

Stahl in Beton: Korrosionsschutz mit Beschichtungen

Text **Martin Brem**

Bild und Grafiken **SGK**



Unsere Infrastruktur besteht zu einem grossen Teil aus Stahlbetonstrukturen. Deren Nutzungsdauer wird wesentlich durch Korrosion der Bewehrung begrenzt. Unterhalt und Erneuerung sind ein relevanter Kostenfaktor. Dieser Artikel zeigt zugrundeliegende Prozesse sowie Möglichkeiten für den Schutz der Bewehrung vor Korrosion mit Beschichtungssystemen auf.

Autor Dr. Martin Brem ist Dipl. Bau-Ing. ETH/SIA, Stv. Geschäftsführer, Projektleiter und Beschichtungsinspektor in der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK) sowie Vorstandsmitglied des Verbands Schweizerischer Korrosionsschutzfirmen.

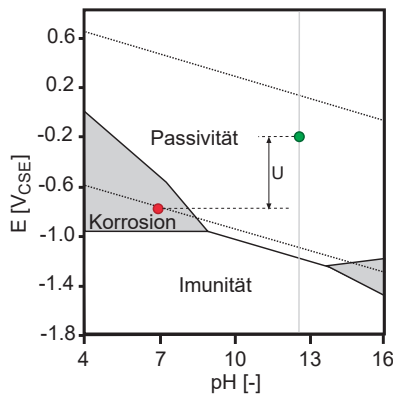
Einleitung

Im Stahlbetonbau wird unbehandelter, blanker Bewehrungsstahl in den Beton eingebracht. Beton weist eine feinporige Struktur aus Gesteinskörnern und Zement auf. Bei den meisten Expositionen sind diese Betonporen nur teilweise mit Wasser gefüllt. Insbesondere die grösseren Poren bleiben offen, was zu einem schnellen Zutritt von Sauerstoff an die Bewehrungsfläche führt.

Beton ist keine Beschichtung

Daraus folgt, dass der Beton nicht die grundlegenden Funktionen einer Beschichtung übernimmt. Er ist durchlässig für Wasser und Sauerstoff. Die Korrosionsschutzwirkung des Betons basiert somit nicht auf einer Trennung von Stahl und dem Umgebungsmedium, sondern auf dem in der Betonporenlösung enthaltenen Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Diese Lauge hat eine schützende Wirkung bei einem pH-Wert im Bereich von 12,5.

Der Korrosionsschutz von Stahl in Beton ist die Folge der korrosionsschützenden Wirkung der Hydroxidionen OH^- und dem daraus resultierenden hohen pH-Wert. Dieser Effekt ist in Grafik 1 dargestellt. Der Be-



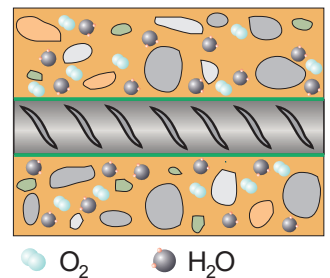
Graphik 1: Abhängigkeit des Korrosionszustands von Stahl von pH-Wert und Potenzial.
Roter Punkt: Korrodierender Stahl in neutralem Medium.
Grüner Punkt: Passiver Stahl in Beton.

wehrungsstahl, der bei atmosphärischer Exposition korrodiert, bildet nach dem Einbringen in den Beton einen schützenden Passivfilm auf der Oberfläche.

Der Korrosionsschutz von Stahl in Kontakt mit Wasser und Sauerstoff durch Passivierung (Bildung eines schützenden Passivfilms) ist in Grafik 2 schematisch dargestellt. Im Gegensatz zu Beschichtungen wird der Korrosionsschutz von Stahl in Beton nicht durch eine Trennung von Stahl und Umgebungsmedium, sondern durch eine Veränderung der Zusammensetzung des Mediums erreicht.

Wirkung geht verloren

Die Korrosionsschutzwirkung des Betons kann bei ungünstiger Exposition im Verlaufe der Zeit verloren gehen. Der Einsatz von Oberflächenschutzsystemen wie Hydrophobierungen, Imprägnierungen und Beschichtungen nach der Norm SN EN 1504-2 kann selbst bei extremen Expositionen eine deutliche Erhöhung der Nutzungsdauer von Stahlbetonstrukturen bewirken. Die relevanten Mechanismen und die Wirkungsweise von Beschichtungen werden im Folgenden diskutiert.



