

---

# Frust mit Rost? Instandhaltung von Korrosionsschutzsystemen

Ferdi Rickenbacher, Ingo Wulff, Hombrechtikon

---

## Zusammenfassung

Bei grösseren Bauwerken folgt der Wertschöpfung die Werterhaltung auf dem Fuss, weil beispielsweise auch Korrosionsschutzmassnahmen unter Korrosionsbelastungen nur befristet wirken. Die Planung und Projektierung evaluiert geeignete Systeme, die auch punkto Erhaltung die Anforderungen technisch und wirtschaftlich optimal zu erfüllen suchen. Angesichts der exponentiell wachsenden Unterhaltskosten stellt sich die Frage, ob dies effizient geschah. Der Artikel nimmt zu diesem Problem und zum Entwurf der SIA-Norm 469 Stellung und erörtert anschliessend einige praktische Probleme bei der Inspektion und Instandstellung anhand des Ausfallverhaltens dreier typischer Korrosionsschutzsysteme bzw. Werkstoffgruppen.

## La rouille, une frustration? Entretien de systèmes de protection contre la corrosion – Résumé

Pour les constructions d'une certaine importance, la conservation suit immédiatement la création de plus-values, car par exemple, les mesures de protection ne sont effectives qu'à court terme pour ce qui est des contraintes dues à la corrosion. Des systèmes appropriés sont évalués lors de la planification; ils tentent de remplir les exigences techniques et économiques de manière optimale du point de vue de l'entretien également. Le problème de savoir si cela a été fait de manière efficiente se pose en regard des coûts d'entretien qui explosent de façon exponentielle. La présente contribution prend position sur cette question et sur le projet de norme SIA 469; elle discute ensuite de quelques solutions pratiques pour l'inspection et la remise en état, à l'aide du comportement de défaillance de trois systèmes typiques de protection contre la corrosion ou groupes de matériaux.

## Frustration with Corrosion? Maintenance of Corrosion Protection – Summary

Subsequent to the net value of larger constructions follows immediately the preservation of this value, because the corrosion protective measures, for instance, act only limited under corrosion stresses. The planning evaluates suitable systems which optimally try to fulfil the technical and economic requirements. In view of the exponentially growing maintenance costs the question arises, whether this occurred efficiently. The article comments on this problem and on the draft of the SIA-Standard 469. Furthermore, it discusses a few practical problems of inspection and corrective maintenance illustrated on the failure behaviour of three typical corrosion protection systems resp. material groups.

---

## 1. Synergien zwischen Wertschöpfung und Werterhaltung

Seit gut 100 Jahren werden technische Werkstoffe gegen Korrosion geschützt, damit sie ihre Aufgabe länger erfüllen können. Dies geschieht mit unterschiedlichem Erfolg, wie die Vergänglichkeit technischer Bauwerke eindrücklich zeigt. Die dabei entstehenden Verfärbungen, Abbau- und Korrosionsprodukte betreffen eine Phasengrenze zwischen der aggressiven Umgebung und dem Grundwerkstoff bzw. seinem Schutzfilm.

Nun beeinträchtigen diese Erscheinungen einerseits die Ästhetik, andererseits auch die Verfügbarkeit der Anlage sowie die Sicherheit von Personen und weiteren Sachgütern. Folglich benötigen Bauwerke und Anlagen mit langer Lebensdauer (Nutzungsdauer) verschiedene Reparaturmassnahmen zur Wiederherstellung des Korrosionsschutzes. Dass das keine leichte und schon gar keine billige Angelegenheit ist, belegen u. a. regelmässige Meldungen über exponentiell gestiegene *Unterhaltskosten* von öffentlichen Bauten. Leider ergeben sich daraus mehr Grundsatzdiskussionen und Blockierungen um geplante Neuinvestitionen, als dass die Erkennt-

nisse aus der Instandhaltung in die Planung und Projektierung einfließen. Dieses fehlende Feedback wird zu einer weiteren Kostenzunahme für *Erhaltungsmassnahmen* führen, unterstützt durch fehlende oder untaugliche Korrosionsschutzkonzepte [1], die Vergabe an den billigsten (nicht preisgünstigsten) Bieter und die fehlende oder ungenügende Ausführungskontrolle. Im besten Fall wird gerade eben die Gewährleistungspflicht erfüllt. Die Planungs- und Ausführungsünden fallen dann zu Lasten des geplagten Unterhaltsbudgets.

## 2. Die SIA-Normen zur Erhaltung von Bauwerken

Die SIA-Normen 2002 und 169 definieren «Erhaltung» als «das Bewahren der Gebrauchstauglichkeit durch einfache und regelmässige Massnahmen». Darunter fallen die Tätigkeiten «Überwachung, Unterhalt/Instandhaltung und Erneuerung».

Demgegenüber definiert DIN 31 051 den Begriff «*Instandhaltung*» als «... Massnahmen zur Bewahrung und Wiederherstellung des Sollzustandes sowie zur Feststellung des Ist-Zustandes von technischen Mitteln eines Systems.» Instandhaltung ist also der Oberbegriff von Wartung, Inspektion und Instandstellung. Diese DIN-Definitionen wirken griffiger. Trotzdem sind die in der Schweiz geltenden technischen Regeln einzuhalten, das heisst u. a. die SIA-Normen. Dieser Umstand und der in der Vernehmlassung stekende Entwurf der SIA 469 als Nachfolger der SIA 169 (1987) sind einige Betrachtungen wert.

