

U. Nürnberger

## **Korrosionsverhalten feuerverzinkter Baustähle in überwiegend sandhaltigen Böden**

**Corrosion behaviour of galvanized steel in mainly sandy grounds**

„Werkstoffe und Korrosion“ 40 (1989) 1, S. 7/16

Bericht Nr. 111  
des Gemeinschaftsausschuß Verzinken e.V.

# Korrosionsverhalten feuerverzinkter Baustähle in überwiegend sandhaltigen Böden

## Corrosion behaviour of galvanized steel in mainly sandy grounds

U. Nürnberger\*

Herrn Professor Dr. Helmut Kaesche zum 60. Geburtstag gewidmet

In überwiegend sandhaltigen Böden mit unterschiedlichem Feinanteil < 0,06 mm (2,5–20,4%) wurden Proben aus unverzinktem und feuerverzinktem Baustahl im Freien und im Labor ausgelagert. Neben der Bodenzusammensetzung wurde auch der Salzgehalt und die Bodentemperatur variiert. Es wurden die Korrosionsrate und bei unverzinkten Teilen auch das Lochkorrosionsverhalten ermittelt. Weiterhin wurden die das Korrosionsverhalten kennzeichnenden Größen wie spezifischer Bodenwiderstand und Korrosionspotential kontinuierlich verfolgt.

Der Metallabtrag war bei unverzinkten Teilen sehr viel ausgeprägter als bei feuerverzinkten und nahm bei unverzinkten auch mit steigendem Feinanteil der Böden zu. Salzzugaben zu Beginn der Versuche bewirkten einen erhöhten Abtrag, beeinflussten bei feuerverzinkten Teilen jedoch nur die Anfangskorrosion. Die erhöhten Abtragungen setzten etwa ab Gehalten von  $3 \cdot 10^{-3} \text{ Mol Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}/\text{kg}$  ein. Wurden Salze dem Boden erst nach 2 Jahren (nach Deckschichtbildung) zugegeben, dann erhöhten diese zwar bei unverzinkten, nicht jedoch bei feuerverzinkten Proben den Abtrag.

Von unverzinkten Stählen in dem Boden mit 20,4% Feinanteil abgesehen, trat nach einer anfänglich stärkeren Korrosion eine Verlangsamung infolge Deckschichtbildung ein.

Bei den unverzinkten Proben trat starke Lochkorrosion auf, und zwar in den belüftungsfähigen Böden stärker als in den dichten und somit wasserhaltigeren. Salzzugaben förderten eher einen allgemeinen Abtrag als eine Lochkorrosion.

Bei feuerverzinkten Teilen wurde nach örtlichem Abtrag des Zinks unter extremen Verhältnissen der Stahluntergrund kaum abgetragen. Die zinkfreien Stellen wurden durch das noch vorhandene Zink kathodisch geschützt.

Die Korrosion von Stahl ist temperaturabhängig: Bei Erhöhung der Temperatur von 4 auf 20°C wurden Korrosionszunahmen um bis zu 100% festgestellt. Bei Feuerverzinkungen ist der Temperatureinfluß auf die Korrosion nur gering.

In mainly sandy grounds with different portions of fine parts < 0,06 mm (2,5–20,4%) specimens of ungalvanized and galvanized steel were stored outside and in the laboratory. Besides the composition of the ground, the salinity and the temperature of the ground were varied too. The corrosion rate and, for ungalvanized specimens, the behaviour to pitting corrosion were determined. Furthermore the factors characterising the corrosion behaviour such as specific resistance of soil and corrosion potential were investigated continuously.

The loss in weight of metal was much greater for ungalvanized than for galvanized specimens and increased for ungalvanized specimens with an increasing portion of fine parts in the ground. Additions of salt at the beginning of the tests produced an increased amount of metal wastage, but for galvanized specimens they only had an influence upon initial corrosion. The increased removals of material started since contents of  $3 \cdot 10^{-3} \text{ Mol Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}/\text{kg}$ . If salts were added to the ground after 2 years (after the formation of a surface layer), they increased the wastage of material for ungalvanized but not for galvanized specimens.

Apart from ungalvanized bars in the soil with a fineness portion of 20,4%, corrosion, after an acceleration at the beginning, slowed down owing to the formation of a surface layer.

Ungalvanized specimens were attacked by a strong pitting corrosion and that more in aerated than in dense and, thus, water-containing grounds. The additions of salt accelerate more an uniform corrosion of material than a pitting corrosion.

As for galvanized specimens after a local removal of zinc under extreme conditions the steel base had been hardly corroded away. The parts free of zinc were protected cathodically by the still existing zinc.

The corrosion of steel depends upon the temperature: by increasing the temperature from 4 to 20°C increases of corrosion up to 100% were stated. As for galvanized surfaces temperature has only a small influence upon corrosion.

### 1 Einleitung

Bei Korrosionsbelastung durch Erdböden kann Stahl durch Feuerverzinken geschützt werden. Art und Umfang der Schutzwirkung hängen vor allem von der Belüftung und Leitfähigkeit (d.h. der Bodenstruktur, dem Wasser- und Neutralsalzgehalt) des Bodens ab. Nach [1] empfehlen sich feuerverzinkte Stähle nur für belüftungsfähige, hochohmige und annähernd neutrale Böden. Im Bauwesen kommt feuerverzinkter Stahl bei tragenden Konstruktionen (z.B. Bewehrter Erde) deshalb vorzugsweise in überwiegend sandhaltigen Böden

homogener Zusammensetzung zur Anwendung, an welche aus korrosionstechnischer Sicht (z.B. Drainagefähigkeit, Salzgehalt, pH-Wert) besondere Anforderungen gestellt werden [2, 3]. Weiterhin kommt feuerverzinkter Stahl für Erderwerkstoffe in Frage [4]. Anwendungen in spezifizierten Böden bieten sich z.B. auch in der Installationstechnik an.

Neben der Beschaffenheit des Bodens wird das Korrosionsverhalten auch durch elektrochemische Einflußgrößen wie Elementbildung mit anderen Bauteilkomponenten sowie Gleich- und Wechselstrom beeinflusst [5]. Bei den folgenden Betrachtungen sollen diese Sonderfälle ausgeschlossen werden.

Zum Verhalten feuerverzinkter und zum Vergleich auch unverzinkter Baustähle wurden umfangreiche Versuche in [3] im Hinblick auf eine Anwendung bei Bewehrte Erde-Kon-

\* Dr. Ing. habil. Ulf Nürnberger, Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg (FMPA), Otto-Graf-Institut, Pfaffenwaldring 4, 7000 Stuttgart 80.

struktionen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sollen im folgenden in wesentlichen Punkten dargestellt werden, da sie grundsätzliche Aussagen zur freien Korrosion feuerverzinkter Bauteile in überwiegend sandhaltigen Böden ermöglichen.

## 2 Grundlagen

Bei der Sauerstoffkorrosion metallischer Bauteile im Erdboden laufen vergleichbare Korrosionsreaktionen ab wie in annähernd neutralen, wäßrigen Medien. Vergleichbar einer Korrosionsbelastung durch die Atmosphäre tritt auch in Böden eine merkliche Erhöhung der Korrosionsgeschwindigkeit erst dann ein, wenn diese einen gewissen Wassergehalt aufweisen [1, 6]. Der feuchte Boden übernimmt die Rolle eines Elektrolyten; sein Wassergehalt bestimmt zudem die Sauerstoffnachdiffusion im Boden. Abb. 1 zeigt schematisch die Verhältnisse bei aktiver Metallkorrosion in an Wasser ungesättigten und gesättigten Böden. Bei steigendem Wassergehalt nimmt im freien Volumen zwischen den Bodenteilchen der Luftanteil ab, die relative Sättigung an Bodenwasser dagegen zu. Entsprechend nehmen der Bodenwiderstand und der Sauerstoffgehalt ab (die Bodenleitfähigkeit nimmt zu). Bei fallendem Bodenwiderstand wächst auch der Korrosionsangriff. Dies gilt jedoch nur bis zu einem kritischen Wassergehalt  $W_{kr}$ , ab welchem die ständige Verminderung des Sauerstoffs im Boden den Angriff rasch herabsetzt. Der Metallangriff erreicht also ein Maximum, wenn Wasser und Bodenluft in einem entsprechenden Verhältnis zusammenwirken.

In ungesättigten Böden wird somit die Korrosionsgeschwindigkeit bei aktiver Korrosion weitgehend durch den Bodenwiderstand bestimmt. Der Sauerstoff der Bodenluft reicht hier offenbar aus, um die Korrosion unter Sauerstoffüberschuß zu halten. Wird die Luft im Porenvolumen des Bodens verbraucht, so kann diese aus der Atmosphäre nachdiffundieren.

Der Sauerstoffgehalt im Boden bzw. das Wasser/Luft-Verhältnis und auch die Größe der Bodenteilchen sind jedoch für die Kinetik der Korrosion maßgebend. Je nach Größe der

anodischen und kathodischen Bezirke auf der Metalloberfläche besteht nämlich die Möglichkeit der Entstehung einer hohen Zahl von Belüftungselementen. Deshalb werden z.B. Stahlteile in überwiegend sandhaltigen Böden vorzugsweise lokal (Lochkorrosion) angegriffen [1, 2, 7].

