Korrosion und Korrosionsschutz von Stahlbauteilen bei Betonkonstruktionen

Autor(en): **Petermann, R.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **90 (1972)**

Heft 5: **SIA-Heft, Nr. 1/1972: Korrosion/Korrosionsschutz; Arbeiten im Ausland**

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85105

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

SIA-Heft Nr. 1, 1972

Korrosion und Korrosionsschutz von Stahlbauteilen bei Betonkonstruktionen

DK 620.193.004.4

Von Dr. **R. Petermann**, Zürich

Der SIA ist Mitglied der Korrosionskommission, die sich mit Fragen der Korrosion unter Einwirkung von Gleichströmen und des Korrosionsschutzes unter derartigen Bedingungen befasst. Die Korrosionskommission unterhält eine Kontrollstelle, in deren Tätigkeit u. a. die Abklärung von Schadenfällen, verursacht durch die genannten Einwirkungen, fällt. Die Kontrollstelle hatte in den letzten Jahren zahlreiche Fälle von Korrosion im Zusammenhang mit Betonstruktionen zu beurteilen, wobei viele der festgestellten Schäden bezüglich ihrer Ursache oft völlig identisch sind.

Die zur Wiederinstandstellung und Behebung von Folgeschäden aufzuwendenden, meist schon beträchtlichen Beträge stellen aber oft nur einen Bruchteil dessen dar, was dann die gesamte, dauerhafte Sanierung der gefährdeten Anlagen erfordert.

Im Folgenden soll über einige ausgewählte Fälle, wie sie uns immer wieder unterbreitet werden, berichtet werden. Nebst der Darlegung der Korrosionsursachen wird auch auf die Frage von Präventivmassnahmen eingegangen. Der Berichterstatter ist sich jedoch bewusst, dass wirksame Schutzmassnahmen oft mit den übrigen Anforderungen der gesamten Konstruktion im Widerspruch stehen. Die nachstehenden Ausführungen betreffend Schutzmassnahmen sind deshalb weniger als ein fertiges Rezept anzusehen, sondern sollen vielmehr den Weg weisen, der zu einer allseits befriedigenden Lösung führen kann.

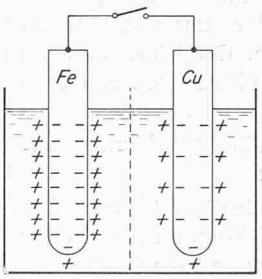
1. Grundlagen der Korrosion unter Einwirkung von Gleichstrom

Zunächst ist festzustellen, dass jede Art Korrosion unter Austausch von Elektronen, also unter Stromfluss, stattfindet. So gibt beispielsweise ein in eine Säure getauchter Eisenstab Elektronen an die vorhandenen Wasserstoffionen ab, wobei das Eisen in den Ionenzustand übertritt und aus den Wasserstoffionen elementarer Wasserstoff entsteht. Hierbei erfolgt der Elektronenaustausch über atomare oder molekulare Dimensionen oder höchstens über die Distanz von Gefügebestandteilen des Eisens. Die hierbei fliessenden Ströme können dann in der Regel nur indirekt festgestellt werden. In ähnlicher Weise erfolgt ganz allgemein die Korrosion in aggressiver Umgebung, wie zum Beispiel die Rostbildung auf Stahl. Diese oft als chemische Korrosion bezeichnete Zerstörung metallischer Konstruktionen soll uns hier nicht weiter beschäftigen.

Weist eine elektrisch verbundene Metallkonstruktion verschiedene Metalle auf, steht eine Metallkonstruktion gleicher Metalle mit verschiedenen Elektrolyten in Kontakt oder wird eine mit einem Elektrolyten in Kontakt stehende Metallkonstruktion durch äussere Gleichströme beeinflusst, kann auch in nicht aggressiver Bettung eine Korrosion auftreten, deren Geschwindigkeit oft ein Vielfaches derjenigen in aggressiver Umgebung (der genannten chemischen Korrosion) ist.

Zum Verständnis dieser Korrosionsart seien kurz die hierbei ablaufenden Vorgänge in Erinnerung gerufen:

Wird ein Eisenstab in einen Elektrolyten, zum Beispiel Leitungswasser, getaucht, geht primär das Eisen gemäss Gleichung (1) in Bild 1 unter Abgabe von zwei Elektronen (Symbol e^-) vom metallischen in den Ionenzustand über. Können die freigesetzten Elektronen nicht abfliessen, lädt sich das Metall gegenüber dem Elektrolyten so lange auf, bis ein für jedes Metall charakteristischer Wert, das Eigenpotential, erreicht wird. Das sich einstellende Potential wird in der Regel um so negativer, je unedler das Metall ist. In einem definierten Elektrolyten ergibt sich hierfür die bekannte sogenannte Spannungsreihe der Metalle. Mit Nachdruck ist aber darauf hinzuweisen, dass diese Klassifizierung nur für einen Elektrolyten bestimmter Metallionen-Konzentration gilt, das heisst für eine Bedingung, welche unter praktischen Verhältnissen kaum je vorliegt. Weicht aber die Elektrolytenzusammensetzung von dieser definierten Metallionen-Konzentration ab, erfahren auch die genannten Potentiale wesentliche Änderungen. So kann das Eigenpotential von Stahl unter praktisch möglichen Bedingungen Werte annehmen, die sich um fast 1 V unterscheiden. Es ist somit möglich, dass die Spannungsreihe der Metalle in natürlichen Elektrolyten wesentliche Änderungen erfahren kann.



$$(1)\ Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$
$$(2)\ H_2O + \tfrac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow 2\,(OH)^-$$
$$(3)\ Fe^{2+} + 2\,(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2$$
$$(4)\ Fe + H_2O + \tfrac{1}{2} O_2 \rightarrow Fe(OH)_2$$
$$(5)\ Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$$

Bild 1. Beispiel des elektrochemischen Umsatzes bei der Korrosion von Stahl

Hat ein Metall in einem Elektrolyten sein Eigenpotential erreicht und tritt keine elektronenverbrauchende Reaktion auf, zum Beispiel Stahl in luftfreiem Leitungswasser, kommt die Reaktion (1), das heisst die Korrosion, zum Stillstand (Gleichgewichtszustand).