Der Ingenieur, der mit der Aufgabe einer Hauptinspektion betraut wird, erwartet von einer Norm mit dem Titel «Erhaltung von Bauwerken» zur Organisation, Durchführung und Untersuchungsmethodik klare Angaben oder entsprechende Querverweise. Die Ist- und Soll-Zustände beschreiben eine «Vorratsmenge von Funktionserfüllungen» oder, einfacher und korrosionsschutzgerechter ausgedrückt, den «Schutzwert» bzw. «Abnutzungsvorrat».

Die SIA 169 bietet (noch) einige wertvolle *Checklisten*, die aber punkto Korrosionsschutz lapidar kurz sind. Der Entwurf der SIA 469, der «... die fachgerechte und wirtschaftliche Erhaltung von Bauwerken» bezweckt und sich «... an die vom Eigentümer beauftragten Fachleute» richtet, kann (unserer An-

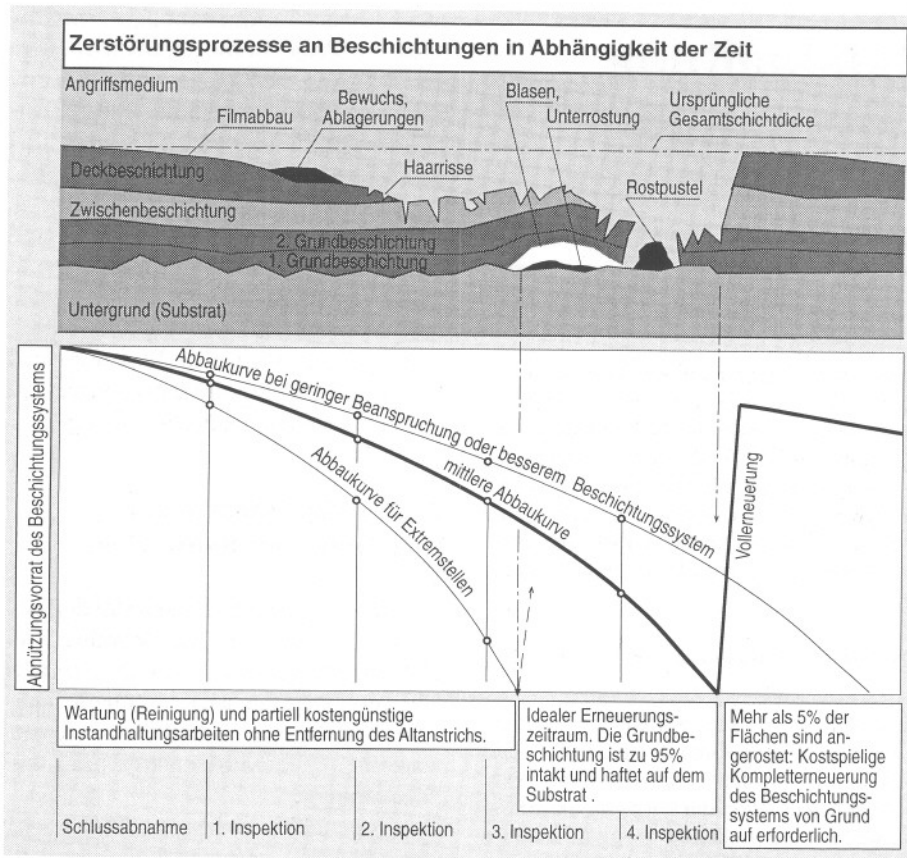


Abb. 1 Der «Abnutzungsvorrat» eines Korrosionsschutzsystems ist das Resultat verschiedener Planungs-, Ausführungs- und Unterhaltmassnahmen. Das Ausfallverhalten ist von einem ungleichmässigen Abbau geprägt, der an exponierten oder inneren Schwachstellen schneller abläuft, so dass diese den Erneuerungszeitpunkt des Beschichtungssystems bestimmen. Diese Stellen erfordern im Hinblick auf geringe Instandhaltungsaufwände bereits in der Planung und Fertigung besondere Massnahmen und Sorgfalt.

sicht nach) die korrosionstechnischen Ziele nicht erfüllen mit folgenden Begründungen:

- Die Checklisten für wiederkehrende Abläufe sind vollends entfallen. Dafür sind der organisatorische Anteil und die (geänderten!) Begriffsdefinitionen ausgedehnt worden.
- Es fehlen Informationen oder Querverweise für fachgerechte Durchführung, erforderliche Fachkompetenz, Untersuchungsmethodik und das Ausfallverhalten von Werkstoffen.
- Das Thema Sicherheit ist bezüglich Bauwerk sehr allgemein gehalten. Die Verantwortlichkeit der beauftragten Fachleute wird nicht behandelt (es sei an den tragischen Unfall «Hallenbad Uster» und die Produkthaftung erinnert).
- Das bisherige Inspektionsintervall von 5 Jahren, resp. nach SIA 469 von «mind. 6 Jahren», berücksichtigt nicht die unterschiedlichen und zeitlichen Ausfallverhalten der realen «verarbeiteten Werkstoffe» in entsprechenden Angriffsmedien.

- Bei soviel Organisation überrascht, dass das Feedback von der Instandhaltung an die Planung, beispielsweise nach Schadensfällen, nicht auch geregelt ist.