Von besonderer Bedeutung sind der Sauerstoffgehalt im Boden bzw. der Sauerstoffzutritt zur Metalloberfläche auch für die Bildung von Deckschichten [7-9], welche in der Lage sind, Korrosionsprozesse zu hemmen. Die Ausbildung der Deckschichten ist aus kinetischen Gründen erst oberhalb bestimmter Grenzwerte für die Sauerstoffkonzentration möglich. Ferner können gelöste Salze die Schutzwirkung der Deckschichten beeinträchtigen. In porösen und gut belüfteten Böden, das sind z.B. überwiegend sandhaltige Böden, sind daher einerseits die Bedingungen für einen anfänglich schnellen Korrosionsabtrag vorhanden, andererseits sind aber auch die Bedingungen für eine Schutzschichtbildung gegeben [1, 2, 10, 11].

Aufgrund der genannten Zusammenhänge werden sowohl bei unverzinktem als auch feuerverzinktem Stahl Art und Umfang einer Korrosion sowie die Gesetzmäßigkeit des Abtrages maßgeblich durch die Struktur und den Wasserhaushalt der Böden bestimmt: Bei zunehmender Belüftungsfähigkeit (abnehmendem Feinanteil und Wassergehalt) tritt eine Verringerung der Korrosion ein, und in belüfteten Böden sind feuerverzinkte Stähle den unverzinkten deutlich überlegen [1, 2, 10, 11]. Bei mangelhafter Belüftung und/oder hohen Salzgehalten wird eine Zinkauflage jedoch verhältnismäßig rasch aufgezehrt und übt dann nur einen temporären Schutz aus.

Die zeitliche Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeit bei unverzinktem bzw. feuerverzinktem Stahl in belüfteten Böden geringer Aggressivität [1, 2, 10, 11] ist auf die Bildung von Deckschichten zurückzuführen, welche nach etwa 2 bis 5 bzw. 2 Jahren weitgehend abgeschlossen ist. In unbelüfteten Böden kann bei beiden Werkstoffen nicht mit Deckschichtbildung gerechnet werden. Auch bei abgemindertem und bei verzinktem Stahl auch bei stark erhöhtem pH-Wert der Böden (amphoterer Verhalten) treten verstärkte Abzehrungen auf [1, 6]. Bei überwiegend sandhaltigen, gut bis sehr gut belüfteten Böden nimmt die Zinkkorrosion unterhalb pH 4 deutlich zu.

In der Literatur [5] werden bei Feuerverzinkungen zumeist Deckschichten aus Zinkkorrosionsprodukten als Ursache der zeitlichen Abnahme der Zinkkorrosion genannt. Es sind jedoch auch noch andere Gründe für dieses Verhalten denkbar; u. a. wird angenommen, daß die Abnahme der Korrosion auch auf die Anwesenheit von Eisen in der Zinkauflage zurückzuführen ist [12]. Bei erdvergrabenen, feuerverzinkten Teilen entsteht als Reaktionsprodukt Zinkhydroxid, welches mit Kohlensäure zu Zinkkarbonat umgewandelt werden kann. Die Karbonatschichten besitzen eine höhere Schutzwirkung als die Hydroxidschichten. Insofern entscheidet die Belüftungsfähigkeit (Zutritt von  $\text{CO}_2$  durch den Boden zum feuerverzinkten Teil) auch bei verzinkten Oberflächen über die Fähigkeit zur Deckschichtbildung.

Je nach Aggressivität der Böden wird die Zinkauflage mit der Zeit abgebaut. Dabei sind die Voraussetzungen für eine Lochkorrosion bei einer Feuerverzinkung in sehr viel geringerem Umfang gegeben als bei unverzinkten Stahloberflächen [12]. Bei der Umwandlung von Zink in seine Korrosionsprodukte findet eine Volumenzunahme um etwa den Faktor 3,6 statt, wodurch das Erdreich von der Zinkoberfläche weggedrückt und verdichtet wird [13]. Dadurch wird der Zutritt von Sauerstoff zur Metalloberfläche erschwert, und der Abtrag wird reduziert. Bei örtlichem Abtrag der Verzinkung in

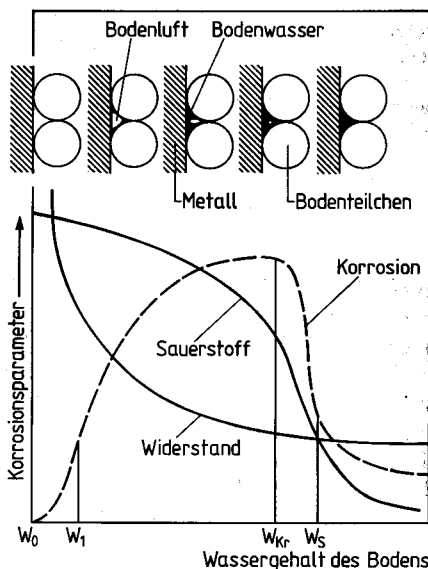


Abb. 1. Bodenwiderstand, Sauerstoffgehalt und Korrosion in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens, schematisch (Markovic)

Fig. 1. Schematic relationship between water content of soil and soil resistance, oxygen content and corrosion (Markovic)

aggressiveren Böden werden freiliegende Stahloberflächen kathodisch geschützt [1, 2, 6, 11]. Wenn die Zinkschicht großflächig abgetragen ist, beginnt der Stahluntergrund zu korrodieren. Wegen der besonderen Art der Korrosionsprodukte ist der Korrosionsangriff dann jedoch beträchtlich langsamer als bei gleichermaßen ausgelagerten unverzinkten Stählen [1, 2, 11]. Die Schutzschichten aus Korrosionsprodukten und verklebter Bodenschicht bewirken auch einen im Vergleich zum unverzinkten Stahl sehr viel gleichmäßigeren Angriff und setzen die Neigung des Stahluntergrundes gegenüber Lochkorrosion herab [2].

### 3 Versuchsdurchführung und Versuchsmaterialien

Zur Feststellung des Korrosionsverhaltens wurden unverzinkte und feuerverzinkte (mittlere Zinkauflage 95 µm) Blechabschnitte (25 × 8 × 0,3 cm) aus unberuhigtem Baustahl St 37 in Gruben im Freien und für Sonderuntersuchungen in Boxen im Labor ausgelagert. Die Abmessungen der Gruben und Boxen, das Einfüllen und Verdichten der Versuchsböden und die Lage der Metallproben wird eingehend in [3] beschrieben.

Während der bis zu 4,5 Jahre andauernden Auslagerung wurden regelmäßig die Klimadaten (Bodentemperatur, Bodenfeuchte), der Bodenwiderstand (Wenner-Methode) und das Korrosionspotential der Proben verfolgt. Das Korrosionsverhalten der Blechabschnitte wurde durch regelmäßige Probenahme ermittelt: Neben dem über Gewichtsverlustmessungen bestimmten mittleren Abtrag wurde (bei unverzinkten Stählen) auch das Lochkorrosionsverhalten untersucht.

Die Eigenschaften der zur Füllung der Gruben und Boxen verwendeten Böden im Anlieferungszustand geht aus der Tabelle hervor. Untersucht wurden ein enggestufter Sand (Boden 1) und Sand-Ton-Gemische (Böden 2 bis 4). Zur Füllung der Gruben wurden die Böden 1 bis 3 verwendet. In der genannten Reihenfolge werden diese dichter und belüftungsärmer: Der Feinanteil (Körnung < 0,063 mm) und der mittlere Wassergehalt nehmen zu, der Luftgehalt dagegen ab.

Die Füllung der Boxen erfolgte mit Boden 4, der in seinen Eigenschaften in etwa einem Mittel aus den Böden 2 und 3 entspricht.

Tabelle. Eigenschaften der Böden im Anlieferungszustand  
Table. Properties of the ground in the original state

Boden Bodenart		1 Sand	2 Sand-Ton-Gemische (lehmiger Sand)	3	4
Körnung < 0,063 mm %		2,5	12,8	20,4	16,7
spezif. Bodenwiderstand <sup>1</sup>	Ω · cm	13 300	8570	4030	5210
Wassergehalt <sup>2</sup>	%	4,1	15,4	15,5	14,6
Luftgehalt <sup>2</sup>	%	33,5	15,5	7,0	12,7
pH-Wert		8,1	8,3	8,4	7,4
Säurekapazität K <sub>s</sub> 4,8	m val/kg	71	66	143	51
Sulfid S <sup>2-</sup>	mg/kg	< 5 (Spuren)			
Chlorid Cl <sup>-</sup>	mg/kg	11	9	7	15
Sulfat SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/kg	142	103	206	155

<sup>1</sup> Boden mit destilliertem Wasser gesättigt, 20 °C

<sup>2</sup> Mittelwert von 6 Monaten

Aufgrund der in der Tabelle angegebenen Eigenschaften sind die Böden 1, 2 und 4 nach dem Arbeitsblatt GW 9 (Merkblatt für die Beurteilung der Korrosionsgefährdung von Eisen und Stahl im Erdboden, Ausgabe 1985) als nicht aggressiv und Boden 3 als schwach aggressiv einzustufen.

