



Das Problem - Korrosion von Stahl in Beton:

Der Baustoff Stahlbeton ist seit seiner Einführung vor über 100 Jahren zum Rückgrat des konstruktiven Ingenieurbaus geworden. Die nahezu unbegrenzte Formgebung, hohe Festigkeiten und eine komfortable Verarbeitung haben Stahlbeton zu einem unverzichtbaren Baumaterial werden lassen.

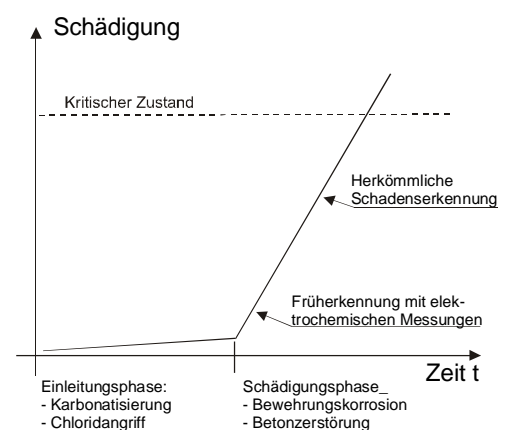
Das mit weitem Abstand größte Problem der Stahlbetonbauwerke sind dabei Korrosionsschäden an der Bewehrung. Die Bewehrungsstähle werden normalerweise durch die hohe Alkalität des Betonporenwassers vor Korrosion geschützt. Bei Verlust der Alkalität (durch Karbonatisierung oder Chloridangriff) ist der Stahl stark korrosionsgefährdet. Die Korrosionsprodukte weisen ein größeres Volumen auf als der ungeschädigte Stahl. Dadurch kommt es im Beton zu Druckkräften, die die Festigkeit des Betons überschreiten. Die Folge sind Risse, Verlust von Haftverbund und Abplatzungen im Beton.

Gerade bei hochbelasteten öffentlichen Bauwerken - Brücken, Tunnel, Parkdecks, aber auch Talsperren oder Wasserbehälter - entstehen so erhebliche Schäden, die oft bereits nach relativ kurzer Nutzungszeit (15-20 Jahre) Sanierungsbedarf erfordern. Die nötigen Reparaturmaßnahmen sind kostenintensiv sowie technologisch und organisatorisch meist sehr anspruchsvoll, besonders, wenn die schwer zu erkennende Schädigung schon weit fortgeschritten ist.

Jährlich müssen in allen Industrieländern Milliardenbeträge für die Instandhaltung und Sanierung aufgewendet werden. Allein durch Tausalze entstehen in Nordamerika Brückenschäden von schätzungsweise 20 Mrd. US \$ pro Jahr. Untersuchungen des britischen Verkehrsministeriums zeigen eine ähnliche Situation mit 1,6 Mrd. £ für die Brücken der Hauptstraßen, wo jährlich 1-2 Mio. Tonnen Tausalze eingesetzt werden. In Deutschland werden allein für Brückeninstandhaltungen auf Bundesfernstraßen jährlich mehr als 360 Mio. € aufgewendet.

Bei diesen Kosten entfallen auch großen Anteile auf Verkehrsumleitung und Verkehrssicherung; diese Aufwendungen übersteigen an manchen Objekten sogar die Baukosten.

Beträchtliche Kosten- und Aufwandssenkungen können durch eine frühzeitige Schadenserkenkung erreicht werden. Mit den herkömmlichen Untersuchungen lassen sich aber Korrosionsschäden erst dann feststellen, wenn sie durch voluminöse Korrosionsprodukte bereits zu Zerstörungen an die Bewehrung umgebenden Beton geführt haben.



Schädigungsverlauf an Stahlbetonbauwerken nach Tuuti



Technische Hintergründe - was ist Korrosion?

Korrosion ist ein natürlicher Vorgang z.B. in dem Bestreben verhütteter Metalle, die im Herstellungsprozeß zugeführte Energie nach Möglichkeit wieder abzugeben und zu einem ausgeglichenen Energiezustand zu gelangen, der auch in den Eisenerzen vorherrscht.

