

FLECKENBILDUNG IN TRINKWASSERRESERVOIRS

FOWA-PROJEKT

In zahlreichen Trinkwasserreservoirs entstehen auf der Beton-/Mörteloberfläche Flecken, die häufig mit einer Aufweichung der Oberfläche einhergehen. In Laborversuchen wurde die Auswirkung von Strom und galvanischer Korrosion auf die Fleckenbildung untersucht. Aus den Resultaten wurde eine Modellvorstellung für den Schadensmechanismus entwickelt und mögliche Schutzmechanismen abgeleitet. Das Forschungsprojekt wurde vom FOWA (Forschungsfonds Wasser) des SVGW unterstützt.

Carl-Heinz VouÛte; Markus Bchler, SGK – Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz
Felix Wenk, Hochschule für Technik Rapperswil; Adrian Rieder, Wasserversorgung Stadt Zürich*

RÉSUMÉ

TACHAGE DANS LES RÉSERVOIRS D'EAU POTABLE

Des taches, qui vont souvent de pair avec un ramollissement de la surface, se forment sur le béton/mortier de surface dans de nombreux réservoirs d'eau potable. A ce jour, aucune cause générale n'a été identifiée pour ces taches. Certains des facteurs soupçonnés sont les effets du courant électrique dus  la corrosion,  la qualité de l'eau ou  la microbiologie.

En raison de ces problèmes, des lots de travaux correspondants ont été définis dans le cadre d'un projet de recherche FOWA. Cet article présente les résultats d'études sur la corrosion de l'acier dans le béton, la corrosion des macroéléments et l'impact de l'électricité sur les dommages. Un essai a été mis au point en laboratoire, et pourrait être utilisé pour étudier le comportement  la corrosion des barres d'armature bétonnées lorsqu'elles sont mises en contact avec l'acier inoxydable. Les tests ont montré que la corrosion des barres d'armature qui ont été bétonnées selon les normes diminue avec le temps. L'intervalle de temps dépend ici de la qualité du béton. C'est pourquoi la séparation d'éléments en acier inoxydable est recommandée dans la pratique.

AUSGANGSLAGE

In vielen Reservoirs ist es in den letzten Jahren zur Bildung von Flecken in der Zementmrtelaukleidung gekommen. Diese Flecken führen zur einer Aufweichung der zementösen Beschichtung. Somit wird nicht nur das Erscheinungsbild der Reservoirkammer beeinträchtigt, auch verliert der Mörtel in diesen Bereichen seine mechanische Festigkeit und Alkalinität. Das Titelbild oben zeigt ein typisches Beispiel für die Fleckenbildung in einem Reservoir.

Bis heute besteht keine allgemein anerkannte Ursache für diese Fleckenbildung. In der Literatur werden verschiedene Ursachen diskutiert wie Stromeinwirkungen, mikrobiologische Phänomene, Wasserdruckschwankungen, Kondensatbildung auf der Oberfläche oder die Korrosion der darunterliegenden Bewehrung.

Verschiedene Literaturstellen beschreiben, dass eine Gleichstromeinwirkung zu einer Veränderung der Betonstruktur führen kann [1–5]. Teilweise wurden diese Untersuchungen in Zusammenhang mit der Endlagerung von radioaktiven Abfllen durchgeführt. Sie zeigen, dass durch die Stromeinwirkung vor allem eine Auslaugung von Calcium stattfindet. Bei ausführlichen Untersuchungen [1] wurde festgestellt, dass durch Anlegen

* Kontakt: carl-heinz.voute@sgk.ch

eines elektrischen Feldes in erster Linie der Calciumhydroxid-gehalt abgebaut wird, in einem weiteren Schritt wird auch Calcium aus den CSH-(Calciumsilikathydrat)-Phasen freigesetzt. In anderen Untersuchungen [6] wird als primäre Ursache für die Fleckenbildung die Verwendung von sauren Reinigungsmitteln genannt. Durch die dadurch hervorgerufene Schädigung der Oberfläche wird die Besiedelung durch Mikroorganismen gefördert.

Die Auslaugung der Mörteloberfläche durch den Kontakt mit Wasser wird in [1] und [7-12] beschrieben. Wie stark eine Auslaugung erfolgt, ist abhängig vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Wassers. Eine grosse Bedeutung wird der Calciumcarbonatschicht (Calcit) an der Oberfläche des Mörtels zugeschrieben. Diese kann den Auslaugungsprozess stark bremsen, sofern sie dicht aufgebaut ist. Die Bildung von Calcit in der Anfangsphase ist daher von grosser Bedeutung. Wird diese gestört, z.B. durch Kondenswasserbildung, wird die Fleckenbildung an diesen Stellen begünstigt [7].