Wird im genannten Beispiel dagegen das Leitungswasser belüftet, werden gemäss Reaktion (2) Elektronen verbraucht, und es bilden sich Hydroxylionen, welche gemäss Reaktion (3) mit den Fe^{2+}- Ionen zu Eisenhydroxyd, der ersten Stufe der Rostbildung, umgesetzt werden (Bild 1). Aus den Gleichungen (1) bis (3) ergibt sich die chemische Summengleichung (4).

Die Reaktion gemäss Gleichung (4), das heisst die Korrosion, schreitet so lange fort, als Elektronen verbraucht werden bzw. das System belüftet wird.

Der zum Fortschreiten der Korrosion notwendige Verbrauch der Elektronen kann aber auch dadurch erfolgen, dass der im vorliegenden Beispiel genannte Eisenstab mit einem elektropositiveren Metall, zum Beispiel Kupfer, elektrisch verbunden wird. Hierbei werden gemäss Reaktion (5) Kupferionen unter Elektronen-Aufnahme zu metallischem Kupfer reduziert.

Dieselbe Reaktion tritt auch dann auf, wenn zum Beispiel zwei elektrisch zusammengeschlossene Stahlkonstruktionen sich in einem verschiedenen Elektrolyten, in welchem der Stahl verschiedene Eigenpotentiale annimmt, befinden.

Wie Reaktion (5) weiter zeigt, kann durch Elektronenzufuhr Metall abgeschieden werden, das heisst, die Korrosion kann unterbunden werden. Dies ist grundsätzlich bei allen Metallen möglich, welche sich aus wässerigen Lösungen abscheiden lassen.

Damit ergeben sich zunächst die folgenden wichtigen Feststellungen:

- Wird das natürliche Potential einer Metallkonstruktion in einem Elektrolyten in positiver Richtung verschoben, erfolgt Korrosion.
- Wird das natürliche Potential dagegen in negativer Richtung verschoben, wird die Metallkonstruktion mit zunehmender Potentialabsenkung gegen Korrosion geschützt (kathodischer Schutz).

Nach diesen qualitativen Feststellungen stellt sich die Frage, wie sich eine positive Potentialverschiebung quantitativ auswirkt, das heisst die Frage nach der Korrosionsgeschwindigkeit.

Da der Stoffumsatz direkt mit der Zahl der umgesetzten Elektronen verknüpft ist und diese das direkte Mass des fliessenden elektrischen Stromes darstellen, bestimmt letzterer die Korrosionsgeschwindigkeit. Hierbei werden von einem austretenden Strom pro mA und Jahr rund 10 g oder 1,2 cm^3 Fe aufgelöst.

Da der Strom gemäss dem Ohmschen Gesetz durch den Quotienten Spannung dividiert durch Widerstand festgelegt ist, wird ersterer und damit die Korrosionsgeschwindigkeit um so grösser, je grösser die Spannung und je geringer der Widerstand wird.

Als für diese Vorgänge massgebende Spannung ist nach dem Gesagten die positive Potentialverschiebung gegenüber dem natürlichen Potential anzusehen. Der Widerstand wird durch die Kontaktfläche gegen den Elektrolyten und dessen spezifischen Widerstand bestimmt.

Die sich hieraus ergebenden praktischen Konsequenzen seien an folgendem Beispiel erläutert:

Eine mit einer elektrisch isolierenden Umhüllung (Schutzbelag) versehene Stahlleitung von 5 mm Wandstärke weise einen kreisrunden Defekt in der Umhüllung von 1 cm Durchmesser, D, auf, welcher der Fehlerfläche von rund 1 cm^2 gleichgesetzt sei. Das Stahlrohr liege in einer feuchten Bettung (Erdreich) mit einem spezifischen Widerstand ρ von 1000 Ωcm, entsprechend etwa einem schweren Lehmboden, und das natürliche Potential der Stahlleitung sei um 200 mV in positiver Richtung verschoben. Frage: Wie lange dauert es, bis die Leitung durch Aussenkorrosion perforiert ist?

Der Übergangs-Widerstand R berechnet sich aus dem spezifischen Widerstand ρ der Rohrbettung gemäss

$$R = \frac{\rho}{2\,D} = \frac{1000}{2} = 500\ \Omega$$

und damit der fliessende Strom gemäss

$$J = \frac{U}{R} = \frac{0{,}2}{500} = 0{,}0004\ \text{A} = 0{,}4\ \text{mA}$$

0,4 mA lösen pro Jahr 0,48 cm^3 Eisen auf, das heisst tragen von einer Fläche von 1 cm^2 4,8 mm Eisen bzw. Stahl ab. Die Stahlleitung mit 5 mm Wandstärke wird demnach in etwas mehr als einem Jahr perforiert.

Dieses Beispiel zeigt, wie unter diesen Bedingungen schwere Schäden, verglichen mit der einer Konstruktion zugedachten Lebensdauer, in ausserordentlich kurzer Zeit auftreten können.

Nun stellt sich aber die weitere Frage, ob unter praktischen Bedingungen überhaupt mit derartigen Beeinflussungen zu rechnen ist. Hierzu ist folgendes festzustellen:

Wie schon darauf hingewiesen, können die natürlichen Potentiale von Stahl entsprechend der chemischen Zusammensetzung der feuchten Bettung wesentliche Unterschiede aufweisen. Unter Berücksichtigung praktisch möglicher Bettungsarten können unlegierte Stähle folgende Potentiale annehmen:

Stahl in anaerobem, sulfathaltigem Lehm	bis —0,95 V
Stahl in schweren, mit Humus und Lehm durchsetzten Böden	—0,6 bis —0,8 V
Stahl in durchlässigem, sauberem Kies- oder Sandboden	—0,4 bis —0,5 V
Stahl in feuchtem Beton, in Abhängigkeit der Alkalinität bzw. des Zementzuschlages	—0,05 bis —0,2 V

Die Potentialwerte beziehen sich ausschliesslich auf die für Korrosionsmessungen meistverwendete, gesättigte Kupfer-Kupfersulfat-Bezugselektrode.

