# Das Korrosionsverhalten

Autor(en): **Schwitter, Hermann / Böhni, Hans**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **97 (1979)**

Heft 6: **SIA, Heft 1/1979: Stahlbau/Korrosion**

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-85406

**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**

# SIA-Heft 1, 1979

*Stahlbau/Korrosion*

# Wetterfeste Baustähle

Von Hans Böhni, Zürich

Das Bestreben, einen niedriglegierten, preisgünstigen und dennoch korrosionsbeständigen Baustahl herzustellen, führte vor mehr als 40 Jahren in den *USA* zur Entwicklung der *wetterfesten Stähle*. Der von der US Steel Corporation entwickelte *Cor-Ten-Stahl* ist dabei als *eigentlicher Schrittmacher* zu betrachten. Die Anwendung dieses vielversprechenden Werkstoffes beschränkte sich zunächst auf den Bau von Schienen- und Strassenfahrzeugen; erst wesentlich später, nach eingehenden Langzeitprüfungen (1940–1960), erfolgte schliesslich ihre Verwendung im Hochbau. In Europa und besonders in der Schweiz hat die Anwendung dieser Stähle auf breiterer Basis sogar noch später, d. h. erst vor ca. 10 Jahren, begonnen. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind bis heute Transport- und Förderanlagen, Gittermaste, Brücken, Tragskelette im Hochbau sowie Fenster und Fassaden.

Welche praktischen Erfahrungen hat man nun im Blick auf den Korrosionsschutz mit diesem Werkstoff gemacht? Unter dem Begriff «wetterfester Stahl» fasst man heute Baustähle mit geringen Legierungsgehalten an Kupfer, Chrom, Nickel und Phosphor zusammen. Auf der Oberfläche dieser Stähle sollte sich an der Atomsphäre eine beständige, korrosionshemmende Rostschicht bilden, so dass kein zusätzlicher Korrosionsschutz mehr notwendig ist. Die zahlreichen Schadenfälle, die inzwischen in der Schweiz und auch im Ausland an diesen Werkstoffen aufgetreten sind, lassen jedoch den berechtigten Verdacht aufkommen, dass die Bildung solcher Schutzschichten in der Praxis entweder nur teilweise erfolgt oder zumindest deren Schutzwirkung in Frage gestellt werden muss.

Ein erster Vergleich der in den USA und in Grossbritannien durchgeführten Langzeitversuche der 40er und 50er Jahre zeigt jedoch bereits, dass im Korrosionsverhalten der wetterfesten Stähle zwischen den verschiedenen Auslagerungsorten beachtliche Unterschiede auftreten können. Die unterschiedlichen Gewichtsverluste werden dabei meist ohne nähere Erläuterungen auf die verschiedenen Angriffsverhältnisse zurückgeführt; eingehende Untersuchungen über den *Einfluss der Bewitterung auf das Korrosionsverhalten wetterfester Stähle* sind bis heute jedoch nicht erfolgt.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit am *Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion* der *ETH-Zürich* wurde deshalb das Ziel gesetzt, den Einfluss der Bewitterung auf die Bildung und Schutzwirkung von Deckschichten bei wetterfesten Stählen näher abzuklären. Die Resultate dieser Arbeit, deren wichtigste Aspekte für die Praxis im folgenden Artikel («Das Korrosionsverhalten wetterfester Baustähle») wiedergegeben sind, zeigen deutlich, dass der Bewitterung eine wesentlich bedeutendere Rolle zukommt als etwa der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes.

Bei der Beurteilung der Bewitterungsverhältnisse in der Praxis muss jedoch beachtet werden, dass das Korrosionsgeschehen auf einer Metalloberfläche grundsätzlich von den Angriffsmittelverhältnissen in der unmittelbaren Umgebung der Oberfläche abhängt. Diese *mikroklimatischen* Verhältnisse werden ihrerseits nicht nur vom umgebenden *Makroklima* (z. B. Stadt-, Industrie- oder Landluft), sondern ebensosehr auch von den *konstruktiven Gegebenheiten* her beeinflusst. Der *korrosionsgerechten Konstruktion* kommt deshalb bei der praktischen Anwendung wetterfester Baustähle eine ausschlaggebende Bedeutung zu. Ungeeignete konstruktive Massnahmen stellen denn auch eine der Hauptursachen für die vielen Schadenfälle in der Praxis dar. Die Erfahrungen, die man seit knapp 10 Jahren mit den wetterfesten Baustählen in der Schweiz gemacht hat, werden in einem weiteren Artikel («Wetterfester Baustahl – praktische Anwendung im Hochbau») aus der Sicht der *Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA)* näher erläutert. Er soll dem Praktiker die wichtigsten Informationen zur korrekten Anwendung des wetterfesten Baustahles vermitteln, auf die häufigsten Fehlerquellen hinweisen und Wege zu ihrer Vermeidung angeben.

*Wetterfeste Baustähle*

# Das Korrosionsverhalten

Von Hermann Schwitter und Hans Böhni, Zürich

Unter dem Begriff *wetterfester Stahl* versteht man im Bauwesen *niedriglegierte Stähle*, die an der Atmosphäre ohne Korrosionsschutz verwendet werden können. Auf der Metalloberfläche dieser Werkstoffe entstehen *im Laufe der Zeit kompakte, korrosionshemmende Rostschichten*, die den fortschreitenden Korrosionsangriff wirkungsvoll vermindern. Im Gegensatz zu den nichtrostenden Stählen, die äusserst dünne, von blossem Auge nicht sichtbare Deckschichten – sogenannte Passivfilme – bilden, sind die Schutzschichten bei den wetterfesten Stählen wesentlich dicker. Die Bildung erfolgt dementsprechend auch viel langsamer. Die wetterfesten Baustähle müssen hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens an der Atmosphäre deshalb mit den unlegierten Stählen verglichen werden. Eine klare Trennung ist jedoch meist schwierig, da im Korrosionsverhalten häufig ein fliessender Übergang beobachtet werden kann. Grundsätzlich lässt sich aber sagen, dass bei den wetterfesten Baustählen infolge ihrer geringen Gehalte an bestimmten Legierungselementen der Metallabtrag in vergleichbarer Atmosphäre wesentlich kleiner ist als bei unlegierten Stählen.

Verbindliche Vorschriften über die chemische Zusammensetzung der wetterfesten Baustähle existieren nicht. Die in der Schweiz im Handel erhältlichen Produkte wie z. B. *Corten, Coraldur, Intradur, Patinax, Resista* haben jedoch eine Zusammensetzung, die als charakteristisch für die wetterfesten Baustähle angesehen werden kann. Die *Richtanalyse* umfasst folgende Elemente [in Gew.%]:

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Cu | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ~0,15 | 0,1–0,4 | 0,2–0,5 | 0,05–0,12 | <0,05 | 0,5–0,8 | 0,3–0,5 | ~0,4 |

Der Einfluss der verschiedenen Legierungselementzusätze war schon Gegenstand zahlreicher Untersuchungen [1, 2, 3]. Vergleiche zwischen den von *Larra-*

*bee* et al. [4] in den USA und *Edwards* [5] in England durchgeführten Langzeitversuchen zeigen jedoch ausserdem, dass das Korrosionsverhalten nicht nur von der Zusammensetzung dieser Stähle, sondern auch vom Auslagerungsort abhängt. Vergleichbare Stähle korrodierten in Grossbritannien 5–10mal stärker als in den USA. Es muss daraus geschlossen werden, dass der Bewitterungsart eine ebensogrosse Bedeutung zukommt wie dem Legierungselementgehalt; systematische Untersuchungen über den Bewitterungseinfluss liegen jedoch nicht vor. Das Ziel der vorliegenden Studie war deshalb, den Einfluss der Bewitterungsart auf die Bildung von schützenden Deckschichten näher zu untersuchen.