Modellvorstellung (Schalenmodell von Bor): Ein Atom ist zwar elektrisch neutral, jedoch nicht stabil, wenn es keine voll besetzte äußere Elektronenschale hat. Während Nichtmetalle in der Regel eine stark besetzte äußere Schale haben und bestrebt sind, „fehlende“ Elektronen aufzunehmen, ist es bei Metallen umgekehrt: die Korrosionsanfälligkeit ist um so größer, je mehr Elektronen für eine volle Schale „abzugeben“ sind. Es kommen nur solche Metalle in reiner Form in der Natur vor, die gemäß obigem Modell eine volle äußere Elektronenschale besitzen, z. B. Gold. Der Korrosionsprozeß - die Metallauflösung bzw. Oxidation - läuft ab, sobald eine natürliche, atmosphärische Umgebung herrscht, also Wasser und Sauerstoff vorhanden sind. Verschiedene äußere Bedingungen können verhüttete Metalle davon abhalten, in ihre natürliche Erscheinungsform zurückzufallen, dazu zählt Mangel an Wasser oder Sauerstoff, aber auch eine stark alkalische Umgebung. Das *Pourbaix-Diagramm* zeigt die thermodynamischen Bedingungen, unter denen Metalle (hier: Eisen) stabil sind oder korrodieren.

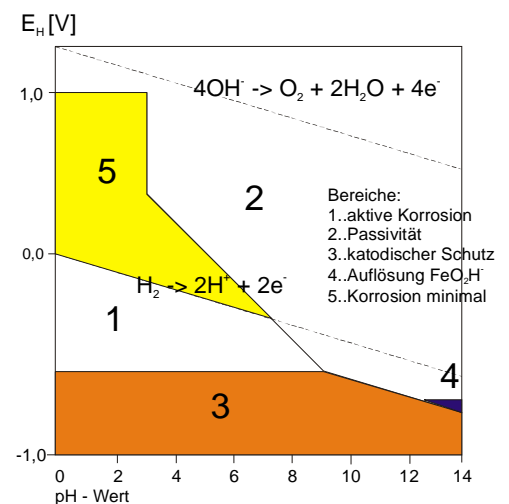
Korrosion ist also ein Vorgang, der dem natürlichen Streben nach minimalem Energiegehalt entspricht. Elektrochemisch betrachtet, bilden sich dafür zwei Reaktionsorte aus: die Anode, an der Elektronen in Folge Eisenauflösung entstehen, und die Katode, wo Elektronen mit Sauerstoff oder Wasser reagieren.

Daher ist es wichtig zu wissen, warum Stahl in Beton normalerweise nicht korrodiert, denn es handelt sich um einen porösen Baustoff, in dem sowohl Wasser als auch Sauerstoff vorhanden sind. Die Ursache liegt in der hohen Alkalität des Beton-Porenwassers, wo als Ergebnis der Betonerhärtung u.a. Kalzium-, Natrium- und Kaliumhydroxid entsteht und zu einem pH-Wert von ca. 12,5 führt. Beim Betoneinbau erfolgt die sogenannte Passivierung des Stahls, wo sich nach sehr kurzer anodischer Eisenauflösung eine dünne, aber sehr dichte Oxidschicht auf der Stahloberfläche bildet, die eine weitere Korrosion praktisch bis zum Stillstand verlangsamt. Ein solcher Prozeß ist in Beton nur in stark alkalischer Umgebung möglich und stellt die kinetische Hemmung der thermodynamisch bedingten Metallauflösung dar. Grundsätzlich macht diese Passivität alle Gebrauchsmetalle erst verwendungsfähig.

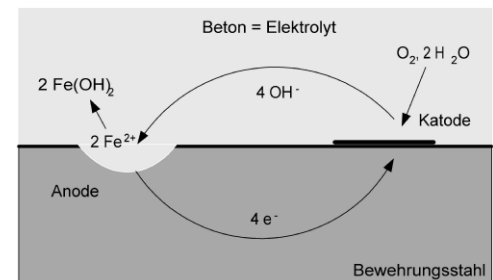
Die Schutzfunktion des Betons gegen Bewehrungskorrosion kann durch 2 Prozesse beeinträchtigt oder aufgehoben werden: durch **Karbonatisierung** oder durch **Chloridangriff**. Während die Karbonatisierung ein Vorgang ist, dem alle Betonbauten (außer unter Wasser) ausgesetzt sind, konzentriert sich Chlorideinwirkung hauptsächlich auf Bauwerke, die von Tausalzen des Straßenwinterdienstes betroffen sind, deren Frischbeton mit Meerwasser hergestellt wurde, oder die mit chloridhaltigen Brandgasen in Berührung kommen.