Die spezifischen Leitfähigkeiten praktisch möglicher Bettungen können ebenfalls sehr grosse Unterschiede aufweisen. Natürliche, feuchte Böden können folgende mittlere Werte aufweisen:

Reiner Lehm	800 ÷ 1000 Ωcm
Schwere, mit Humus und Lehm durchsetzte Böden	1000 ÷ 3000 Ωcm
Leichte Böden	3000 ÷ 10000 Ωcm
Reine Kies- und Sandböden	bis etwa 20000 Ωcm
Trockene Sandböden	bis über 100000 Ωcm

Diese Werte der möglichen natürlichen Potentiale zeigen, dass die im vorgenannten Beispiel angenommene Potentialverschiebung von 200 mV und damit die Korrosionsgeschwindigkeit bei Vorliegen ungünstiger Verhältnisse noch um ein Vielfaches übertroffen werden kann.

Diese durch natürliche Ursachen möglichen Potentialverschiebungen können noch weit übertroffen werden, wenn äussere Gleichströme eine Stahlkonstruktion in feuchter Bettung beeinflussen.

In diesem Zusammenhang ist noch festzustellen, dass Wechselströme technischer Frequenzen unter den möglichen Bedingungen innerhalb etwa 5 bis 10 V als nicht gefährlich zu betrachten sind.

Auf Grund dieser Überlegungen ergeben sich bei Betonkonstruktionen folgende Gefährdungen:

Wie hinreichend bekannt, erfährt Stahl in feuchtem Beton entsprechend der alkalischen Umgebung eine sogenannte anodische Passivation, das heisst, der Stahl nimmt gegenüber neutraler Bettung ein positiveres Potential an, wird dann edler und ist solange gegen Korrosion geschützt, als die Bettung alkalisch bleibt. In armierten Bauwerken weist einbetonierter Stahl daher normalerweise stets das positivste Potential gegenüber andern, in feuchter, natürlicher Bettung liegenden Stahlteilen auf.

Sind einbetonierte und erdverlegte Stahlteile elektrisch zusammengeschlossen, entsteht unter Potentialausgleich ein sogenanntes Mischpotential, wobei das Potential des im Beton liegenden Stahles in negativer, das heisst günstiger Richtung und dasjenige des erdverlegten Stahles in positiver, das heisst ungünstiger Richtung verschoben wird.

Ist die Oberfläche, das heisst der Übergangswiderstand der in verschiedener Bettung liegenden Stahlteile, je etwa gleich gross, wird sich ein dem arithmetischen Mittel entsprechendes

Mischpotential einstellen. Dies sei am folgenden Beispiel erläutert (Bilder 2a bis 2d):

Eine erdverlegte Stahlrohrleitung und Armierungseisen in feuchtem Beton (zum Beispiel Fundamentarmierung) etwa gleicher Oberfläche seien gemäss Bild 2b miteinander elektrisch verbunden. Das natürliche Potential des Betoneisens betrage 0,10 V, dasjenige der Stahlleitung —0,70 V. Das sich einstellende Mischpotential beträgt dann —0,40 V, wobei das Potential der Stahlleitung um 0,30 V in positiver, das heisst ungünstiger Richtung verschoben wird und dasjenige der Betonarmierung um denselben Betrag in negativer, das heisst günstiger Richtung.

Wäre dagegen, gemäss vorgenanntem, rechnerischem Beispiel, die Stahlleitung mit einem elektrisch isolierenden Überzug versehen, Bild 2c, verschöbe sich entsprechend dem nunmehr kleinen Übergangswiderstand an der Fehlstelle des Überzuges das Potential des Stahlrohres praktisch auf den Wert der Betoneisen, das heisst, die Potentialverschiebung in ungünstiger Richtung verdoppelt sich und damit auch die Korrosionsgeschwindigkeit.

Wäre dagegen das nackte Stahlrohr nur in Verbindung mit einem kurzen Stück Betoneisen, Bild 2d, zum Beispiel weniger als etwa 1 m Länge, in elektrischem Kontakt, könnte letzteres das Potential der Stahlleitung nicht mehr in nennenswerter Weise in ungünstiger Richtung verschieben.

Derartige Korrosionen unter Einfluss von Gleichströmen weisen fast ausschliesslich folgende Merkmale auf: Die Korrosionsstelle ist scharf begrenzt, stark in die Tiefe gehend und unmittelbar nach Freilegung blank, oft glänzend und frei von Rost. Im Gegensatz hierzu ist das Bild des genannten chemischen Angriffes, das heisst, die Angriffsstelle ist unscharf, der Abtrag eher flächenhaft und die Korrosionsstelle oft mit dicken Rostschichten überzogen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

- Die Korrosionsgeschwindigkeit bei positiver Potentialverschiebung ist direkt und proportional dem fliessenden Strom.
- 1 mA austretender Strom trägt pro Jahr rund 10 g oder 1,2 cm^3 Eisen ab.
- Der austretende Strom als Mass der Korrosionsgeschwindigkeit ist um so grösser, je grösser die positive Potentialverschiebung und je geringer der Bettungswiderstand ist.

2. Schutzmassnahmen gegen Korrosion unter Einwirkung von Gleichströmen

Auf Grund vorstehender Ausführungen könnte der Eindruck erweckt werden, dass Bauwerke der genannten Art stets schwere Korrosionsschäden erleiden. Dem ist glücklicherweise nicht so, müssen doch mehrere Bedingungen am Zustandekommen derartiger Schäden gleichzeitig erfüllt sein. Sind diese Bedingungen aber erfüllt, können Korrosionen fast katastrophalen Charakter annehmen.

Bezüglich möglicher passiver Schutzmassnahmen sind die vier folgenden Punkte von primärer Bedeutung:

1. Wie das Reaktionsschema in Bild 1 zeigt, müssen die Konstruktionsteile verschiedener Potentiale, damit der Elektronenaustausch erfolgt, miteinander elektrisch verbunden werden. Werden sie elektrisch aufgetrennt, unterbleibt der Stromfluss und damit die Korrosion.