Bei den Versuchen in den Gruben im Freien wurden weitere Parameter untersucht:

Im Hinblick auf mögliche Störfälle in der Praxis (Eindringen von tausalzhaltigem Wasser oder z.B. geologischen Wässern) wurde den Böden 1 bis 3 in gesonderten Gruben zu Versuchsbeginn einmalig etwa 210 mg/kg Chlorid (als NaCl) und etwa 1150 mg/kg Sulfat (als Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) in gleichmäßiger Verteilung zugegeben. Diese Mengen an Salzen stellten extreme Zugaben dar, wie sie unter praktischen Verhältnissen nur sehr selten vorkommen dürften.

Mittels kontinuierlicher durchgeführter Bodenanalysen und bestätigt durch die Widerstandsmessungen (Abschnitt 4.1) wurde festgestellt, daß die den Böden zugegebenen Salze trotz Abdeckung der Gruben durch seitlich eindringendes Regenwasser ausgewaschen wurden. Die „Auswaschung“ erfolgte bei den Chloriden rascher als bei den Sulfaten und nahm in der Reihenfolge Boden 3 – Boden 2 – Boden 1, also mit zunehmender Drainagefähigkeit, zu [3]. In den Korrosionsprodukten und dem an den Blechabschnitten anhaftendem Sand kam es dagegen zu Aufkonzentrierungen der Salze.

Wie die Ergebnisse der Auslagerung zeigten, stellte sich je nach Material (unverzinkt bzw. verzinkt) und einer Salzzugabe eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Abnahme der Korrosionsrate infolge Deckschichtbildung ein. Durch eine weitere (erstmalige oder erneute extreme) Salzzugabe nach etwa 2 Jahren wurde in gesonderten Versuchen der Frage nach der Stabilität von Deckschichten nach der späteren Verschärfung der Korrosionsverhältnisse nachgegangen. Dabei wurde in Anlehnung an die Praxis davon ausgegangen, daß Störfälle in der Regel erst im Zeitraum der Nutzung eintreten, während die Böden beim Einbau meist frei von schädlichen Salzkonzentrationen sind.

In Boden 2 mit und ohne (extreme) Salzzugabe wurde in gesonderten Gruben zu Versuchsbeginn schichtweise Calciumcarbonat eingestreut und in mit CO<sub>2</sub> versetztem Wasser gelöst. CaCO<sub>3</sub> besitzt eine nur geringe Wasserlöslichkeit und wird durch die Kohlensäure in das leicht lösliche Bicarbonat Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> überführt. Eine Bicarbonatzugabe kann sowohl bei unverzinktem als auch feuerverzinktem Stahl eine Deckschichtbildung begünstigen und somit verminderte Korrosion bewirken [7, 14]. Bei unverzinktem Stahl setzen erhöhte Konzentrationen an Calciumbicarbonat die Neigung gegenüber Lochkorrosion herab, da eine Stabilisierung von Korrosions-elementen durch Hydrolysereaktionen (Ansäuerung im anodischen Bereich) und Alkalisierung der Kathode infolge der Pufferung durch Bicarbonationen verhindert wird.

Vergleichbar dem zugegebenen Chlorid und Sulfat wurde jedoch auch das Bicarbonat innerhalb weniger Wochen durch Fremdwässer ausgewaschen. Der Auslagerung der Proben in Gruben im Freien lagen somit bei Salzzugabe in Form von Chlorid, Sulfat und Bicarbonat keine konstanten Korrosionsbedingungen zugrunde. Aber auch hinsichtlich der Bodentemperatur und Bodenfeuchtigkeit waren keine konstanten Verhältnisse gegeben, da jahreszeitliche Klimaschwankungen sich auf diese Größen unmittelbar auswirkten [3].

Zur Feststellung des Korrosionsverhaltens in Abhängigkeit von bestimmten und auf Dauer konstanten Wassergehalten, Temperaturen und Salzkonzentrationen im Boden wurden zusätzliche Auslagerungen von Proben in Boxen im Labor durchgeführt. Boden 4 wurde in 10 Boxen gestaffelt bis zu

210 mg/kg Chlorid und bis zu 1100 mg/kg Sulfat zugegeben. In zwei Fällen wurden die Chlorid- und Sulfatgehalte gleichzeitig erhöht. Bei einer Box wurde in vergleichbaren Konzentrationen wie bei den Gruben Bikarbonat zur Feststellung einer bevorzugten Deckschichtbildung zugegeben.

Die vorgenannten Boxen-Versuche wurden bei 20°C durchgeführt. Zusätzlich wurden in 4 Boxen Proben bei 11°C bzw. 4°C ausgelagert. Diese Böden entsprachen bezüglich ihrer Zusammensetzung dem Anlieferungszustand bzw. extremer Salzzugabe. Somit konnte das Korrosionsverhalten in weitgehend salzfreien und salzhaltigen Böden in einem Temperaturbereich verfolgt werden, der bei Berücksichtigung der jährlichen Temperaturänderungen für oberflächennahe Böden typisch ist.

## 4 Ergebnisse der Untersuchungen

### 4.1 Bodenwiderstand

Der in den Gruben kontinuierlich gemessene spezifische Bodenwiderstand wird in Abb. 2 aufgezeigt. Man erkennt eine Abnahme des Widerstandes in der Reihenfolge Boden 1 – Boden 2 – Boden 3, also mit steigendem Feinanteil. Desweiteren durchlaufen die Kurven in den Wintermonaten ein Maximum und im Sommer ein Minimum: Erhöhte Temperaturen setzen den Widerstand herab. Ein merklicher Einfluß der jährlichen Schwankungen der Bodenfeuchtigkeit auf den gemittelten Bodenwiderstand wurde nicht festgestellt. Nur bei kurzfristigen extremen Änderungen der Bodenfeuchtigkeit (z.B. bei einem Tagesniederschlag von  $> 10 \text{ l/m}^2$ ) wurde eine deutliche Abnahme des Bodenwiderstandes vermerkt.

In Abb. 2 liegen die Bodenwiderstände in Gruben mit Salz (mS) deutlich niedriger als in jenen ohne Salz (oS). Der allmähliche Anstieg des Widerstandes in den Gruben mit Salzzugabe ist auf das Auswaschen des Salzes zurückzuführen. Dies war im Boden 1 bereits nach 2–3 Monaten, bei Boden 2 nach etwa 2 Jahren und bei Boden 3 nach etwa 3 Jahren abgeschlossen.

In einem Teil der mit Boden 2 gefüllten Gruben mit und ohne extreme Salzzugabe zu Versuchsbeginn wurde nach etwa 2 Jahren (Dezember) erneut bzw. erstmalig Salz in gelöster Form zugegeben. Danach fielen die Bodenwiderstände kontinuierlich von etwa  $10000 \Omega \cdot \text{cm}$  auf Werte um 700 bis

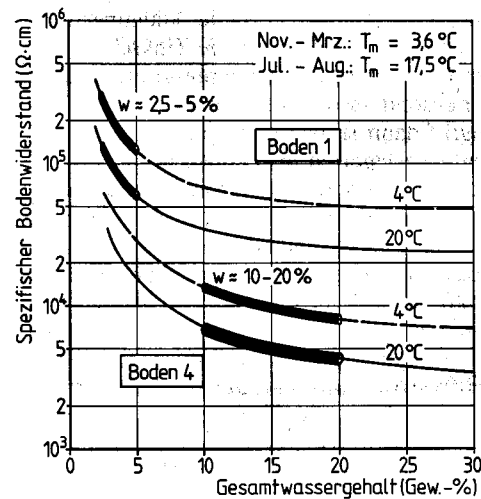


Abb. 3. Spezifischer Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Temperatur

Fig. 3. Relationship between water content, temperature and soil resistance

$1000 \Omega \cdot \text{cm}$  im Sommer ab und stiegen auf etwa 1500 bis  $2000 \Omega \cdot \text{cm}$  im darauf folgenden Winter an.

Der über jeweils ein Jahr gemittelte Bodenwiderstand lag für die Böden 1, 2 und 3 (ohne Salzzugabe) bei  $2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  bzw.  $5 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ; der spezifische Bodenwiderstand nahm somit mit zunehmender Drainagefähigkeit bzw. abnehmendem Feinanteil der Böden zu.

Eine Auswertung der Bodenwiderstände in Abhängigkeit von den gemittelten Monatstemperaturen zeigte eine geradlinige Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur auf: Bei einer Temperaturerniedrigung um  $10^\circ\text{C}$  stieg der Bodenwiderstand im Mittel um 70% an [3].