### 3. Korrosionssysteme und Korrosionsschutzkonzept

Je nach Nutzung und Belastungen stellen sich an die Phasengrenze, gebildet aus dem Substrat (z. B. eine Metallkonstruktion) und der unmittelbaren Umgebung, Anforderungen bezüglich Festigkeit, Formänderung, Korrosionsbeständigkeit, Verschleiss, Farbtongebung, Brandschutz, Dichtigkeit, Reinigung, Rauigkeit, Glanz, um nur einige zu nennen.

Pro Korrosionssystem «Werkstoff und Angriffsmedium» sind somit geeignete Profile von Schutzeigenschaften (Korrosionsschutzsysteme) schon in der Projektierung im Rahmen des Korrosionsschutzkonzepts [1] festzulegen. Dazu eignen sich sowohl «beständige Werkstoffe» (z. B. Chrom-Nickel-Stahl)

als auch effizientere Werkstoffkombinationen, die auf einer Aufgabenteilung Tragfunktion/Schutzfunktion basieren (z. B. metallischen Überzügen oder Beschichtungen). Diese Schutzsysteme widerstehen aber immer nur eine begrenzte Zeit und einer begrenzten Anzahl von Umgebungseinflüssen. Sie benötigen deshalb Überwachung und Instandhaltung.

Die folgende Ausführung beschränkt sich auf das Gegenüberstellen der korrosionsbedingten Ausfallverhalten von Beschichtungen und von feuerverzinktem sowie hochlegiertem Stahl. Dazu wurde in den Abbildungen eine unübliche, vereinfachte Darstellungsweise gewählt, die mehr den praktischen Belangen dient.

### 3.1 Ausfallverhalten von beschichteten Konstruktionen

Metallkonstruktionen erhalten Beschichtungen, um einerseits in aggressiver Umgebung bestehen zu können, und andererseits zur farblichen Gestaltung. Mit organischen Beschichtungen kann bei optimaler Oberflächenvorbereitung, Ausführung und erwarteter makroklimatischer Beanspruchung eine Funktionsfähigkeit (Schutzdauer) von 10 bis 25 Jahren erzielt werden, in bestimmten Fällen bis 40 Jahre.

Bei einem kalkulierten Abbau und erwartungsgemässer Objektnutzung können in etwa drei Stufen und Gruppen Alterungsvorgänge unterschieden bzw. durchlaufen werden (Abb. 1):

- Glanzverlust, Farbtonänderung, Kreiden, Deckschicht-Filmabbau
- Versprödung (zunehmende Glasübergangstemperatur), Quellung/Entquellung, partielle Mikroausbrüche, Haarrisse, weiterer Filmabbau
- Unterwanderung (mit Blasen), Delamination, Unterrostung, Flächenrost, Perforationen

Bei einem «nicht kalkulierten Abbau» wird Stufe III direkt und oft noch innert Gewährleistungsfrist erreicht. Die möglichen Ursachen reichen von korrosionstechnisch unkorrekter Konstruktion und Fertigung, mangelhafter Oberflächenvorbereitung, untauglichem oder fehlerhaftem Beschichtungsmaterial bis zu Applikationsmängeln.

Die Haltbarkeit eines Beschichtungssystems im Industrie- und Bautenbereich wird heute paradoxerweise statt durch hochwertige Beschichtungsmaterialien zunehmend durch Schwachstellen dik-

tiert. Dabei wird die Schutzdauer nicht durch einen stofflichen Abbau aufgrund der Korrosionsbelastung, ausser bei nicht vorgesehenen Mikroklimatas, sondern vielmehr durch innere Defekte massiv verkürzt. Darunter fallen Beschichtungsverletzungen, Filmstörungen (Poren), Vernetzungsstörungen (Lösemittelretention, unzulässige Vernetzungstemperaturen) und insbesondere Untergrundverunreinigungen [2], folgenreiche Defekte also, die dank heutiger «Just-in-time-Fertigung» und forcierten Fertigungsbedingungen immer häufiger anzutreffen sind.

Sobald 5% der Oberflächen korrodiert sind, gilt die Schutzdauer als beendet. Ein partielles Ausflicken ist dann meistens nicht mehr wirtschaftlich, statt dessen wird eine kostspielige *Vollerneuerung* des ganzen Beschichtungssystems fällig. Nicht zuletzt deshalb hat sich in den letzten Jahren die Erkenntnis durchgesetzt, die Funktionstüchtigkeit des Beschichtungssystems durch partielles Erneuern frühzeitig zu verlängern. Wo dies aus Wirtschaftlichkeitsüberlegungen oder wegen ungenügender Zugänglichkeit nicht möglich ist, bleibt als einzige Möglichkeit, für den Erst-

schutz alle Register der Korrosionsschutzkunst zu ziehen.

### 3.2 Ausfallverhalten feuerverzinkter Konstruktionen

Die Korrosionsvorgänge begünstigenden Stimulatoren, z. B. Schwefeldioxid, bilden auf Eisenwerkstoffen in einer Zwischenstufe Eisensulfat, das durch Hydrolyse in Oxid und Säure zerfällt. Die Säure fördert den weiteren Angriff, wobei der entstehende Rost wegen seiner lockeren Struktur und schlechten Haftung keinen wirksamen Schutz bietet. Dagegen wird bei Zink die Säure an relativ schwerlösliche basische Salze gebunden [3].