Durch Chloridangriff zerstörte Bewehrung



Pourbaix-Diagramm: Abhängigkeit der Korrosionsaktivität vom umgebenden pH-Wert und dem Ruhepotential



Prinzip der Eisenauflösung/ Korrosion



Bei der *Karbonatisierung* wird das $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im Porenwasser durch CO_2 -Einwirkung aus der Luft langsam neutralisiert. Nach einigen Jahren kann die Karbonatisierungsfrent die Bewehrung erreichen und dort zu einer flächigen Auflösung der Passivschicht führen. Im Ergebnis entstehen Mikroelemente, bei denen kleine Anoden- und Katodenflächen nahe beieinander liegen und mit relativ geringer Korrosionsgeschwindigkeit zu einer relativ gleichmäßigen Abrostung führen (ähnlich wie in freier Atmosphäre).

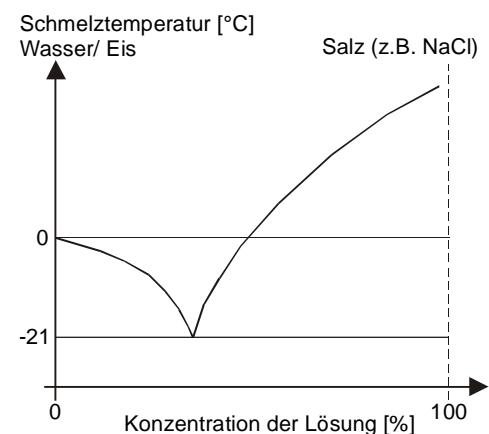
Völlig anders sieht es bei der *Chloridkorrosion* aus: hier reichern sich punktuell ‚Durchbruchkonzentrationen‘ an, die bei Überschreiten eines bestimmten OH^-/Cl^- -Verhältnisses, vorzugsweise an Gefügestörungen in der Stahloberfläche, zu Lochfraßkorrosion führen. Dabei stehen sehr kleine Anodenflächen in der Regel großen Katodenbereichen gegenüber, was zu sehr starken und schnellen örtlichen Korrosionsabträgen führt. Chlorid ist an der Korrosionsreaktion selbst nicht beteiligt, sondern zieht mit seinen Ladungs- und Bindungseigenschaften gelöste Wasserstoff-Ionen mit sich, die ihrerseits die Passivschicht am Stahl punktweise aufdünnen.

Im Ergebnis der Bewehrungskorrosion entstehen vor allem bei Karbonatisierung voluminöse Korrosionsprodukte, die zu erheblichen Druck- und Zugkräften auf den umgebenden Beton führen und diesen schließlich absprengen. Hier wird deutlich, daß die äußerlich sichtbaren Betonabplatzungen erst Folgeschäden im Korrosionsprozeß sind. Besonderheit der chloridinduzierten Korrosion ist, daß sie nicht in jedem Fall zu Hohlstellen und Abplatzungen am Beton führt, so daß die Bewehrung geschwächt werden kann ohne äußerlich erkennbare Anzeichen. Weder Chloride noch die Karbonatisierung sind unmittelbar für den Beton schädlich. Daher ist es wichtig, Korrosionsprozesse so früh wie möglich zu erkennen und ursächlich zu bekämpfen.