2. Weiter ist erforderlich, dass sich die Konstruktionsteile verschiedener Potentiale in einem gemeinsamen Elektrolyten befinden. Wird der Elektrolyt elektrisch unterbrochen, wie etwa in Bild 1 durch die punktierte Linie angedeutet, wird der Ionenfluss und damit die Korrosion ebenfalls unterbunden.

3. Da ferner bei gegebener Potentialbeeinflussung der die Korrosionsgeschwindigkeit bestimmende Strom vom Übergangswiderstand abhängig ist, kann durch Vergrösserung des letzteren der Strom auf ein tragbares Mass reduziert werden. Hierbei genügt es schon, diese Massnahme nur an dem einen potentialbestimmenden Konstruktionsteil durchzuführen.

4. Künstliche Potentialabsenkung (kathodischer Schutz). Die Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Schutz dieser Art dürften aber bei den hier zur Diskussion stehenden Bauwerken nur ausnahmsweise erfüllt sein.

Praktisch stehen zur Durchführung dieser Schutzmassnahmen folgende Mittel zur Verfügung:

- Vermeidung elektrischer Verbindungen zwischen innerhalb und ausserhalb feuchten Betons liegenden Stahlteilen, zum Beispiel durch konstruktive Vorkehren oder Einlage isolierender Zwischenstücke oder Zwischenlagen, welche bei geeigneter Wahl der Werkstoffe auch die Übertragung mechanischer Kräfte erlauben.
- Vermeidung der Elektrolyt-Berührung der gefährdeten Konstruktion durch elektrisch isolierende Überzüge. Solche müssen aber weitgehend fehlerfrei sein, da sich der genannten Gründe wegen die Korrosion an Fehlstellen isolierender Schutzüberzüge besonders stark auswirkt.
- Vermeidung niederohmiger Bettungen. Wird beispielsweise eine Stahlrohrleitung statt in Lehm in Sand verlegt, kann der Übergangswiderstand und damit die Lebensdauer um einen Faktor 30 oder mehr vergrössert werden.
- Ein noch besserer, wenn richtig ausgeführt, voll wirksamer Schutz kann, fast unabhängig von der Art der Bettung, durch vollständige Trockenlegung erreicht werden.

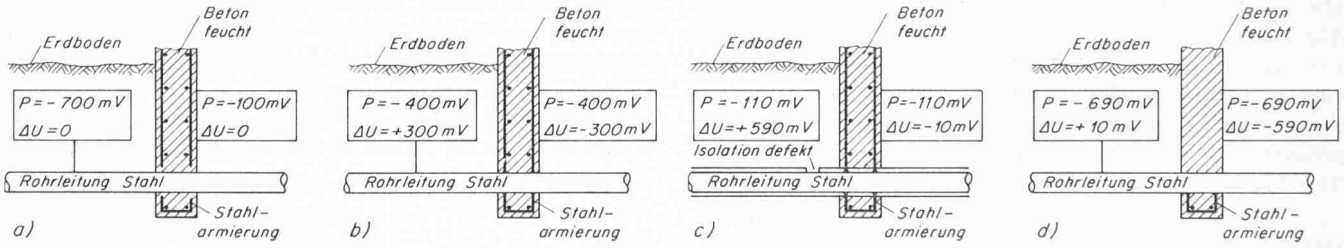


Bild 2a. Keine elektrische Verbindung der Betonarmierung mit der stählernen Rohrleitung. Keine positive Potentialverschiebung der Rohrleitung, *keine Korrosionsgefahr durch Elementbildung*

Bild 2b. Elektrische Verbindung der Betonarmierung mit der Rohrleitung. Rohroberfläche ≅ Armierungsoberfläche. Positive Potentialverschiebung + 300 mV an der Rohrleitung. *Korrosionsgefahr durch Elementbildung*

Bild 2c. Elektrische Verbindung der Betonarmierung mit der Rohrleitung. Rohroberfläche (Isolationsdefekt) < Armierungsoberfläche. Positive Potentialverschiebung + 590 mV. *Durch Elementbildung praktisch verdoppelte Korrosionsgefahr*

Bild 2d. Elektrische Verbindung der Betonarmierung mit der Rohrleitung. Rohroberfläche > Armierungsoberfläche. Nur sehr geringe positive Potentialverschiebung + 10 mV. *Vernachlässigbar geringe Korrosionsgefahr durch Elementbildung*

Bilder 2a bis 2d. Schematische Darstellung der Elementbildung zwischen Stahl in Beton und Stahl in lehmigem, weitgehend anaerobem Erdboden

P = Potential der Stahlkonstruktion gegen die gesättigte Cu/Cu SO_4-Elektrode ΔU = Potentialverschiebung, + = positiv, — = negativ

3. Fälle aus der Praxis

Im Folgenden soll über einige Fälle berichtet werden, wie sie von uns in der Praxis immer wieder festgestellt werden.

3.1 Korrosionen an einbetonierten Stahlkonstruktionen

Die Auffassung, der beste Korrosionsschutz von Stahlbauteilen in Rohrleitungen, Behältern u. a. in feuchter Umgebung, das heisst vor allem bei unterirdischer Verlegung, sei die Einbetonierung, ist richtig, wenn die zu schützende Konstruktion wirklich lückenlos im Beton eingebettet ist und bleibt. Dieser Forderung Nachachtung zu verschaffen ist aber, wie praktische Erfahrungen zeigen, oft mit einem erheblichen Aufwand verbunden.

