche Schutzvorkehrungen an Bedeutung. Diese können den Einsatz von beschichteten oder hochlegierten Bewehrungsstählen umfassen [1, 2]. Aber auch ein Oberflächenschutz (Hydrophobierungen, Beschichtungen [3]) oder der kathodische Schutz [4] ganzer Bewehrungsnetzwerke bieten sich als Lösungen an.

Noch wenig erprobt ist die Verwendung von Inhibitoren [5]. In Bild 2 sind die verschiedenen Möglichkeiten des zusätzlichen Korrosionsschutzes bei Stahlbeton schematisch dargestellt.

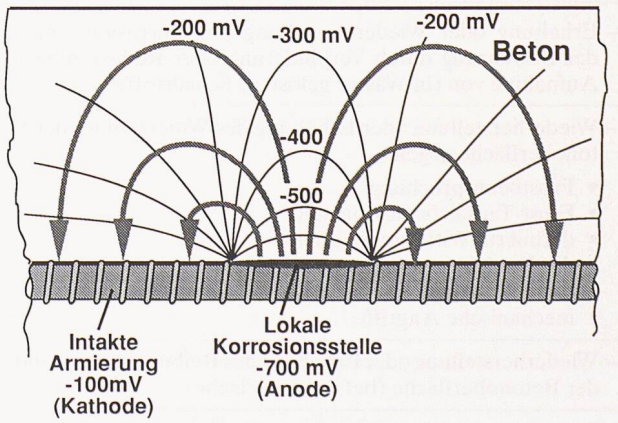

Bild 1. Verstärkte lokale Korrosion an einem Stahl infolge Makroelementbildung

Neben diesen Schutzmöglichkeiten werden immer mehr auch Verfahren wie die elektrochemische Chloridentfernung [6] und die Realkalisierung [7] zu Sanierungszwecken eingesetzt bzw. propagiert. Ein Vergleich der verschiedenen Methoden sowie eine Bewertung ist in [8] zu finden. Im folgenden soll auf den Oberflächenschutz mit Beschichtungen näher eingegangen werden.

Oberflächenschutz

Aufgaben des Oberflächenschutzes

Unter Oberflächenschutz von Stahlbetonbauwerken versteht man das Aufbringen von Materialien an der Oberfläche, welche das Eindringen von Schadstoffen in die Konstruktion verhindern oder zumindest erschweren. Solche Massnahmen haben zum Ziel, ein Bauteil, welches grossen chemisch/physikalischen Beanspruchungen ausgesetzt ist, vorbeugend zu schützen. Dies kann planmässig (z. B. Kläranlagen), unplanmässig bei ungenügender Dauerhaftigkeit (Überdeckung, Dichtigkeit) als vorbeugender Schutz oder im Rahmen von Sanierungsarbeiten erfolgen. Auch Änderungen im Erscheinungsbild aus ästhetischen, verkehrs-, unterhalts- oder energietechnischen

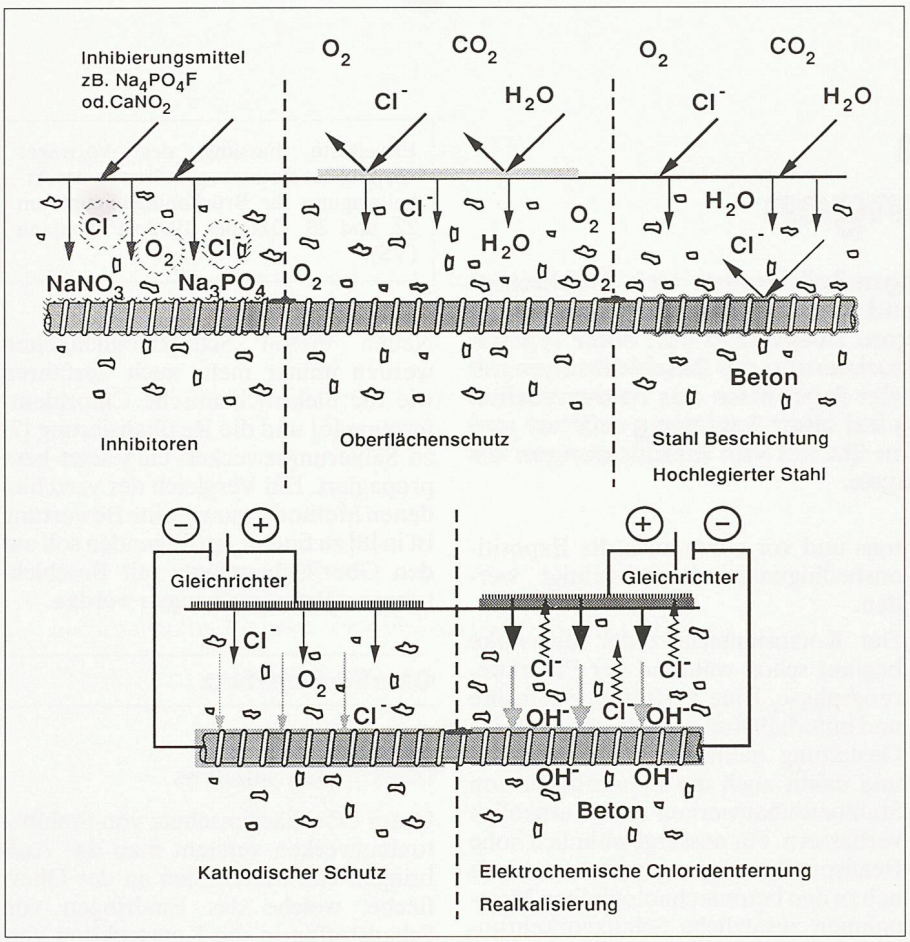

Bild 2. Möglichkeiten des zusätzlichen Korrosionsschutzes bei Stahlbeton

Gründen können einen Oberflächenschutz erfordern. Die zu erreichenden Ziele sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Neben den Eigenschaften der anzuwendenden Materialien muss auch deren Zusammenwirken mit der Stahlbetonkonstruktion berücksichtigt werden:

Im Beton dürfen keine Zustände geschaffen werden, welche bauphysikalisch ungünstig und schadenauslösend sind (z. B. Wassersättigung durch Kondensation bei nicht frostbeständigem Beton). Weiter liegt es auf der Hand, dass Schutzsysteme keine Stoffe enthalten sollen, welche den Beton selber angreifen können. Um einen dauerhaften Schutz gewährleisten zu können, muss die Beschichtung (oder Imprägnierung) vollflächig aufgebracht werden, und die Haftung am Untergrund und zwischen den einzelnen Komponenten des Schutzsystems muss dauerhaft sein. Die eingesetzten Stoffe selber müssen in der Lage sein, den Witterungseinflüssen zu widerstehen, um die vorgesehene Nutzungsdauer zu erreichen. Letztlich darf auch der Unterhalt des Systems und im Schadenfall die Möglichkeit einer Reparatur nicht vernachlässigt werden.

Arten des Oberflächenschutzes

Grundsätzlich muss beim Oberflächenschutz von Beton zwischen Imprägnierungen, Beschichtungen und Verkleidungen unterschieden werden (Bild 3), wobei die Übergänge fliessend sind.