Als Untersuchungsmethoden wurden Bewitterungstests, licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen, sowie röntgenographische und elektrochemische Messungen durchgeführt.

## Versuchsdurchführung

### Material

Als Probenmaterialien wurden ein *reiner Kohlenstoffstahl* und *niedriglegierte, wetterfeste Baustähle mit variabler Zusammensetzung* verwendet. Die Analyse dieser Stähle zeigt Tabelle 1.

Die niedriglegierten Stähle besitzen alle die gleiche Grundanalyse. In drei verschiedenen Gruppen wurde aber jeweils ein Legierungselement variiert, so in der Kupferreihe (Stähle E, P, M) das Element Kupfer in den Konzentrationen 0,053%, 0,18% und 0,47%, in der Chromreihe das Element Chrom in den Konzentrationen 0,017%, 0,28% und 0,75% und in der Phosphorreihe das Phosphor in den Konzentrationen 0,014%, 0,074% und 0,101%. Alle Stähle wurden vor der Bewitterung sandgestrahlt und in Benzin entfettet.

### Bewitterung

Zu Vergleichszwecken setzte man die Proben einer 2jährigen Naturbewitterung in einem stadtnahen Gebiet und einer Schnellbewitterung im Labor aus.

Bild 1 gibt eine schematische Übersicht über die durchgeführten Arten der Schnellbewitterung. Bei der ersten Bewitterungsart (3×) wurden die Proben in 12 Stunden dreimal benetzt und getrocknet. Innerhalb einer Woche erfolgten auf diese Weise 12 solcher 3×-Zyklen und ausserdem noch zwei zwölfstündige $SO_2$-Auslagerungsperioden. Der $SO_2$-Gehalt in der separaten Auslagerungsbox betrug durchschnittlich 20 ppm, die relative Luftfeuchtigkeit 85%. Beim Bewitterungstyp 2× wurden die Proben in zwölf Stunden hingegen nur zweimal, beim Bewitterungstyp 1× sogar nur einmal dem Trocken/Nass-zyklus ausgesetzt. Die durchschnittliche Nasszeit stieg von 46% beim Zyklus 3× auf 77% beim Zyklus 1× an. Die Benetzung erfolgte mit einem Aerosolsprühgerät und durch Beregnen. Alle anderen Versuchsparameter wie Trocknungstemperatur, Probenvorbereitung und $SO_2$-Gehalt wurden in dieser Untersuchung konstant gehalten.

## Resultate

### Gewichtsverluste

Eine Übersicht über die Resultate der Schnellbewitterung ist in Bild 2 dargestellt. Bei der Kupferreihe wie auch bei der Chromreihe ist der Einfluss der Bewitterung deutlich erkennbar. Die nach dem Zyklus 3× bewitterten Proben zeigen einen kleineren Korrosionsverlust und vor allem eine wesentlich geringere Korrosionsgeschwindigkeit als die nach dem Typus 2× und 1× behandelten Proben. Der Unterschied bei den beiden ungünstigeren Bewitterungen ist dagegen nicht sehr gross. Erstaunlicherweise ist bei der günstigen Bewitterung der Einfluss der Legierungselemente nur schwach. Auch der unglegierte Stahl S zeigt nach 63 Tagen nur noch einen sehr kleinen Korrosionsabtrag. Etwas grösser ist der Einfluss der Legierungselemente bei den Bewitterungen nach den Typen 2× und 1×. Je stärker der Stahl mit Cu legiert ist, desto kleiner ist der Gewichtsverlust.

Die gleichen Resultate ergaben sich auch bei der Chromreihe, in der das Element Chrom variiert wurde. Für die Phosphorreihe liegen nur die Resultate der Bewitterung 3× vor, die aber die Ergebnisse der Kupfer- und Chromreihe bestätigen. Diese Resultate erlauben folgende wichtige Aussage: Bei einem häufigen Trocken/Nass-Wechsel, wie es bei der Bewitterung 3× der Fall ist, tritt ein günstiges Korrosionsverhalten auf. Nach einer anfänglich hohen Korrosionsgeschwindigkeit korrodieren die

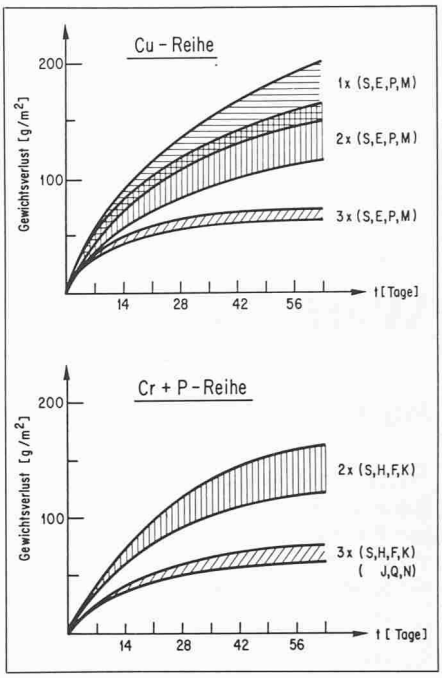



*Bild 2. Resultate der Schnellbewitterungsversuche*

| Stahl | | C | S | Si | Mn | Cr | P | Cu | Ni |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Unlegiert | | 0,02 | 0,011 | 0,005 | 0,29 | 0,015 | 0,042 | 0,018 | 0,04 |
| Niedrig Legiert | E | 0,09 | 0,009 | 0,36 | 0,50 | 0,56 | 0,061 | 0,053 | 0,27 |
| | P | 0,10 | 0,008 | 0,37 | 0,42 | 0,50 | 0,074 | 0,18 | 0,28 |
| | M | 0,11 | 0,010 | 0,34 | 0,49 | 0,54 | 0,081 | 0,47 | 0,30 |
| | H | 0,10 | 0,006 | 0,34 | 0,42 | 0,01 | 0,079 | 0,34 | 0,29 |
| | F | 0,11 | 0,010 | 0,34 | 0,49 | 0,28 | 0,067 | 0,34 | 0,30 |
| | K | 0,11 | 0,007 | 0,42 | 0,50 | 0,75 | 0,075 | 0,45 | 0,31 |
| | J | 0,10 | 0,007 | 0,36 | 0,45 | 0,54 | 0,014 | 0,44 | 0,31 |
| | Q | 0,11 | 0,011 | 0,39 | 0,50 | 0,51 | 0,074 | 0,41 | 0,30 |
| | N | 0,11 | 0,012 | 0,38 | 0,50 | 0,51 | 0,101 | 0,47 | 0,30 |

