

Betonfundamente lassen Wasserleitungen korrodieren

Stahl in der Erde rostet, wenn er mit Fundamentern verbunden wird

Berühren sich Metalle verschiedener Güte, bildet sich ein galvanisches Element – das unedlere Metall korrodiert. Der hohe pH-Wert von Beton veredelt die darin eingebettete Stahlbewehrung. Wenn also eine Wasserleitung oder eine Stahlstruktur im Boden mit der Armierung eines Betonfundaments verbunden wird, bildet sich gleichfalls ein galvanisches Element mit einer Spannung von bis zu 400 mV. Je nach Impedanz fließen dann Ströme bis zu 2 A, und die Wasserleitung verliert durch Korrosion jedes Jahr 20 kg Eisen. Gerade bei Erneuerungen und Erweiterungen von Wasserkraftwerken wird diesem Effekt zu wenig Beachtung geschenkt.

Die Nutzungsdauer von metallischen Anlagen wird häufig durch Korrosion beeinträchtigt. Im Verlaufe der letzten Jahrzehnte wurden erhebliche Fortschritte im Korrosionsschutz gemacht, was in vielen Anwen-

Markus Büchler, Daniel Bindschedler

dungen Nutzungsdauern im Bereich von 100 Jahren und mehr ermöglicht. Während beim metallischen Grundwerkstoff kaum Veränderungen vorgenommen wurden, führten neue Beschichtungen und Applikationsverfahren zu einer höheren Dauerhaftigkeit. Trotz dieser Neuerungen werden in der Praxis immer wieder Fälle beobachtet, wo aufgrund der Missachtung der aktuellen Regeln der Technik ein stark erhöhter Korrosionsabtrag erfolgt, der zu einem Versagen von Bauteilen bereits nach kurzer Betriebszeit führt. Dies ist umso ärgerlicher, weil die zugehörigen Mechanismen und die Schutzmassnahmen bereits seit geraumer Zeit bekannt sind und sich viele der Schäden problemlos verhindern liessen.

Es ist allgemein anerkannt, dass Streuströme von Gleichstrombahnen Korrosionsangriffe verursachen können und dass die metallische Verbindung von unterschiedlichen Werkstoffen zu einer erhöhten Korrosionsgeschwindigkeit des unedleren Werkstoffs führt. Trotz der Kenntnis der negativen Auswirkung von Stromfluss und von elektrischen Verbindungen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen wird diesem Zu-

sammenhang bei der Planung und dem Bau von Infrastrukturanlagen kaum Beachtung geschenkt.

Das galvanische Element

Beim Eintauchen von Zink und Kupfer in einen gemeinsamen Elektrolyten, zum Beispiel eine Kupfersulfatlösung, kommt es aufgrund der unterschiedlichen Potenziale der beiden Werkstoffe zu einem Stromfluss und zum Ablauf von elektrochemischen Reaktionen (Bild 1). Diese haben zur Folge, dass Kupferionen auf der Kupferplatte abgeschieden werden, während das Zink durch Korrosion aufgelöst wird. Der durch die Korrosion von Zink ermöglichte Stromfluss wird in Batterien technisch genutzt. Sobald alles Zink wegkorrodiert ist, kommt der Stromfluss zum Erliegen, und die Batterie ist entladen.

Dieser Korrosionsprozess des Zinks kann gestoppt werden, indem die metallische Verbindung zwischen dem Zink und dem Kupfer unterbrochen oder indem der Elektrolyt entfernt wird. So weit sind die Zusammenhänge klar und allgemein akzeptiert. Es ist nun so, dass nicht nur der metallische Kontakt von unterschiedlichen Werkstoffen zur Bildung eines galvanischen Elements führen kann. Auch die elektrische Verbindung von Eisenwerkstoffen, die in unterschiedlichen Medien eingebettet sind, kann zu Differenzen im Potenzial und damit zur Bildung eines galvanischen

Elements führen. Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt bei der elektrischen Verbindung von Stahl im Erdboden mit Stahl im Beton. Da Beton einen hohen pH-Wert aufweist, kommt es zur Ausbildung einer Passivschicht auf der Metalloberfläche. Diese Passivschicht verringert die Korrosionsgeschwindigkeit auf ein technisch vernachlässigbares Mass und führt zu einem elektrochemischen Verhalten, das vergleichbar ist mit einem Edelmetall. Insbesondere steigt das Potenzial an und wird vergleichbar mit jenem von Kupfer. Dieser Passivierung und die sich bildende Potenzialdifferenz kann anhand des Pourbaixdiagramms (Bild 2) nachvollzogen werden.