ZIELSETZUNG UND VORGEHEN

Für die Formulierung von wirksamen Schutzmassnahmen gegen die Fleckenbildung ist zuerst eine Abklärung der Schädigungsmechanismen erforderlich. Aufgrund der Ausgangslage wurden folgende Fragestellungen behandelt:

- Kann Stahl in gesundem Beton aufgrund von unterschiedlichen Potenzialen korrodieren?
- Welchen Einfluss haben die Stromstärke, die Stromrichtung und dessen Frequenz auf die Fleckenbildung? Welche Möglichkeiten bestehen zur Verhinderung der Fleckenbildung?

Aufgrund dieser Fragestellungen wurden im Rahmen eines FOWA-Forschungsprojektes entsprechende Arbeitspakete definiert. Im Folgenden werden Resultate der Untersuchungen betreffend Korrosion von Stahl im Beton, Makroelementkorrosion und Auswirkung von Strom auf das Schadensbild vorgestellt.

UNTERSUCHUNGEN UND RESULTATE

VERWENDETE BETONSORTEN

In den Versuchen wurden verschiedene Betonsorten verwendet. Um den Einfluss unterschiedlicher Betonporosität zu prüfen, wurde Probenmaterial mit verschiedenen Wasserzementwerten hergestellt. Ausserdem wurden zwei Zementarten eingesetzt, die sich sowohl auf bestehende (CEM I) als auch auf neue Trinkwasserreservoir (CEM II) beziehen. Die beiden Wasserzementwerte waren 0,47 und 0,60.

UNTERSUCHUNGEN ZUR KORROSION VON STAHL IM BETON

Bei der Makroelementkorrosion wird bei einem metallischen und einem elektrolytischen Kontakt zwischen einem unedleren Metall (Anode) und einem edleren Metall (Kathode) das unedlere Metall beschleunigt aufgelöst. Im Falle des Wasserreservoirs wird diskutiert, dass eine solche Makroelementkorrosion zwischen der einbetonierten Bewehrung (Anode) und Einbauten aus nichtrostendem Stahl (Kathode) erfolgen und dies die Fleckenbildung begünstigen könnte. Um dies zu untersuchen, wurde im Labor ein Versuch aufgebaut, der die Verhältnisse im Reservoir nachbildet. In *Figur 1* ist das Prinzip der Makroelementkorrosion, wie sie im Reservoir erfolgen könnte, schematisch

dargestellt. Je sechs Bewehrungsstäbe \varnothing 12 mm aus C-Stahl wurden in die Betonkörper ($50 \times 15 \times 15$ cm) einbetoniert. Für die Körper wurden verschiedene Betone verwendet und die Bewehrungsüberdeckung variiert. Die Betonkörper wurden in mit Leitungswasser gefüllten Becken teilweise eingetaucht. Im Becken befanden sich ausserdem Bleche aus nichtrostendem Stahl. Während des Versuchs wurden die Kathoden mit den Anoden verbunden. Gemessen wurden der Elementstrom zwischen Kathode und Anode sowie das Korrosionspotenzial, das gegenüber einer Referenzelektrode erfasst wurde. Die Registrierung der Messwerte erfolgte alle 30 Minuten, die gesamte Versuchsdauer betrug je nach Versuchskörper ein halbes bis ein Jahr.

In *Figur 2* sind zwei typische Verläufe der registrierten Ströme dargestellt. Bei beiden Proben findet mit der Zeit eine Passivierung statt, und der Elementstrom ist vernachlässigbar klein. Zu erkennen ist, dass die Passivierung im poröseren Beton mit einem W/Z-Wert von 0,6 länger dauert als bei der Probe eingebettet in Beton mit einem W/Z-Wert von 0,47.

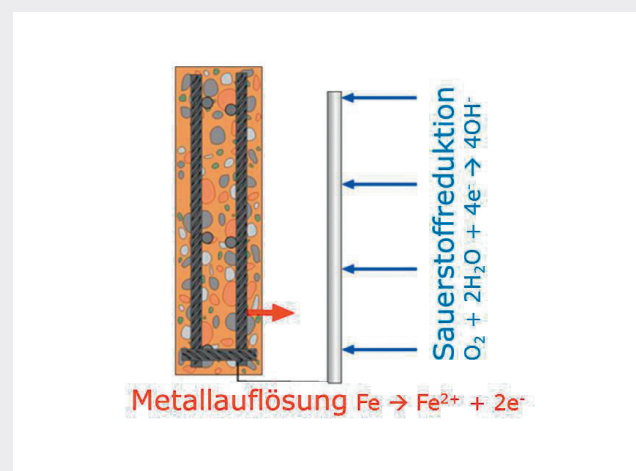


Fig. 1 Prinzip Makroelementkorrosion, links Stahlbeton, rechts Element aus nicht rostendem Stahl