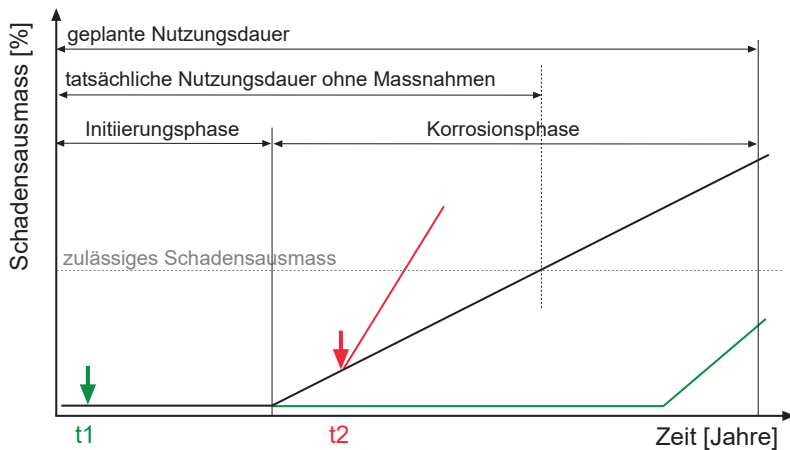
Graphik 2: Bildung eines Passivfilms (grün) auf der Stahloberfläche im porösen Beton mit pH-Wert von 12,5 in Gegenwart von Wasser (H_2O) und Sauerstoff (O_2).

Korrosion von Stahl in Beton

Die Einbettung des Stahls in einen wasser- und sauerstoffhaltigen, porösen Beton mit erhöhtem pH-Wert führt zu einem wirksamen, dauerhaften Korrosionsschutz. Der hohe pH-Wert verringert die Korrosionsgeschwindigkeit auf vernachlässigbare Werte. Daraus folgt, dass ein Verlust des von der Betonporenlösung erzeugten hohen pH-Werts an der Stahloberfläche zu Korrosion führen muss. Eine Verringerung des pH-Werts in Beton auf Werte unter 9 kann wegen zweier Prozesse erfolgen:

- Kohlendioxid CO_2 aus der Luft dringt in den Beton ein und führt zu einer Verringerung des pH-Werts durch die sogenannte Karbonatisierung.
- Durch das Vordringen von Chloriden Cl^- an die Stahloberfläche kommt es zu galvanischen Strömen zwischen dem passiven und dem korrodierenden Stahl. Dies ist eine Folge der Spannung U in Grafik 1. Diese Ströme bewirken eine lokale Säurebildung an der Korrosionsstelle.

Beide Effekte gehen mit einem Transport von Schadstoffen (CO_2 und Cl^-) durch die poröse Betonstruktur bis an die Stahloberfläche einher. Der korrosionsbedingte Schädigungsprozess von Stahlbeton kann somit in eine Initiierungs- und eine Korrosionsphase gemäss Grafik 3 (seite 18) getrennt werden: Zunächst ist der Stahl während der Phase ohne Korrosion, der sogenannten Initiierungsphase, passiv und die Schadstoffe Cl^- und CO_2 dringen über Transportprozesse in den Beton ein. In dieser Phase wird die

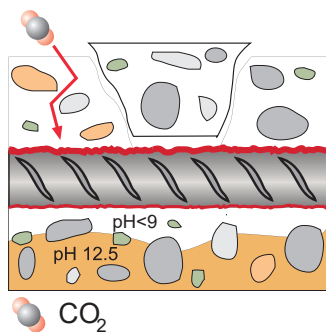


Grafik 3: Schematische Darstellung der Schadentwicklung eines Bauwerks und die daraus resultierende Nutzungsdauer. Schwarz: keine Schutzmassnahme. Grün: Applikation einer Beschichtung zum Zeitpunkt t1. Rot: Applikation einer Beschichtung zum Zeitpunkt t2.

Dauerhaftigkeit durch Transportprozesse bestimmt. Sobald der pH-Wert und/oder der Chloridgehalt an der Stahloberfläche kritische Werte erreichen, löst das Korrosion aus. Im weiteren Verlauf wird die Schädigung durch die nun ablaufenden Korrosionsprozesse bestimmt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Prozesse im Zusammenhang mit Karbonatisierung und Chlorid-induzierter Korrosion diskutiert.