Die Passivierung von Stahl in Beton hat zur Folge, dass die Verbindung von Gusseisen im Erdboden mit Stahl im Beton zur Elementbildung führt. Dabei kommt es zur Auflösung des Gusseisens, während auf der Stahloberfläche im Beton Sauerstoff reduziert wird. In Bild 3 ist dieser Prozess schematisch für die Hauseinführung einer Wasserleitung dargestellt.

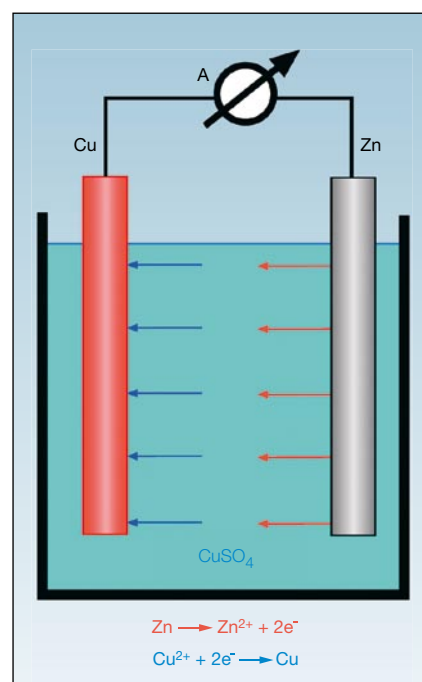


Bild 1 Galvanisches Element durch Verbindung von Kupfer und Zink in einer Kupfersulfatlösung.

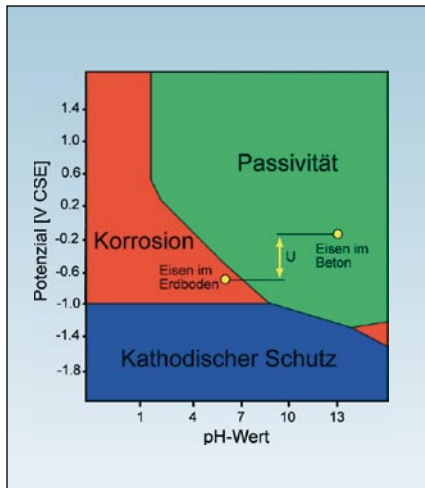


Bild 2 Pourbaixdiagramm von Eisen und die durch die Unterschiede im pH-Wert verursachte Spannungsdifferenz.

Das Erdungsobligatorium an die Wasserleitung hat dazu geführt, dass eben diese Elementbildung in Liegenschaften systematisch vorgenommen wurde. Die dadurch verursachte Korrosion führt typischerweise innerhalb von 10 bis 40 Jahren zum Durchbruch der Rohrleitung (Bild 4). In gewissen ungünstigen Fällen ist der Schaden bereits nach 2 Jahren aufgetreten. Ohne Bildung von galvanischen Elementen kann mit diesen Werkstoffen durchaus eine Lebensdauer von 80 bis 120 Jahren erreicht werden, wie bei den nicht mit Erdungen verbundenen Gasleitungen beobachtet werden kann.

Historische Entwicklung

Die Erdung an die Wasserleitung war aus korrosionstechnischer Sicht so lange unbedenklich, wie keine ausgedehnten Fundamenterder erstellt wurden. Als in den späten 60er-Jahren systematisch stark bewehrte Luftschutzkeller und Stahlbetonfundamente gebaut wurden, hat sich die Situation dramatisch verändert. Zwar wurden diese Fundamente nicht direkt mit der Wasserleitung verbunden, durch Zufallkontakte zwischen dem Potenzialausgleich und der Bewehrung ist es aber in den meisten Fällen dennoch zu einem elektrischen Kontakt gekommen.