Principe de la corrosion des macroéléments, béton armé à gauche, élément en acier inoxydable à droite

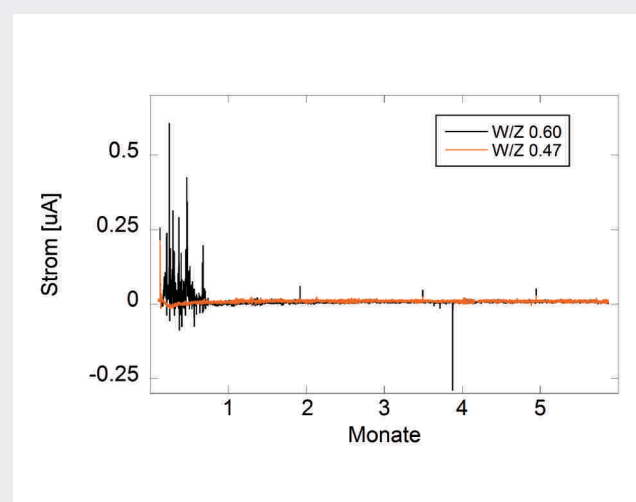


Fig. 2 Beispiele für den Verlauf des Elementstromes von zwei Proben in Betonkörpern, hergestellt mit CEM II und unterschiedlicher Porosität

Exemples d'évolution du courant d'élément de deux échantillons de corps en béton fabriqués avec CEM II et porosité différente

Als mögliche Ursache der Korrosion von Bewehrungsstahl wurde auch eine Makroelementbildung zwischen Bewehrungsstahl unterhalb und oberhalb des Wasserspiegels in Betracht gezogen. Das Prinzip ist in *Figur 3* skizziert. Die Bewehrung unterhalb des Wasserspiegels, der vergleichsweise wenig Sauerstoff zur Verfügung steht, wird zur Anode, die Bewehrung oberhalb des Wasserspiegels wird zur Kathode. Um diese Situation im Labor nachzubilden, kamen gleich aufgebaute Betonkörper wie in dem vorgängig beschriebenen Versuch zum Einsatz. Die Betonkörper wurden dazu geneigt in ein Becken mit Leitungswasser eingetaucht. Die Stahlproben kommen so unterschiedlich stark unterhalb des Wasserspiegels zu liegen. Entsprechend variiert das Sauerstoffangebot. Die verschiedenen Stahlproben wurden verbunden und die Elementströme während ca. einem halben Jahr gemessen.

Auch bei diesen Versuchen konnte keine dauerhafte Aktivierung eines oder mehrerer Bewehrungsstahlproben festgestellt werden.

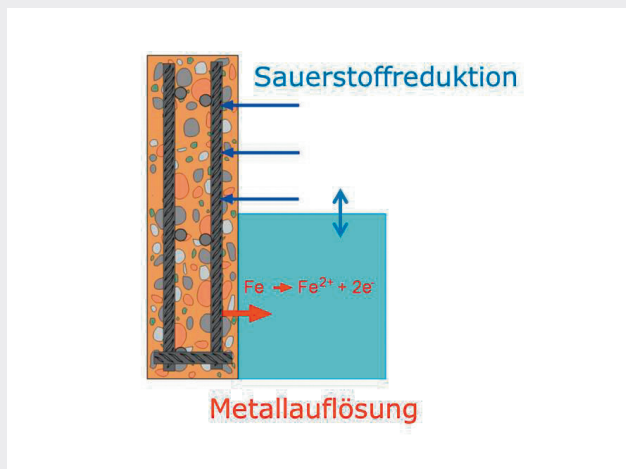


Fig. 3 Prinzip Makroelementkorrosion in Folge von Feuchtigkeitsgradienten

Principe de la corrosion des macroéléments en raison de gradients d'humidité

Aufgrund der Resultate der Versuche betreffend Korrosion von Stahl in Beton können folgende Feststellungen gemacht werden:

- In allen untersuchten Betonen und Überdeckungen wurden die galvanischen Elementströme im Verlaufe der Zeit vernachlässigbar klein.
- Die Passivierung erfolgt bei allen Proben trotz elektrischem Kontakt mit einer Kathode aus nichtrostendem Stahl.
- Die Zeit, bis die Korrosion stoppt, ist abhängig von der Betonqualität. Bei erhöhter Porosität (W/Z 0,6) und bei Verwendung von CEM II betrug die Zeitdauer bis zur vollständigen Passivierung mehrere Monate. Bei Verwendung von CEM I wurde bei beiden Qualitäten (W/Z 0,6 und 0,47) eine raschere Passivierung als in CEM II festgestellt.
- Trotz des erzeugten Feuchtigkeitsgradienten konnte bei den durchgeführten Versuchen keine stabile Aktivierung der Bewehrung festgestellt werden.