So wurde eine einbetonierte Treibstoffleitung in durch Bergwasser dauernd durchfeuchtetem Beton innerhalb etwa 5 Jahren von aussen nach innen perforiert. Nach sorgfältiger Freilegung zeigte sich, dass, an der Korrosionsstelle anliegend, ein Stück eines zusammengeknäuelten Papierzementsackes einbetoniert worden war. Bei der Verrottung des Papiers entstehen saure Produkte, die alkalische Umgebung wird damit neutralisiert, und das natürliche Potential des Stahles an dieser Stelle wird um etwa 300 bis 500 mV in negativer Richtung verschoben. Da dieser Stelle aber praktisch voll das Betonpotential aufgedrückt wird, wird das natürliche Potential hier um denselben Betrag in positiver Richtung verschoben, womit die Voraussetzungen erfüllt sind, um gemäss vorstehenden Berechnungen derartige Schäden zu veranlassen.

In einem ähnlich gelagerten Fall wurde ein einbetonierter Lagerbehälter aus Stahl durch Korrosion perforiert. Hier konnte hinter der Korrosionsstelle ein Stück eines hölzernen Werkzeugstieles festgestellt werden. Ursache und Folgen sind dieselben wie im vorgenannten Fall.

Derartige Korrosionen können aber auch durch Infiltrationen von Grund- oder Bergwasser entstehen. Wird durch Risse im Beton oder durch Kiesnester Wasser an die Stahloberfläche geleitet, werden die alkalischen Bestandteile eluiert oder neutralisiert, womit auch hier die genannten Korrosionsbedingungen erfüllt sind. Unter derartigen Bedingungen sind alle einbetonierten Stahlkonstruktionen, wie natürlich auch die Armierungseisen in gleicher Weise als gefährdet zu betrachten.

Muss unter diesen Bedingungen ein Korrosionsschutz gewährleistet werden, ist deshalb der sorgfältigen Einbettung der zu schützenden Konstruktion grösste Aufmerksamkeit zu schenken.

Bestehen bezüglich der Möglichkeit der Durchführung dieser Forderung Bedenken, kann die Lage durch Aufbringen eines geeigneten isolierenden, dichten Überzuges in verschiedener Hinsicht verbessert werden: Der feuchte Beton liegt nicht mehr am Stahl an, damit werden bei Infiltrationen oder Fremdkörpern die gefährlichen Potentialdifferenzen ganz verhindert oder zumindest wesentlich verringert. Wasserinfiltrationen oder Fremdkörper im Beton sind bei umhüllter Konstruktion nicht mehr wirksam. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Einwirkungen mit Fehlstellen des Überzuges koinzidieren, kann durch geeignete Auswahl des Überzuges und sorgfältige, fehlerfreie Applikation vermindert werden.

Bei Rohrleitungen, welche gemischt in Erde und Beton verlegt werden, ist diese Massnahme unerlässlich. Desgleichen, wenn das Objekt kathodisch zu schützen ist.

3.2 In Beton unter Putz verlegte Leitungen

Im Gegensatz zu Stahlrohren bei Strahlungsheizungen, welche direkt einbetoniert werden und deren Betriebstemperatur der Wärmedilatation wegen begrenzt ist, müssen bei Stahlleitungen für thermisch höher belastete Heiz- und Warmwasserleitungen zwischen Rohrwand und Beton Bettungen verwendet werden, welche die Wärmedilatation nicht behindern. Ein bei derartigen Leitungen häufig verwendetes Verfahren besteht darin, dass die Stahlleitung mit Faserzöpfen umwickelt oder mit Isolierhalbschalen aus Kork oder Schaumstoff umhüllt und einbetoniert wird.

Während des Giessens der Betondecke wird überschüssiges Anmachwasser und später Meteorwasser in die poröse Zwischenlage eindringen. Ist das eingedrungene Wasser nicht ausreichend alkalisch, wird sich am Stahlrohr eine gefährliche Potentialdifferenz ausbilden, und die Korrosion beginnt.

Ob es nun zu einem Schaden durch Perforation der Leitung kommt, hängt im vorliegenden Fall allein davon ab, wie rasch der Bau austrocknet. Einen diesbezüglichen Hinweis gibt auch die Feststellung, dass derartige Schäden besonders bei Hochbauten auftreten und dann stets in der untersten Dekke, weil ein Hochhaus eine längere Bauzeit erfordert als ein Gebäude mit wenigen Stockwerken und die wirksame Austrocknung erst später einsetzt, wobei die unterste Decke am längsten feucht bleibt. Die Frage, ob und wann derartige Schäden auftreten, dreht sich deshalb nur darum, wie rasch die Austrocknung erfolgt. In dieser Hinsicht können sich verschiedene konstruktive und bauliche Massnahmen sehr ungünstig auswirken.

Wird zum Beispiel in der Absicht, die Verhältnisse zu verbessern, die poröse Rohrumhüllung mit Kunststoffband umwickelt, um einen besseren Korrosionsschutz zu erreichen, hat dies meist die gegenteiligen Folgen. Die Kunststoffbandage wird beim Giessen der Betondecke fast unweigerlich an mehreren Orten verletzt, so dass trotzdem Wasser in die poröse Isolation eindringt. Da die Wiederverdunstung des eingedrungenen Wassers ausschliesslich über Wasserdampfdiffusion durch die Poren erfolgt, wird die Austrocknung bei gegebener Temperatur um so rascher verlaufen, je grösser der zur Verfügung stehende Porenquerschnitt ist. Eine wasserdampfundurchlässige Bandage mit nur wenigen Fehlstellen behindert diesen Vorgang aber ganz wesentlich.

In gleicher Weise wirkt sich ein auf die Decke aufgebrachter, wasserdampfdichter Plattenbelag aus. Wird ein derartiger Belag aufgebracht, solange die Decke noch stark feucht ist, wird die Wiederverdunstung in gleicher Weise behindert, indem nur noch die im allgemeinen poröse Ausfugung als Diffusionsquerschnitt nach oben zur Verfügung steht.

Oft wird nach der Reparatur derartiger Schäden festgestellt, dass sie einige Wochen später erneut an einem ganz anderen Ort auftreten. Dies wird verständlich, wenn man bedenkt, dass eine Perforation erst festgestellt werden kann, wenn die Leitung in Betrieb ist. Das in der Folge ausfliessende Wasser kann dann, bevor überhaupt etwas festgestellt wird, durch die poröse Rohrumhüllung im dichten Beton über mehrere Meter fliessen, bevor an einer zufälligen Öffnung das Austreten von Wasser bemerkt wird. Damit werden schon ausgetrocknete Partien der Rohrumhüllung wieder durchfeuchtet. So können an Tiefpunkten, wie schon eindeutig festgestellt wurde, Wasseransammlungen entstehen, womit die Voraussetzungen für weitere Perforationen gegeben sind.