Übrigens: Wie funktionieren eigentlich **Tausalze**? Ziel des Straßendienstes ist es, die Fahrwege schnee- und eisfrei zu halten. Während z.B. Splitt die Fahrbahn vorübergehend abstumpfen kann, haben Tausalze ein anderes Wirkprinzip: Die Schmelztemperatur einer wäßrigen Salzlösung liegt viel niedriger als die von Wasser (Eis) - bei optimaler Konzentration von NaCl in Wasser wird ein Schmelzpunkt von -21°C erreicht. Um Eis auf einem gefrorenen Beton zu schmelzen, wird dem Beton Wärme entzogen - auch aus tiefer liegenden Schichten, die sonst nicht frostgefährdet sind. Somit kühlt sich der Beton bei Tausalzeinwirkung u.U. weit unter die Umgebungstemperatur ab. Die klimatische Belastung des Betons wird damit erhöht, und um eine Vielzahl von Frost-Tausalzwechseln zu verkraften, muß ein Straßenbeton besonders dicht sein und über möglichst wenig Kapillarporenraum, in dem Wasser gefrieren kann, verfügen.



Karbonatisierungsbestimmung mit Phenolphthalein

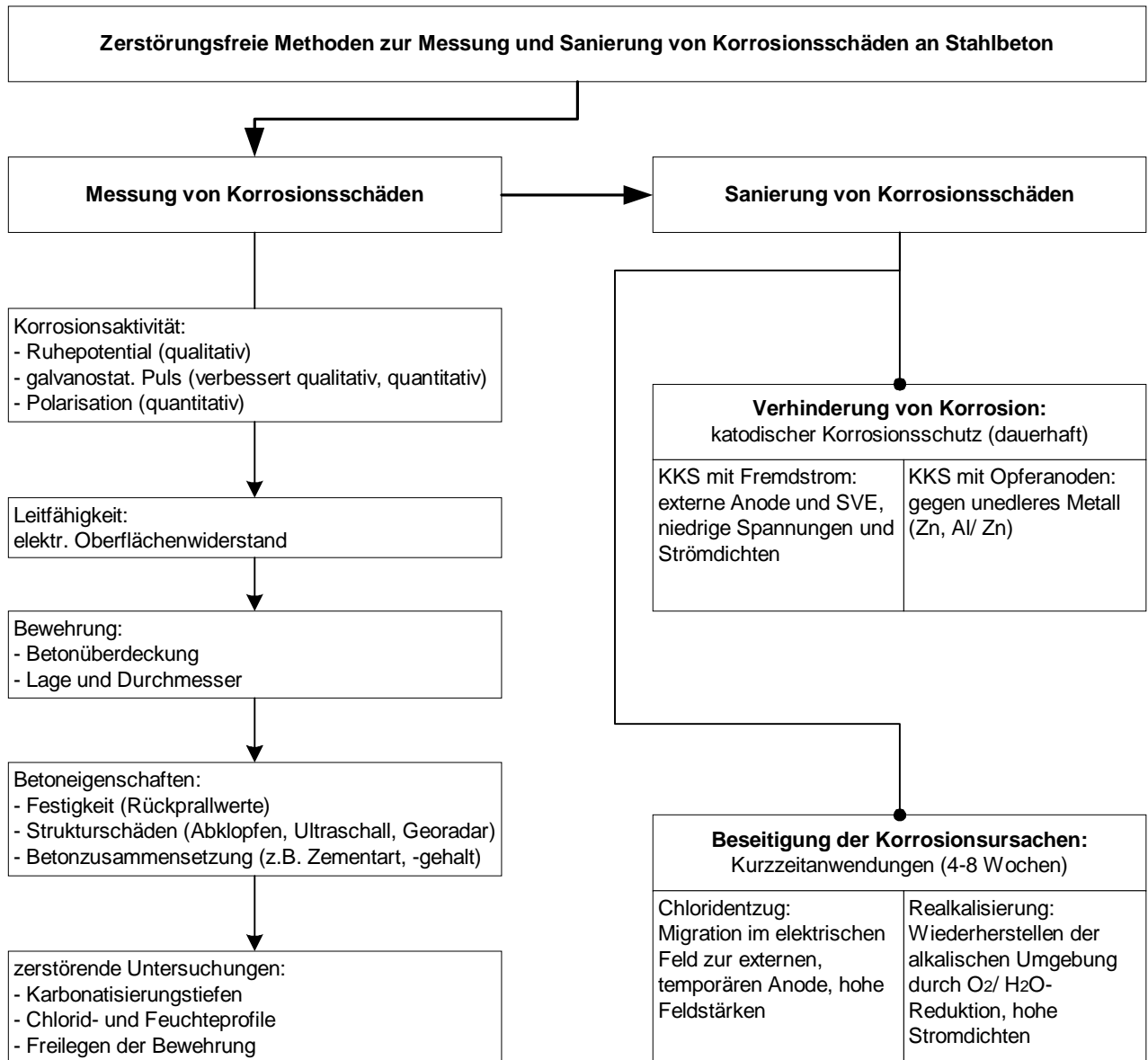


Absenken der Schmelztemperatur durch Tausalze



Elektrochemische, zerstörungsfreie Methoden zur Messung und Sanierung von Korrosionsschäden