AUSWIRKUNG VON STROM AUF DAS SCHADENSILD

Um die Auswirkung von elektrischem Strom auf Beton und Mörtel untersuchen zu können, wurden Proben der verschiedenen Betonsorten in einen Rahmen aus Kunststoff eingebaut und an-

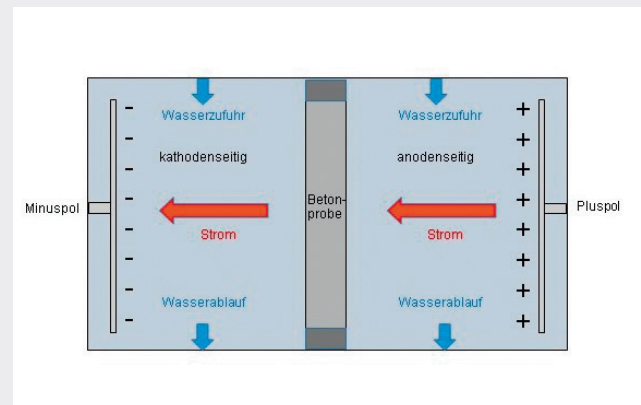


Fig. 4 Versuchsaufbau / Montage expérimentale

schliessend in einen Wasserbehälter gestellt, sodass im Behälter zwei getrennte Kammern entstanden (*Fig. 4*). In jeder Kammer befand sich eine kreisförmige Plattenelektrode aus nichtrostendem Stahl. Die linke Elektrode wurde an den Minuspol (Kathode) und die rechte Elektrode an den Pluspol (Anode) der Stromquelle angeschlossen. Das kreisförmige Probenmaterial aus Beton wies einen Durchmesser von 9 cm und eine Dicke von 2 cm auf. Eine Seite war geschalt, die andere abtalschicht. Die geschaltete, glatte Seite war dem Minuspol zugewandt. Das Wasser in den Kammern wurde stetig erneuert. Als Versuchsparameter wurden neben der Betonsorte die Spannung, die Stromstärke und der pH-Wert des Wassers variiert. Letzteres wies unbehandelt eine Karbonathärte von ca. 33 °fH und einen pH-Wert von ca. 7,2 auf. Der Sättigungsindex war positiv. Um aggressive Kohlensäure zu erhalten, wurde dem Wasser kontrolliert Kohlendioxid zugesetzt. Der pH-Wert sank dabei auf ca. 6,4.

Die Proben wurden in regelmässigen Zeitabständen ausgebaut und visuell untersucht. Zudem wurden periodisch auch die Stromstärken und die über den Proben abgegriffenen Potentialdifferenzen gemessen. Aus diesen Werten wurden Widerstände berechnet.

Nach Abschluss der Messungen wurden die Proben gespalten und die Bruchflächen mit der Indikatorlösung Phenolphthalein eingesprüht. Die Tiefe des kathodenseitigen Bereichs mit reduziertem pH-Wert hängt von den Stromdichten ab (*Fig. 5*).

Aufgrund der visuellen Begutachtung und den durchgeführten Messungen können betreffend die untersuchten Einflussfaktoren folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Einfluss Zementart: Während der Versuchsdauer konnte visuell kein signifikanter Einfluss der Zementart auf die Veränderung der Betonoberflächen festgestellt werden.
- Einfluss Wasserzementwert: Während der Versuchsdauer konnte visuell kein signifikanter Einfluss des Wasserzementwertes auf die Veränderung der Betonoberflächen festgestellt werden. Hingegen nimmt der elektrische Widerstand der Prüfkörper infolge der höheren Porosität mit steigendem Wasserzementwert ab. Die Stromdichten nehmen zu und die Transportvorgänge in den Poren laufen schneller ab.
- Einfluss des Gleichstroms: Bei steigenden Stromdichten nehmen auf der Seite des Stromeintritts die Kalkablagerungen und auf der Austrittsseite die Bereiche mit reduziertem pH-Wert zu (*Fig. 5* und *Fig. 7*).
- Einfluss pH-Wert: Mit sinkendem pH-Wert respektive höherem CO₂-Gehalt nimmt der Beton- respektive Mörtelangriff zu (*Fig. 6*).