*Tabelle 1. Chemische Zusammensetzung der verwendeten Stähle (Gew. Prozente)*

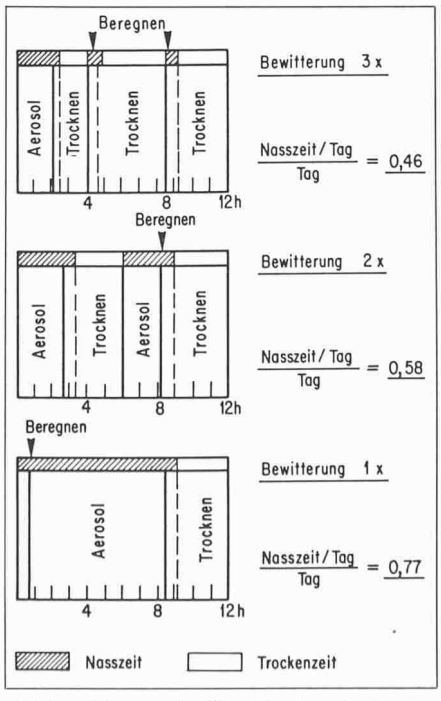



*Bild 1. Schematische Übersicht über die Bewitterungstypen 3×, 2× und 1× bei der Schnellbewitterung*

nach dieser Art bewitterten Proben nach kurzer Zeit nur noch schwach. Dabei ist dieses Verhalten beinahe unabhängig vom Legierungselementgehalt. Auch beim unlegierten Stahl S kommt die Korrosion nach einer gewissen Zeit praktisch zum Stillstand.

Bei der Bewitterung mit längeren Nassperioden (Typ 2× und 1×) tritt nach der untersuchten Zeitperiode keine so starke Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit ein. Der absolute Metallabtrag ist zudem doppelt bis dreimal so hoch. Obwohl der Einfluss der Legierungselemente bei diesen Bewitterungstypen grösser ist, kann der erhöhte Korrosionsverlust bzw. die grössere Korrosionsgeschwindigkeit hier nicht allein auf das Fehlen von Legierungselementen zurückgeführt werden. Auch die am stärksten legierten Proben M und K zeigen bei dieser Bewitterung ein wesentlich schlechteres Verhalten.

Dass die kleinere Korrosionsgeschwindigkeit beim Bewitterungszyklus 3× nicht durch die kürzere Gesamtnasszeit hervorgerufen wird, zeigt Bild 3. Hier

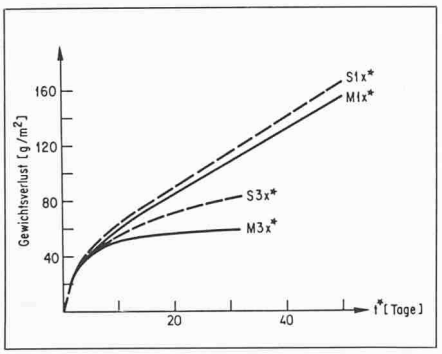



*Bild 3. Gewichtsverluste bei der Schnellbewitterung; auf die wahre Nasszeit reduzierte Zeitachse (t*)*

stellt die ×-Achse nicht die Bewitterungszeit, sondern die Gesamtzeit dar, während der die Proben nass sind. Auf diese Weise können die Bewitterungsarten 1×, 2× und 3× direkt miteinander verglichen werden. Interessanterweise weisen die Kurven M3×* und S3×* auch bei dieser Darstellung ein starkes Einbiegen auf. Obwohl die Nasszeit bei der Bewitterung 3× nur etwa ein Drittel kürzer ist, sinkt der Gewichtsverlust etwa um die Hälfte ab. Bei der Bewitterung 1× hingegen fallen die Kurven mehr oder weniger zusammen.

In Bild 4 sind die Resultate der Naturbewitterung dargestellt. Die niedriglegierten Stähle weisen dabei innerhalb einer gewissen Bandbreite ein ähnliches Verhalten auf. Die weniger legierten Stähle liegen eher im oberen, die stärker legierten eher im unteren Teil des Wertebandes. Deutlich schlechter verhält sich der unlegierte Stahl S. Interessanterweise zeigt keiner der Stähle nach einer Expositionsdauer von ca. zwei Jahren eine Gewichtsverlustkurve, die

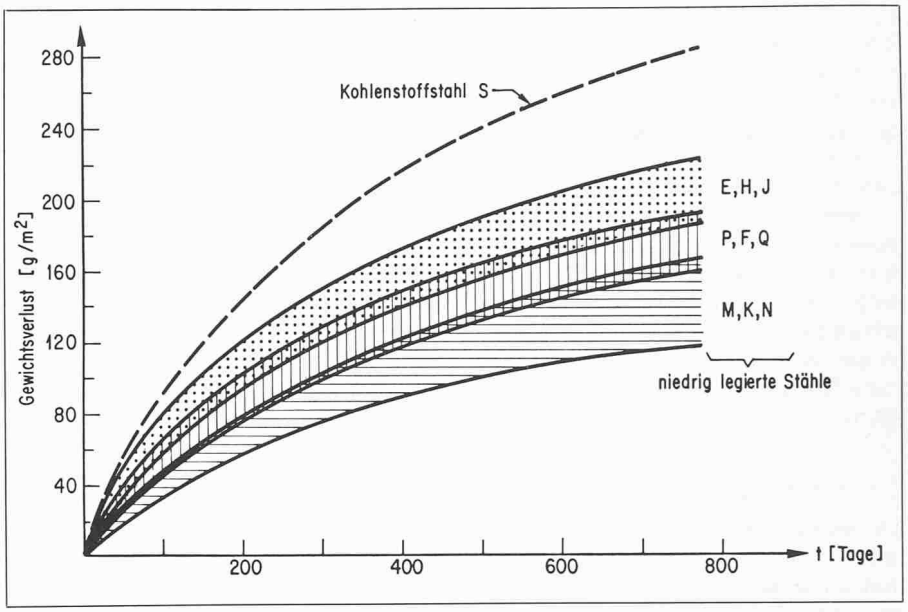
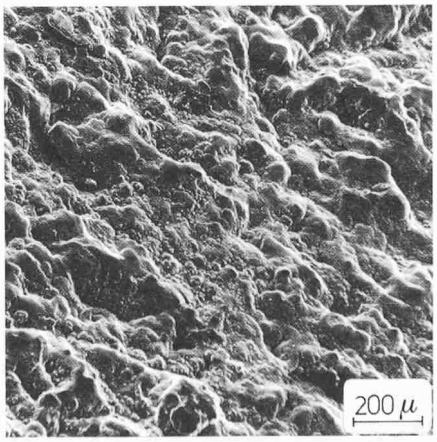



*Bild 4. Resultate der Naturbewitterungstests*

auf eine vollständig schützende Schicht hinweist.