Mit elektrochemischen Methoden allein ist es möglich, beginnende Veränderungen auf der Bewehrungs-oberfläche zu erkennen, bevor es zu Zerstörungen am Beton kommt. Gleichzeitig kann bei fachgerechter Kombination der verfügbaren Messungen (sowohl zerstörungsfrei als auch konventionell) Schadensursache und Schädigungsumfang exakt bestimmt werden und damit eine präzise Planung für dauerhafte Instandsetzungsmaßnahmen erfolgen.



Übersicht zu den grundsätzlichen Möglichkeiten und Methoden bei der Messung und Vermeidung bzw. Sanierung von Korrosionsschäden an Stahlbeton



Vermeidung, Messung und Sanierung von Korrosionsschäden:

Konstruktive Maßnahmen: Bereits vor und während der Errichtung eines Stahlbetonbauwerks werden Dauerhaftigkeit und Korrosionsschutz entscheidend beeinflusst. Wichtigster, auch nach DIN 1045 geforderter Parameter ist dabei die Einhaltung einer den Umweltbedingungen angepaßten Mindest-Betonüberdeckung. Weitere Entwurfskriterien sind:

- Berücksichtigung der zu erwartenden Umwelteinflüsse bei der Zementauswahl
- Gewährleisten eines geringen Kapillarporenraumes durch niedrigen w/z-Wert
- Gestalterische Maßnahmen für guten Wasserablauf

Bei der Herstellung tragen Lagesicherung der Bewehrung, verarbeitungsgerechter Betoneinbau (Konsistenz, Zusätze, Verdichtung) und eine ordnungsgemäße Nachbehandlung dazu bei, daß die projektierten Betoneigenschaften auch erreicht werden.

Wenn Schäden an Stahl und Beton bekannt sind, müssen Maßnahmen zur Sanierung eingeleitet werden. Art und Umfang der Reparaturen hängen von vielen, abzuwägenden Faktoren ab (Schadensursache, verbleibende Bauwerksstandzeit, Nutzungsbedingungen) und müssen individuell entschieden werden. Grundsätzlich soll jedoch eine Rehabilitation, d.h. eine Beseitigung der Schadensursachen und nicht nur eine Bekämpfung der Auswirkungen erfolgen. Folgende Herangehensweisen sind bekannt:

Bewehrungsscan: Elektromagnetische Bewehrungsmeßgeräte benutzen die elektrische Leitfähigkeit und/oder die magnetische Permeabilität des Bewehrungsstahls als Meßgrößen für die Lokalisierung und Bestimmung der örtlichen Bewehrung. Das empfangene Signal erhöht sich mit steigendem Stahldurchmesser und abnehmender Entfernung. Alle Stoffe, die in ein magnetisches Feld gebracht werden, unterliegen der magnetischen Polarisation.

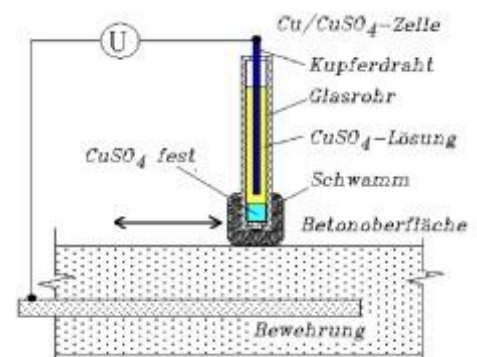
Die Magnetfelder werden mit Wechselstrom entweder über U-förmige Eisenkerne (niederfrequent) oder unter Verwendung von kernlosen Spulen (hochfrequent) erzeugt. Durch Vergleich von Erregerfeld und gemessenem Streufeld können Meßkurven geräteintern ausgewertet werden.