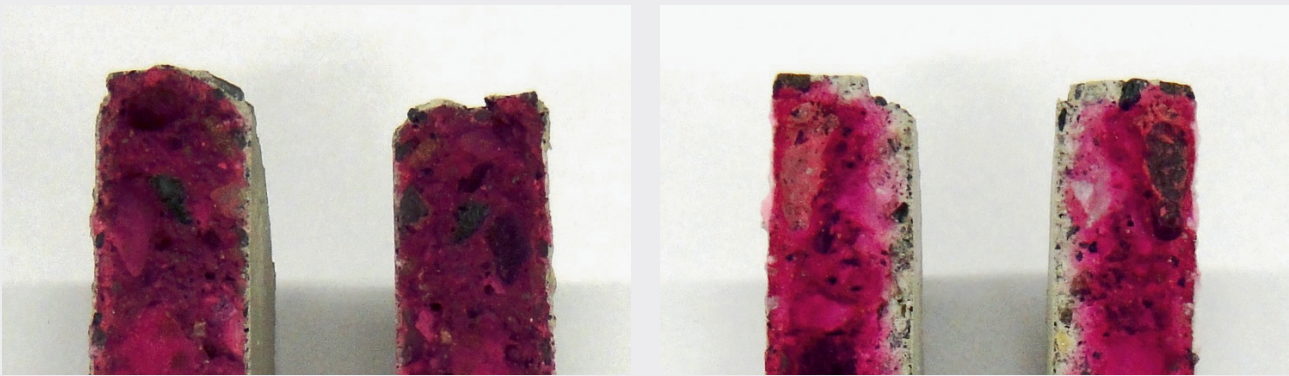


Fig. 5 Mit Phenolphthalein besprühte Bruchflächen. Bei den inneren Flächen fand der Stromaustritt statt.

Figur links: Stromdichte 16 mA/m²; Figur rechts: Stromdichte 125 mA/m²

Surfaces de rupture vaporisées avec de la phénolphtaléine. La sortie de courant a eu lieu dans les surfaces intérieures.

Figure de gauche: densité de courant de 16 mA/m², Figure de droite: densité de courant de 125 mA/m²



Fig. 6 Probe im Leitungswasser pH 6,4 auf der Seite mit Stromaustritt: links bei Versuchsbeginn, rechts nach sechs Monaten

Échantillon dans de l'eau du robinet de pH 6,4 côté sortie de courant: à gauche au début de l'essai, à droite après six mois



Fig. 7 Kalkablagerungen im Leitungswasser pH 7,2 auf der Seite mit Stromeintritt: links 62 mA/m², rechts 189 mA/m²

Présence de calcaire dans l'eau du robinet de pH 7,2 côté admission de courant: à gauche 62 mA/m², à droite 189 mA/m²

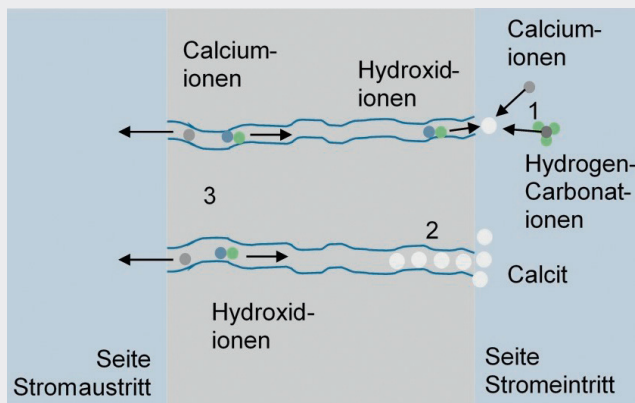


Fig. 8 Darstellung der ablaufenden Prozesse im elektrischen Feld
Illustration des processus impliqués dans le champ électrique

Die ablaufenden Prozesse im elektrischen Feld sind in *Figur 8* dargestellt:

1. Calcium- (Ca^{2+}) und Hydrogencarbonationen (HCO_3^-) aus dem Wasser bilden zusammen mit den Hydroxidionen (OH^-) aus der Porenlösung des Betons Calciumcarbonat (CaCO_3). Der diffusionskontrollierte Prozess wird durch ein äusseres angelegtes elektrisches Feld und die damit verbundene Migration verstärkt.
2. Die Calcitbildung findet zuerst in den oberflächennahen Poren statt, anschliessend auf der Betonoberfläche. Durch diese Strukturverdichtung wird der elektrische Widerstand auf der Seite des Stromeintritts erhöht.
3. Das elektrische Feld führt zu einer Migration der positiv geladenen Calciumionen und der negativ geladenen Hydroxidionen. Ist das Reservoir an Calciumhydroxid aufgebraucht, werden die festigkeitsbildenden Calciumsilikathydrate in der Zementsteinmatrix angegriffen. Die Betonoberfläche nimmt sichtbar Schaden.