## Metallographische Untersuchungen

Zur Beschreibung der weiteren durchgeführten Untersuchungen werden nur noch die Resultate des Kohlenstoffstahles S und des am stärksten mit Kupfer legierten Stahles M aufgeführt, obwohl die Resultate für die anderen Stähle auch vorliegen. Ebenso wird die Bewitterung 2× nicht weiter erwähnt, weil die Resultate ähnlich sind wie bei der Bewitterung 1×. Makroskopisch betrachtet, weisen die verschieden bewitterten Proben unterschiedliche Oberflächen auf. Die günstig bewitterten Proben (Typus 3×) zeigen eine relativ dunkle, homogen wirkende Oberfläche. Von



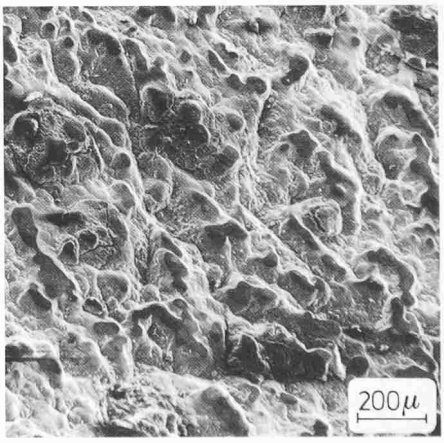




*Bild 5. Rostoberfläche, Schnellbewitterung 3×, rasterelektronenmikroskopische Aufnahme*

blossem Auge sind keine eigentlichen Rostpusteln sichtbar. Die Rostschicht auf den nach Typus 1× ungünstig bewitterten Proben dagegen ist heller gefärbt und erinnert stärker an die bekannte rostrote Farbe. Die Oberfläche ist zudem mit vielen grossen Pusteln überzogen. Nicht so homogen erscheint die Oberfläche der an der Atmosphäre bewitterten Proben. Eine relativ hell gefärbte Rostschicht ist von grossen dunkeln Rostpusteln durchsetzt. Diese haften zum Teil nur schwach auf der Rostschicht.

### *Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen*

Bild 5 zeigt in diesem Zusammenhang mit dem REM aufgenommene Oberflächenaufnahmen der Proben M3× und S3×. Die Rostschicht ist hier sehr homogen und kompakt. Die einzelnen Unebenheiten sind sehr klein und alle etwa gleich gross. Die Oberfläche der Probe M3× ist frei von sichtbaren Rissen; auf der Probe S3× können wenige dünne Risse festgestellt werden. Weitere Unterschiede sind zwischen den beiden Proben nicht festzustellen.

Im Gegensatz dazu weisen die Proben M1× und S1× (Bild 6) eine eher inhomogene Rostoberfläche auf. Neben vielen kleinen befinden sich auf diesen Proben auch grosse Rostpusteln, die stark mit Rissen durchzogen sind. Aber

auch die Rostschicht neben den grossen Rostpusteln ist mit vielen feinen Rissen durchsetzt. Zwischen den beiden Proben M1× und S1× sind auf der Oberfläche keine signifikanten Unterschiede vorhanden.
Die Oberflächen der naturbewitterten Proben entsprechen sowohl bei den legierten als auch bei den unlegierten Stählen eher denen der Schnellbewitterung 1×. Auffallend sind dort die schuppenförmigen Pusteln. Die Risse in der Rostschicht konzentrieren sich vor allem auf die Umgebung dieser Pusteln.

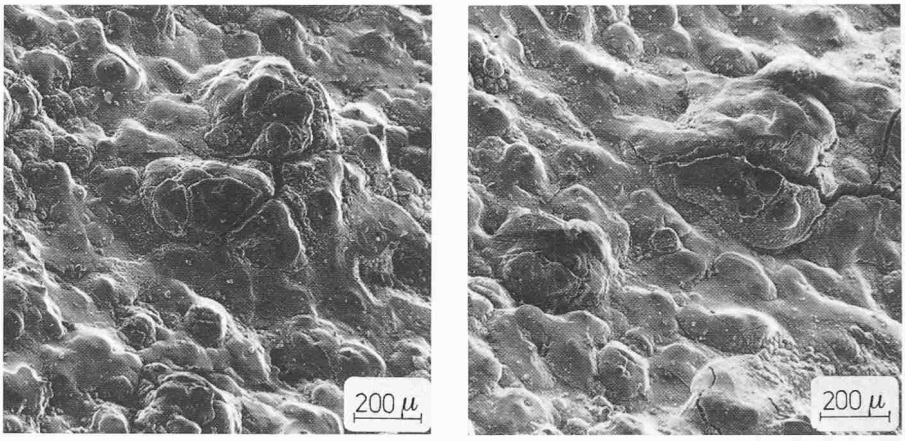



*Bild 6. Rostoberfläche, Schnellbewitterung 1×, rasterelektronenmikroskopische Aufnahme*

*Lichtmikroskopische Untersuchungen*

Mit metallographischen Querschliffen untersuchte man ferner den Aufbau und die Struktur der Rostschicht. Bild 7 zeigt die Querschliffe durch die Proben M3× und S3×. Die Aufnahmen 7a wurden auf übliche Weise mit dem Lichtmikroskop, die Bilder 7b mit *polarisiertem Licht* und *gekreuzten Nicols* erhalten. Die Rostschicht der Probe M3× besteht aus zwei Schichten: aus der auf der Metalloberfläche aufliegenden dunklen und der darüberliegenden hellen Schicht. Das optische Verhalten der dunklen Schicht ist isotrop. Die andere Schicht zeigt ein durch Doppelbrechung hervorgerufenes anisotropes Verhalten und weist im Mikroskop eine leuchtend orange Farbe auf. Untersuchungen mit der *Elektronenstrahlmikrosonde* ergaben ausserdem, dass in der dunklen Schicht die Legierungselemente und der Schwefel angereichert sind. Mit *röntgenographischer Phasenanalyse* konnte im weiteren gezeigt werden, dass ein grosser Mengenanteil des Rostes ein röntgenamorphes Verhalten aufweist. Aus den beiden genannten Untersuchungen kann gefolgert werden, dass die dunklen Anteile im Querschliff aus dem in der Literatur beschriebenen Material, nämlich dem amorphen $FeO_x(OH)_{3-2x'}$, bestehen müssen [6].
Die Oberfläche der Probe M3× ist zu ca. 80–90% mit der dunklen, amorphen Schicht bedeckt. Der Querschliff durch die Rostschicht der Probe S3× zeigt für diesen Stahl einen etwas weniger geordneten Aufbau. Die helle, anisotrope Schicht ist im Verhältnis zur dunklen Schicht etwas dicker. Die Metalloberfläche ist aber auch hier zu einem grossen Teil mit der grauen Rostphase bedeckt.
Ausschnitte aus der Rostschicht der Proben M1× und S1× sind in Bild 8 dargestellt. Im Falle der schlechten Bewitterung 1× ist die Rostschicht nicht so geordnet wie bei der guten Bewitterung. Die dunklen und die hell erscheinenden Rostphasen zeigen keinen klaren Schichtaufbau. Auch unmittelbar auf der Metalloberfläche können helle Rostphasen auftreten. Die Metalloberfläche ist ausserdem nur zu ca. 50–60% mit der dunklen Rostschicht bedeckt. Die Schichtdicke des Rostes ist zudem sehr unterschiedlich. Neben grossen Pusteln befinden sich Stellen, wo die Rostschicht nur sehr dünn ist. Vor allem an diesen Stellen reichen die hellen Rostphasen bis auf die Metallphase.