Ende der 60er-Jahre konnte die SGK die Korrosionsschäden an Wasserleitungen, die kurze Zeit nach der Fertigstellung einer neuen Grossüberbauung in Genf aufgetreten sind, mit der elektrischen Verbindung zwischen der Wasserleitung und dem Fundamenterder erklären. Es konnte gezeigt werden, dass bei grösseren Überbauungen galvanische Ströme von bis zu 2 A fließen, was zu einem jährlichen Korrosionsabtrag von 20 kg Eisen auf der Wasserleitung

führt. Die Stadt Genf hat in der Folge für sämtliche neuen Gebäude die Trennung der Erdung von der Wasserleitung vorgeschrieben.

Während in Genf die technischen Zusammenhänge sofort erkannt wurden, gestaltete sich die Trennung der Erdung des Elektrizitätswerks von der Wasserleitung im Rest der Schweiz oft schwierig. Zwar hat die Korrosionskommission der SGK bereits 1976 die Richtlinien für die Trennung der Erdung von der Wasserleitung ausgearbeitet. Erst 1991 wurde aber die Vorschrift der Erdung elektrischer Installationen an die Wasserleitung aufgehoben [1,2]. In der Folge wurden auch die Dokumente «Lösungsmöglichkeiten für die Erdung mit und ohne Benutzung des Wasserleitungsnetzes» [3] und «Fundamenterder» [4] erstellt.

Die Erdung an den Fundamenterder anstelle der Wasserleitung war die logische Konsequenz, da ja gerade die niederohmigen Fundamenterder für die Korrosionsproblematik verantwortlich sind. Mit den veränderten Erdungsvorschriften wurde in der Folge auch die Richtlinie C2 überarbeitet und herausgegeben [5].

Die Konsequenzen der Trennung der Erdung von der Wasserleitung

Die Loslösung der Erdung von der Wasserleitung hatte in erster Linie eine Erhöhung der Sicherheit von elektrischen Installationen zur Folge. In der Vergangenheit wurden die Anforderungen an die Personensicherheit als erreicht erachtet, wenn der PEN-Leiter mit der Wasserleitung verbunden war. Die Personensicherheit schien sichergestellt, da längsleitfähige Gussleitungen mit elektrisch leitfähigen Muffen eingesetzt wurden. Diese Längsleitfähigkeit

kann aber durch Korrosion in den Muffenverbindungen beeinträchtigt oder unterbrochen werden. Ausserdem führen der zunehmende Einsatz von beschichteten Rohrleitungen, Kunststoffleitungen, Rohrsystemen ohne leitfähige Muffenverbindung und der Einbau von hochwertigen Armaturen mit isolierender Beschichtung zu einer stetigen Verringerung der Längsleitfähigkeit des Rohrleitungsnetzes. Alle diese Veränderungen aufseiten der Wasserversorgung haben dazu geführt, dass die Wasserleitung keinen zuverlässigen Erder mehr darstellt. Eine Trafostation kann beispielsweise lediglich an einer Mauerdurchführung von wenigen Dezimeter Länge geerdet sein, da die Verbindung zum restlichen Wasserleitungsnetz durch Korrosion in der Muffenverbindung hochohmig geworden ist.

Bei der Verwendung von Kunststoffleitungen für den Hausanschluss wird dieser in gewissen Gemeinden mit einem Kupferkabel überbrückt. Diese teure Massnahme ermöglicht es kurzfristig, die Erdung sicherzustellen, wird aber längerfristig mit dem zunehmenden Ersatz des Leitungsnetzes mit isolierenden und beschichteten Rohren keine zuverlässige Erdung darstellen. Die Erstellung einer definierten, vom zunehmend isolierenden Wasserleitungsnetz unabhängigen Erdung ist daher vor allem aus Gründen des Personenschutzes nötig. Mit der Verwendung von Fundament- und Tiefenerdern wird ein zuverlässiger alternativer Erder erstellt, und es wird möglich, den Personenschutz sicherzustellen und die Wasserleitung von der Erdung abzutrennen, was für diese die Korrosionssituation nachhaltig verbessert.