Zink korrodiert unter atmosphärischer Belastung «gutmütig» nach einem linearen Zeitgesetz (Abb. 2). Die Zinkcarbonat-Deckschichten (Zink-Patina) bilden sich im Normalfall (d. h. nicht zu saure, aufkonzentrierte Niederschläge) nach Abwitterung immer wieder neu durch das darunter befindliche Zinkangebot. Weiche Regenwässer mit Kohlensäure und Sauerstoff hingegen greifen frisch verzinkte Flächen unter leicht löslicher Weissrostbildung (Zinkoxid-

hydrat) verstärkt an, da die schützenden Oxidschichten (schwerlösliche Zinkcarbonate) fehlen [4].

Schwieriger vorauszusagen ist das Verhalten von Zink in *wässrigen Medien*, da diese wesentlich heterogener wirken als die atmosphärische Korrosion. Bei Kontakt mit Wasser findet eine zwangsläufige Korrosion statt. Sie ist mit einer Abgabe von Zink-Ionen ans Wasser verbunden. Der Abbau von Zink wird im wesentlichen bestimmt durch pH-Wert, Temperatur, Fließgeschwindigkeit, Wasserhärte bzw. den Gehalt an Kohlensäure, Sauerstoff, Salzen sowie von Zink-Ionen. Im üblichen Anwendungsfall und bei pH-Werten von 6 bis 12 findet ein geringer, flächiger Abtrag statt. Die Korrosion der im Neuzustand hell und silbrig glänzenden Reinzinkphase mit Zinkblumen ergibt zunächst die aus Zink-Korrosionsprodukten bestehenden Deckschichten. Bei der danach folgenden flächigen Korrosion der Eisen-Zink-Legierungsphasen nimmt der Gehalt an Eisen-Korrosionsprodukten zu. Die weitere Korrosion führt zu einer aus gealterten Eisen-Korrosionsprodukten bestehenden, bräunlichen Schutzschicht.

Die *ungleichmässige* Korrosion (Muldenfrass, Lokalkorrosion) ist auf Korrosionselemente und Heterogenitäten der Zinkoberfläche (keine Reinzinkphase, Zinkgries, Schweissrate), sowie durch Ablagerungen und Gasblasen. Bei Zinküberzügen mit durchgewachsenen Eisen-Zink-Phasen (hellgraues Aussehen) kann auch ein selektiver Abbau an den Korngrenzen entstehen.

Eine sehr rasche, örtliche Korrosion entsteht bei Elementbildung mit betonumhülltem Armierungsstahl oder mit hochlegiertem Stahl, wie etwa bei fehlenden oder defekten galvanischen Auftrennungen in Mischkonstruktionen [5].

### 3.3 Ausfallverhalten von hochlegierten Chrom-Nickel-Stählen

In den letzten Jahren kamen vermehrt hochlegierte Chrom-Nickel-Stähle für Rohrleitungen und Behälter auf *Abwasserreinigungsanlagen* und ähnliche Industrien zur Anwendung. Teilweise sollten sie den feuerverzinkten Stahl ersetzen mit dem Zweck, weniger Korrosionsprobleme zu bereiten.

Obwohl die Komponenten lediglich wässrige Medien führten, entstanden verfrühte Ausfälle infolge Lokal- oder Lochfrasskorrosion, die die auslegenden