AUSWIRKUNG VON SPANNUNGSGRADIENTEN IN BETONKÖRPERN

Aufgrund der Versuche betreffend Korrosion von Stahl im Beton wurde festgestellt, dass in normgerecht verarbeitetem Beton die Bewehrung passiv ist, selbst bei elektrischer Verbindung mit Einbauten aus nichtrostendem Stahl. Dies gilt auch für die Bewehrung unterhalb der Wasserlinie. Im Weiteren ist bekannt, dass die Fleckenbildung auch in Reservoiren auftreten kann, die keine Bewehrung aufweisen. Es ist bekannt, dass Strömungspotenziale und Diffusionsüberspannungen in Beton zu Spannungsdifferenzen führen können, die durchaus 100 mV und mehr betragen können, vgl. [13] und [14].

Damit in einem Betonkörper ein Stromfluss erfolgen kann, muss eine Spannungsdifferenz vorliegen. Um dies zu klären, wurden Versuche zu Feuchtigkeitsgradienten (Strömungspotenziale) und pH-Gradienten (Diffusionsüberspannung) durchgeführt. Dazu wurden Betonplatten hergestellt, die anschliessend einem Feuchtigkeitsgradienten oder einem pH-Gradienten ausgesetzt wurden. Zur Erzeugung eines Feuchtigkeitsgradienten wurden die Betonplatten partiell in Leitungswasser eingetaucht. Um einen pH-Gradienten aufzubauen, wurde ein definierter Bereich der Betonoberfläche kohlenstoffhaltigem Leitungswasser mit pH 6 ausgesetzt.

Nach der Vorbehandlung wurden die Betonplatten vollständig in Leitungswasser eingetaucht. Oberhalb der Betonplatte wurde eine Referenzelektrode platziert, die lateral verschoben werden

konnte. Gegenüber einer weiteren, neben der Platte platzierten Elektrode konnten so Spannungsdifferenzen gemessen werden. Bei den so vorbehandelten Betonplatten konnten Spannungsdifferenzen bis zu 30 mV gemessen werden. Diese Spannungsdifferenzen konnten bei allen im Projekt Betonsorten festgestellt werden.

Die Resultate dieser Versuche zeigen, dass durch entsprechende Vorbehandlungen Spannungsdifferenzen entstehen können, die auch noch messbar sind, wenn die Platten vollständig in Leitungswasser eingetaucht sind. Werden unter diesen Bedingungen Spannungsdifferenzen gemessen, bedeutet dies, dass Ausgleichsströme fliessen. Diese können die eingangs beschriebenen ungünstigen Wirkungen auf die zementösen Materialien haben. Die Versuche bestätigen auch die messtechnische Erfahrung, dass im Reservoir zwischen Flecken und Bereichen mit intakter Calcitschicht eine Spannungsdifferenz gemessen wird. Wird die Calcitschicht lokal zerstört, nimmt die gemessene Spannungsdifferenz ab.

DISKUSSION

MODELL FÜR DIE FLECKENBILDUNG

Aufgrund der erhaltenen Resultate und der Angaben in [7] und [10] kann ein Modell formuliert werden, das den Mechanismus und die Stabilisierung der Fleckenbildung beschreibt.

Der Beginn der Fleckenbildung erfolgt in Bereichen, in denen die Bildung einer dichten Calcitschicht gestört ist. Das kann beispielsweise erfolgen, wenn sich unmittelbar nach der Applikation des Mörtels eine dünne Kondenswasserschicht auf der Oberfläche bildet [7]. In diesen Bereichen erfolgt eine Auslaugung von Calcium aus der Mörtelstruktur.

In den Bereichen mit einer intakten und dichten Calcitschicht kommt es aufgrund der unterschiedlichen Ionenbeweglichkeit und der unterschiedlichen Konzentrationsverhältnisse beidseits der Calcitschicht zum Aufbau einer Diffusionsüberspannung. Die entstehende Spannungsdifferenz bewirkt eine Migration von Calciumionen, von den Bereichen mit gestörter Calcitschicht (Flecken) in Richtung Wasser. Dieser Effekt ist schematisch in *Figur 9* skizziert. Gleichzeitig werden die Hydroxidionen in Richtung der Calcitschicht migrieren. Dadurch werden die Mörtelstruktur im Bereich mit intakter Calcitschicht sowie die Konzentrationsdifferenzen weiter stabilisiert.