In der Stadt Zürich wurde im Rahmen der Korrosionsschutz-Koordinationsgruppe, bestehend aus den Vertretern der

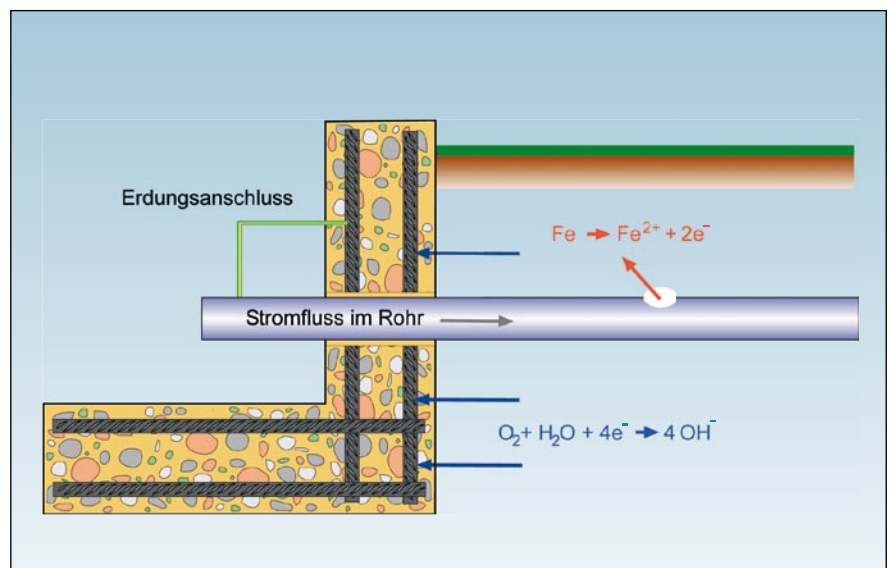


Bild 3 Schematische Darstellung der Korrosionsprozesse bei der Verbindung der Wasserleitung mit dem Fundamenterder.



Bild 4 Korrosion durch Stromeinwirkung an einem duktilen Gussrohr.

Elektrizitätswerke (EWZ), der Verkehrsbetriebe (VBZ), der Erdgas Zürich AG und der Wasserversorgung (WVZ), ab 1990 keine Transformatorstationen und keine Verteilkkabinen mehr an die Wasserleitung angeschlossen. Die Erdung der Gebäude ist nur noch an den Fundament- respektive Tiefenerdern erlaubt. Bei Kunststoffhauszuleitungen wurden die bestehenden Erdungsüberbrückungen unterbrochen. Zudem wurden die Erdungen von grossen Stahlbetonbauten und Überbauungen systematisch von der Wasserleitung getrennt. Dies wurde durch den Einbau eines Isolierstücks in die Wasserleitung und Anschluss des PEN-Leiters auf den Fundament- oder Tiefenerder erreicht. Diese Arbeiten werden durch eine Kontrollmessung des EWZ zur Sicherstellung der Nullungsbedingungen begleitet. Dank diesen Massnahmen sowie dem Einbau von Streustromdrainagen konnte der Anstieg der Rohrleitungsschäden gestoppt werden und ist heute sogar rückläufig [6]. Ähnliche Massnahmen werden aus anderen europäischen Städten berichtet [7].

Elementbildung im Kraftwerksbau

Die Problematik der Verbindung von erd- oder wasserberührten Stahlteilen mit Fundamenterdern ist natürlich nicht auf Wasserversorgungssysteme beschränkt, sondern betrifft sämtliche Infrastrukturanlagen. In den letzten Jahren ist es insbesondere im Kraftwerksbau zu erheblichen Schäden gekommen. Bauteile aus Stahl wurden dabei weniger aus Gründen des Personenschutzes als aus Unkenntnis der korrosionstechnischen Zusammenhänge mit den Fundamenterdern verbunden. Die Problematik ist heute besonders ausgeprägt, da die Unternehmen zurzeit erheblich in die Wasserkraft investieren. Gleichzeitig treten Korrosionsschäden an bereits bestehenden Anlagen nach 30 bis 40 Jahren Betriebsdauer auf.