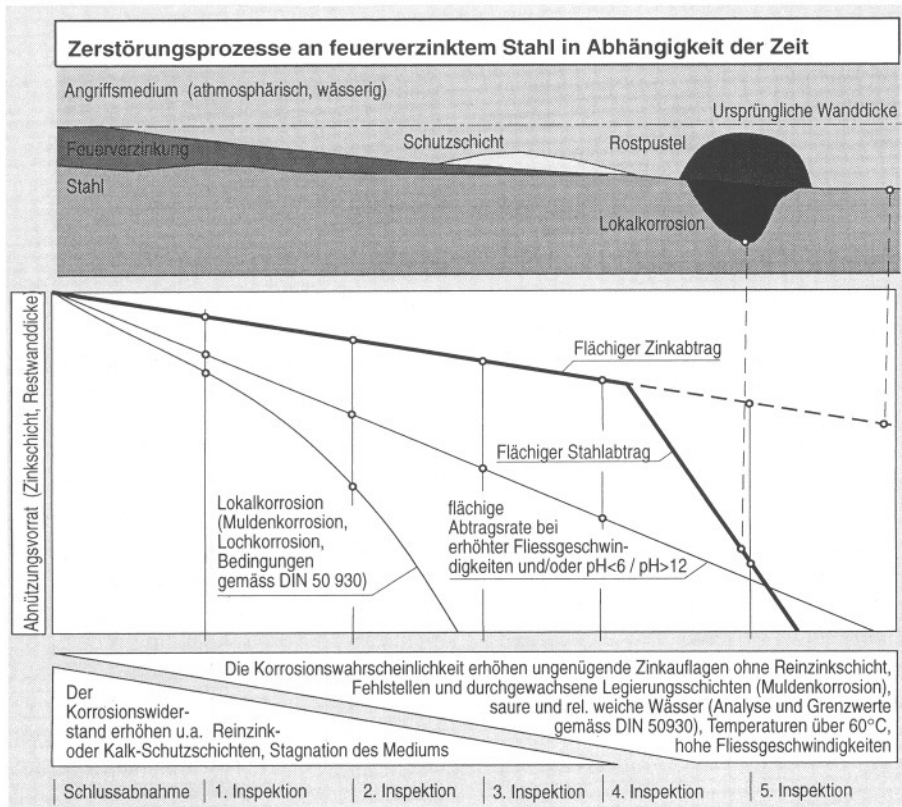


Abb. 2 Das Ausfallverhalten von feuerverzinktem Stahl ist, je nach lokalem Korrosionssystem «Werkstoff und Angriffsmedium», in der Regel durch eine mehr oder weniger ausgeprägte flächige Korrosion geprägt, die sich auch auf dem Stahl fortsetzt. Bestimmte Wässer ermöglichen das Ausbilden von Schutzschichten, können aber auch Lokalkorrosion (Muldenkorrosion, Lochkorrosion) bewirken. Saure Wässer und Niederschläge führen zu schnellem Abbau.

Ingenieure zu Recht verunsicherten und mit Skepsis gegenüber dem «rostfreien Stahl» erfüllten.

Leider suggerieren schon die verbreiteten Begriffe «Rostfreier Stahl», «Nichtrostender Stahl» usw. ein gänzlich falsches Verhalten, sogar bei atmosphärischer Belastung. Obwohl die Korrosionsbeständigkeit abhängig ist vom Korrosionssystem «Werkstoff und Angriffsmittel», werden die Begriffe munter weiter verwendet.

Bei näherer Betrachtung der Schadensfälle waren oft Betriebsbedingungen mit stagnierendem Medium, leicht erhöhter Temperatur bis 40°C und sporadisch erhöhten Chlorid-Konzentrationen bis 300 mg/l vorhanden [6]. Zudem zeigten sich wiederholt Verarbeitungsmängel wie Anlassfarben, nicht sauber durchgezogene und durchgeschweisste Rundnähte oder gar Nähte ohne irgendwelche Nachbehandlung auf der Mediumseite. Öfters kamen Chrom-Nickel-Stähle aus der «V2A»-Gruppe zur Anwendung. Zu guter Letzt lagen vereinzelt Ablagerungen, Biofilme oder gar Sielhäute vor [7, 8, 9]. Es entstanden Lokal- oder Lochfrasskorrosion, sowie Perforationen nach wenigen Monaten bis Jahren Nutzungsdauer.

Vergleicht man diese Schadensfälle mit den entsprechenden technischen Regelwerken und der Fachliteratur, überraschen die Ausfälle nicht, weil in allen Fällen mindestens eine bekannte Randbedingung nicht eingehalten worden war [10, 11].

So überrascht es ebenfalls nicht, dass aufgrund der heutigen Branchensituation ein gewisser Wildwuchs bei der Auslegung stattfindet, bei der Verarbeitung am falschen Ort gespart wird und auch von der Medium- und Prozesseite her Bedingungen entstehen, die die Korrosionswahrscheinlichkeit erhöhen. So sind bei Suspensionen nicht nur die wässrigen und gelösten Anteile für die Prozessgüte relevant, sondern es sind auch die ungelösten (üblicherweise nichterfassten) Wasserinhaltsstoffe zu berücksichtigen, die eine die Korrosion auslösende oder unterstützende Funktion übernehmen können.

Tatsächlich korrodiert der hochlegierte Stahl, wenn erst einmal seine dünne Passivschicht geschwächt oder lokal zerstört ist, relativ leicht weiter, und zwar nicht selbsthemmend, sondern autokatalytisch [12].

Dieses Ausfall-Verhalten ist grundsätzlich anders und heimtückischer als das anderer Korrosionsschutzsysteme wie