Potentialmessung: Bei der Korrosion von Stahl in Beton kommt es im Beton (Elektrolyt) zu einem Transport von Hydroxylionen von der Katode zur Anode und im Stahl zu einem Elektronenfluß von der Anode zur Katode. Dabei bilden sich im Beton Korrosionsstrom- und Potentiallinien aus. Die Potentiallinien stehen senkrecht auf den Stromlinien und stellen Bereiche mit unterschiedlichen Ladungen, d.h. mit unterschiedlichen Elektronenkonzentrationen dar. Diese sind mit Hilfe von Referenzzellen (Bezugselektroden) meßbar.

Oft wird als Bezugselektrode eine Cu/CuSO₄-Halbzelle (CSE) verwendet, die an ein hochohmiges Voltmeter angeschlossen wird. Mit der Messung können nur augenblickliche Korrosionsaktivitäten erfaßt werden. Die Interpretation der Meßwerte



Bewehrungsscan mit HILTI Ferroskan



Potentialmessung mit Referenzelektrode

erfordert viel Erfahrung und oft auch den Abgleich mit anderen Messungen am Bauwerk (mindestens mit Feuchte- und Betonüberdeckungsmessung). Über die Auswertung der Summenkurve aller Meßwerte können Wertebereiche definiert werden, denen Korrosionswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können.

Weiterhin ist zu beachten, daß dieses Meßverfahren nur zum Detektieren von Makrokorrosion geeignet ist, d.h. für die bei Chloridangriff typische Korrosionsform, nicht jedoch zur Bestimmung von Korrosion in Folge von Karbonatisierung. Das Meßergebnis wird stark von der Betonfeuchte, von der Zementart und auch von der Temperatur beeinflusst. Quantitative Aussagen über Abtragsraten und Korrosionsfortschritt lassen sich nicht treffen. Dennoch ist die Potentialmessung – vor allem in Verbindung mit anderen zerstörungsfreien Messungen – eine sehr rationelle Methode, in kurzer Zeit Korrosionswahrscheinlichkeiten an großen Betonflächen zu bestimmen.

Feuchtemessung: Die Bauteilfeuchte hat wesentlichen Einfluß auf Korrosionsprozesse und auch auf deren Messung. Neben der klassischen Methode, eine Materialprobe zu entnehmen und über Wägung und Trocknung den Feuchteanteil zu bestimmen, gibt es auch zerstörungsfreie Verfahren, so z.B. die elektrische Oberflächen- Feuchtemessung. Die hier verwendete 4-Elektrodenanordnung nach Wenner arbeitet mit Wechselspannung, die über 2 äußeren Elektroden angelegt wird. Aus gemessenen Strom- und Spannungswerten wird ein spezifischer Widerstand in [Ohm*Meter] berechnet, der je nach Elektrodenabstand bis zu einer bestimmten Bauteiltiefe charakteristisch ist. Zur Vermeidung von Meßbeeinflussungen durch die Bewehrung ist es ratsam, den Meßkopf 45° gegen die bekannten Bewehrungslagen zu verdrehen.

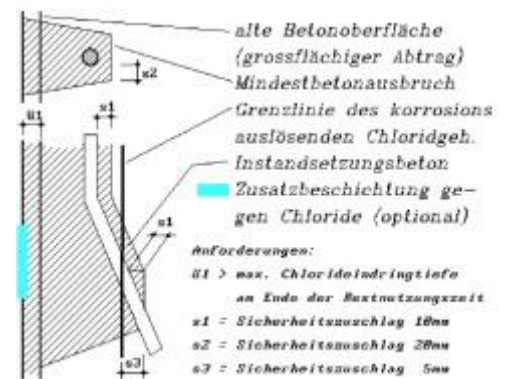
Konventionelle Sanierung: Diese Verfahren zielen auf Teilerersatz der als geschädigt erkannten Betonzonen ab. Beschichtungen sowohl der Bewehrung als auch der Betonoberfläche sollen ein weiteres Eindringen und Wirken von Schadstoffen verhindern. Vorbereitend gehen solchen Sanierungen mindestens visuelle Begutachtungen und Abklopfen der Betonflächen auf hohlliegende Bereiche voraus. Verschiedene Normen und Richtlinien (z.B. ZTV-SIB) schreiben die Arbeitsschritte bei der Betoninstandsetzung genau vor.