Für den Sandboden (Boden 1) und ein Sand-Ton-Gemisch (Boden 4) ist in Abb. 3 der Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt und der Temperatur dargestellt. Aufgrund der Feinstruktur dieser Böden bewegt sich der durch das Klima bedingte natürliche Wassergehalt stets in den dick bezeichneten Abschnitten, nämlich zwischen etwa 2,5 und 5% bei Boden 1 und zwischen etwa 10 und 20% bei Boden 4. Die unterschiedlichen Widerstände solcher Böden

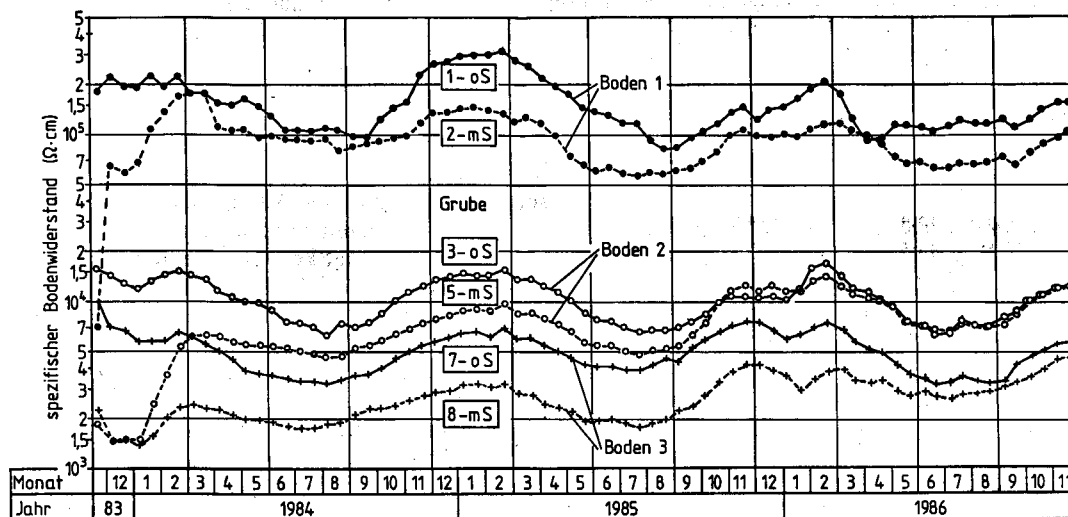


Abb. 2. Bodenwiderstände in den Gruben in den ersten 3 Jahren der Auslagerung

Fig. 2. Soil resistances of the outdoor storage in the first 3 years

210 mg/kg Chlorid und bis zu 1100 mg/kg Sulfat zugegeben. In zwei Fällen wurden die Chlorid- und Sulfatgehalte gleichzeitig erhöht. Bei einer Box wurde in vergleichbaren Konzentrationen wie bei den Gruben Bikarbonat zur Feststellung einer bevorzugten Deckschichtbildung zugegeben.

Die vorgenannten Boxen-Versuche wurden bei 20°C durchgeführt. Zusätzlich wurden in 4 Boxen Proben bei 11°C bzw. 4°C ausgelagert. Diese Böden entsprachen bezüglich ihrer Zusammensetzung dem Anlieferungszustand bzw. extremer Salzzugabe. Somit konnte das Korrosionsverhalten in weitgehend salzfreien und salzhaltigen Böden in einem Temperaturbereich verfolgt werden, der bei Berücksichtigung der jährlichen Temperaturänderungen für oberflächennahe Böden typisch ist.

## 4 Ergebnisse der Untersuchungen

### 4.1 Bodenwiderstand

Der in den Gruben kontinuierlich gemessene spezifische Bodenwiderstand wird in Abb. 2 aufgezeigt. Man erkennt eine Abnahme des Widerstandes in der Reihenfolge Boden 1 – Boden 2 – Boden 3, also mit steigendem Feinanteil. Desweiteren durchlaufen die Kurven in den Wintermonaten ein Maximum und im Sommer ein Minimum: Erhöhte Temperaturen setzen den Widerstand herab. Ein merklicher Einfluß der jährlichen Schwankungen der Bodenfeuchtigkeit auf den gemittelten Bodenwiderstand wurde nicht festgestellt. Nur bei kurzfristigen extremen Änderungen der Bodenfeuchtigkeit (z.B. bei einem Tagesniederschlag von  $> 10 \text{ l/m}^2$ ) wurde eine deutliche Abnahme des Bodenwiderstandes vermerkt.

In Abb. 2 liegen die Bodenwiderstände in Gruben mit Salz (mS) deutlich niedriger als in jenen ohne Salz (oS). Der allmähliche Anstieg des Widerstandes in den Gruben mit Salzzugabe ist auf das Auswaschen des Salzes zurückzuführen. Dies war im Boden 1 bereits nach 2–3 Monaten, bei Boden 2 nach etwa 2 Jahren und bei Boden 3 nach etwa 3 Jahren abgeschlossen.

In einem Teil der mit Boden 2 gefüllten Gruben mit und ohne extreme Salzzugabe zu Versuchsbeginn wurde nach etwa 2 Jahren (Dezember) erneut bzw. erstmalig Salz in gelöster Form zugegeben. Danach fielen die Bodenwiderstände kontinuierlich von etwa  $10000 \Omega \cdot \text{cm}$  auf Werte um 700 bis

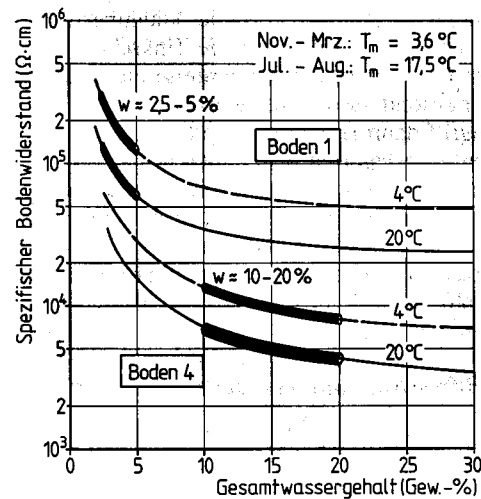


Abb. 3. Spezifischer Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Wassergehalt und der Temperatur

Fig. 3. Relationship between water content, temperature and soil resistance

$1000 \Omega \cdot \text{cm}$  im Sommer ab und stiegen auf etwa 1500 bis  $2000 \Omega \cdot \text{cm}$  im darauf folgenden Winter an.

Der über jeweils ein Jahr gemittelte Bodenwiderstand lag für die Böden 1, 2 und 3 (ohne Salzzugabe) bei  $2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$  bzw.  $5 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ ; der spezifische Bodenwiderstand nahm somit mit zunehmender Drainagefähigkeit bzw. abnehmendem Feinanteil der Böden zu.

Eine Auswertung der Bodenwiderstände in Abhängigkeit von den gemittelten Monatstemperaturen zeigte eine geradlinige Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur auf: Bei einer Temperaturerniedrigung um  $10^\circ\text{C}$  stieg der Bodenwiderstand im Mittel um 70% an [3].

Für den Sandboden (Boden 1) und ein Sand-Ton-Gemisch (Boden 4) ist in Abb. 3 der Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Gesamtwassergehalt und der Temperatur dargestellt. Aufgrund der Feinstruktur dieser Böden bewegt sich der durch das Klima bedingte natürliche Wassergehalt stets in den dick bezeichneten Abschnitten, nämlich zwischen etwa 2,5 und 5% bei Boden 1 und zwischen etwa 10 und 20% bei Boden 4. Die unterschiedlichen Widerstände solcher Böden

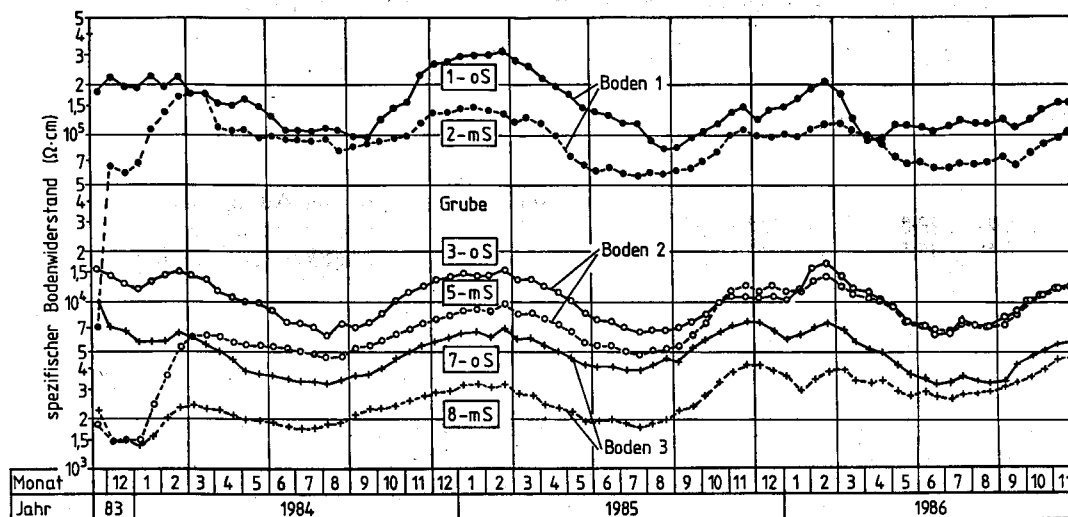


Abb. 2. Bodenwiderstände in den Gruben in den ersten 3 Jahren der Auslagerung

Fig. 2. Soil resistances of the outdoor storage in the first 3 years

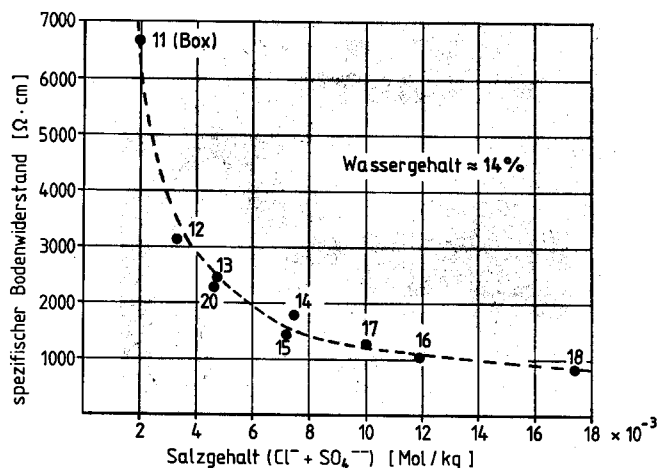


Abb. 4. Spezifischer Bodenwiderstand von Boden 4 in Abhängigkeit vom Salzgehalt bei 20°C