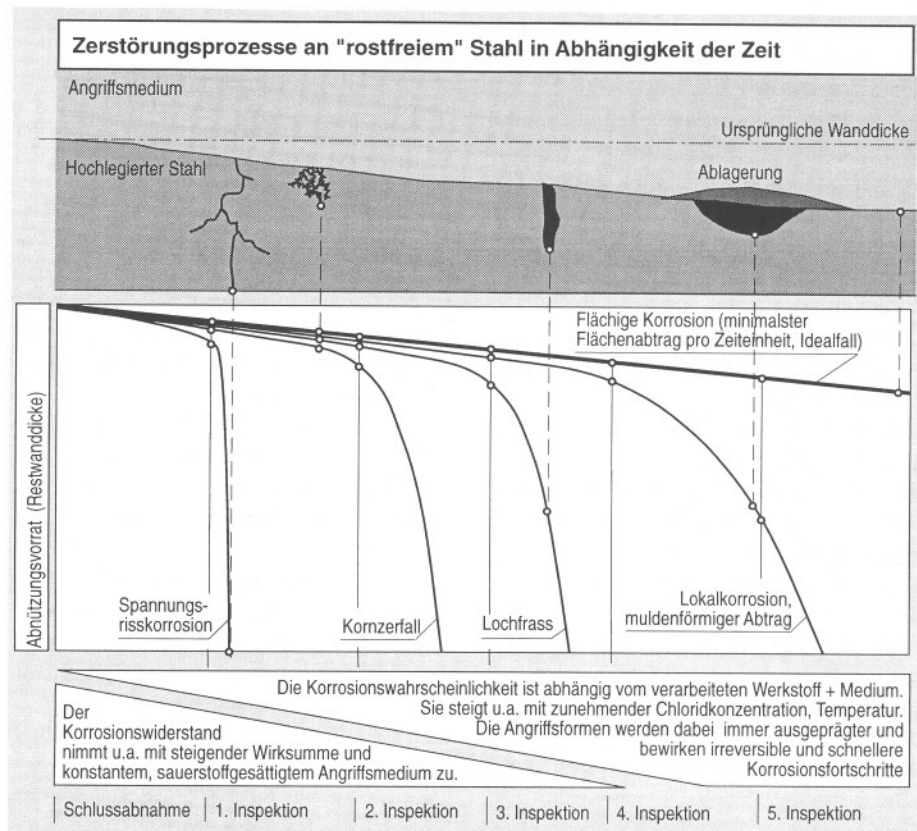


Abb. 3 Das Ausfallverhalten von austenitischem Chrom-Nickel-Stahl zeigt je nach Korrosionssystem «Werkstoff und Angriffsmittel» unterschiedliche Ausfallmechanismen, die bis zu ausgeprägter und zeitlich schnell verlaufender Risskorrosion reichen und autokatalytischen Charakter haben. Daraus ergibt sich die Forderung, diese ausgeprägten Zerstörungsformen durch Ausbildung und Erhaltung einer wirksamen Passivschicht gar nicht erst entstehen zu lassen.

beispielsweise Beschichtungen, die ein sehr universelles Schutzprofil gegenüber wässrigen Medien aufweisen, Kunststoffen oder Feuerverzinkungen. Sowohl in atmosphärischer als auch in wässriger Umgebung verdanken die hier betrachteten und am verbreitetsten eingesetzten austenitischen Stähle ihre Korrosionsbeständigkeit einer Passivschicht, die nur einige Atomlagen dick ist und für die Bildung bzw. Aufrechterhaltung Chrom (Molybdän) und Sauerstoff erfordert.

Der Vergleich mit den Zähnen (Metallurgen mögen es verzeihen) zeigt anschaulich das Ausfallverhalten: Fruchtsäuren und Plaque wirken länger und intensiver in Spalten (Zahnräumen). Sobald der schützende Zahnschmelz zerstört ist, läuft die Kariesbildung irreversibel und schneller weiter, ohne zum Stillstand zu kommen. Beim hochlegierten Stahl erliegt die Chromoxidschicht an Schwachstellen dem Angriff durch Chloride, und der autokatalytische Zerstörungsprozess beginnt.

Abb. 3 zeigt vereinfacht, in Anlehnung zu den Abb. 1 und 2 für Beschichtung

und Feuerverzinkung, einige typische Ausfallverhalten, die nachfolgend knapp beschrieben werden.

#### Flächige Korrosion

Wird die Passivschicht verletzt oder unterliegt sie einem Verschleiss (z.B. durch abrasive Strömung), bildet sie sich, unter bestimmten Umständen, wieder neu. Als Folge entsteht eine flächige Korrosion mit sehr kleinen Abtragsraten.

#### Lokalkorrosion

Fehlen die Bedingungen zur Wiederherstellung der Passivschicht, z.B. unter Ablagerungen, entstehen bei einem Angriff die entsprechenden Schadensformen: Lokalkorrosion, Muldenkorrosion. Während reduzierend wirkende Säuren, wie schwache organische Säuren, zu einem geringen, flächigen Abtrag führen, bewirken Salz- und Flusssäuren hingegen Lochkorrosion.

#### Lochkorrosion, Pitting (Nadelstichkorrosion)

Die Passivschicht reagiert sehr empfindlich auf Halogenide (Chlorid-, Fluorid-,

Bromid-, Jod-Ionen) sowie Hypochlorit-Ionen, die sie an ihren Schwachstellen bevorzugt angreifen. Dazu gehören Versetzungsstellen, kristallografische Fehlstellen, Anlassfarben, Tiefpunkte der Oberflächenrauigkeit, Riefen (z. B. auch nur von den Rädern der Schweissvorrichtung erzeugte), scharfe Kanten, Schweiss-spritzer, Falznähte sowie Fremdatome (eingewalzt, eingebrannt oder haftend).

Da der Elektrolyt im Lochgrund höher konzentriert ist an  $\text{Cl}^-$ - und  $\text{H}^+$ -Ionen, und die Anodenfläche im Lochgrund viel kleiner ist als die Kathodenfläche, wird die Stromdichte gemäss Flächenregel übersetzt und dadurch das Loch sehr schnell vorangetrieben.

Nach [6] wurden die Ursachen für Lochfrasskorrosion in der Nähe der *WIG-Schweisssnahtwurzeln* untersucht mit dem überraschenden Ergebnis, dass die (gemäss DIN 50930 zulässigen) goldgelben Oxidschichten schädliche Kohlenstoffanreicherungen enthielten, die eine generelle Nachbehandlung wie Vollbadbeizen erforderlich machen, weil Schutzgas alleine nicht genügt. Für die Inspektion ist die Kenntnis von Lochfrass-begünstigenden Parametern unumgänglich [13].