Die Karbonatisierung

Wenn CO_2 aus der Luft mit der Betonporenlösung zu Kohlensäure reagiert, verringert sich der pH-Wert des Betons. Ausgehend von der Beton-



Grafik 4: Korrosion und Bildung von Rost (rot) als Folge der Reaktion der alkalischen Betonporenlösung mit pH 12,5 mit Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft, welche den pH-Wert unter 9 verringert. Die Bildung von voluminösem Rost führt zu Rissbildung und Betonabplatzungen.

oberfläche erstreckt sich die Zone mit karbonatisiertem Beton im Verlaufe der Zeit immer tiefer in den Beton. Dieser Prozess ist schematisch in Grafik 4 dargestellt.

Sobald diese sogenannte Karbonatisierungsfront die Höhe der Bewehrung erreicht, geht der schützende Passivfilm der Bewehrung verloren und es kommt zu Korrosion. Die sich bildenden Korrosionsprodukte sind bei Karbonatisierung nicht löslich und führen zur Bildung einer voluminösen Rostschicht auf dem Stahl.

Diese Schicht löst Spannungen und Rissbildung im Beton aus. Im weiteren Verlauf kommt es zu Abplatzungen, wie in Grafik 4 schematisch dargestellt. Der Stahl ist nun der direkten Bewitterung ausgesetzt und der Korrosionsprozess erfolgt beschleunigt.

Im Zusammenhang mit der Karbonatisierung sind die folgenden Aspekte für die Dauerhaftigkeit der Struktur relevant: Bei vollständig wassergesättigtem Beton ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit gering, da der Transport von CO_2 vor allem über luftgefüllte trockene Poren erfolgt. Die Karbonatisierung während der Initiierungsphase erfolgt somit in trockenem Beton schneller. Demgegenüber ist die Rost- und damit die Rissbildung während der Korrosionsphase in nassem Beton schneller.

Dies hat zur Folge, dass sowohl dauerhaft nasser als auch dauerhaft trockener Beton eher geringe Schäden durch Karbonatisierung aufweist. Verstärkte Schäden treten vor allem an alternierend bewitterten Betonelementen auf. In einem solchen Fall sind die Betonporen nur teilweise gefüllt, was die Karbonatisierung begünstigt. Gleichzeitig ist die Betonfeuchte so hoch, dass erhöhte Korrosionsgeschwindigkeiten nach erfolgter Korrosionsinitiation auftreten.

Chloridinduzierte Korrosion

Chloride, die über Tausalze auf die Betonoberfläche gelangen, dringen während der Initiierungsphase in den Beton ein. Sobald der Chloridgehalt im Verlaufe der Zeit an der Stahloberfläche einen kritischen Wert erreicht, ist die Aufrechterhaltung der Passivität nicht mehr möglich. Der Grund dafür ist, dass es zu galvanischen Strömen zwischen der passiven Bewehrung und den lokalen Korrosionsstellen kommt.

Gemäss Grafik 1 (Seite 17) ist eine Spannung U von zirka 0,7 V zwischen der passiven Oberfläche (grüner Punkt) und der lokalen Korrosionsstelle (roter Punkt) für die Stabilisierung der galvanischen Korrosion, für das lokale Absenken des pH-Werts sowie für den schnellen Korrosionsabtrag verantwortlich.

Bei Cl^- -induzierter Korrosion ist die Verringerung des pH-Werts auf den direkten Nahbereich an der Korrosionsstelle begrenzt. Bei den erhöhten Cl^- -Gehalten sind die Eisenionen löslich, sodass es nicht zur Bildung von voluminösen Korrosionsprodukten, zu Rissbildung und Abplatzungen kommt. Bei Cl^- -induzierter Korrosion betrifft die Schädigung somit den Querschnittsverlust (Korrosionsabtrag) der Bewehrung, während bei Karbonatisierung primär die Betonstruktur durch Rissbildung und Abplatzungen geschädigt wird.

Im Zusammenhang mit Cl^- -induzierter Korrosion sind die folgenden Aspekte für die Dauerhaftigkeit der Struktur relevant: Bei vollständig wassergesättigtem Beton und dauerhaft trockene-

nem Beton ist die Diffusionsgeschwindigkeit von Chloriden gering, da deren Transport über langsame Diffusion durch die wassergefüllten Poren erfolgt.