Fig. 4. Relationship between salt content and soil resistance (soil No. 4, 20°C)

werden somit durch die Bodenart und das Klima und die hier von abhängigen Wassergehalte und Temperaturen bestimmt. Die dargestellten Zusammenhänge grenzen in etwa die bei überwiegend sandhaltigen Böden vorkommenden Widerstände ein (etwa 3000 bis 300 000  $\Omega \cdot \text{cm}$ ), die in Abhängigkeit von der Bodenart und dem Klima (Niederschläge, Temperatur) möglich sind. Bei Bauten im Grundwasser, bei Zutritt von Flußwasser (z.B. Hochwasser bei Uferbauten) oder geologischer Wässer, aber auch nach Eindringen von Salzen (z.B. Streusalzen) ist mit niedrigeren Werten zu rechnen.

Quantitative Angaben zum Einfluß des Salzgehaltes sind Abb. 4 zu entnehmen. Bei Salzzugabe verringerte sich der Widerstand (vergleichbar einer Wasserzugabe zum Boden) zunächst rasch und dann immer langsamer. Die gezeigte Abhängigkeit scheint nicht davon beeinflusst zu sein, ob die Zugabe als Chlorid- oder Sulfatsalz erfolgt.

## 4.2 Korrosionspotential

### Unverzinkte Proben

In der Reihenfolge Boden 1 (Sand), Boden 2, Boden 3 (Sand-Ton-Gemische), also mit abnehmender Belüftungsfähigkeit, nahmen die Korrosionspotentiale unverzinkter Proben ab. Sie lagen im jährlichen Mittel (1. Versuchsjahr) um -350, -580, -680  $\text{mV}_{\text{kal}}$ . Dies resultiert aus einer Beeinflussung der kathodischen Teilreaktion.

Salze im Boden erniedrigten, sicherlich über eine Beeinflussung der anodischen Teilreaktion, die Korrosionspotentiale, jedoch war der Salzeinfluß schwächer ausgeprägt als jener der Bodenart. Die anfänglichen Potentialerniedrigungen lagen bei 50 bis 150 mV. Ein Auswaschen der Salze aus dem Boden bedingte eine Angleichung (Anstieg) der Potentiale an jene der Böden ohne Salzzugabe. Abb. 5, welche am Beispiel von Boden 2 die über 4 Jahre gemittelten zeitlichen Verläufe der Korrosionspotentiale von unverzinkten und feuerverzinkten Stählen darstellt, verdeutlicht diese Zusammenhänge. Nach einer erneuten Salzzugabe nach 2 Jahren fielen die Potentiale wiederum ab, und zwar um etwa 130 mV.

In dem Sandboden (Boden 1) wurde bei unverzinkten Teilen innerhalb von 4 Jahren ein kontinuierlicher Anstieg des

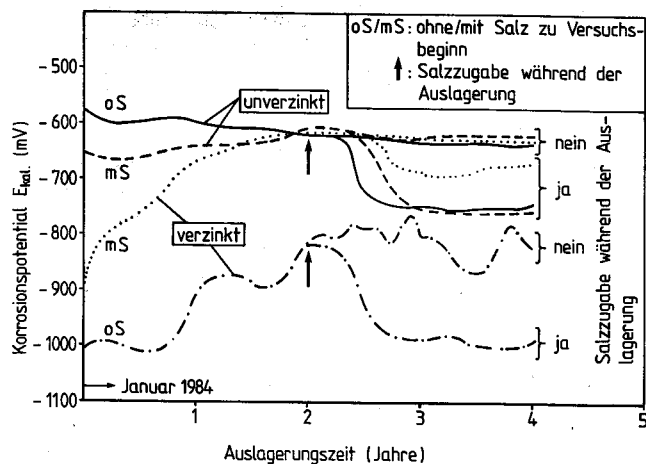


Abb. 5. Verlauf der Korrosionspotentiale bei unverzinkten und verzinkten Proben in Boden 2 ohne und mit extremer Salzzugabe

Fig. 5. Free corrosion potentials of non-galvanized and galvanized specimens in soil no. 2 without and with high salt addition

Korrosionspotentiale um 100–150 mV festgestellt. Dieser Trend zu positiveren Werten dürfte auf eine Deckschichtbildung hinweisen. In den dichterem Böden 2 und 3 (Sand-Ton-Gemische) waren die Potentiale über 4 Jahre im Mittel nahezu konstant (siehe Boden 2 in Abb. 5).

### Feuerverzinkte Proben

Feuerverzinkte Platten hatten im Zeitraum der Anfangskorrosion ein erheblich niedrigeres Potential als unverzinkte. Unabhängig von der Art der hier gewählten Böden lag das Korrosionspotential etwa bei -1000  $\text{mV}_{\text{kal}}$ .

Eine Salzzugabe zu dem Sandboden 1 bewirkte über etwa 4 Jahre gegenüber dem Boden ohne zusätzliche Salze keine entscheidende Änderung des Potentials. Hierzu ist jedoch zu bemerken, daß die Salze, wie bereits erwähnt wurde, anfänglich stark und nach etwa 2 bis 3 Monaten nahezu vollständig aus dem Boden ausgewaschen wurden.

In den tonhaltigen Sandböden 2 und 3 trat in den Gruben mit zusätzlicher Salzzugabe unmittelbar ein rasch verlaufender Anstieg des Potentials bis zum Potential unverzinkter Stähle auf (Abb. 5). Diese „Potentialveredlung“ kann nur durch einen raschen Abtrag der äußeren Reinzinkschicht, zumindest an wenigen Stellen, und das Freilegen der eisenhaltigen Legierungsphasen erklärt werden.

In allen Böden ohne Salzzugabe wiesen die Verzinkungen einen i.M. deutlichen Trend zu positiveren Potentialen auf, was bei Berücksichtigung der festgestellten geringen Korrosionsrate (Abschnitt 4.4) nur mit Deckschichtbildung erklärt werden kann. Der Anstieg des Potentials über 3 Jahre lag im Mittel bei 200 mV.

Nach einer erneuten bzw. erstmaligen Salzzugabe nach 2 Jahren fielen die Potentiale wiederum um etwa 70 bzw. 200 mV ab, obwohl diese Salzzugabe bei den deckschichtbehafteten Zinkoberflächen zu keiner merklichen Zunahme der Zinkkorrosionsrate führte (Abschnitt 4.4). Dieser Potentialabfall könnte damit zusammenhängen, daß wegen einer gehemmten kathodischen Sauerstoffreduktion an den „passiven“ Oberflächen selbst geringe Eingriffe in die anodische Reaktion an den leicht polarisierbaren Elektroden deutliche Potentialänderungen bewirken.



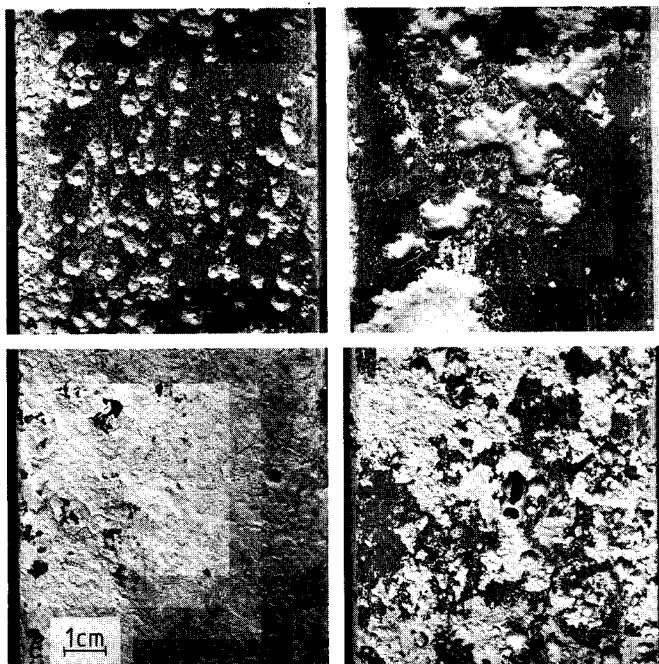


Abb. 6. Korrosionsarten der ungeschützten Stähle: a – Lochkorrosion, b – Muldenkorrosion, c – Flächenkorrosion, d – b + c

Fig. 6. Type of corrosion of the non-protected steels: a – pitting corrosion, b – wide pitting, c – general corrosion, d – b + c

Bei den ausgelagerten Proben wichen die Potentiale vorübergehend (in Abb. 5 nicht erfaßt) bis zu 300 mV vom Mittel ab. Maxima traten zu Zeiten mit Austrocknung und Minima nach stärkeren Niederschlägen auf. Hier äußerte sich eine Beeinflussung der kathodischen Teilreaktion durch vorübergehende Belüftungsunterschiede.