#### Kornzerfall

Im Schweissnahtbereich kann ein interkristalliner Kornzerfall entstehen, wenn eine Chromverarmung durch die Wärmebehandlung in der Art erfolgt, dass sich beim zu langsamen Abkühlen Chrom mit dem Kohlenstoff zu Chromkarbid verbindet (*Sensibilisierung*). Der Zerfall beginnt, wenn die chromverarmten Bereiche, die sich elektrisch und elektrochemisch anders verhalten als das Korninnere, durchlässig werden für das angreifende Medium. Derart geschwächter Stahl rostet bereits in neutralem Wasser [12, 13]. Die Karbidausscheidung an Korngrenzen wurde gemäss [16] auch schon bei stabilisierten Stählen der Werkstoffnummer 1.4541 in Kraftwerken festgestellt. Die Sensibilisierung erhöht zudem auch die Anfälligkeit auf Loch- und Spaltkorrosion.

#### Spannungsrisskorrosion (SRK)

Nur in bestimmten kritischen Korrosionssystemen entsteht die gefürchtetste Korrosionsart SRK. Einflussparameter sind Legierung, elektrochemisches Potential, Chlorid-Konzentration, Zugspannungsgrösse, Temperatur, Anrisse oder Lochfrassansätze und Vorge-

schichte des Materials. Gemäss [14, 16] genügen als SRK-Auslöser unter bestimmten Umständen bereits Raumtemperatur und nach [13] Grenzspannungen von  $20 \text{ N/mm}^2$ .

Auffallend ist auch der zeitliche Verlauf: Nach einer Inkubationszeit (*Induktionsphase*) zur Ermöglichung der Rissbildung folgt eine relativ kurze Reissphase [12, 14]. Dabei wurden schon bei Versuchsanordnungen über längere Zeiträume rissfreie Oberflächen beobachtet, bis plötzlich Korrosionsrisse auftraten, die sich dann in kürzester Zeit mit minimalstem Stoffumsatz meist transkristallin bis zum verformungsinduzierten Bruch fortpflanzten. Die autokatalytischen Vorgänge sind im Detail noch nicht vollständig bekannt. Das phänomenologische und zeitliche Verhalten erfordert Inspektionsmethoden, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann.

#### Mikrobiologisch induzierte Korrosion (Microbially Influenced Corrosion MIC)

Seit ca. 4 Jahren häufen sich Schadensberichte von wasserführenden Rohrleitungen und Apparaten aus CrNi(Ti)-Stählen, wo Mikroorganismen als Biofilme oder Sielhäute oder in Ablagerungen vorlagen [7, 8, 9]. Die Kombination von aggressiven Fördermedien mit Strömungsbedingungen, die Ablagerungen ermöglichen, erhöht die Korrosionswahrscheinlichkeit enorm. Die resultierenden Beanspruchungen überfordern, auch ohne den Einfluss der MIC, die *Werkstoffgruppe* «V2A» gänzlich und die «V4A»-Gruppe knapp.

In jedem Wasser existieren nun, neben den herkunftsspezifischen Mikroorganismen, eine Reihe wachstums- und lebensfähiger Organismen, die je nach Energie- und Stoffhaushalt des Standortes gedeihen. Durch die Anhäufung von schleim- oder säurebildenden sowie von sulfatreduzierenden Mikroorganismen, bilden sich *aggressive Biofilme* bzw. aufkonzentrierte Beläge, bevorzugt bei Wechselzonen und stagnierender Strömung. Für MIC-Beanspruchungen werden deshalb nochmals höher legierte Stähle mit Wirksummen ab ca. 35 empfohlen, wobei selbst dann noch eine kleine Korrosionswahrscheinlichkeit besteht.

Die routinemässigen Nachweismethoden und Schutzstrategien für diese seit bald 100 Jahren bekannten Vorgänge, aber in dieser Anwendung noch junge Wissenschaft, stecken naturgemäss noch in den Kinderschuhen.

## 4. Inspektion von Korrosionsschutzsystemen

Langlebige und unterhaltsgünstige Korrosionsschutzsysteme bedingen zum einen die beanspruchungsgerechte Materialwahl, zum andern die korrosionstechnisch schwachstellenfreie Fertigung der Metallkonstruktion und die optimale Ausführung der Korrosionsschutzarbeiten nach dem Grundsatz: *Ein Korrosionsschutzsystem ist nur so gut wie seine Schwachstelle*. Mit diesem Grundsatz vor Augen sind die Bauwerke zu konzipieren und auch zu überwachen.

Der Inspektion obliegt nun die schwierige Aufgabe, das korrosionsbedingte Ausfallverhalten grundsätzlich zu kennen, an Bauwerken mit verschiedensten Werkstoffen vor Ort die relevanten Schwachstellen zu erkennen und sowohl subtile Veränderungen des Ist-Zustands als auch Korrosionsschäden im Hinblick auf die Sicherheit und Funktionstüchtigkeit bis zur nächsten Hauptinspektion sicher zu erkennen und korrekt zu bewerten. Zusätzlich sind daraus entsprechende Erneuerungsmassnahmen abzuleiten.

Die Inspektion dürfte für Low-Tech-Systeme naturgemäss einen fachlich, gerätetechnisch und zeitlich geringeren Aufwand benötigen als High-Tech-Systeme. In jedem Fall sind aber die Nutzungs- und Sicherheitsdokumentationen des Bauwerks zu konsultieren.