Derartige Schäden treten aber nicht nur durch ungenügende oder zu wenig rasche Bauaustrocknung auf. In mehreren gleichartigen Fällen konnte nachgewiesen werden, dass die Rohrisolation durch ungeeignete Bodenabdichtungen bei häufig benutzten Sanitäranlagen dauernd wieder befeuchtet wurde und zu den genannten Folgeschäden Anlass gab. Derartige Durchfeuchtungen können dann aber auch zur Ursache von Korrosionen an andern unter Putz verlegten Leitungen führen.

Zur Vermeidung solcher, meist besonders kostspieliger Schäden ist alles vorzukehren, damit die Rohrbettung möglichst rasch austrocknet. Als diesbezüglich wirksame Massnahmen sind zu empfehlen:

- Die Rohrisolation soll die Wasserverdunstung nicht erschweren.
- Beim Bau selbst ist auf die genannten Bedürfnisse Rücksicht zu nehmen. Wasserdampfdichte Bodenbeläge oder Deckenverkleidungen sollen erst nach Austrocknen der Betondecke aufgebracht werden.
- Durch möglichst frühzeitige Inbetriebnahme der Heizung kann die Austrocknung wesentlich beschleunigt werden, besonders dann, wenn es die Heizanlage gestattet, mit der Heizwassertemperatur knapp über den Siedepunkt des Wassers zu gehen.

3.3 Wasserbauten

An folgenden Bauwerken sind immer wieder Schäden festzustellen, welche auf die genannte Korrosionsursache zurückzuführen sind: Anlagen der Abwasserreinigung, Anlagen der Trinkwassergewinnung, Wehrschützen, Schwimmbäder und Wasserversorgungen für Grossbauten mit Fundamentarmierungen.

Die genannten Anlagen weisen folgende gemeinsame Baumerkmale auf: Es handelt sich um ausgedehnte, stahlarmierte Betonkonstruktionen, welche entsprechend ihrem Verwendungszweck dauernd im Kontakt mit Wasser oder Feuchtigkeit stehen und welche zum Teil ausgedehnte Stahlkonstruktionen aufweisen, welche ausserhalb des Betons ebenfalls dauernd im Kontakt mit Wasser oder Feuchtigkeit stehen (gemeinsamer Elektrolyt) und elektrisch mit der Anlagearmierung verbunden sind.

Soweit die aussenliegenden Stahlbauteile im Kontakt mit Wasser oder feuchtem Erdreich stehen, werden sie in der Regel durch isolierende Überzüge, das heisst Anstriche oder Beschichtungen, gegen Korrosion geschützt. Der modernen Anstrich- und Beschichtungstechnik stehen heute Werkstoffe und Verfahren zur Verfügung, welche den gestellten Anforderungen an den Schutz gegen Feuchtigkeitskontakt durchaus genügen.

Nun ist aber kaum zu vermeiden, dass auch beim besten Anstrich später punktförmige Verletzungen durch mechanische Einwirkungen entstehen. Man denke in diesem Zusammenhang nur an die Wucht der auf eine Wehrschütze aufprallenden Baumstämme bei Hochwasser. In besonderen Fällen ist die Applikation von Anstrichen oder Beschichtungen sogar unzulässig, zum Beispiel dann, wenn es sich um Lauf- oder Gleitflächen unter Wasser handelt.

Weist nun eine im Bereich des Wassers oder feuchten Erdreiches stehende Stahlkonstruktion, welche elektrisch mit der Stahlarmierung verbunden ist, Defekte im Schutzüberzug auf, ist nach vorliegenden Ausführungen nicht nur etwa die Aggressivität des umgebenden Wasser- oder Erdreiches für die Korrosionsgeschwindigkeit massgebend, sondern zur Hauptsache die dann auftretende Potentialverschiebung in positiver Richtung, wobei das natürliche Potential an den Fehlstellen des Anstriches oder des Überzuges um mehrere hundert mV in positiver Richtung verschoben wird. Wir hatten schon verschiedentlich Gelegenheit, in solchen Fällen derartige Potentialverschiebungen tatsächlich zu messen.

Unter diesen Bedingungen ist dann der Stahl bei Fehlstellen des Schutzüberzuges starken Korrosionen unterworfen. Handelt es sich um natürliche Wässer als Elektrolyt, sind die bei genügend hohem spezifischen Widerstand des umgebenden Mediums entstehenden Schäden bezüglich ihres zeitlichen Fortschrittes allenfalls noch tragbar. In Abwässern dagegen, die infolge ihres Salzgehaltes (Kochsalz, abgeschwemmtes Streusalz, neutrale Industriesalze usw.) einen wesentlich geringeren spezifischen Widerstand aufweisen, kann ein Abtrag 10- bis 20-mal schneller erfolgen.

Hierzu ein Beispiel: In verschiedenen Abwasserreinigungsanlagen traten am Heizturm in der aus armiertem Beton erstellten Faulkammer Perforationen der Heizzuleitungen auf, welche durch Korrosion entstanden waren. Die Innenaufbauten wiesen eine gute Beschichtung als Schutz gegen Korrosion auf. Durch Wärmedilatation wurde bei einer Befestigungsbride die Beschichtung durchgescheuert, wobei der Faulschlamm in Kontakt mit der Stahloberfläche geriet. Wie nachträglich durch Potentialmessungen festgestellt werden konnte, wurde an diesen Kontaktstellen durch die Betonarmierung das Potential um etwa 500 mV in positiver Richtung verschoben. Damit waren alle Voraussetzungen für die in Jahresfrist aufgetretenen Schäden gegeben.