Bei der Präparation der metallographischen Schliffe zeigte es sich, dass die hellen Phasen sehr spröde sind und leicht herausbrechen. Es muss sich dabei um ein lockeres, brüchiges Rostgefüge handeln. Die dunklen Schichten dagegen sind sehr kompakt und können ohne herauszubrechen sehr gut präpa-

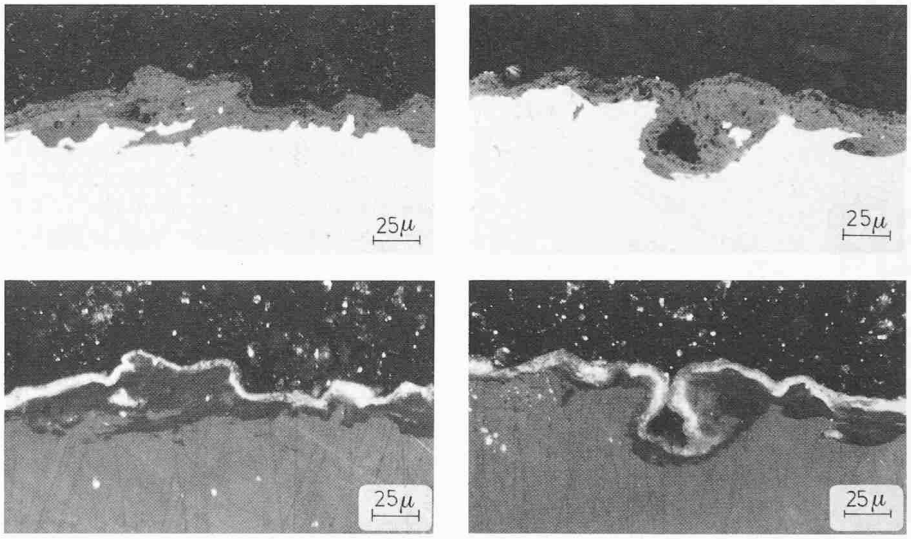



*Bild 7. Querschliff durch die Rostschicht, Bewitterung 3×*
*a) unpolarisiertes Licht (oben), im Text mit a bezeichnet*
*b) polarisiertes Licht und gekreuzte Nicols (unten), im Text mit b bezeichnet*

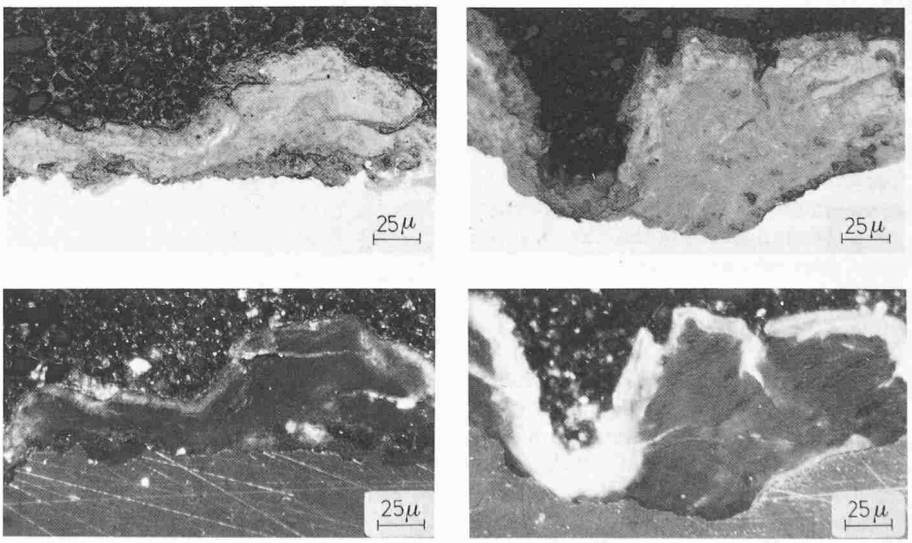



*Bild 8. Querschliff durch die Rostschicht, Bewitterung 1×*
*a) unpolarisiertes Licht (oben)*
*b) polarisiertes Licht und gekreuzte Nicols (unten)*

riert werden. Dieser Unterschied in den mechanischen Eigenschaften ist sehr deutlich und liefert einen Hinweis auf die Schutzwirkung der grauen, isotropen Schicht.

**Elektrochemische Untersuchungen**

Alle elektrochemischen Versuche wurden in luftgesättigter 0,1 M $Na_2SO_4$-Lösung durchgeführt. Die Aufnahme der Stromdichte-Potentialkurven erfolgte mit den üblichen elektronischen Mess- und Regelgeräten (Firma Wenking). Der Potentialvorschub bei der Aufnahme der Polarisationskurve betrug 15 mV/min. Als Bezugselektrode verwendete man für alle Versuche eine in gesättigte KCl-Lösung getauchte Kalomelelektrode. Die untersuchte Probenfläche betrug 4 $cm^2$.

*Potentialverlauf beim Eintauchen*

Die trockenen Proben wurden in den Elektrolyten eingetaucht und das Potential kontinuierlich verfolgt. Aus Bild 9 ist der Potentialverlauf der Proben M und S ersichtlich. Die Potentiale bei den nach Typus 1× bewitterten Proben fallen innerhalb weniger Minuten nach dem Eintauchen ab und erreichen schnell einen konstanten Wert. Die Proben M3× und S3× dagegen erreichen diesen Wert erst nach mehreren Stunden. Der Potentialverlauf der naturbewitterten Proben (MA und SA) liegt zwischen dem der Bewitterung 3× und 1×. Das konstante Potential, das schliesslich erreicht wird, ist für alle Versuche jedoch ungefähr gleich.
Interessant ist auch der Potentialverlauf der mit Rost bedeckten Proben, nachdem die Rostschicht mit einer Nadel angekratzt worden ist. Die gestrichelte Kurve in Bild 9 zeigt einen solchen Kurvenverlauf. Das Potential fällt sofort auf den stabilen Endwert ab.