Beschichtungen

Art und Aufbau von Beschichtungen

Eine Beschichtung ist ein auf dem Beton haftender Überzug, welcher aus Bindemittel, Lösungsmittel und Zusatzstoffen besteht. Die Dicke einer Beschichtung variiert zwischen einigen Zehntel- und einigen Millimetern. Der optische Eindruck einer Betonoberfläche geht in der Regel verloren. Es ist zweckmässig, Beschichtungen, nach ihrem Binde- und ihrem Lösungsmittel einzuteilen (vgl. Bild 3). Ist das Bindemittel eine organische Verbindung, so handelt es sich um eine Kunststoffbeschichtung. Als Lösungsmittel kommen Wasser oder ebenfalls organische Verbindungen (Kohlenwasserstoffe) in Frage. Im ersten Fall spricht man von Dispersionen, im anderen Fall von Lacken. Zementgebundene Beschichtungen sind immer vom Typ Dispersion. Normalerweise sind die Teilchengrössen des Kunststoffes beim Typ Lack kleiner als beim Typ Dispersion. Dies führt im allgemeinen zu einer besseren Eindringung in den Beton und so auch

– Erhaltung oder Wiederherstellung des Korrosionsschutzes der Bewehrung durch Verhinderung oder Reduzierung der Aufnahme von (in Wasser gelösten) Schadstoffen.
– Wiederherstellung oder Erhöhung des Widerstandes der Betonoberfläche gegen • Frostbeanspruchung • Frost-Tausalzbeanspruchung • definierte Witterungseinflüsse • das Eindringen betonaggressiver Stoffe • das Eindringen stahlaggressiver Stoffe • mechanische Angriffe
– Wiederherstellung oder Erhöhung des Reibungswiderstandes der Betonoberfläche (befahrbare Fläche).
– Steigerung der Wärmedämmung von Bauteilen
– Abdichten von Rissen
– Verbesserung der Reinigungsmöglichkeit der Oberfläche

Tabelle 1. Ziele von Oberflächenschutzmassnahmen

– Identitätsprüfungen	Prüfung der Dichte, Nichtflüchtige Anteile, Glührückstand, Infrarot-Analyse
– Materialkennwerte bei konstanter Temperatur	Zug-Dehn-Verhalten, Haftfestigkeit auf Beton
– Materialkennwerte in Abhängigkeit der Temperatur	Schubmodul, Wärmedehnungskoeffizient
– Mechanische Prüfungen	Schlagfestigkeit, Rissüberbrückungsfähigkeit
– Dichtigkeit	«Diffusionsverhalten» gegenüber Wasser, Chloriden und Kohlendioxid
– Verhalten gegenüber Agenzien unter künstlicher Bewitterung	Wasser, Alkalien, künstliche Bewitterung, Temperatur wechsel, Frost-Tausalz-Beständigkeit

Tabelle 2. Aufbau eines Prüfprogrammes für Betonbeschichtungen

zu einer grösseren Haftung. Im Zusammenhang mit der Luftreinhaltung ist aber die chemische Industrie bestrebt, organische Lösungsmittel durch Wasser zu ersetzen.

Anforderungen an Beschichtungen

Um Beschichtungen als Korrosionsschutz und somit zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit erfolgreich einsetzen zu können, ist es wichtig, das Beanspruchungskollektiv zu kennen und daraus die Anforderungen abzuleiten. Die Anforderungen, welche an ein Beschichtungssystem zu stellen sind, lassen sich vereinfacht mit 3 Oberbegriffen beschreiben: Schutzwirkung (Dichtigkeit, Haftung, Rissüberbrückung), Beständigkeit und Anwendung.

Eine Beschichtung soll den Beton dauerhaft vor dem Eindringen von Schadstoffen (Wasser, Chloride, Kohlendioxid) schützen. Eine beschränkte Wasserdampfdiffusion ist in der Regel erwünscht, da sich sonst negative Auswirkungen auf die Haftung ergeben. Bei der Festlegung des Anforderungskatalogs gilt es, das Bauwerk in seiner Gesamtheit zu erfassen und insbesondere den mikroklimatischen Verhältnissen (Expositionsbedingungen) genügend Rechnung zu tragen.

Charakterisierung der Beschichtungen

Um einem Misserfolg bei der Verwendung von Beschichtungen vorzubeugen, erscheint es sinnvoll, deren Leistungsvermögen im vornherein zu kennen. Dazu sind Prüfungen im Labor, sogenannte Eignungsprüfungen, notwendig. Die Qualifizierung «geeignet» bzw. «nicht geeignet» setzt aber die Kenntnis der zu erwartenden Belastung, und daraus abgeleitet, der entsprechenden Anforderungen voraus. Modellversuche simulieren in der Praxis vorkommende Belastungen (technologische Prüfungen). Da für die Modellierung der Belastung verschiedene Möglichkeiten denkbar sind, werden in den Prüflaboratorien meist unterschiedliche Verfahren angewendet, um eine bestimmte Eigenschaft eines Produktes zu testen. Dadurch wird die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Resultaten stark eingeschränkt. Auf europäischer Ebene sind im Rahmen des CEN Bestrebungen im Gang, die Prüfungen für Beschichtungsstoffe zu normieren. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Prüflaboratorien zu erreichen, ist es unabdingbar, dass Prüfvorschriften im Detail vorliegen.

Ein Aufbau für ein Prüfprogramm für Betonbeschichtungen zeigt Tabelle 2.