Zur Vermeidung weiterer derartiger Schäden wurde folgendes vorgekehrt: Da bei gleichgebauten Anlagen, welche mehr als 10 Jahre störungsfrei im Betrieb waren und deren Innenaufbau keinen Schutzanstrich aufwies, keine Hinweise für eine besondere Aggressivität des anaeroben Faulschlammes (Methangärung) vorlag, wurde der Schutzüberzug entfernt. Der dann fliessende Ausgleichsstrom wird zwar hierdurch wesentlich höher und damit auch der gesamte Abtrag. Dagegen wird die spezifische Stromdichte beträchtlich geringer. Eine Abschätzung führt zu etwa folgenden Beträgen: Bei voller Potentialbeeinflussung 0,5 mA über eine einzige Fehlstelle von 1 cm^2 aus kann ein Rohr mit 6 mm Wandstärke in einem Jahr perforiert werden. Ist dagegen der ganze Stahlinnenaufbau mit etwa 20 m^2 Oberfläche nackt, ist der dann fliessende Gesamtstrom durch den Innenwiderstand dieses galvanischen Elementes bestimmt, welcher etwa 5 Ω beträgt. Bei 0,5 V Spannungsbeeinflussung beträgt der dann mögliche Strom etwa 100 mA, das heisst, es werden, gleichmässigen Abtrag vorausgesetzt, pro Jahr nurmehr etwa 0,015 mm Stahl abgetragen.

Im vorliegenden Fall begnügten wir uns aber nicht mit dieser an sich tragbaren Korrosionsrate, sondern versuchten, die beiden potentialbestimmenden Strukturen, das heisst Innenaufbauten und Betonarmierung, elektrisch zu trennen. In die Zuleitungen wurden Isolierstösse eingebaut, und die Abstützungen durch Isolierzwischenlagen elektrisch getrennt. Nach erfolgter Auftrennung konnte über die Isolierstösse eine Potentialdifferenz von 500 mV gemessen werden, und das Potential des Heizturmes wurde um etwa denselben Betrag negativer.

Damit konnte die eigentliche Ursache, die Wirkung des galvanischen Elementes zwischen Betoneisen und Heizturm, unterbunden werden. Es verbleibt dann die Aggressivität des umgebenden Elektrolyten, deren Wirkung aber meist um ein Vielfaches geringer als unter Einfluss der genannten Gleichströme ist.

Die elektrische Auftrennung der potentialbildenden Strukturen, das heisst der Betonarmierung von den im Kontakt mit Wasser oder Erdbettung stehenden Stahlkonstruktionen, kann in solchen Fällen als wirksamste Massnahme des Korrosionsschutzes angesehen werden. Ganz allgemein dürfte diese Massnahme keine Schwierigkeiten bereiten, wenn sie schon im Projektstadium berücksichtigt wird.

Bei der Durchführung derartiger Massnahmen ist aber noch darauf hinzuweisen, dass sich damit unter Umständen Widersprüche mit Massnahmen des Personen- und Sachschutzes gegen elektrische Überspannungen ergeben können. Wird aber hier auf diese Bedürfnisse schon im Projektstadium Rücksicht genommen, lässt sich in den meisten Fällen ein alle Anforderungen befriedigender Kompromiss finden.

Soll über die genannte elektrische Auftrennung hinaus, zum Beispiel gegen sehr aggressive Bettungsmedien, ein zusätzlicher Korrosionsschutz erreicht werden, kann dies durch den kathodischen Schutz geschehen. Ist ein solcher vorgesehen, ist es auch hier unerlässlich – hierauf ist mit besonderem Nachdruck hinzuweisen –, den kathodischen Schutz in die Planung einzu-

beziehen. Wie die praktische Erfahrung zeigt, ist es oft nachträglich kaum mehr möglich, mit vernünftigem Aufwand eine Anlage für den kathodischen Schutz einzubauen.

3.4 Verschiedene Betonkonstruktionen

3.4.1 Korrosionen an einbetoniertem Stahl

Entsprechend seinem positiven Eigenpotential ist nach den vorstehenden Ausführungen einbetonierter Stahl durch andere Baustoffe kaum gefährdet, da durch diese das Potential von Stahl in Beton meist in negativer, das heisst günstiger Richtung verschoben wird. Anders, wenn durch äussere Gleichstromeinwirkungen das Potential von Stahl in Beton in positiver Richtung verschoben wird. Abhängig von der Alkalinität des Betons und dem Salzgehalt des im Beton enthaltenen Elektrolyten bricht bei einer erzwungenen positiven Potentialverschiebung um einige hundert mV die anodische Passivation zusammen, und die Korrosion setzt ein. Quantitativ gelten dann dieselben Gesetzmässigkeiten, wie sie für nicht in Beton verlegten Stahl dargestellt wurden. Die Folgen der einsetzenden Korrosion bleiben dann aber nicht nur auf eine Querschnittsverminderung beschränkt. Geht Stahl in ein beliebiges Oxyd (Rost), Hydroxyd oder Salz über, tritt infolge Volumenvergrösserung ein Aufplatzen des Betons ein.

Ist mit derartigen positiven Gleichstrombeeinflussungen irgendwelcher Herkunft zu rechnen, zum Beispiel durch Streuströme bei Gleichstrombahnen, sind bei wichtigen Bauwerken Schutzvorkehren zu ergreifen. Dies kann durch aktive Massnahmen, wie durch Drainage oder Soutirageeinrichtungen, welche erlauben, das Potential der zu schützenden Konstruktion auf dem zulässigen Wert zu halten, oder durch Passivmassnahmen wie Feuchtigkeitsisolation (Erhöhung des Übergangswiderstandes) gegen die mit feuchtem Erdreich in Kontakt stehenden Betonteile wie Brückenpfeiler, Brückenjoche, Stützmauern usw. geschehen. Als besonders wirksam sind Massnahmen anzusehen, welche verhindern, dass wichtige Armierungen durch Meteorwasser wieder befeuchtet werden. In absolut trockener Umgebung wird auch eine beträchtliche Potentialbeeinflussung keine Schäden mehr anrichten, da entsprechend dem hohen Widerstand trockenen Betons keine schädlichen Ströme mehr fliessen können.