#### 4.3 Art des Korrosionsangriffs

In den überwiegend sandhaltigen Böden lag bei den unverzinkten Blechen vom Korrosionstyp her Lochkorrosion vor. Bei steigendem Feinanteil und/oder abnehmender Belüftung und wenn zusätzlich mittlere Gehalte an Fremdsalzen dem Boden zugegeben wurden, trat anstelle von Lochkorrosion vermehrt Flächenkorrosion auf. Extreme Salzgehalte im Boden bewirkten Flächenkorrosion und örtlichen Angriff in Form von Muldenkorrosion. Beispiele für die festgestellten Korrosionsarten sind in Abb. 6 dargestellt.

In einem Boden ohne Salzzugabe wurde eine Feuerverzinkung kaum sichtbar angegriffen. Bei Salzzugabe zum Boden erfolgte der Zinkabtrag anfangs örtlich; anschließend ging dieser Angriff in eine Flächenkorrosion über.

Bei den Versuchen in den Boxen (Boden 4 mit erhöhter Salzzugabe) wurde Zink bis zum Stahluntergrund abgetragen. Solange die zinkfreien Bereiche Ausdehnungen von etwa 50 bis 100 cm<sup>2</sup> nicht überstiegen, wurde der Stahluntergrund jedoch nicht erkennbar abgetragen (Abb. 7.1). Nach einem großflächigen Zinkabtrag wurde auch der Stahluntergrund angegriffen (Abb. 7.2), jedoch war dieser Abtrag selbst unter ungünstigsten Korrosionsbedingungen praktisch gleichmäßig und sehr viel niedriger als bei unverzinkten Stählen unter gleichen Korrosionsbedingungen. Bei feuerverzinkten Stählen erfährt der Stahl somit nach erfolgter Zinkkorrosion einen

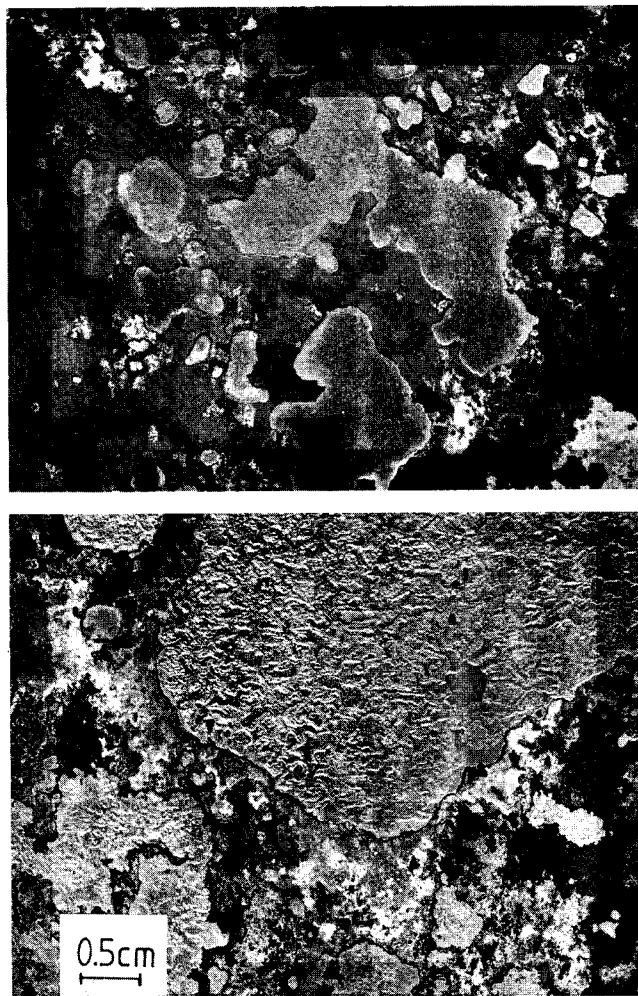


Abb. 7. Korrosion feuerverzinkter Proben in extrem aggressiven Böden

Fig. 7. Corrosion of galvanized specimens in extreme aggressive soils

kathodischen Schutz, und der Stahlangriff wird durchweg gleichmäßiger als bei unverzinkten Stählen.

#### 4.4 Mittlerer Metallabtrag in den Gruben

Der zeitliche Verlauf des mittleren Korrosionsabtrages von unverzinkten und feuerverzinkten Proben in den Gruben ist in Abb. 8 dargestellt. Es wird unterschieden nach Böden ohne und mit extremer Salzzugabe zu Beginn der Versuche und nach der Art des Bodens (Böden 1 bis 3). Ein Einfluß der Bicarbonatzugabe auf das Korrosionsverhalten unverzinkter und feuerverzinkter Teile in den Böden ohne und mit zusätzlicher Salzzugabe wurde nicht festgestellt, was auf das bereits erwähnte Auswaschen des Bicarbonats aus dem Boden zurückzuführen ist. Auf eine Wiedergabe dieser Versuchswerte wurde daher verzichtet.

Der mittlere Stahlabtrag lag bis zu einem Mehrfachen höher als der mittlere Zinkabtrag der Feuerverzinkung, und zwar nach 3 Jahren in Böden ohne Salzzugabe um das 7fache und in Böden mit extremer Salzzugabe etwa um das 3fache.

Eine extreme Salzzugabe zum Boden setzte die Stahl- und auch Zinkkorrosion herauf. Nach 3 Jahren wurde der Stahlabtrag um den Faktor 3 und der Zinkabtrag um den Faktor 8



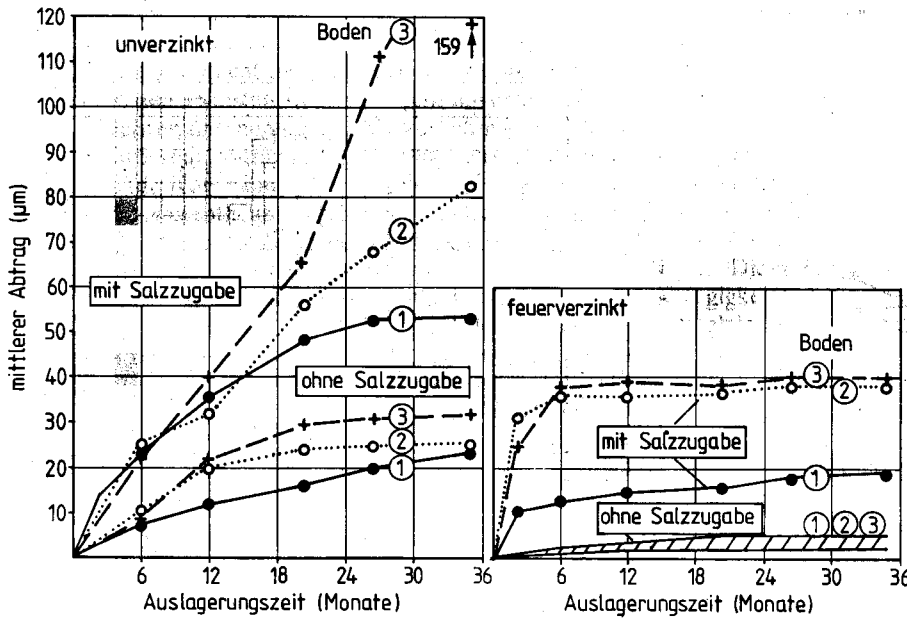


Abb. 8. Mittlerer Korrosionsabtrag bei unverzinkten und verzinkten Proben nach Auslagerung in den Böden 1 bis 3 ohne und mit extremer Salzzugabe zu Versuchsbeginn  
 Fig. 8. Average amount of metal wastage of non-galvanized and galvanized specimens after storage in the soils no. 1 to 3 without and with extreme salt addition at the beginning

gesteigert. Hohe Salzgehalte wirkten sich bei den Feuerverzinkungen vor allem auf die Anfangskorrosion nachteilig aus. Aufgrund der genannten Zusammenhänge geht der vorteilhafte Einfluß der Feuerverzinkung bei hohen Salzgehalten im Boden somit zurück.

Innerhalb der untersuchten Böden war der Einfluß der Zusammensetzung auf die Korrosion, wenn keine zusätzlichen Salze zugegeben wurden, sowohl bei unverzinkten als auch feuerverzinkten Blechen gering. Bei einer Salzzugabe verhielten sich die Böden im Mittel um so ungünstiger, je dichter diese waren. Dies ist sicherlich ein indirekter Einfluß des Salzgehaltes: Die Salze wurden – wie erwähnt – aus dem Boden ausgewaschen, und zwar um so langsamer, je dichter der Boden war.

Die Korrosionsgeschwindigkeit war sowohl bei unverzinkten (extreme Salzgehalte im Boden ausgenommen) als auch feuerverzinkten Proben infolge Deckschichtbildung zeitlich abnehmend. Diese Deckschichtbildung fand bei den Feuerverzinkungen innerhalb weniger Monate statt und war bei den unverzinkten Stahlteilen selbst nach 3 Jahren offenbar noch nicht abgeschlossen. Bei den feuerverzinkten Proben war die anfängliche Korrosionsgeschwindigkeit in den salzhaltigen Böden (bis etwa 3 Monate nach Versuchsbeginn) hoch und nahm dann schlagartig ab. Diese Abtragstiefe reichte mit etwa 40 µm in etwa bis zur Legierungsphase, so daß hier eine Schutzschichtbildung – wie in [12] vermutet – auf die Anwesenheit von Eisen zurückgeführt werden kann. Reinzink ist sehr viel korrosionsanfälliger als eine Eisen-Zink-Legierung.