Bei wechselnder Beanspruchung mit längeren Trockenphasen und kurzzeitiger Benetzung mit Cl⁻-haltigem

Wasser kommt es jedoch zu einem sehr schnellen Eintrag über kapillare Prozesse. Der trockene Beton saugt dabei das Cl⁻-haltige Wasser auf. Dieser Vorgang kann bei den typischen jahreszeitlich bedingten Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen in der Schweiz zu vergleichsweise kurzen Initiierungs-

phasen und schnellem Querschnittsverlust der Bewehrung während der Korrosionsphase führen.

Korrosionsschutz von Stahl in Beton

Die Ausführungen zur Korrosion von Stahl in Beton haben verdeutlicht, dass die Verringerung des pH-Werts an der Stahloberfläche zu Schäden und verringerter Dauerhaftigkeit führen kann. Dies ist eine Folge der Neutralisierung der Betonporenlösung aufgrund von Kohlensäureeintrag oder von lokaler Säurebildung bei galvanischer Korrosion aufgrund von Cl⁻-Eintrag. Da beide Prozesse mit Diffusion oder kapillarem Transport von Schadstoffen in den Beton verknüpft sind, ist es naheliegend, die Dauerhaftigkeit durch eine Behinderung des Stofftransports zu erhöhen.

Beeinflussung des Stofftransports

Eine ausreichende Betonüberdeckung nach Norm SIA 262 ist die primäre Massnahme, welche die Aufrechterhaltung des erhöhten pH-Werts und damit der Passivität an der Stahloberfläche sicherstellt. Die Verlängerung des Transportwegs für Schadstoffe verlängert die Initiierungsphase. Weiter kann durch die Wahl eines dichten Betons mit hohem Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand nach Norm SIA 262-1 der Eintrag der Schadstoffe zusätzlich verlangsamt werden.

Die Erhöhung der Betonüberdeckung und die Wahl einer hohen Betonqualität können zwar die Initiierungsphase verlängern. Das Erreichen von kritischen Konzentrationen in Bezug auf CO₂ und/oder Cl⁻ an der Stahloberfläche kann aber nicht dauerhaft ausgeschlossen werden. Es kann daher sinnvoll sein, bei entsprechenden Umgebungsbedingungen von

Bauwerken zusätzliche Massnahmen zur Verminderung des Stofftransports einzusetzen.

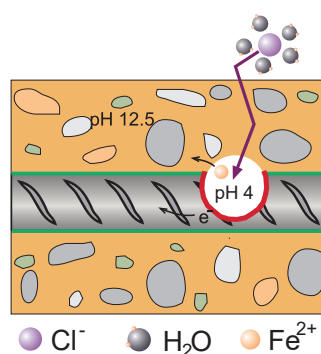
Das Aufbringen von Beschichtungen vermindert den Stoffaustausch zwischen Beton und Umgebung (Grafik 6). So verhindert eine Beschichtung das direkte Auftreffen von Cl⁻-haltigem Spritzwasser auf die Betonoberfläche und reduziert das Eindringen von CO₂ aufgrund des reduzierten Diffusionskoeffizienten stark.

Nebst der Behinderung des direkten Schadstoffzutritts zum Beton haben die Beschichtungen aber noch eine weitere wichtige Funktion: Sie vermindern das Austrocknen des Betons und

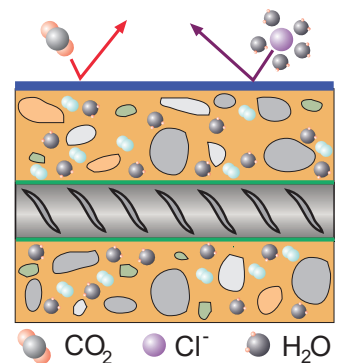
reduzieren damit den Einfluss der jahreszeitlich bedingten Nass- und Trockenphasen. Dies hat zur Folge, dass der Beton unter der Beschichtung eine höhere Feuchtigkeit aufweist, die Betonporen stark gefüllt bleiben und damit der Stofftransport zusätzlich vermindert ist. Gemäss Grafik 3 kann somit das Aufbringen einer Beschichtung zum Zeitpunkt t1 die Schädigung des Bauwerks stark verringern und die geplante Nutzungsdauer ermöglichen.