Zwei Beispiele zeigen die Problematik: Im Rahmen der Gesamterneuerung eines Flusskraftwerks wurden die einzelnen

Wehrfelder neu gestaltet. Dabei wurden im Bereich der Grundablässe neue, stark bewehrte Betonstrukturen eingebaut. Die Lager der Schütze wurden direkt mit der Bewehrung verschweisst. Bereits zwei Jahre nach der Inbetriebnahme kam es zu erheblicher Korrosion (Bild 5). Ursache für die Schäden ist die elektrische Verbindung zwischen der Bewehrung im Beton und den Schützen. Für den Betreiber war der Effekt überraschend, da die alten Schütze über Jahrzehnte hinweg ohne signifikante Korrosionsangriffe betrieben wurden. Die alte Struktur war jedoch nur geringfügig bewehrt und die Bewehrung nicht systematisch elektrisch vermascht. Durch die hochohmigen Verbindungen und die geringe Oberfläche der Bewehrung sind früher bedeutend kleinere galvanische Ströme und entsprechend geringere Korrosionsangriffe entstanden.

Die hohe Bewehrungsdichte der Neubauten sowie die direkte niederohmige Verbindung der Bewehrung haben zu einer starken Zunahme der Korrosionsbelastung geführt. Bei Messungen vor Ort wurde am Bewehrungsstahl ein Potenzial von -200 mV CSE ermittelt. Das Potenzial von Stahl in Wasser betrug ca. -400 mV CSE. Dadurch entsteht eine Zellspannung von 200 mV. Angesichts des niederen Ausbreitwiderstands des Fundaments treten erhebliche Korrosionsströme auf. Bei Fehlstellen

in der Beschichtung wurden Abtragsgeschwindigkeiten von bis zu $1,2$ mm pro Jahr gemessen.

Dieselben Probleme können ebenso bei erdvergrabenen Kraftwerksteilen auftreten. So wurden bei einer im Rahmen einer Kraftwerkserweiterung neu in Betrieb genommenen Druckleitung nach 6 Jahren Korrosionsangriffe mit einer Tiefe von bis zu 3 mm gefunden. Die Druckleitung ist im Kraftwerk direkt mit Turbine und Generator – und folglich mit dem Fundamenterder – verbunden, was zur Bildung eines galvanischen Elements führte. Die Druckleitung war zudem mit einer hochwertigen Korrosionsschutzbeschichtung versehen. Da bei Verlegearbeiten immer mit punktuellen Beschädigungen der Beschichtung zu rechnen ist, konzentriert sich der gesamte Stromaustritt auf diese wenigen Defekte. Dies führte zu den hohen lokalen Abtragsgeschwindigkeiten von $0,5$ mm pro Jahr. Bei älteren Beschichtungen minderer Qualität wurden zum Teil bedeutend geringere Korrosionsgeschwindigkeiten beobachtet, da sich der Strom auf eine grössere Metalloberfläche verteilt. In diesem Fall ist also die hohe Qualität der Beschichtung, zusammen mit der korrosionstechnisch unzulässigen Verbindung mit dem Fundamenterder, für die hohe Korrosionsgeschwindigkeit verantwortlich.



Bild 5 Korrosion an einem Segmentschütz mit starker Pustelbildung.

Bilder: SGK

Generell führen die aufgrund der neuen Normen erhöhte Bewehrungsdichte sowie die erhöhten Umhüllungsqualitäten zu einer stärkeren Korrosion. In der Folge treten nach Erneuerungen und Sanierungen heute oft auch an jenen Anlagen Probleme auf, die bisher keine Beeinträchtigung der Lebensdauer durch Korrosion aufwiesen. Natürlich beschränkt sich die Problematik bei Kraftwerken nicht auf die elektrifizierten Zentralen. Fixpunkte mit Bewehrung wirken genauso als Fundamenterder und ermöglichen eine Elementbildung. Aufgrund der Erfahrungen mit verschiedenen aktuellen Druckleitungsprojekten ist davon auszugehen, dass oft ein Zufallskontakt gegeben ist, sofern er nicht sogar durch Verschweissen von Rohr und Bewehrung gezielt erstellt wurde.