Dass als Frostschutz dem Anmachwasser keine hygroskopischen Salze wie zum Beispiel Calciumchlorid beigegeben werden, darf heute wohl vorausgesetzt werden.

Im Zusammenhang mit möglichen Potentialverschiebungen soll kurz noch auf die Verhältnisse bei einem besonders anspruchsvollen Bauelement, den Vorspannkabeln, hingewiesen werden. Unter ungünstigen Streustromverhältnissen ist eine Gefährdung dieser Elemente denkbar. Bei der am häufigsten verwendeten Konstruktionsart wird der Hohlraum im Beton zur Aufnahme der Spannkabel durch Einbau sogenannter Casings, meist bestehend aus Stahlwellrohren, ausgespart. Nach Einziehen und Vorspannen wird in den Zwischenraum Zementmilch injiziert. Durch das wasserdampfundurchlässige Casing wird aber das Austrocknen des Injektionsgutes in einer Weise erschwert, dass sich die Frage stellt, ob dies überhaupt je vollständig geschieht. Die Verwendung poröser Casingmaterialien – der Verfasser ist sich der damit verbundenen Schwierigkeiten durchaus bewusst – würde die Austrocknung der Zementmilch erlauben und damit einen praktisch vollkommenen Korrosionsschutz darstellen. Die genannten schädlichen Potentialbeeinflussungen dürften aber nur ausnahmsweise auftreten und können bei Verdacht festgestellt werden.

3.4.2 Felsanker

In zunehmendem Mass werden Stützmauern mittels Felsanker im anstehenden Fels verankert. Bei Auftreten von Bergwasser ist anzunehmen, dass sowohl Betoneisen wie Ankerstäbe in feuchter Bettung liegen. Gemäss vorstehenden Ausführungen sind durch positive Potentialverschiebungen die Felsanker durch Korrosion gefährdet. Die Gefährdung ist hierbei um so grösser, je geringer die im Kontakt mit feuchter Bettung stehende Ankeroberfläche gegenüber der gesamten, in feuchtem Beton liegenden Armierungsoberfläche ist. Dabei ist zu berücksichtigen, dass hierfür nicht nur die geometrischen Verhältnisse massgebend sind. Ankerstäbe können zum Beispiel nur an wenigen Stellen, etwa bei Wasserinfiltrationen in Felsspalten, in feuchter Bettung liegen.

Ist mit derart ungünstigen Verhältnissen zu rechnen, kann auch hier durch elektrische Auftrennung des Felsankers von dem Betoneisen eine ganz wesentliche Verminderung der Gefährdung durch Korrosion erreicht werden.

Da die Felsankerköpfe zur Verankerung in der Regel einbetoniert werden, kann die Kontaktfläche gegen Beton durch isolierende Überzüge, zum Beispiel auf der Basis der gegen Beton beständigen Epoxydharze, allenfalls glasfaserverstärkt, verringert werden. Kleine Beschädigungen im Überzug setzen die Wirksamkeit dieser Massnahme nicht nennenswert herab.

3.4.3 Einbetonierte Masten, Abschrankungen und dgl. aus Stahl

Verschiedene Schäden an derartigen Konstruktionen zeigen, dass solche durch geringfügige Verbesserungen zu vermeiden sind. Vorausgesetzt, dass das verwendete Profil im porenfreien Beton (keine sogenannten Kiesnester) eingegossen wurde, ist die Grenzfläche Beton–Luft besonders dann gefährdet, wenn um das Stahlprofil im Beton eine kleine Vertiefung besteht, in welcher sich Meteorwasser ansammeln kann. Die Gefährdung ist dann wohl so lange tragbar, als es sich um verhältnismässig reines Meteorwasser mit relativ hoher spezifischer Leitfähigkeit handelt. Gerät aber durch Strassenfahrzeuge versprühtes Streusalz in die mit Wasser gefüllte Vertiefung, kann der spezifische Widerstand rund hundertmal geringer und damit die Korrosionsrate um diesen Betrag erhöht werden.

Durch konstruktive Massnahmen sollen derartige Ansammlungen von Flüssigkeit in der kritischen Grenzzone vermieden werden. Wird diese Massnahme noch als ungenügend betrachtet, können durch einen isolierenden Schutzanstrich, etwa 5 bis 10 cm beidseits der Grenzzone, Korrosionen wirksam verhindert werden.

Literatur

Der Leser, welcher diesem Fachgebiet nicht nahesteht und sich eingehender mit vorliegender Materie vertraut machen möchte, hat es nicht leicht, sich anhand zahlreicher kleiner und kleinster Hinweise, verstreut in Publikationsorganen verschiedenster Fachgebiete, zu orientieren [1]).

Dabei ist ferner zu bedenken, dass es sich bei den in vorliegendem Aufsatz behandelten Problemen nur um einen schmalen Ausschnitt aus dem Gebiete der Korrosion und des Korrosionsschutzes handelt. Auch ist nicht zu übersehen, dass für viele Fragen der Korrosion erst in den letzten Jahren eine befriedigende Antwort gegeben werden konnte und weitere Probleme noch zu bearbeiten sind.

Um dem interessierten Leser aber doch einen Hinweis zu geben, sei das jüngst erschienene Handbuch des kathodischen Schutzes von *W. v. Baeckmann* und *W. Schwenk*, erschienen im Verlag Chemie GmbH in Weinheim BRD, empfohlen, welches in einem Kapitel die Grundlagen der Korrosion nach den neuesten Gesichtspunkten behandelt und ausführlich auf die bezügliche Literatur hinweist.

[1]) Vgl. auch *A. Bukowiecki:* Über das Korrosionsverhalten von Metallen im Bauwesen, SBZ 1968, H. 48, S. 856 und *K. Vögtli:* Korrosionsgefahr durch Betoneisen, «Bulletin SEV» Nr. 22, S. 1094, 1971.

Adresse des Verfassers: Dr. *Robert Petermann*, Kontrollstelle der Korrosionskommission, 8008 Zürich, Seefeldstrasse 301.