Beeinflussung der Geschwindigkeit

Sobald der Korrosionsprozess gestartet ist, lässt sich die Nutzungsdauer des Bauwerks nur noch über die Beeinflussung der Korrosions-



Grafik 5: Cl⁻-induzierte Korrosion unter Bildung von löslichem Fe²⁺, welche in alkalischem Beton aufgrund der lokalen Absenkung des pH-Werts zu stark beschleunigtem Querschnittsverlust der Bewehrung führt.



Grafik 6: Korrosionsschutz durch Aufbringen einer Beschichtung (blau) auf die Betonoberfläche, welche den Zutritt von Cl⁻ und CO₂ verhindert. Dies erhöht die Initiierungs- und somit die Nutzungsdauer des Bauwerks.

geschwindigkeit kontrollieren. Als Korrosionsschutzmassnahmen stehen damit in erster Linie die Hydrophobierung und der Kathodische Korrosionsschutz (KKS)² im Vordergrund. Falls im Beton bereits grössere Risse und Abplatzungen vorhanden sind, muss oft der schadhafte Beton abgetragen und ersetzt werden. Die Hydrophobierung bewirkt im Idealfall ein Austrocknen des Betons, während der

KKS die galvanischen Elemente, welche die Folge der Spannung U in Grafik 1 (Seite 17) sind, im Bauwerk vermindert.

Demgegenüber haben Beschichtungen nach erfolgter Initiierung oft nur einen begrenzten Nutzen. In ungünstigen Fällen kann eine Beschichtungsapplikation zum Zeitpunkt t_2 gemäss Grafik 3 (Seite 18) sogar zu einer Ver-

ringerung der Nutzungsdauer führen, wenn die dauerhaft erhöhte Betonfeuchtigkeit zu höheren Korrosionsgeschwindigkeiten führt.

Schlussfolgerung

Die Ausführungen zu den Korrosionsprozessen und den relevanten Einflussfaktoren ermöglichen es, konkrete Massnahmen zu einer Erhöhung der Nutzungsdauer von Stahlbetonstrukturen zu erörtern.

Dabei zeigt sich, dass es sinnvoll sein kann, an neuen Stahlbetonstrukturen durch das Aufbringen einer Beschichtung den Eintrag von CO_2 und Cl^- in die poröse Betonstruktur zu behindern und damit die Initiierung von Korrosion stark hinauszuzögern. Diese Schutzmassnahme ermöglicht es, bei entsprechendem Unterhalt, die Nutzungsdauer des Bauwerks zu erreichen oder gar deutlich zu übertreffen.

Umgekehrt wird deutlich, dass nach erfolgtem Schadstoffeintrag und insbesondere nach der Initiierung von Korrosion das Aufbringen von Beschichtungen in ungünstigen Fällen gar eine korrosionsbeschleunigende Wirkung haben kann.

Nicht auf alle Bauten übertragbar

Die positive Wirkung von Beschichtungen besteht in der Reduktion des Stoffaustauschs mit der Umgebung während der Initiierungsphase. Die negative Wirkung bei nachträglicher Applikation der Beschichtung basiert gerade auf diesem reduzierten Stoffaustausch, der in vielen Fällen zu schlechterem Abtrocknen, höherer Betonfeuchte, geringerem elektrischem Betonwiderstand und somit während der Korrosionsphase zu höheren Korrosionsgeschwindigkeiten führt.

Der vorliegende Beitrag gibt eine vereinfachte Übersicht über die grundlegenden ablaufenden Prozesse und die optimalen Anwendungszeitpunkte von Beschichtungen. Diese Vorgaben können nicht ohne Weiteres auf alle Bauwerke übertragen werden. Vielmehr sind die konstruktiven Gegebenheiten, die Expositionsbedingungen und auch die Produkteigenschaften der Beschichtungen bei der Planung von Bauwerken und bei Instandsetzungen zu berücksichtigen. /

Literatur

- 1 H. Böni: Corrosion in reinforced concrete structures. CRC Woodhead publishing limited, Cambridge, 2005.
- 2 U. Bette, M. Büchler, A. Vimalanandan: Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz», Vulkan Verlag, Essen, ed. 10. Auflage, 2022

ANZEIGE

| | | |
|------------------------|---|--|
| <h1>SWISS BAU</h1> | <p>SAVE THE DATE</p> <p>20.–23. JANUAR</p> <h1>2026</h1> |  <p>maier glpser</p> <p>Die Kreativen am Bau.</p> |
|------------------------|---|--|