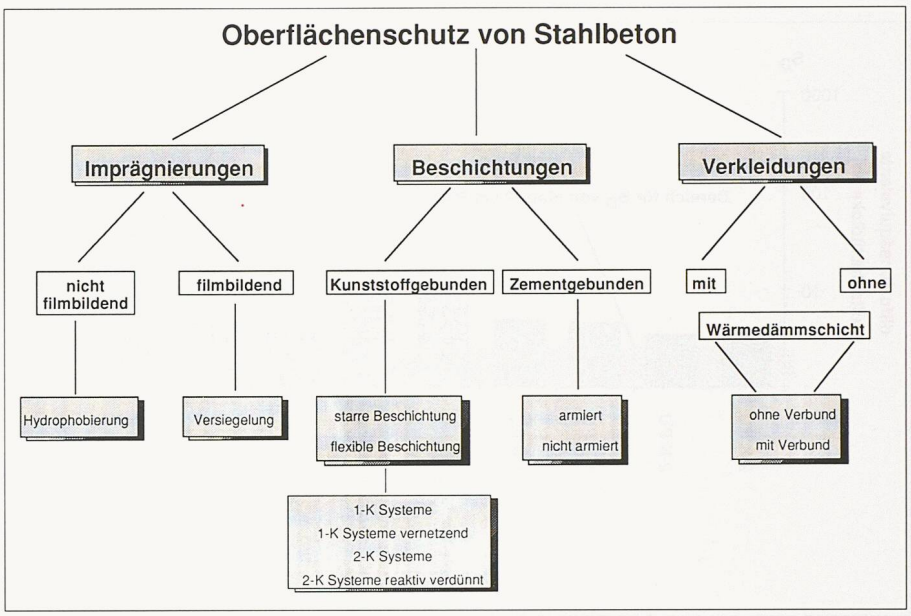

Bild 3. Schematische Darstellung der Möglichkeiten beim Oberflächenschutz

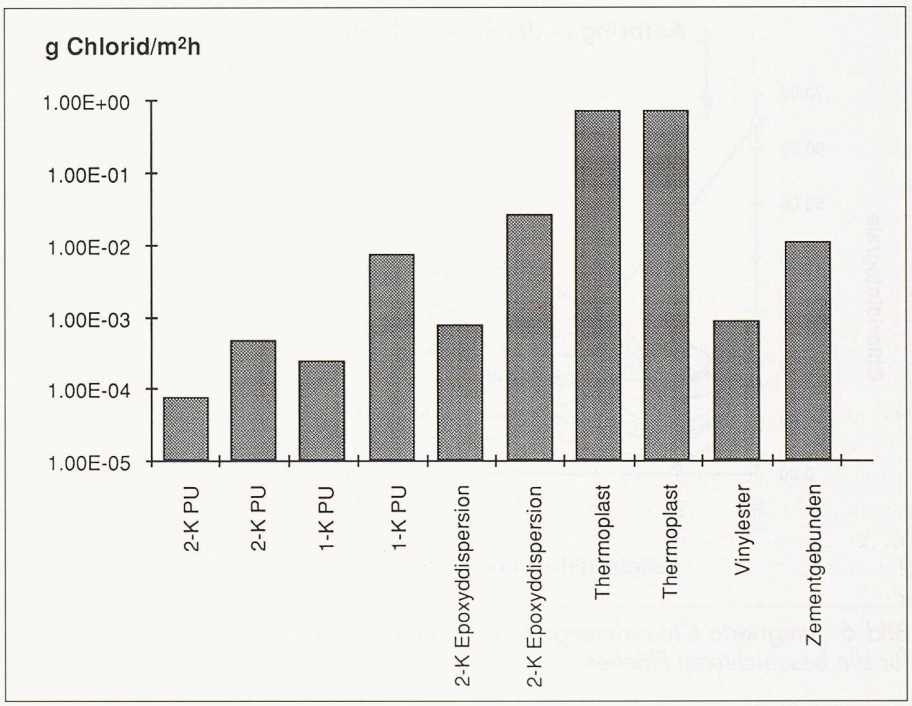

Bild 4. Chloriddurchgang von 10 Beschichtungen aus Laborversuchen

Zu den wichtigsten Prüfungen gehören jene, welche die Dichtigkeit charakterisieren, da mit diesen Eigenschaften die eigentliche Schutzwirkung definiert werden soll. Geprüft werden im wesentlichen die Dichtigkeit gegenüber Wasser und Wasserdampf sowie gegenüber dem Eindringen von Schadstoffen wie Chloride und Kohlendioxid. Alle Prüfungen sind Laborprüfungen, sie können also nur nachweisen, was Beschichtungen unter bestimmten Bedingungen, Laborbedingungen eben, zu leisten imstande sind. Meistens sind die Applikationsbedingungen auf der Baustelle alles andere als laborgerecht. Prüfungen am Bauwerk sind daher für die Qualitätssicherung notwendig. Im Idealfall kann eine Prüfung am Bauwerk periodisch wiederholt werden, so dass eine Entwicklung im Leistungsvermögen der Beschichtung beobachtet werden kann.

Laborversuche

Im Rahmen des Forschungsprojektes «Schutz- und Sanierung von Stahlbetonbauwerken im Bereich von Strassen» wurde ein Musterprüfprogramm für Betonbeschichtungen erarbeitet. Unter Beschichtung wurde hier die äusserste Schicht eines Betonsanierungssystems verstanden (exklusive Reprofilierungsmörtel). Das Prüfprogramm ist das Resultat einer Zusammenarbeit des Institutes für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH-Zürich und der Eidgenössischen

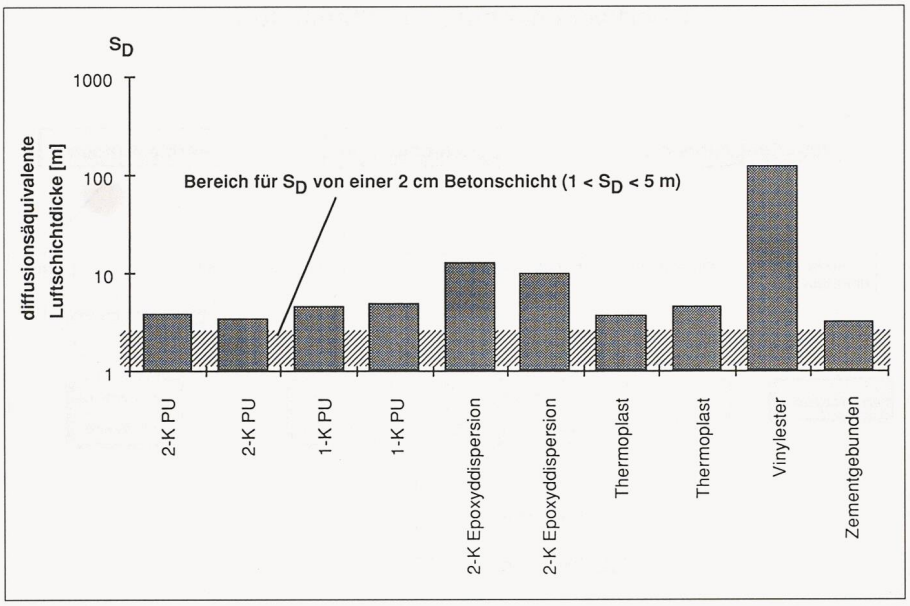

Bild 5. Diffusionsverhalten gegenüber Wasserdampf (Laborversuche)

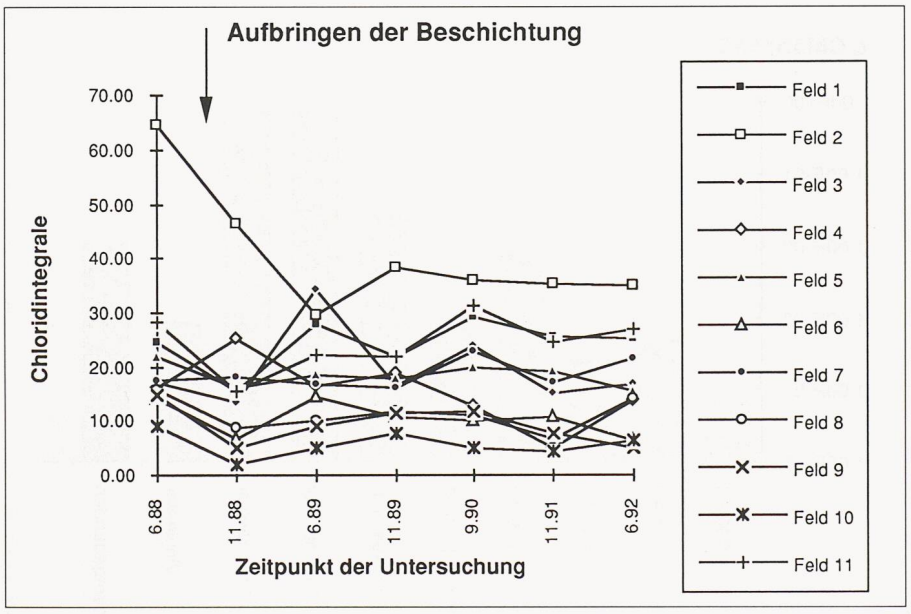

Bild 6. Integrierte Chloridmenge in Abhängigkeit des Beobachtungszeitpunktes für die beschichteten Flächen