## 5. Fazit

- A. Die hohen Unterhaltskosten gewisser Bauwerke könnten vermindert werden, wenn einerseits das korrosionsbedingte *Ausfallverhalten* gängiger technischer Werkstoffe sowohl bei der Planung als auch bei Inspektionen besser bekannt wäre und wenn andererseits die Fertigung wenigstens den Minimalanforderungen der technischen Regeln genüge.
- B. Der Entwurf SIA 469 als Nachfolger der SIA 169 bringt korrosionstechnisch keine Verbesserungen und birgt *Risiken* für den Bauherrn und Inspektor in sich. Es wird mit Bedauern festgestellt, dass mit dieser Norm kein wesentlicher Beitrag zum Vermeiden eines Falles wie «Hallenbad Uster» geleistet wird. Der Zweck dieser Norm bezüglich «Erhaltung Korrosionsschutz» wird daher in Frage gestellt.
- C. Das Ausfallverhalten von geschweissten, hochlegierten Stahlsorten, wie

sie auf Kläranlagen üblich sind, könnte verbessert werden, wenn die Ausführung intensiver kontrolliert würde und wenn abtragendes, scharfes *Vollbadbeizen* wieder die Regel wäre. Allerdings entfällt damit der Kostenvorteil gegenüber dem feuerverzinkten Stahl weitgehend.

D. Mikrobiologisch induzierte Korrosion ist unseres Wissens auf verzinkten Flächen noch nicht festgestellt worden. Eine *antiseptische Wirkung* wird vermutet.

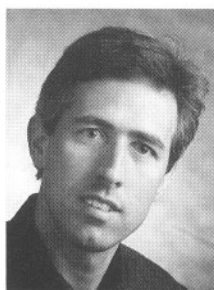
E. Die Verwendung von hochlegiertem Stahl ist gegenüber feuerverzinktem Stahl und auch gegenüber Kunststoff neu zu überdenken für Anwendungen wie Kläranlagen mit einem sehr *breiten Belastungsprofil*. Die Fördermedien sind Suspensionen mit gelösten Stoffen. Eine Anlagerung von Partikeln oder Ausfällung ist auf ARA's praktisch der Normalfall. Das hat den feuerverzinkten Stahl weniger gestört, bzw. die Ablagerungen schützten ihn teilweise sogar. Hingegen reagiert der austenitische Stahl empfindlicher auf Ablagerungen, die heute zudem durch reinere Wässer oder durch die Nitri- und Denitrifikation in ihrem Aufbau und Deckungsgrad anders ausfallen dürften als vor geraumer Zeit.

F. Für die korrekte Auslegung von Chrom-Nickel-Stählen wird mit einem *Sicherheitsfaktor* gegen Korrosion postuliert. Analog zur festigkeitsmässigen Auslegung mit Sicherheiten gegen Bruch, Fließen oder Formänderung bei Maximalbelastung soll der Korrosions-Sicherheitsfaktor einerseits die maximalen Korrosionsbelastungen und die daraus resultierenden Korrosionsbeanspruchungen und andererseits nicht den idealen, sondern den realen, bearbeiteten und deshalb in seiner Schutzwirkung geminderten Werkstoff berücksichtigen.

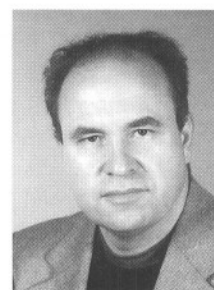
### Literaturverzeichnis

- [1] Rickenbacher, F., Wulff, I. (1995): Korrosionsschutz ohne Planung: Korrosion!, gwa 8/95, SD, Nr. 1349.
- [2] Ruf, J. (1994): Organischer Metallschutz.
- [3] van Oeteren, K. A. (1978): Kurzbericht atmosphärische Korrosionsgeschwindigkeit Feuerverzinkung.
- [4] van Eijnsbergen, J. F. H. (1994), Duplex Systems
- [5] Rickenbacher, F. (1993), Korrosionsrisiken bei Mischkonstruktionen.
- [6] Finke, Pries, Lacmann, Wohlfahrt (1996): TU Braunschweig, Untersuchungen von Schäden im Schweißnahtbereich von Rohrleitungen, Referat GfKORR-Fachtagung.
- [7] Renner (1996): Bayer AG, Betrachtung und Bewertung von Einflussgrößen auf die MIC-beeinflusste Korrosion, Referat GfKORR-Fachtagung.
- [8] Thierry, D., Sand, W. (1995): MIC, in «Corrosion Mechanisms in Theory and Practice».
- [9] Dillon, C. P. (1995): Corrosion Resistance of Stainless Steels.
- [10] DIN 50 930, T4, 1993.
- [11] SGK (1995): C6d Richtlinien zum Korrosionsschutz in Abwasseranlagen.
- [12] Hömig, H. E. (1991): Metall + Wasser.
- [13] Lohmayer, S. (1989): Edelstahl I und Edelstahl II.
- [14] Böhni, H. (1988): SIA-Dokumentation D 030, Einsatz von «nichtrostenden Stählen» im Bauwesen.
- [15] Bächle und Mitautoren (1981): Korrosionsverhalten von verzinkten Stahlrohren, Werkstoffe und Korrosion 32, 435-442.
- [16] Forchhammer/Woitschek (1996): SRK an austenitischen Stählen für Kraftwerke, Referat GfKORR-Fachtagung.

Adresse der Autoren:



F. Rickenbacher, dipl. Ing. HTL



I. Wulff, dipl. Ing. ETH

SCE GmbH  
Speerstrasse 24, Postfach 18, 8634 Hombrechtikon