Bei Gruben mit Boden 2 wurde im Fall ohne und mit extremer Salzzugabe zu Versuchsbeginn nach 2 Jahren erneut Salz zugegeben. Versuchswerte sind in Abb. 9 enthalten. Bei Gruben ohne anfängliche Salzzugabe wurde eine Aktivierung der zunächst geringen Zinkkorrosion nicht festgestellt, und auch in Gruben mit anfänglicher Salzzugabe trat nach der erneuten Zugabe keine weitere Steigerung der Korrosionsrate auf. Feuerverzinkungen verhalten sich somit gegenüber Salzangriff sehr viel günstiger, wenn der Salzzutritt erst nach abgeschlossener Deckschichtbildung erfolgt.

Bei den unverzinkten Proben war das Korrosionsverhalten ungünstiger. Bei einer Salzzugabe nach 2 Jahren trat ein sprunghafter Anstieg der bis dahin relativ geringen Korrosion

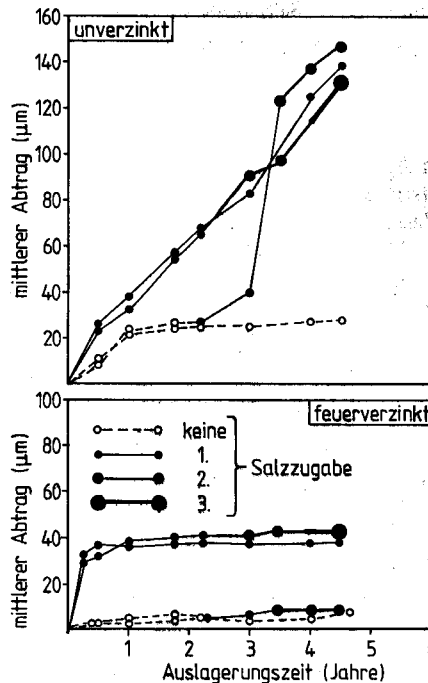


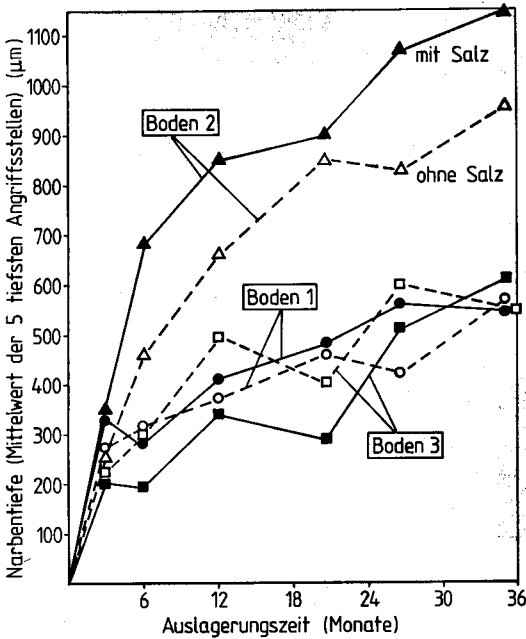
Abb. 9. Mittlerer Korrosionsabtrag bei unverzinkten und verzinkten Proben nach Auslagerung in Boden 2 und unterschiedlicher Salzzugabe

Fig. 9. Average amount of metal wastage of non-galvanized and galvanized specimens after storage in soil no. 2 and different salt additions

auf (Abb. 9). Bei Proben mit anfänglicher Salzzugabe setzte sich bei erneuter Zugabe die bis dahin festgestellte höhere Korrosionsrate fort.

#### 4.5 Narbenkorrosion in den Gruben

Der zeitliche Verlauf der Narbentiefe (Mittelwert aus den 5 tiefsten Angriffsstellen) unverzinkter Proben auf der Ober-



**Abb. 10.** Narbentiefe unverzinkter Platten nach Auslagerung in den Böden 1 bis 3 ohne und mit extremer Salzzugabe zu Versuchsbeginn

**Fig. 10.** Depth of uneven local corrosion of non-galvanized specimens after storage in the soils no. 1 to 3 without and with extreme salt addition at the beginning

plus Unterseite wird in Abb. 10 dargestellt. Den deutlichsten Einfluß auf die Angriffstiefe zeigte die Bodenart: In Boden 2 mit einem mittleren Wasser- und Luftgehalt von je etwa 15% traten deutlich tiefere Narben (Lochkorrosion) auf als in Boden 1 mit einem Wasser- und Luftgehalt von 4 bzw. 34%. Bei Boden 3 mit einem Wassergehalt von 15% und einem Luftgehalt von nur 7% dominierte das Erscheinungsbild der allgemeinen Flächenkorrosion. Die tiefsten Korrosionsanriffe traten somit in einem Boden auf, der gleichzeitig eine hohe Belüftung und einen hohen Wassergehalt (hohe Leitfähigkeit) aufwies.

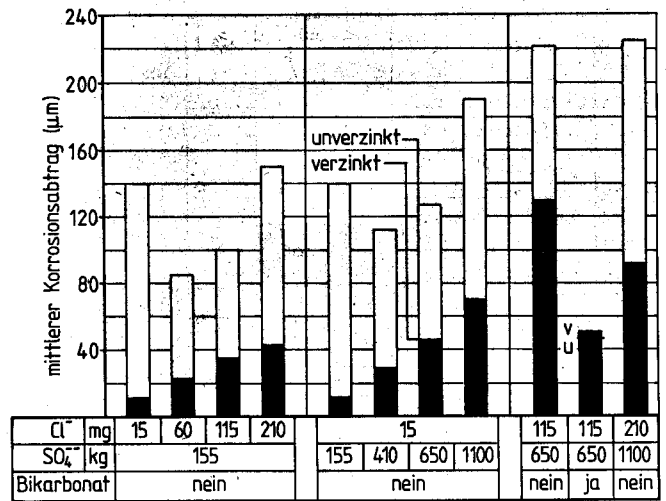
Im Gegensatz zum mittleren Abtrag in Abb. 9 waren die hier gewählten anfänglichen extremen Salzzugaben von geringerer Bedeutung für die Tiefe örtlicher Angriffsstellen: Die zugegebenen Salze förderten im vorliegenden Fall eher den allgemeinen Flächenabtrag als eine Muldenkorrosion und Lochkorrosion.

Die Geschwindigkeit der Narbenkorrosion war zeitlich abnehmend, was auf die Wirkung korrosionshemmender Korrosionsprodukte (Deckschichten) zurückzuführen ist.

#### 4.6 Mittlerer Metallabtrag in den Boxen

Die Versuche in den Boxen (Boden 4, 20°C) sollten im Hinblick auf die Korrosion kritische Grenzwerte einer Salzkonzentration aufzeigen. Die Ergebnisse sind jedoch nicht auf die praktischen Verhältnisse unmittelbar übertragbar, da die Korrosionsbedingungen in den Boxen ungünstiger sind (als z.B. in den Gruben); sie haben somit vor allem vergleichenden Charakter. Wesentliche Unterschiede bei den Versuchen in den Gruben und Boxen bestanden bei der Temperatur und dem Salzgehalt.

- In den Gruben ist die mittlere Jahrestemperatur mit 9,6°C niedriger als in den Boxen (20°C) (siehe auch Abschnitt 4.8).



**Abb. 11.** Mittlerer Korrosionsabtrag bei unverzinkten und feuerverzinkten Proben nach 2,5jähriger Auslagerung in Boden 4 bei unterschiedlicher Salz- und Bicarbonatzugabe

**Fig. 11.** Average amount of metal wastage of non-galvanized and galvanized specimens after 2,5 years storage in soil no. 4 and different salt- respectively bicarbonate addition

- In den Boxen wurden die Salzgehalte konstant gehalten, in den Gruben dagegen ausgewaschen. Aber auch die Feuchtigkeits- und Belüftungsverhältnisse waren unterschiedlich.

Abb. 11 zeigt den mittleren Korrosionsabtrag unverzinkter und feuerverzinkter Bleche nach 2,5 Jahren in Abhängigkeit vom Salzgehalt (Chloridzugaben Balken 1 bis 4, Sulfatzugaben Balken 5–8, Zugaben extremer Gehalte an Chloriden und Sulfaten Balken 9 bis 11). Der mittlere Stahlabtrag überstieg den Abtrag der Feuerverzinkung um ein Mehrfaches, jedoch ging die korrosionsschützende Wirkung der Feuerverzinkung bei steigendem Salzgehalt zum Boden zunehmend verloren. Auch bei den Versuchen in den Boxen wirkten sich Salzzugaben zum Boden lediglich auf die Anfangskorrosion nachteilig aus, während die nachfolgende Deckschichtbildung (vergleichbar Abb. 8) den Angriff erheblich verzögerte. Dies galt im Prinzip auch für die extremen Salzzugaben, die zu einer weitgehenden Aufzehrung der im Mittel 95 µm starken Zinkauflage geführt haben und bei denen sich der kathodische Schutz auswirkte. Nach grober Schätzung können im Boden bis zu 500 mg/kg Sulfat oder 50 bis 100 mg/kg Chlorid toleriert werden, ohne daß die Anfangskorrosion mehr als 25% der Zinkauflage aufzehrt.