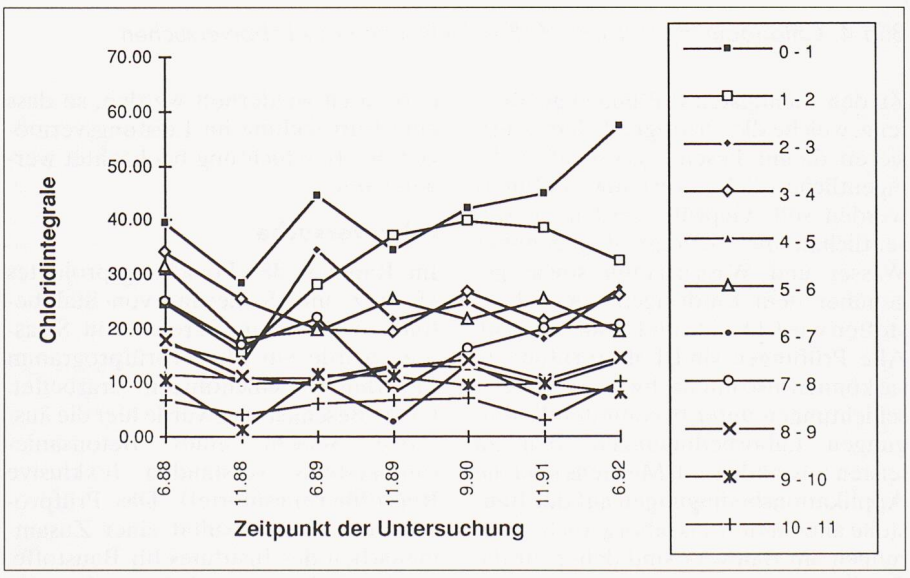

Bild 7. Integrierte Chloridmenge in Abhängigkeit des Beobachtungszeitpunktes für die unbeschichteten Flächen

Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA. Im weiteren wirkten folgende Institutionen mit:

- Verein Schweizerischer Lack- und Farbenfabrikanten, VSLF, Zürich
- Laboratoire des matériaux de construction LMC, EPFL, Lausanne
- Labor für Präparation und Methodik, LPM AG, Beinwil am See (AG)

Diesem Prüfprogramm (Details und vollständige Resultate in [9]) wurden 10 verschiedene, auf dem Markt erhältliche Betonbeschichtungen unterzogen. Die Durchführung der Prüfungen oblag der EMPA. In Bild 4 ist das Verhalten der 10 Beschichtungen gegenüber der Chlorideindringung dargestellt. Sehr gut erkennbar ist der grosse Unterschied im Chloriddurchgang (log-Skala). Die Unterschiede manifestieren sich nicht nur zwischen den verschiedenen Beschichtungstypen, sondern auch innerhalb einer Gruppe (z. B. 1-Komponenten Polyurethan 1-K PU). Geprüft wurde die Chloriddurchlässigkeit der eigentlichen Beschichtung. Für die Prüfung wurde sie nicht auf Beton appliziert, sondern auf einen Tonzylinder.

In Bild 5 ist das Diffusionsverhalten der Beschichtungen gegenüber Wasserdampf dargestellt. Auf der Ordinate ist, wie bei Schutzschichten üblich, die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke aufgetragen. Für die Prüfung wurden die Beschichtungen auf eine Betonplatte von 2 cm Stärke aufgetragen. Die meisten Beschichtungen weisen ein ähnliches Verhalten auf wie eine 2 cm starke Betonschicht ($S_D = 2 \div 5$ m). Dies zeigt das Bestreben der Hersteller auf, den Widerstand gegenüber Wasserdampf zu minimieren, damit keine allzu starken Änderungen im bauphysikalischen Verhalten des Betons eintreten.

Feldversuche

Um das Verhalten von Beschichtungen unter Praxisbedingungen studieren zu können, wurde im Rahmen einer Sanierung eine Versuchsfläche eingerichtet. Es handelt sich dabei um eine rund 500 Meter lange und 2 Meter hohe Steinschlagschutzmauer entlang der N2, welche sich zwischen Faido und Dalpe befindet (Fahrtrichtung Gotthard). An dieser Mauer wurden insgesamt 11 Versuchsfelder bestimmt. Auf diese wurden 1988 jene 10 Beschichtungen (bzw. Systeme) appliziert, welche im Labor eingehend untersucht worden waren. Auf dem 11. Feld wurde zusätzlich eine Imprägnierung appliziert. Zwischen den einzelnen Versuchsfeldern wurde jeweils ein Streifen von rund 2 Meter Breite offengelassen.

Der Beton war vorher eingehend untersucht worden. Zum Teil war er be-

Literatur

[1] *B. Elsener:* Einsatz epoxidbeschichteter Stähle, SIA-Dokumentation D 021 1 988, S. 17–26.

[2] *K. W. J. Treadaway, R. N. Cox, B. L. Brown:* Durability of corrosion resisting Steels in Concrete, proc. Inst. Civ. Engs, part 1, Vol 86,1989, p. 305–331.

[3] *H. R. Sasse:* Hydrophobierungen und filmbildende Beschichtungen, Theorie und Praxis, SIA-Dokumentation D 021 1988, S. 43–66.

[4] *F. Hunkeler:* Kathodischer Korrosionsschutz – Wissensstand, Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen, SIA-Dok. D 021 1988, S. 27–42.

[5] *B. El-Jazairi, N. S. Berke:* The Use of Calcium Nitrite as a Corrosion Inhibiting Admixture to Steel Reinforcement, Page, Treadaway Bamforth eds. Elsevier Applied Science London 1990, p. 571–585.

[6] *B. Elsener, M. Molina, H. Böhni:* Electrochemical Removal of Chlorides from Reinforced Concrete, submitted to Corrosion Science.

[7] *B. Isecke, J. Mietz:* Investigation on Realkalization of Carbonated Concrete, Proceeding of EuroCorr 91, Budapest, 21–25 Oct. 1991 Vol 11 p. 732/38.

[8] IP Bau, Bundesamt für Konjunkturfragen, Schutzsysteme im Tief- und Ingenieurbau, Publ.-Nr. 724.455 d, 1992.

[9] *D. Flückiger, A. Hächler, H. Böhni:* Schutz und Sanierung von Stahlbetonbauwerken im Bereich von Strassen, Forschungsbericht Nr. 212, Bundesamt für Strassenbau 1991.

– Kapillare Saugvorgänge (Sorption)	Chloride werden im Wasser gelöst durch das kapillare Saugverhalten in den und im Beton transportiert (Huckepacktransport)
– Diffusion	Aufgrund eines Konzentrationsgradienten werden die Chloride im (wassergesättigten) Porensystem transportiert.
– Ionenmigration	Ionenwanderung im (wassergesättigten) Porensystem des Betons aufgrund elektrischer Felder
– Hydraulische Strömung	Durch einen, von aussen aufgeprägten Druck kommt es zu einem gegenüber dem kapillaren Saugen verstärkten Wassertransport, welcher die Chloride ebenfalls mittransportiert.