Wirkprinzipien der konventionellen Sanierung sind:

- Entfernen und Ersetzen des schadstoffhaltigen Betons um die Bewehrung
- Realkalisierung der Stahlumgebung mit hochalkalischem Reprofilierungsmörtel
- Reduzieren des Wassergehaltes im Beton durch Auftrag von Hydrophobierungsmitteln

Problematisch ist dabei, daß durch die visuelle und akustische Untersuchung nach DIN 1076 Schadensbereiche oft zu gering eingeschätzt und behandelt werden, was nach kurzer Zeit zu erneuter Korrosion in angrenzenden Betonzonen führt.

Katodischer Korrosionsschutz (KKS): Hierbei soll der Stahl in einen thermodynamischen Bereich gezwungen werden, in dem eine Eisenauflösung unmöglich ist. Dazu wird auf der gesamten Oberfläche eines Bauteils eine dimensionsstabile



Instandsetzungsprinzip R1-Cl: Ersatz von chloridbelastetem Beton bis hinter die Bewehrung



Elektrode, z.B. aus Titan, fest installiert (i.d.R. in einer Spritzbetonschicht eingebettet, aber auch bestehend aus leitfähigen Beschichtungen oder Kohlefasernetzen). Mit einer externen Spannung wird ein geringes Schutzpotential für die gesamte verbleibende Standzeit des Bauwerks erzeugt, infolge dessen sich eine Stromdichte von ca. 2-20 mA/m² Betonoberfläche einstellt. Diese elektrochemische Schutzmaßnahme hat sich bereits auf vielen tausend Quadratmetern Stahlbeton bewährt.

Eine weitere Variante besteht im Aufbringen eines Zinküberzuges auf eine belastete Stahlbetonoberfläche, die als Opferanode für den darunterliegenden Stahl wirkt. Diese Methode kommt ohne externe Spannungsquellen aus, ist aber an einen ausreichenden elektrolytischen Kontakt zwischen Zinküberzug und Beton gebunden.

Voraussetzungen für eine korrekte Installation und den Betrieb eines KKS-Systems sind:

- metalleitende Durchverbindung der Bewehrung
- Beseitigung von Null-Betondeckungen
- Einteilung von Schutzzonen entsprechend Betonüberdeckung, Chloridbelastung und anderen zu untersuchenden Parametern
- korrekte Überwachung der Signale an den Referenzelektroden (z.B. 100 mV-Kriterium bei Ausschaltmessungen bzw. sicheres Betreiben des KKS im katodischen Bereich)

Herangehensweisen und Schutzkriterien sind in der DIN EN 12696 beschrieben.

Chloridzug (CE): Mit diesem elektrochemischen Verfahren soll der Chloridgehalt im Beton in einem Zeitraum von wenigen Wochen auf ein unschädliches Maß abgesenkt und die Korrosionsaktivität der Bewehrung beseitigt werden. Dazu wird eine in der Regel dimensionsstabile Elektrode auf die Betonoberfläche montiert und in eine Elektrolytschicht eingebettet.

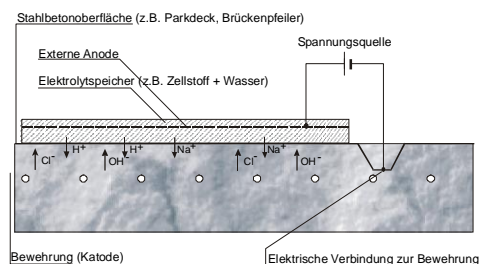
Im elektrischen Feld zwischen Bewehrung und externer Elektrode bewegen sich negativ geladene Ionen (vor allem Chlorid) zur Betonoberfläche. Gleichzeitig werden bei der Reduktion von Sauerstoff und Wasser an der Bewehrung Hydroxylionen gebildet, die zur Alkalisierung der Stahlu Umgebung beitragen und den Korrosionswiderstand verbessern. Die angewendeten Stromdichten sind wesentlich höher als beim Katodischen Schutz – etwa 1 bis 5 A/m². Beton und Bewehrung müssen vor Beginn einer Sanierung genau untersucht werden, um die zu sanierende Fläche in Bereiche mit jeweils gleicher Zusammensetzung zu unterteilen und Unregelmäßigkeiten in der Bewehrungsführung zu erkennen und zu korrigieren.