*Anodische Polarisation*

Die Proben wurden nach 20 Minuten Eintauchen in den Elektrolyten anodisch polarisiert. Aus Bild 10 ist ersichtlich, dass die Polarisationskurven den Stromspannungskurven passivierbarer Metalle sehr ähnlich sind. Der maximale Wert der Stromdichte bei der anodischen Polarisation ist dabei umso grösser, je tiefer das Potential während der 20minütigen Eintauchzeit abfällt. Die Stromdichte im passiven Bereich erreicht bei den Proben 3× ferner einen sehr tiefen Wert, im Gegensatz zu den Proben 1×. Das Passivierungspotential liegt in allen Fällen zwischen 200 und 300 mV (SCE). Das gleiche Potential haben auch die trockenen Proben unmittelbar nach dem Eintauchen in den Elektrolyten.
Gut bewitterte Proben (M3×) weisen nach dem Eintauchen nur einen kleinen Potentialabfall und bei der anodischen Polarisation überhaupt kein Stromdichtemaximum auf. Der Unterschied zwischen legiertem und unlegiertem Stahl ist auch bei den elektrochemischen Messungen wiederum nur unbedeutend.
Die Resultate der elektrochemischen Versuche lassen den Schluss zu, dass die bewitterten Proben nach dem Eintauchen teilweise im passiven Zustand vorliegen. Mit der Zeit fällt jedoch das Potential zu tieferen Werten ab, und die Passivierung bricht zusammen. Um die Passivierung aufrechterhalten zu können, muss im Rost der bewitterten Proben ein leicht reduzierbares Oxidationsmittel vorhanden sein, welches das Potential des Systems im Passivbereich hält und eine elektrochemische Passivierung der aktiven Fläche ermöglicht. Über die Menge und die Art dieses Oxidationsmittels kann aus der vorliegenden Untersuchung nichts Eindeutiges gesagt werden. Da die Legierungselemente innerhalb der einzelnen Bewitterungsarten keinen Einfluss auf die Passivierbarkeit ausüben, ist anzunehmen, dass es sich hier um einen leicht reduzierbaren Anteil des normalen Rostes handeln muss, der für die Aufrechterhaltung der Passivierung verantwortlich ist. In dieser Untersuchung konnte weder durch kathodische Reduktionskurven noch durch röntgenographische Phasenanalyse eine solche Rostphase ermittelt werden. Dies deutet im weiteren darauf hin, dass der notwendige Mengenanteil sehr klein ist und/oder die Roststruktur sich nur wenig von der Struktur der üblichen Rostphase unterscheidet.
Passivierungsversuche mit künstlich verletzten Rostoberflächen haben gezeigt, dass die kritische Stromdichte für die Passivierung umso grösser ist, je grösser die blanke Metalloberfläche ist. Umgekehrt kann aus diesem Versuch geschlossen werden, dass für eine konstante Oxidationsmittelmenge im Rost die Passivität umso länger aufrechterhalten werden kann, je kleiner die aktive, korrodierende Probenfläche ist.
Wie die metallographischen Untersuchungen zeigen, ist die Rostoberfläche der nach Typus 1× bewitterten Proben von zahlreichen Rissen und Unregelmässigkeiten durchzogen. Im Gegensatz dazu weist bei der Bewitterung 3× der Rost beinahe keine Risse auf, und die Metalloberfläche ist zum grössten Teil mit der dunklen, kompakten Rostphase überzogen. Bei diesen Unregelmässigkeiten auf der Rostoberfläche muss es sich um die aktiven, korrodierenden Stellen handeln. Im Falle gut bewitterter Stähle bedeckt die kompak-

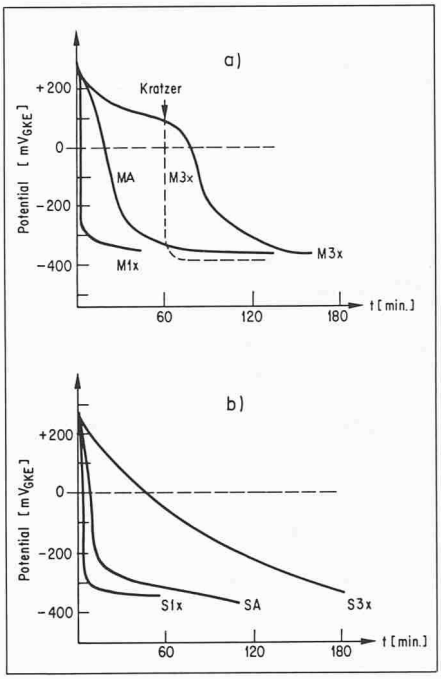



*Bild 9. Potentialabfall nach dem Eintauchen der Proben in 0,1 M $Na_2SO_4$-Lösung*
*a) wetterfester Stahl M*
*b) unlegierter Stahl S (vgl. Text)*

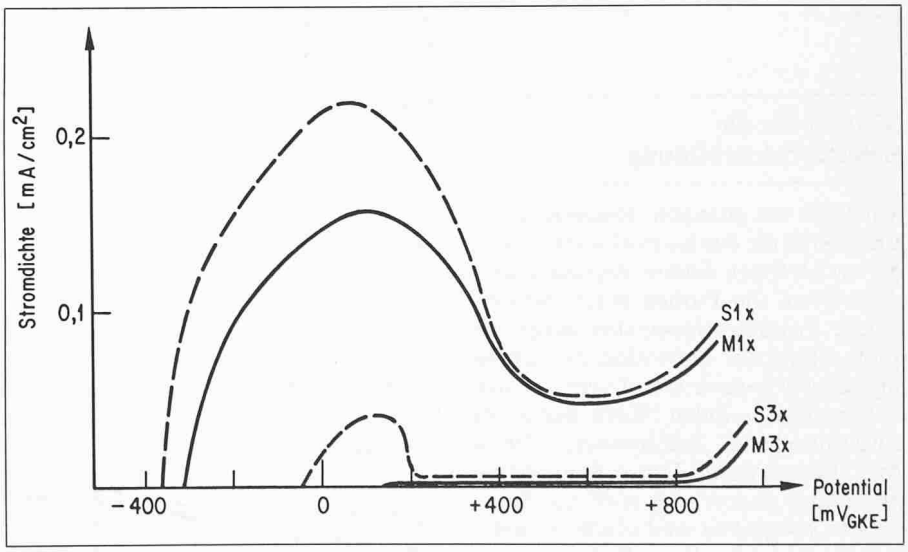



*Bild 10. Anodische Stromdichte-Potentialkurven nach 20 Min. Immersion in 0,1 M $Na_2SO_4$-Lösung, Potentialvorschub: 15 mV/Min.*

te Deckschicht grössere Flächenbereiche. Das Oxidationsmittel reicht deshalb länger aus, um die geringen aktiven Flächenanteile zu passivieren. Dies erklärt auch, weshalb das Potential bei den Proben 1× viel schneller zu tieferen Werten abfällt. Die aktive Fläche ist hier grösser als bei den nach 3× bewitterten Proben, und das Oxidationsmittel reicht nur für eine kurze Zeit aus, um das Potential im Passivbereich zu halten.
Die reduzierten Bestandteile des Rostes werden in den Trocknungsphasen durch den Luftsauerstoff jeweils wieder aufoxidiert, so dass bei erneutem Eintauchen die Proben eine Zeitlang passiv sind.