Tabelle 3. Möglichkeiten des Transportes von Wasser und Chlorid in Beton

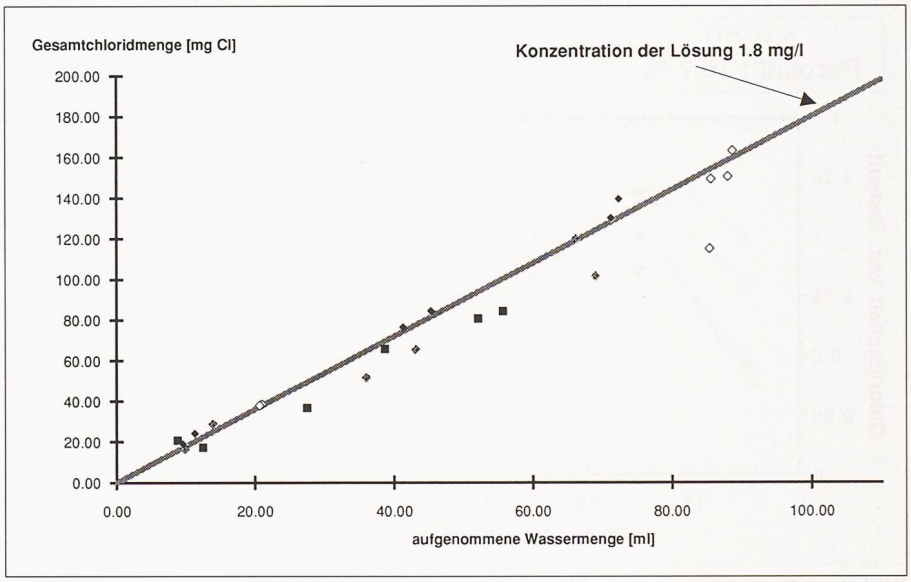

Bild 8. Vergleich der aufgenommenen Salzlösungs- mit der Gesamtchloridmenge (Laborversuche an Zementstein, verschiedene Zeiten und Porositäten)

reits erheblich mit Chloriden kontaminiert. Diese Chloride wurden jedoch bewusst nicht entfernt, um gerade den Einfluss der Beschichtung auf die sich im Beton befindenden Chloride studieren zu können. Die Exposition der Mauer konnte mit Einschränkungen als überall gleich angesehen werden. Vorbehalte müssen gemacht werden, weil die ersten 4 Felder näher an der Fahrbahn lagen (Fehlen des Standstreifens). Zudem lag die Versuchsfläche unmittelbar nach einem Tunnel, was sich in Form unterschiedlicher Salzbelastung auswirken könnte. Im Frühling und im Herbst wurden jeweils von allen Versuchsfeldern und den Zwischenfeldern Bohrkerne entnommen (Höhe ab Boden rund 0.90 m) und die Chloridprofile bestimmt.

Um die zeitliche Entwicklung der Chloridbeaufschlagung analysieren zu können, wurden die jeweiligen Chloridprofile integriert. Der erhaltene Wert stellt ein Mass für die gesamte Chloridmenge im Beton, bezogen auf die Fläche des Bohrkerns, dar. In Bild 6 sind die Resultate für die beschichteten Flächen dargestellt. Die entsprechenden Werte für die unbeschichteten Zwischenflächen können Bild 7 entnommen werden.

Die beiden Darstellungen bestätigen zunächst die Annahme, dass die Felder in Tunnelportalnähe (Felder 7–11) eine kleinere Chloridbelastung aufweisen als diejenigen, welche sich weiter weg und zudem näher an der Fahrbahn befinden (Felder 1–4). Die Beschichtung wurde im Zeitraum zwischen 6. 1988 und 11. 1988 aufgebracht. Die in Einzelfällen sichtbaren Tendenzen lassen keine eindeutige Aussage über ein unterschiedliches Verhalten zwischen beschichteten und unbeschichteten Flächen zu.

Diskussion

Bei den unbeschichteten Flächen ist zu erwarten, dass sich die Chloridprofile sowohl in der Form wie auch in den Absolutwerten ändern können. Bei den beschichteten Flächen sollte der Chloridgehalt konstant bleiben, weil die Beschichtung eine Barriere darstellt. Aufgrund der sehr grossen Unterschiede bezüglich der Chlorideindringung bereits in den Laborergebnissen (vgl. Bild 4) ist zu erwarten, dass sich diese Unterschiede auch bei den Versuchsflächen einstellen. Grundsätzlich sollte sich auch eine Homogenisierung des Chloridprofils zeigen. Eine solche Homogenisierung, d. h. Nivellierung des Chloridgehaltes in die Tiefe, wäre ausserordentlich erwünscht. Dadurch würde sich das Risiko einer hohen Chloridkonzentration in Bewehrungsnähe stark reduzieren und das Korrosionsrisiko entschärft.

Um die Schutzwirkung von Beschichtungen beurteilen zu können, ist es notwendig, sich über die Transportphänomene von Wasser und Chlorid im Beton Klarheit zu verschaffen.

Chloride im Beton

Grundsätzlich lassen sich 4 verschiedene Möglichkeiten des Transportes vorstellen. Sie sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