Mit günstigen Verfahrensauslegungen ist es auch möglich, chloridbelastete Stahlbetonplatten im gesamten Querschnitt zu behandeln und das Chlorid auch zwischen den Bewehrungslagen zu entziehen.

Zu beachten ist weiterhin die Chlorgasentwicklung an der externen Elektrode (Anode), die neben gesundheitsschädlichen Wirkungen auch zu starker Korrosion an Metallbauteilen

Prinzip des elektrochemischen Chloridzuges (CE)

Betriebsspannung zwischen Anode und Katode: ca. 30-40 V
Stromdichte, bezogen auf die Betonoberfläche: ca. 1-5 A/m²
Anwendungsdauer: ca. 4-8 Wochen



Anordnung einer externen Elektrode zum elektrochemischen Chloridzug aus Stahlbeton



Chloridzug auf dem Hohlkastenboden einer Autobahnbrücke (CITec GmbH)



in der Nähe der CE-Installation führen kann. Um diesen Nebeneffekt zu vermeiden, hat die CITec GmbH eine spezielle Elektrode mit Ionenaustauscher entwickelt, der das Chlorid bindet. Bei Erreichen der Sättigungsgrenze im Ionenaustauscher schaltet ein Chloridmeßmodul den betreffenden Flächenabschnitt ab, und die Elektroden müssen regeneriert werden.

Die DIN CEN/TS 14038-2, in der Randbedingungen und Ausführungskriterien beschrieben sind, ist im Entwurfsstadium.

Realkalisierung: Dieses Verfahren hat den gleichen technischen Aufbau wie beim Chloridentzug; wird aber in der Regel über einen kürzeren Anwendungszeitraum (2 - 4 Wochen) bei bis zu 2 A/m² durchgeführt. Sanierungsziel ist die Wiederherstellung des erforderlichen pH-Wertes im Porenwasser an der Bewehrung, was durch die Bildung von Hydroxylionen bei der katodischen Sauerstoff- und Wasserreduktion erreicht wird. Unterstützend setzt man Ca(OH)₂ oder Na₂CO₃ der Elektrolytflüssigkeit zu. Die Randbedingungen gelten wie beim Chloridentzug.

Das Anwachsen der alkalisierten Betonzone kann mit Sprühindikatoren überwacht und sichtbar gemacht werden.

Herangehensweise und Erfolgskriterien sind in der DIN CEN/TS 14038-1 beschrieben.



Realkalisierung des Betons um einen Bewehrungsstahl (CITec GmbH)

Fazit:

Korrosionsvorgänge in Stahlbeton sind sehr komplex, vielfältig in der Erscheinung und oft nur schwer zu erkennen. Daraus ergeben sich hohe Anforderungen an die mit der Feststellung und Reparatur von Korrosionsschäden beschäftigten Personen:

- die Zustandserfassung kann nicht schematisch abgearbeitet werden, sondern muß das Verständnis des Bauwerks und der darin ablaufenden Korrosionsprozesse zum Ziel haben. Die Beschränkung der Untersuchung auf einzelne Parameter kann leicht zu falschen Schlußfolgerungen führen. Alle Meßwerte müssen kritisch betrachtet und hinterfragt werden; Vor-Ort-Arbeiten und Datenanalyse sollten von den gleichen Personen ausgeführt werden.
- es gibt keine Generallösungen oder grundsätzliche Vorzugsvarianten bei der Instandsetzung von Korrosionsschäden an Stahlbetonbauten. Die zur Verfügung stehenden Methoden (konventionelle Sanierung, KKS, Chloridentzug/ Realkalisierung) müssen entsprechend ihrer Vorteile und Nachteile abgewogen werden; vielfach führt eine kombinierte Anwendung zum optimalen, dauerhaften Ergebnis, wobei neben den Baukosten auch weitere Faktoren (z.B. Verkehrseinschränkungen) zu berücksichtigen sind.