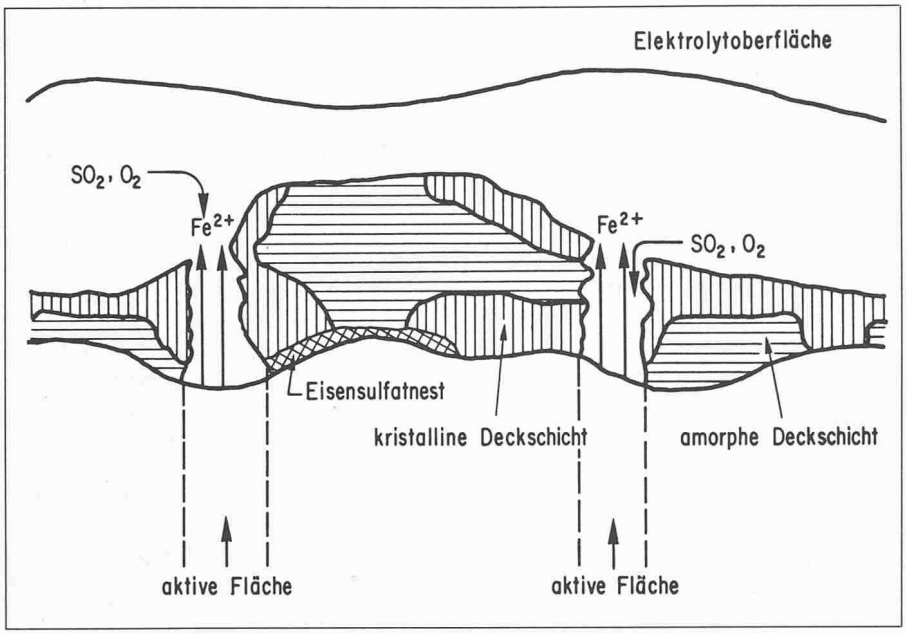



*Bild 11. Schematische Darstellung der Rostschicht eines gut bewitterten wetterfesten Stahles*

## Modell für die Schutzschichtbildung

Mit Hilfe der gezeigten Resultate kann ein Modell für das Korrosionsverhalten der wetterfesten Stähle abgeleitet werden. Wenn die Proben einem wiederholten Trocken/Nasszyklus ausgesetzt sind, erfolgt die Korrosion gleichmässig auf der ganzen Oberfläche. In den kurzen Nassperioden bilden sich keine ausgesprochene Sulfatnester. Durch Ausfällen von unlöslichen Korrosionsprodukten und Altern wird die Rostschicht kompakter und bildet teilweise eine Deckschicht, die als Diffusionsbarriere die Metalloberfläche schützen kann. Mit der Zeit ist der vom Rost aufrechterhaltene Reduktionsstrom gross genug, um die aktiven Korrosionsstellen während der Nassperioden zu passivieren. An diesen Stellen ist dadurch das Wachstum grosser Rostpusteln gehemmt. Dieser Vorgang kann sich sowohl bei legierten als auch bei unlegierten Stählen abspielen. Die Legierungselemente fördern aber das Ausfällen von basischen Sulfaten, so dass auch bei ungünstigen Bewitterungsbedingungen die Bildung von Deckschichten erleichtert wird [7].
Bild 11 zeigt diese Verhältnisse schematisch. Die aktive Fläche ist im Verhältnis zu den mit Deckschichten passivierten Flächen klein, so dass sie in den Nassperioden durch elektrochemische Passivität geschützt wird.
Wie sich lang anhaltende Nassperioden auf das Korrosionsverhalten der beschriebenen Stähle auswirkt, ist in Bild 12 dargestellt. Liegt die Probe längere Zeit im nassen Zustand vor, so können durch die anionensammelnde Wirkung der Eisenauflösung grosse Sulfatnester entstehen [8]. Die damit verbundenen, aktiv korrodierenden Oberflächenbereiche sind relativ gross und deshalb nicht mehr oder nur noch während sehr kurzer Zeit durch elektrochemische Passivierung geschützt. Durch Rissbildung und Treibwirkung neu entstandener Korrosionsprodukte können diese Rostpusteln abgesprengt werden. Die Folge davon ist eine gegenüber der günstigen Bewitterung stärkere Korrosion, die nicht zum Stillstand kommen wird.

## Folgerungen für die Praxis

Die Resultate dieser Untersuchung zeigen deutlich den *starken Einfluss der Bewitterung*. Es muss darauf geachtet werden, dass die verwendeten niedriglegierten Baustähle *nie längere Zeit nass* sind. Je schneller die Proben nach der Bewitterung wieder trocknen, desto besser ist das Langzeitverhalten dieser Stähle. Häufige kurze Nassperioden, gefolgt von Trockenphasen, beeinträchtigen hingegen die Lebensdauer der Stähle nicht, sondern führen zu einer immer besser schützenden Deckschicht.
Bei optimaler Bewitterung ist der Einfluss der Legierungselemente gering. Die vorteilhafte Wirkung der Legierungselemente kommt jedoch nur bei ungünstiger Bewitterung zur Geltung. Kleine Unterschiede in der Analyse der Stähle haben hingegen keinen wesentlichen Einfluss, wichtig ist nur, dass die Elemente Kupfer, Chrom und Phosphor in einer minimalen Konzentration vorhanden sind. Werden diese Baustähle unter ständig nassen Bedingungen verwendet, so bringen die Legierungselemente keinen Vorteil. Sowohl der unlegierte wie auch der niedriglegierte, wetterfeste Baustahl werden bald vollständig wegkorrodiert sein.

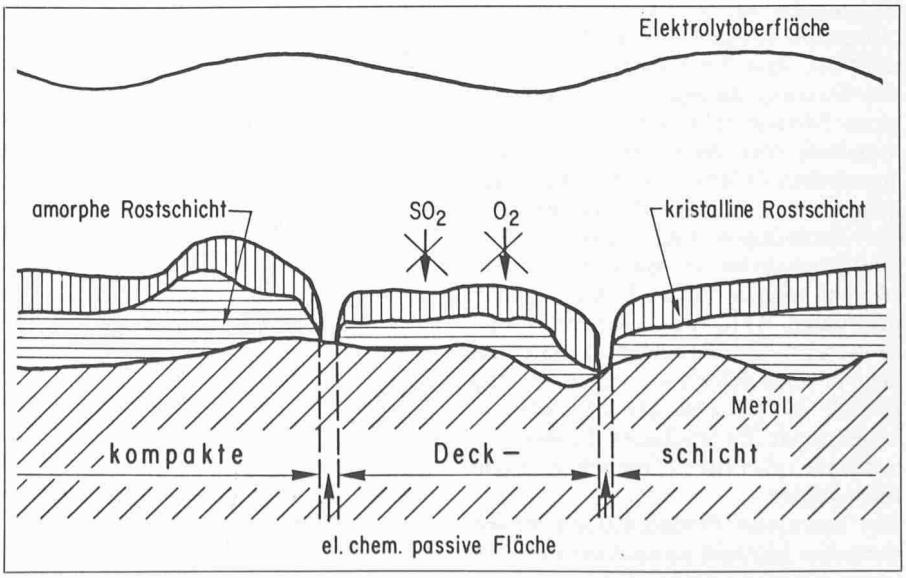



*Bild 12. Schematische Darstellung der Rostschicht eines schlecht bewitterten wetterfesten Stahles*