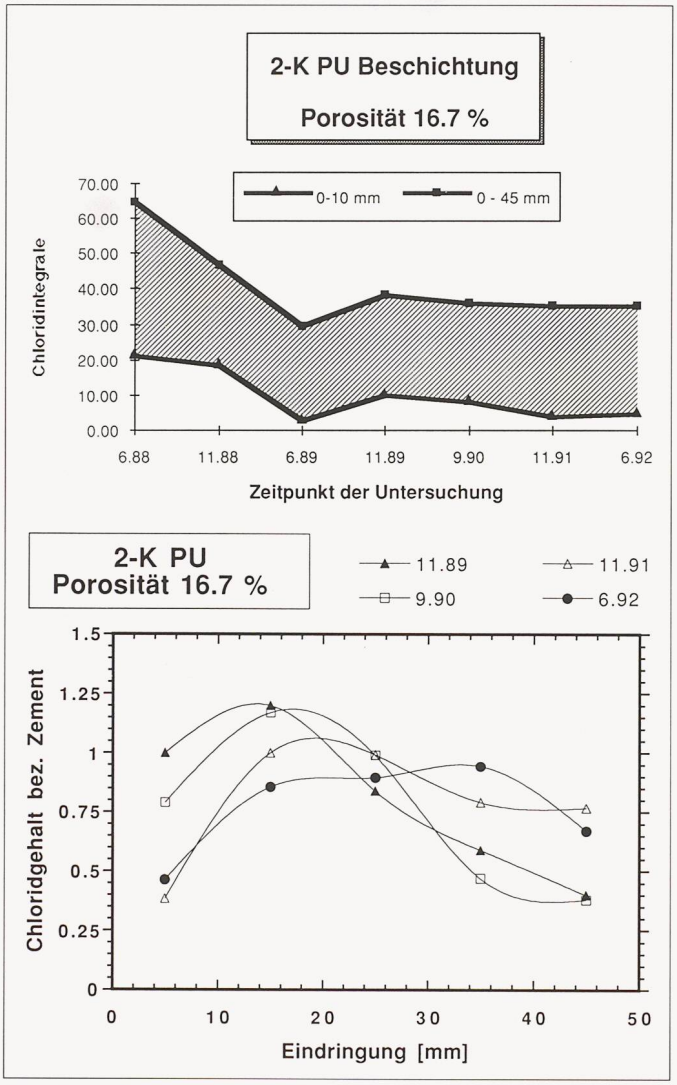

Bild 9. a) Schichtintegrale Feld 2; b) Chloridprofile für Feld 2

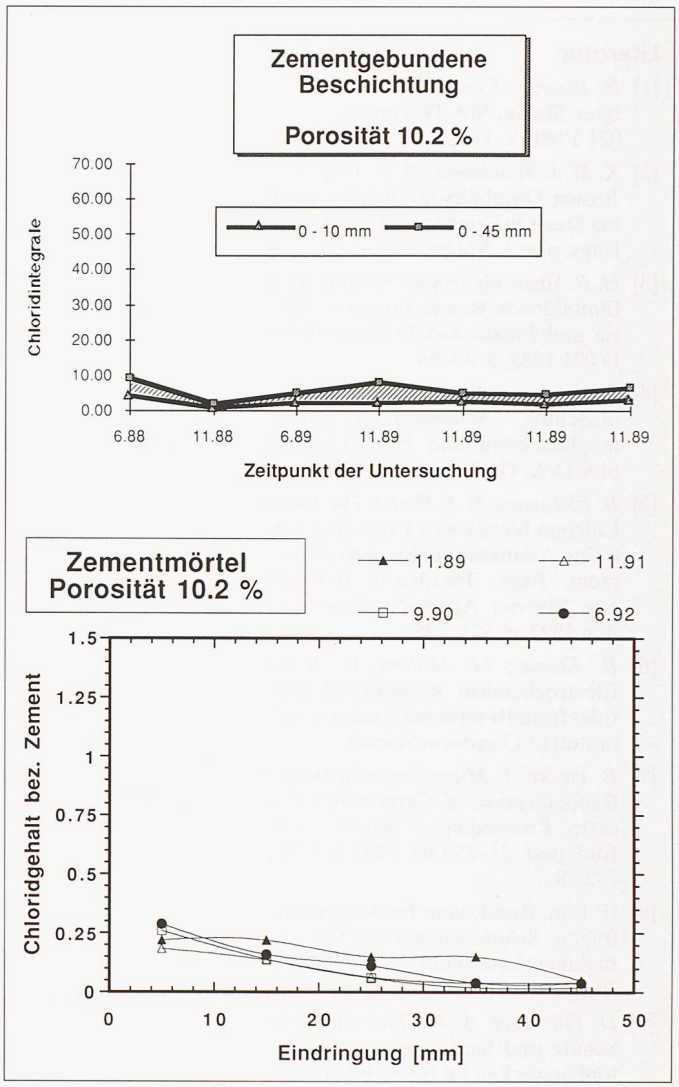

Bild 10. a) Schichtintegrale Feld 10; b) Chloridprofile für Feld 10

In den meisten Fällen der Praxis kann die reine Diffusion (Konzentrationsausgleich) vernachlässigt werden. Bild 8 zeigt die nach Aufsaugversuchen gemessene Chloridmenge in Zementstein in Abhängigkeit der aufgenommenen Wassermenge (Salzlösungsmenge). Die Grafik zeigt sehr deutlich, dass eine gute Korrelation zwischen der Gesamtchloridmenge und der aufgenommenen Salzlösung besteht. Der mit Abstand wichtigste Transportvorgang ist somit der Huckepacktransport.

Für den Transport im Porensystem des Zementsteins stehen aber nur die freien, nicht in schwerlöslichen Hydratationsprodukten gebundenen Chloride zur Verfügung. Die Bindekapazität des Zementes kann jedoch nicht als feste Grösse in Rechnung gestellt werden, sie hängt wie bei allen chemischen Gleichgewichten von den Umgebungsbedingungen (Konzentration anderer Anionen wie OH^-, aber auch Kationen wie Na^+ und Ca^{++}) ab, welche im Beton erheblich variieren können. Das Verhältnis freie/gebundene Chloride kann sich daher ändern. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die totale Chloridmenge im Beton zu bestimmen, welche sich aus gebundenen und freien Chloriden zusammensetzt (wie auch in SIA 162/2 festgehalten).

Eine dauernde Beanspruchung des Betons durch eine Chloridlösung führt zu einer kleineren Belastung des Betons durch Chloride als eine alternierende, nass – trocken Beanspruchung. Die Kapazität des Transportes (Menge) wird durch den Gehalt und die Grössenverteilung der Poren im Beton (Porosität) sowie die Feuchtigkeitsverhältnisse bestimmt und manifestiert sich in der Inhomogenität der sich einstellenden Chloridprofile.

Einfluss der Beschichtung auf den Transport

Um den Einfluss auf die Entwicklung des Chloridprofils besser zu verdeutlichen, wurden bei den Feldmessungen die Integrale für jede Schicht einzeln berechnet. Die Darstellung des Integrals der oberflächennahen Schicht (0–10 mm) gegenüber dem gesamten Integral (0–45 mm) liefert Hinweise, wie die Chloride im Beton verteilt sind. In Bild 9a sind die Schichtintegrale in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Als Ergänzung sind in Bild 9b die Chloridprofile dargestellt. Sie beziehen sich auf ein beschichtetes Feld. Die Beschichtung kann im Vergleich zu den übrigen Materialien als dicht angesehen werden (vgl. Bild 4).

Die Darstellung zeigt deutlich, dass keine entscheidende Homogenisierung der Chloridkonzentration über die Tiefe stattfindet. Die Gesamtchloridmenge hat in der Beobachtungszeit nicht zugenommen, was auf den Einfluss der Beschichtung zurückzuführen ist. Je nach Witterungsverhältnissen wandern die Chloride aber nach innen oder nach aussen. Aus diesen Darstellungen ist auch die «Atmungs-» bzw. «Transportzone» des Betons (Bereich, in dem der Einfluss der Umgebung merkbar ist, vgl. nachfolgender Abschnitt) ersichtlich. Sie beträgt im vorliegenden Fall mehr als 45 mm.

Bild 10 zeigt die entsprechenden Grafiken für ein anderes Versuchsfeld. Die dabei verwendete Beschichtung ist im

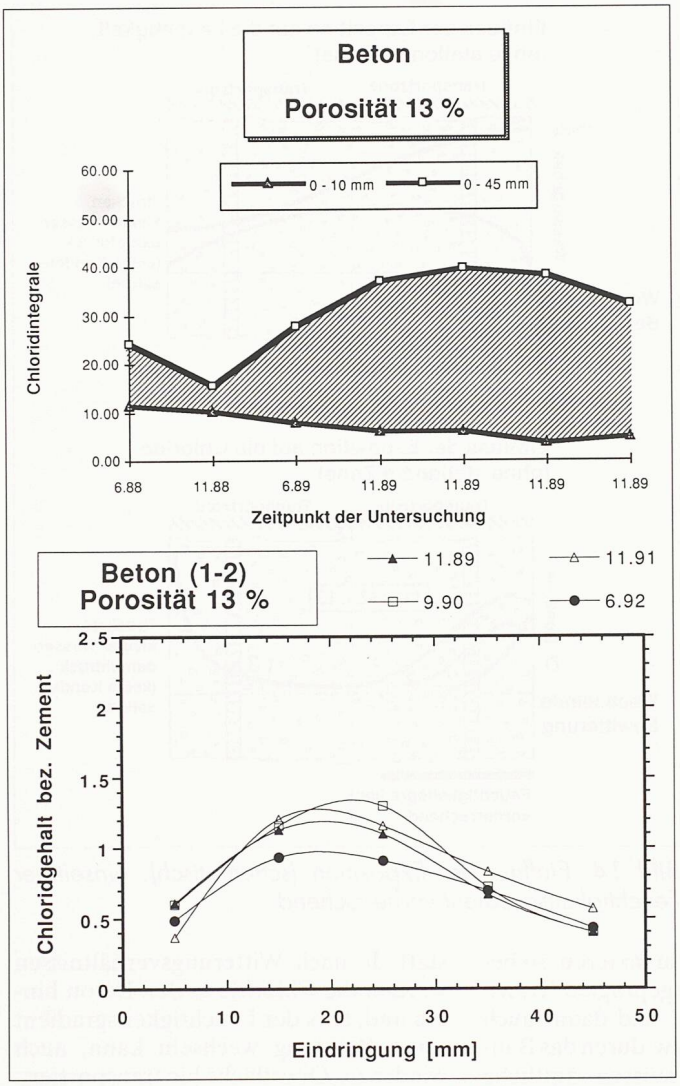

Bild 11. a) Schichtintegrale Zwischenfeld 1-2; b) Chloridprofile Zwischenfeld 1-2