Der durch die Spannungsdifferenz über die Calcitschicht bewirkte Stromfluss zwischen Mörteloberfläche mit intakter und beschädigter Calcitschicht fördert und stabilisiert das Fleckenwachstum. Ein zusätzlicher Makroelementstrom aufgrund von Korrosionsprozessen kann den Prozess begünstigen. Dieser Effekt kann beispielsweise durch eine Elementbildung zwischen nicht vollständig mit Beton umhülltem Bewehrungsstahl und nichtrostenden Einbauten entstehen. Auf der anderen Seite kann ein überlagertes elektrisches Feld den Prozess auch bremsen oder sogar umkehren. Wird beispielsweise ein kathodischer Schutz aufgebracht, bremst dieser den Austrag der Calciumionen. Gleichzeitig wird der pH-Wert an der Mörteloberfläche durch den Schutzstrom erhöht, was zu einer Stabilisierung der Struktur führt [15].

Mit dem basierend auf den Beobachtungen und Messresultaten erarbeiteten Erklärungsmodell können auch die positiven Erfahrungen [16] von mittels kathodischen Schutzanlagen erzeugten elektrischen Feldern auf Beton- und Mörteloberflächen in Trink-

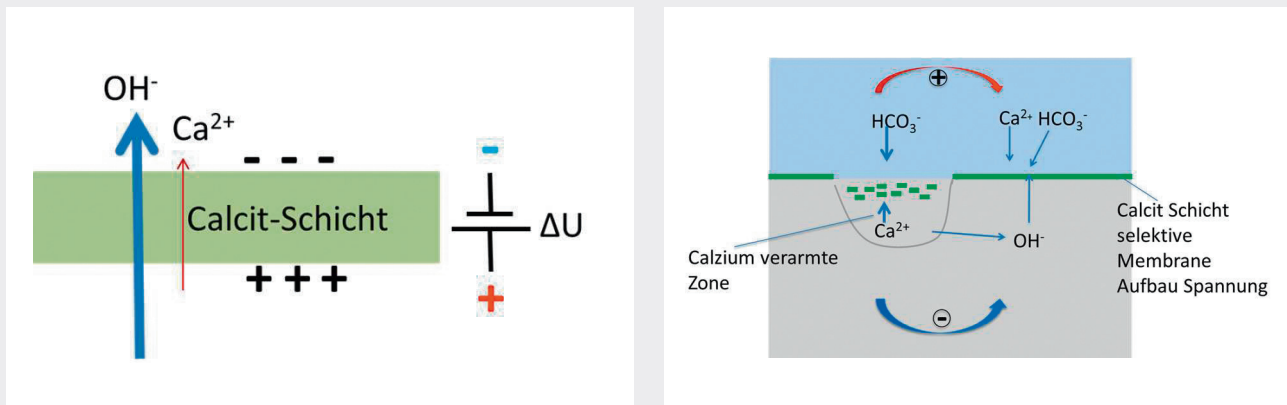


Fig. 9 Modellskizze für den Mechanismus bei der Fleckenbildung.

Links: Aufbau einer Diffusionsüberspannung über die Calcitschicht, diese stabilisiert den Prozess entsprechend dem Bild rechts
 Dessin en coupe du mécanisme de tache; à droite: formation d'une surtension de diffusion sur la couche de calcite qui stabilise le processus selon l'image de gauche

wasserreservoiren erklärt werden. Die optimalen Schutzstromdichten müssen in weiterführenden Forschungsarbeiten ermittelt werden. Sie dürften sowohl von den Beton- und Mörtel Eigenschaften als auch von der Wasserzusammensetzung abhängen.