**Literaturverzeichnis**

[1] *Eisenstecken F., Stinnes W.:* Archiv Eisenhüttenwesen 27 (1956), 469-474
[2] *Friehe W., Tenhaven U.:* Stahl und Eisen 92 (1972), 277-279
[3] *Vedenkin S. G.*, Protection of Metals 11 (1975), 259-270
[4] *Larrabee C. P., Coburn S. K.:* 1st International Congress on Metallic Corrosion, London (1962), 276-285
[5] *Edwards A. M.:* Proc. Symposium on Developments in Methods of Prevention and Control of Corrosion in Buildings, British Iron and Steel Federation, London (1966)
[6] *Misawa T., Asami K., Hashimoto K., Shimodeira S.:* Corrosion Science 14 (1974), 279-289
[7] *Kunze E.:* Neue Hütte 19 (1974), 295-303
[8] *Schwarz H.:* Werkstoffe und Korrosion 16 (1965), 93-103

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. *H. Böhni*, dipl. Werkstoff-Ing., *H. Schwitter*, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich

*Wetterfeste Baustähle*

# Praktische Anwendung im Hochbau

Von Franz Theiler und Roland Geiser, Dübendorf

**In einer Zusammenstellung der wichtigsten Hinweise zur korrekten Anwendung von wetterfestem Baustahl wird der heutige Stand des Wissens für den Praktiker vorgestellt. Besonders häufige Fehlerquellen werden anhand von typischen Schadenfällen in Wort und Bild dokumentiert. Zum Schluss wird eine Checkliste präsentiert, die es erlaubt, Korrosionsschäden an Neubauten und bestehenden Bauten aus wetterfestem Baustahl in Zukunft zu vermeiden.**

Mit der Einführung von wetterfestem Baustahl im *Hochbau* wurde den *Architekten* ein Material in die Hand gegeben, das *auf den ersten Blick bestechende Vorteile* aufwies. Endlich fielen kostspielige Korrosionsschutzarbeiten wie Sandstrahlen, Streichen, Verzinken und periodischer Unterhalt dahin. Endlich war ein Werkstoff aus Stahl geschaffen worden, der in seiner Unempfindlichkeit gegenüber der atmosphärischen Bewitterung dem Beton gleichkam. Entsprechend freudig wurden erste erfolgversprechende Berichterstattungen aus dem Ausland zur Kenntnis genommen, und alsbald, d. h. Ende der sechziger, Anfang der siebziger Jahre, setzte auch in der Schweiz eine rege Bautätigkeit mit dem neuen Werktstoff ein.

Ganz so neu war dieser Werkstoff aber nicht, wenigstens nicht in den *USA*. Dort konnte man auf dem Gebiete des *Schienen- und Strassenfahrzeugbaus* bereits auf jahrzehntelange gute Erfahrungen zurückblicken. Zudem wirkten die ersten Bauten in wetterfestem Baustahl auf die meisten Betrachter irgendwie attraktiv - zumindest auf eine gewisse Distanz betrachtet (vgl. Tabelle 1). Wen wundert's, dass der neue Baustoff unter diesen Umständen *mit Vorschusslorbeeren* geradezu *überhäuft* wurde und dass die Stahlhersteller die Gunst der Stunde nutzten und durch farbige, sehr optimistisch gehaltene Prospekte und Broschüren versuchten, den wetterfesten Baustahl bei den Architekten noch beliebter zu machen. Schlagworte, wie «Edelrost», «Patina» und die Devise «Rost schützt vor Rost», trugen das ihrige dazu bei, jede etwa noch vorhandene Skepsis gegenüber dem im Hochbau noch unerprobten Baustoff abzutragen. Und ab Anfang der siebziger Jahre folgten sich die neuen Gebäude in wetterfestem Baustahl Schlag auf Schlag.

Allein, es dauerte nicht sehr lange, bis dem anfänglichen Enthusiasmus eine kräftige Ernüchterung folgte. Man kam nämlich dahinter, dass das neue Material die hochgesteckten Erwartungen in den meisten Fällen nicht erfüllen konnte. Wie immer bei solchen Gelegenheiten, schlug das Pendel nun auf die entgegengesetzte Seite aus. Hatte man vorher den neuen Baustoff praktisch bedenkenlos übernommen, so holte man jetzt gnadenlos nach, was man vorher an Kritik versäumt hatte. Und wenn z. B. der «Spiegel» in einem Artikel mit Bezug auf den schadhaften Dahlemer Neubau der FU Berlin aus wetterfestem Baustahl von einer «Rostlaube» und einer «bautechnischen Pleite, die fast ohne Beispiel ist», spricht und gleichzeitig ankündigt, dass «der Berliner Bau-Senat von COR-TEN-Stahl in Zukunft die Finger lässt» [1], so ist dies zwar eine reichlich pointierte, im übrigen aber typische Stellungnahme zum Problem der Bauschäden an wetterfestem Baustahl in der heutigen Zeit.

*Tabelle 1. Beispiele für erste Bauten aus wetterfestem Baustahl im In- und Ausland*

| | |
|---|---|
| *Ausland* | |
| - Verwaltungsgebäude der John Deer & Co., Moline, Jll., USA | Eröffnet 1964 |
| - Civic Center, Chicago, USA | Eröffnet 1969 |
| *Inland* | |
| - Verkehrshaus der Schweiz, Luzern | Eröffnet 1970 |
| - ETS Magglingen | Eröffnet 1970 |
| - Kantonsschule Chur | Eröffnet 1970 |
| - Verwaltungsgebäude der Ferrolegeringar, Zürich | Eröffnet 1970 |

Ein völliger Verzicht auf die Verwendung von wetterfestem Baustahl hiesse jedoch auch, auf seine unbestreitbaren Vorzüge zu verzichten. Die Kunst der korrekten Anwendung des neuen Baustoffes besteht aber darin, bei bestmöglicher Ausnützung seiner Vorteile, die damit verknüpften Nachteile vorauszusehen und so weit als möglich zu vermeiden. Dieser Artikel soll nun dem Praktiker die wichtigsten Informationen zur korrekten Anwendung des wetterfesten Baustahls vermitteln, die häufigsten Fehlerquellen aufdecken und Wege zu ihrer Vermeidung angeben.

## Informationen über die korrekte Anwendung für den Praktiker

Dem Korrosionsspezialisten sind die günstigen und weniger günstigen Eigenschaften von wetterfestem Baustahl seit mindestens zwanzig Jahren bekannt. Publikationen über das Korrosionsverhalten während langjähriger Bewitterungsversuche lassen sich ohne Schwierigkeiten in den einschlägigen Fachzeitschriften finden. Dem Praktiker bleiben solche Informationen allerdings in der Regel verschlossen. Er muss sich an Hand von Merkblättern, Verbandsmitteilungen und Firmenbroschüren orientieren, so gut es eben geht. Einige typische Vertreter darunter sind - ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben - im Literaturverzeichnis aufgeführt [2]...[8].

In diesen Publikationen werden z. T. schon sehr früh, nämlich 1969, erste brauchbare Hinweise zu den Themen Konstruktion, Deckschichtbildung, Verfärbung angrenzender Bauteile gegeben.

### Hinweise zur Konstruktion

Diese Hinweise sind sehr wichtig, gelten sie doch als Stand des Wissens für den Praktiker; sie werden daher in vollem Wortlaut und chronologisch zitiert. Dem Eingeweihten auf dem Gebiet des wetterfesten Baustahls wird auffallen, dass die Angaben anfänglich sehr allgemein gehalten sind und erst im Verlauf