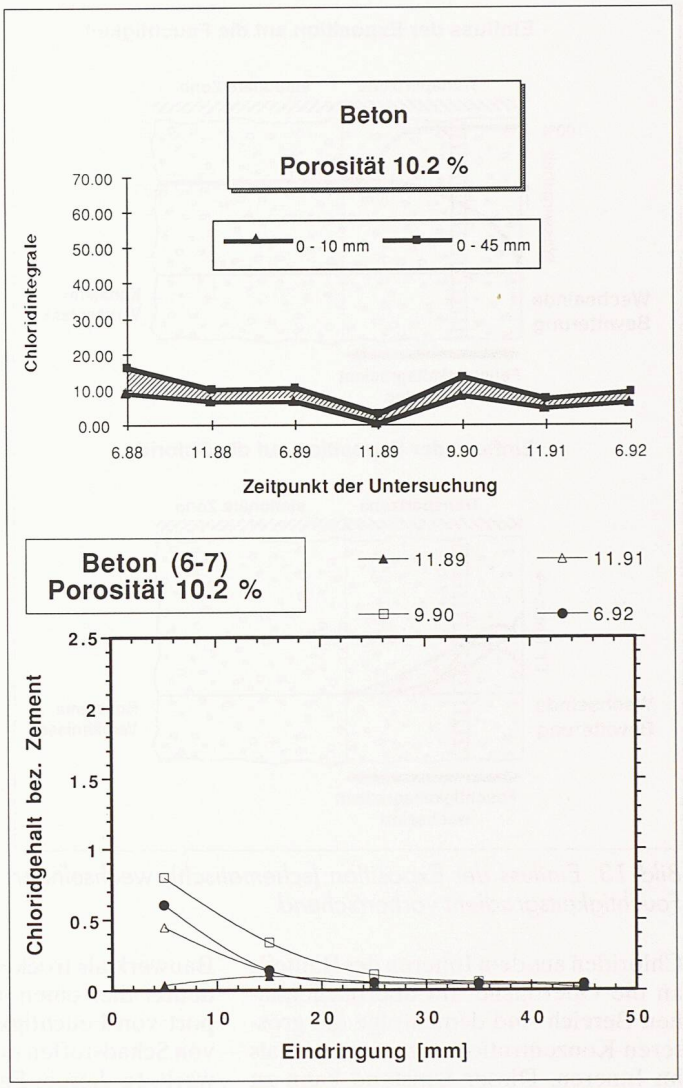

Bild 12. a) Schichtintegrale Zwischenfeld 6–7; b) Chloridprofile Zwischenfeld 6–7

Vergleich zur vorhergehenden als weniger dicht einzustufen (vgl. Bild 4).

Der Unterschied zwischen der äusseren Schicht und der gesamten Schicht fällt viel kleiner aus (Bild 10a). Dies wird durch die Darstellung der Chloridprofile (Bild 10b) verdeutlicht. Die Änderungen der Chloridkonzentration spielen sich demzufolge hauptsächlich in den oberflächennahen Schichten ab. Der Unterschied zwischen Feld 2 (Bild 9) und Feld 10 (Bild 10) liegt in der Porosität des Betons (kapillare Wasseraufnahme). Die Bilder 11 bzw. 12 zeigen die Verhältnisse bei einem unbeschichteten Beton mit einer vergleichbar grossen bzw. kleinen Porosität wie bei den voher gezeigten beschichteten Flächen. Eine grosse Porosität von rund 13 ÷ 16 % (Bild 9 bzw. Bild 11) hat eine grosse Transportkapazität für Wasser und Chlorid. Dies führt zu einer grossen Transportzone und zu entsprechend hohen Chloridkonzentrationen. Ist die Porosität dagegen klein (10 % und weniger), so ist auch die Transportkapazität klein (Bild 10 bzw. 12). Die Schadstoffe (Chloridlösungen) dringen weniger tief in den Beton ein, und die Transportzone fällt klein aus. In den Beispielen von Feld 10 und dem Zwischenfeld 6-7 dürfte sie sich in der Grössenordnung von 35 mm bewegen.

Beschichtungen reduzieren die kapillare Wasseraufnahme, was bestimmt zu einer Verkleinerung der Chloridaufnahme führt. Sie sind aber nicht in der Lage, den Wassertransport im darunterliegenden Beton grundsätzlich zu verhindern. Dies ist an sich nicht erstaunlich, zeigen doch die meisten Beschichtungen ein ähnliches Verhalten gegenüber Wasserdampf wie eine 2 cm dicke Betonschicht.

Einfluss der Expositionsbedingungen

Ein Chloridprofil stellt nur eine Momentaufnahme dar. Unter Einwirkung von Feuchtigkeit kann sich die Form eines Profils wesentlich ändern, selbst wenn die Gesamtmenge der Chloride gleich bleibt. Die Expositionsbedingungen des Bauteils, ein wesentlicher Bestandteil des Beanspruchungskollektivs, bestimmen, in welcher Richtung sich die Feuchtigkeit im Bauwerk selbst bewegt. Kann sich der Feuchtigkeitsgradient im Vorzeichen verändern und sind die Abmessungen genügend gross (Bild 13), so bildet sich von der Oberfläche her eine Zone im Beton, worin sich der Wasser- und damit der Schadstofftransport hauptsächlich abspielt. Die Grösse dieses Bereiches, Transportzone («Atmungszone») genannt, hängt im wesentlichen vom Gehalt und der Verteilung der Poren im Beton (Porosität) ab. Im Inneren des Betons sind die Feuchtigkeitsverhältnisse mehr oder wenig konstant. Es bildet sich eine stationäre Zone aus.

Ist der Beton bereits mit Chloriden kontaminiert, so kann das Chloridprofil Aufschluss geben über das Ausmass der Transportzone. Dabei müssen aber die Witterungsverhältnisse vor der Bestimmung des Chloridprofils mitberücksichtigt werden. Ist der Bohrkernentnahme beispielsweise eine lange Trockenperiode vorausgegangen, so wurde der Beton in dieser Zeit ausgetrocknet. Dies bedeutet einen Transport von Wasser und damit auch einen Transport von