Der Einfluss des Bodenwiderstands

Natürlich ist die Problematik nicht in allen Städten und bei allen Kraftwerksbauteilen gleich ausgeprägt, obwohl die treibende Spannung in allen Fällen 200 bis 400 mV beträgt. Die Hauptursache für die Unterschiede liegt in den zum Teil erheblichen Unterschieden im Bodenwiderstand begründet. So zeigt Zürich in den Bereichen mit niederohmigen Böden bedeutend mehr Korrosionsschäden als Basel und Bern, die auf hochohmigem, kiesigem Untergrund gebaut sind. Ebenso führen die felsigen Untergründe bei vielen Kraftwerksanlagen dazu, dass die Korrosionsschäden erst nach 30 bis 40 Jahren Betriebsdauer auftreten.

Im Sinne der Werterhaltung der Infrastrukturanlagen sowie der langfristigen Erhaltung einer gesicherten Erdung ist es sinnvoll, wenn die Erdung von der Wasserleitung getrennt wird. Insbesondere bei Kraftwerksanlagen ist es wesentlich, im Rahmen der zurzeit aktuellen Erneuerungsarbeiten den Stand der Technik bezüglich Korrosionsschutz zu berücksichtigen. Überall dort, wo grössere Betonfundamente erstellt und in den Potenzialausgleich einbezogen werden, besteht die Gefahr einer stark erhöhten Korrosion. Durch einfache Massnahmen in der Planungsphase lässt sich diese Problematik eliminieren.

Referenzen

- [1] Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung StV), SR 734.2.
- [2] Regeln des SEV: Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen (SEV 3755)

- [3] Leitsätze des SEV 4113: Fundamenterder.
- [4] Leitsätze des SEV 4118: Lösungsmöglichkeiten für die Erdung mit und ohne Benützung des Wasserleitungsnetzes.
- [5] Richtlinie C2 der SGK: Richtlinien zum Korrosionsschutz von erdverlegten metallischen Anlagen.
- [6] A. Rieder: Substanzerhaltung als Daueraufgabe. GWA, 8, 615-622 (2007).
- [7] H. Gaugler, H.-J. Kocks: Sinn und Unsinn von Nutzungsdauerstatistiken. 3R international, 6, 46 385-391 (2007).

Angaben zu den Autoren

Dr. **Markus Buechler** ist seit 2000 Leiter der Forschung und Entwicklung und seit 2006 zusätzlich auch Geschäftsführer der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz.

SGK, 8005 Zürich, markus.buechler@sgk.ch

Dr. **Daniel Bindschedler** ist seit 1988 Mitarbeiter der Schweizerischen Gesellschaft für Korrosionsschutz und ist in dieser Tätigkeit massgeblich an der Erarbeitung der für Elementbildung und Erdung relevanten Richtlinien beteiligt.

SGK, 8005 Zürich, daniel.bindschedler@sgk.ch

Résumé

Les fondations en béton provoquent la corrosion des conduites d'eau

Dans la terre, l'acier rouille s'il est en contact avec la prise de terre de fondation. Dès que des métaux différents se touchent, il se forme un élément galvanique – le métal moins noble est sujet à la corrosion. Il se trouve que le haut coefficient pH du béton anoblit l'armature en acier qui y est intégrée. Si donc une conduite d'eau ou une structure d'acier dans le sol est reliée à l'armature de la fondation en béton, il se forme également un élément galvanique dont la tension peut atteindre 400 mV. Suivant l'impédance, des courants de jusqu'à 2 A peuvent circuler et la conduite d'eau perd chaque année 20 kg de fer par suite de la corrosion. Lors de rénovations ou d'extensions de centrales hydrauliques, on n'attache pas suffisamment d'attention à ce phénomène.