MÖGLICHE SCHUTZMECHANISMEN UND ERKENNTNISSE FÜR DIE PRAXIS

Aufgrund der im Projekt erhaltenen Erkenntnisse und der erarbeiteten Modellvorstellung ergeben sich folgende Möglichkeiten, wie die Bildung und das Wachstum der Flecken gebremst werden kann:

- Durch einen Stromeintritt in die Betonoberfläche mithilfe eines kathodischen Schutzes kann die Schädigung des Mörtels vermindert werden. Die optimalen Bedingungen müssten durch weitere Untersuchungen geklärt werden.
- Durch den Stromeintritt wird die Auslaugung des Mörtels gebremst und die Calcitschicht gestärkt, was eine Widerstandszunahme zur Folge hat. Gleichzeitig wird der pH-Wert an der Mörteloberfläche erhöht. Die Stromdichte muss dabei so gewählt werden, dass eine möglichst dichte Calcitschicht gebildet werden kann.
- Die Entstehung von Bereichen mit einem beeinträchtigten Aufbau der Calcitschicht muss möglichst von Beginn an verhindert werden. So ist bei Instandsetzungsarbeiten unter anderem die Entstehung von Kondenswasser auf der frischen Mörteloberfläche zu verhindern.
- Durch die Verwendung von Mörtel, die die Bildung einer dichten Calcitschicht

begünstigen. Möglicherweise können Mörtel für die Anwendung im Reservoirbau entsprechend optimiert werden.

- Mögliche Spannungsquellen, die einen Stromfluss zu Folge haben und somit das Fleckenwachstum fördern, sollten eliminiert werden. So sind nichtrostende Einbauten galvanisch getrennt von der übrigen Bewehrung zu installieren.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Schwotzer, M. (2008): Zur Wechselwirkung zementgebundener Werkstoffe mit Wässern unterschiedlicher Zusammensetzung am Beispiel von Trinkwasserbehälterbeschichtungen, Dissertation Universität Fridericiana zu Karlsruhe
- [2] Babaahmadi, A.; Tang, L.; Abbas, Z. (2013): Electrochemical migration technique to accelerate ageing of cementitious materials, EPJ Web of Conferences, www.epj-conferences.org
- [3] Susanto, A. et al. (2013): Mechanical, Electrical and Microstructural Properties of Cement-Based Materials in Conditions of Stray Current Flow, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 11, 119-134
- [4] Jae-Suk, R. (2002): Long-term forecast of Ca leaching from mortar and associated degeneration, Cement and Concrete Research, 32, 1539-1544
- [5] Saito, H.; Nakane, S. (1999): Comparison between Diffusion Test and Electrochemical Acceleration Test for Leaching Degradation of Cement Hydration Products, ACI Materials Journal, Vol. 96, 208-213
- [6] Schoenen, D. (1994): Fleckige Farbveränderungen und Zerstörung von weisser Zementmörtelauskleidung in Trinkwasserbehältern, Wasser Abwasser, 135 (1994) Vol. 12, 669-676
- [7] Schwotzer, M.; Scherer, T.; Gerdes, A. (2010): Protective or damage promoting effect of calcium carbonate layers on the surface of cement based materials in aqueous environments; Cement and Concrete Research 40, p. 1410-1418
- [8] Gerdes, A. et al. (2009): Präventiver Oberflächenschutz von Trinkwasserbehältern: Chemische und mikrobiologische Bewertung von zementgebundenen Beschichtungen; Abschlussbericht der Hochschule Karlsruhe für Technik und Wirtschaft
- [9] Gerdes, A.; Wittmann, F.H. (1992): Electrochemical Degradation of Cementitious Materials; International Congress on the Chemistry of Cement, 5. National Council for Cement and Building Materials, New Dehli
- [10] Koelliker, E. (1986): Skins of calcium carbonate and their significance for the corrosion of concrete, 8th Int. Congr. Chem. Cement, Rio de Janeiro
- [11] Wittmann, F. H. (1996): Zur hydrolytischen Korrosion zementgebundener Werkstoffe, Zementgebundene Beschichtungen in Trinkwasserbehältern, WTA-Schriftenreihe, Heft 12, pp. 27-51
- [12] Leemann, A. (2013): Zementqualität und Trinkwasser, Aqua & Gas Vol. 1, pp. 48-53
- [13] Angst, U.; Vennesland, Ø.; Myrdal, R. (2009): Diffusion potentials as source of error in electrochemical measurements in concrete, Materials and Structures, Vol. 42, pp. 365-375
- [14] Schiegg, Y.; Büchler, M.; Brem, M. (2009): Diffusion potentials as source of error in electrochemical measurements in concrete, Materials and Corrosion, 60 No 2, pp. 79-86
- [15] Büchler, M.; Kelm, A. (2012): Electrochemical treatment of cementations water storage tanks, CeoCor Lucerne Days 30th - 31th May 2012
- [16] Paglia, C.S.; Wenk, F.; Müller, R.O. (2004): Corrosion of water service reservoirs and preventive measures; First International Conference on Service Reservoirs, Geneva

DANK

Die Autoren danken dem FOWA-Forschungsfonds des SVGW und der Sika AG für die grosszügige Unterstützung.