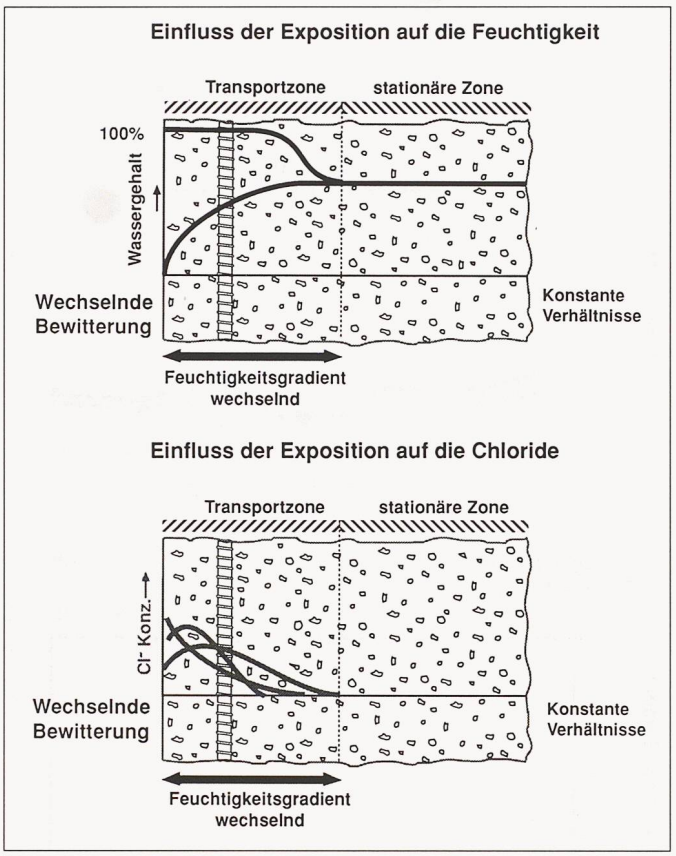

Bild 13. Einfluss der Exposition (schematisch), wechselnder Feuchtigkeitsgradient vorherrschend

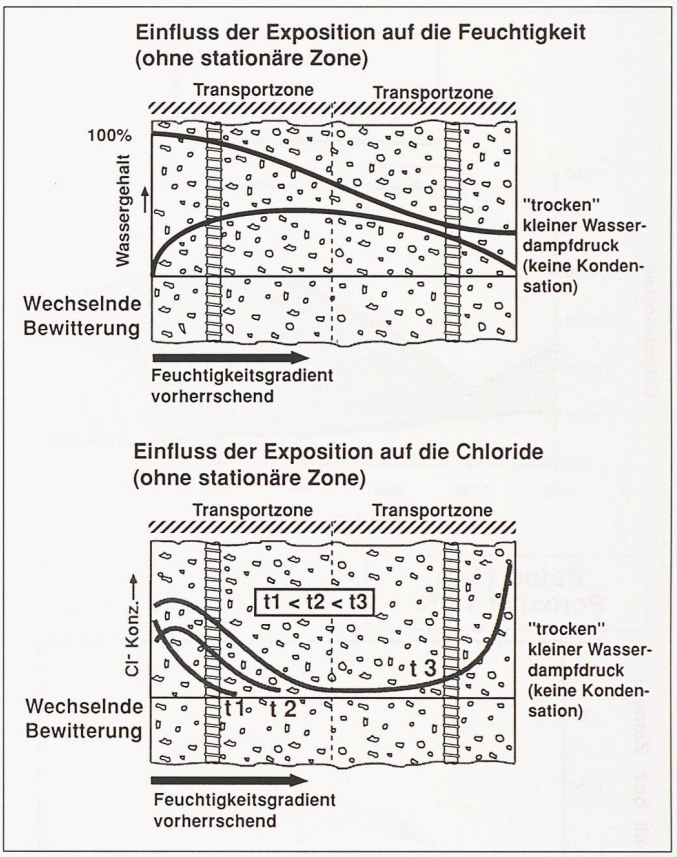

Bild 14. Einfluss der Exposition (schematisch), einseitiger Feuchtigkeitsgradient vorherrschend

Chloriden aus dem Inneren des Bauteils an die Oberfläche. Im oberflächennahen Bereich sind demzufolge die grösseren Konzentrationen zu erwarten als im Inneren. Dieser Umstand kann zu einer Unterschätzung der effektiv massgebenden Transportzone verleiten. Die Gefahr einer chloridinduzierten Korrosion ist sehr klein, wenn die effektive Transportzone kleiner ist als die Bewehrungsüberdeckung. Durch eine Beschichtung kann ein Ansteigen des totalen Chloridgehaltes reduziert werden. Die Chloride im Beton müssen in einem solchen Fall nicht vorgängig entfernt werden.

Wechselt der Feuchtigkeitsgradient sein Vorzeichen nicht (Bild 14), und sind die Abmessungen genügend klein, so kann sich keine stationäre Zone im obendefinierten Sinn ausbilden. Die Transportzonen beider Seiten überlagern sich, und es stellt sich eine eindeutige Transportrichtung ein. Das Wasser und mit ihm auch das Chlorid werden sich im wesentlichen nur in dieser Richtung bewegen. Ist das Klima hinter dem Bauwerk als trocken zu taxieren, so bedeutet dies einen ausgeprägten Transport von Feuchtigkeit und damit auch von Schadstoffen in bzw. durch das Bauwerk. In diesem Fall müssen sämtliche bereits in den Beton eingedrungenen Chloride als potentiell gefährlich angesehen werden. Selbst eine Beschichtung kann ein Durchwandern der bereits eingedrungenen Chloride nicht verhindern. In einem solchen Fall müssen diese Chloride entfernt werden.

Solche Verhältnisse sind ausserordentlich gefährlich. Typischerweise sind sie bei Zwischendecken in Tunnels (Unterseite gegen die Fahrbahn, Oberseite Belüftung) gegeben. Für die Abschätzung des Gefahrenpotentials ist es somit erforderlich, neben der Exposition des Bauteils, das gesamte Chloridprofil sowohl bezüglich Grösse wie auch Verteilung zu berücksichtigen.

Folgerungen für den praktischen Einsatz

Beschichtungen reduzieren die kapillare Wasseraufnahme des Betons und können dadurch die Aufnahme von Schadstoffen wie Chloride erheblich verkleinern. Sie sind aber nicht in der Lage, den Transport von Wasser und damit auch von Chloriden im Beton zu verhindern. Infolgedessen findet keine Homogenisierung des Chloridprofils statt. Je nach Witterungsverhältnissen werden die Chloride in den Beton hinein und, falls der Feuchtigkeitsgradient seine Richtung wechseln kann, auch wieder zur Oberfläche hin transportiert. Den Expositionsbedingungen des Bauteils kommt dabei grösste Bedeutung zu. Als Konsequenz sollten Beschichtungen nur dann eingesetzt werden, wenn das Bauwerk mit Chloriden entweder

- nicht kontaminiert
- schwach kontaminiert oder
- dekontaminiert ist.

Um den Korrosionsschutz und damit die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken mit Beschichtungen verbessern zu können, muss folgenden Aspekten Rechnung getragen werden:

- Beachtung der Geometrie und der Expositionsbedingungen
- Abschätzung der Transportzone
- Abschätzung des Beanspruchungskollektivs
- Geeignete Materialwahl und fachgerechte Ausführung.

Verdankung

Diese Forschungsarbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes 87/88 des Bundesamtes für Strassenbau (ASB), Arbeitsgruppe Brückenunterhaltsforschung, durchgeführt. Die Autoren danken für die grosszügige Unterstützung.

Adressen der Verfasser: *D. Flückiger,* dipl. Bauing. ETH/SIA, *B. Elsener,* Dr. sc. tech., dipl. Werkstoffing. ETH, *H. Böhni,* Prof. Dr. sc. tech., dipl. Ing.-Chem. ETH/SIA, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK), ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich und *W. Studer,* dipl. Bauing. ETH/SIA, Abteilungsvorsteher Beton/Bindemittel EMPA, 8600 Dübendorf.