Bei unverzinkten Platten wurde bei steigendem Salzgehalt zunächst eine Abnahme und hiernach eine kontinuierliche Zunahme des mittleren Abtrages festgestellt. In Übereinstimmung mit den Versuchen in den Gruben steigern somit nur extreme Salzzugaben die Korrosion gegenüber Böden ohne zusätzliche Salze. Wie in Abschnitt 4.7 noch näher erläutert wird, hängen diese Zusammenhänge mit den auftretenden Korrosionsarten zusammen, die sich bei Salzzugabe ändern.

Sowohl bei unverzinkten als auch feuerverzinkten Proben wirkte sich eine Bicarbonatzugabe zum Boden günstig aus (vergl. Balken 9 und 10 in Abb. 11). Der Einfluß einer Bicarbonatzugabe auf die Metallkorrosion ist bei einem unverzinkten Stahl relativ stärker ausgeprägt als bei einem feuerverzinkten Stahl. Im Vergleich zu den Versuchen in den Gruben sind Bicarbonatzugaben somit nur dann wirksam, wenn die Salze nicht frühzeitig ausgewaschen werden.

#### 4.7 Narbenkorrosion in den Boxen

Abb. 12 verdeutlicht die Tiefe der Korrosionsnarben (Mittelwert aus den 5 tiefsten Angriffsstellen) unverzinkter Proben nach 2,5 Jahren und nennt auch die Verhältnisse von Narbentiefe zu mittlerem Abtrag NT/KA. Desweiteren wird auch der dominierende Korrosionstyp angegeben.

Folgende wesentliche Ergebnisse wurden festgestellt: In dem Boden ohne zusätzliche Salzzugabe (Balken 1 bzw. 5) lag vom Korrosionstyp her Lochkorrosion vor. Da Boden 4 sowohl hohe Wassergehalte als auch Luftgehalte aufwies (Tabelle) und somit bei guter Belüftung auch eine hohe Leitfähigkeit des Bodens gegeben war, war die Lochkorrosion vergleichbar Boden 2 bei den Grubenversuchen ausgeprägt und auch für den relativ hohen mittleren Korrosionsabtrag (Abb. 11) bestimmend.

Bei Zugabe von Chlorid bis 115 mg/kg ging die Lochkorrosion in Flächenkorrosion über, weshalb die Verhältniszahlen NT/KA zurückgingen. Damit zusammenhängend wurde auch der mittlere Abtrag geringer (Abb. 11).

Bei weiterer Zunahme des Chloridgehaltes und auch bei Sulfatgehalten  $\geq 650$  mg/kg trat Muldenkorrosion auf, wodurch der mittlere Abtrag erhöht wurde.

Durch eine Bicarbonatzugabe ging in dem salzhaltigen Boden Muldenkorrosion (Balken 9) in reine Flächenkorrosion über (Balken 10); die Verhältniszahlen NT/KA waren dann mit 4 sehr niedrig.

Aus den in Abb. 12 dargestellten Ergebnissen wurden auch die bei den Grubenversuchen erkannten Zusammenhänge (Abb. 10) verständlich, wonach hohe Salzzugaben zum Boden die Angriffstiefe im Vergleich zum salzarmen Boden nicht zwangsläufig heraufsetzen.

#### 4.8 Einfluß der Bodentemperatur

Die monatlichen Mittelwerte der Temperatur in etwa 60 cm Tiefe lagen zwischen 2 und 18 °C und im jährlichen Mittel bei 10 °C. Da sich die Temperatur maßgeblich auf den die Boden-

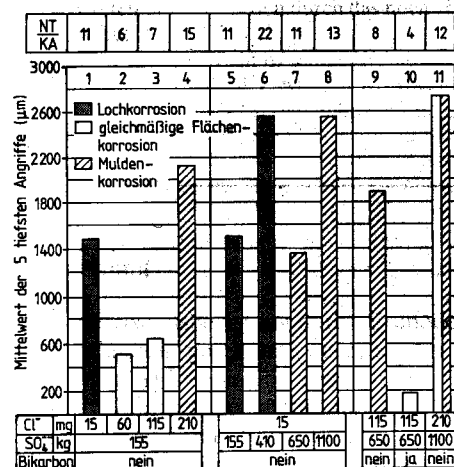


Abb. 12. Mittlerer Korrosionsabtrag und Narbenkorrosion bei unverzinkten Proben nach 2,5-jähriger Auslagerung in Boden 4 bei unterschiedlicher Salz- bzw. Bicarbonatzugabe

Fig. 12. Average amount of metal wastage of non-galvanized specimens after 2,5 years storage in soil no. 4 with different salt- respectively bicarbonate addition

aggressivität kennzeichnenden spezifischen Bodenwiderstand auswirkte (Abb. 2 und 3) war anzunehmen, daß auch das Korrosionsverhalten beeinflusst wird. Aus einer anderen Veröffentlichung [15] ist bekannt, daß z.B. in Tonboden mit etwa 20% Wasser eine Temperaturerhöhung um 10 °C bei Eisen-teilen eine Verdoppelung der Anfangskorrosionsgeschwindigkeit bewirkt. Zur temperaturabhängigen Korrosion feuerverzinkter Teile im Boden sind keine gezielten Untersuchungen bekannt.

Die vorliegenden Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Korrosion wurden in Boxen mit Boden 4, auch bei gleichzeitiger extremer Salzzugabe, durchgeführt. Abb. 13 verdeutlicht den Abtrag nach konstanten Zeiten. Bei unverzinktem Stahl und feuerverzinktem Stahl in extrem salzhaltigen Böden, also unter Bedingungen, bei denen sich schützende Deckschichten nicht oder nur bedingt bzw. zeitlich stark verzögert ausbilden, nahm auf Dauer der mittlere Abtrag des Stahls beziehungsweise der Zinkauflage bei fallender Temperatur ab. Legt man den Korrosionsabtrag nach 2,5 Jahren zugrunde, dann folgt für den unverzinkten Stahl bei Steigerung der Temperatur um 10 °C in etwa eine Verdoppelung des Korrosionsabtrages. Aus Abb. 13 ist auch zu entnehmen, daß der Temperatureffekt bei steigender Auslagerungszeit offenbar zunimmt, während er bei Auslagerungszeiten < 30 Monate kleiner ist.

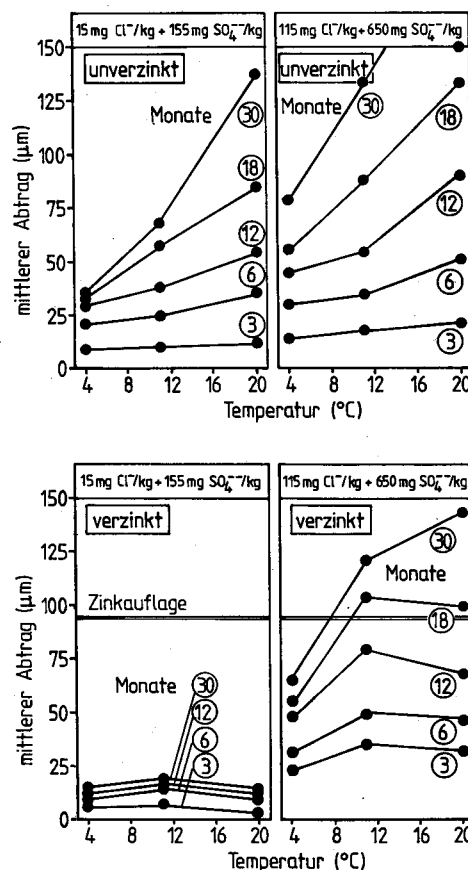


Abb. 13. Mittlerer Korrosionsabtrag bei unverzinkten und feuerverzinkten Proben nach 2,5-jähriger Auslagerung in Boden 4 ohne und mit Salzzugabe bei 20, 11 und 4 °C (Wassergehalt  $\approx 14\%$ )

Fig. 13. Average amount of metal wastage of non-galvanized and galvanized specimens after 2,5 years storage in soil no. 4 with and without salt addition and temperatures of 20, 11 and 4 °C (water content  $\approx 14\%$ )

Bei feuerverzinktem Stahl im Boden ohne Salzzugabe nahm der Abtrag bei fallender Temperatur zunächst schwach zu und dann wiederum ab, blieb insgesamt jedoch praktisch unbeeinflusst von der Temperatur. Ein Maximum der Korrosion bei mittleren Temperaturen wurde auch bei der Anfangskorrosion feuerverzinkter Stähle in extrem salzhaltigen Böden festgestellt, solange Zink noch nicht abgetragen war.

Die genannten Zusammenhänge zeigen eine Zunahme der aktiven Korrosion bei Steigerung der Temperatur an. Da offenbar auch die Ausbildung schützender Deckschichten bei steigender Temperatur begünstigt wird, folgt bei den feuerverzinkten Stählen ein Maximum des Abtrages bei mittleren Temperaturen. Wenn allerdings Zink infolge des Einwirkens hoher Salzgehalte abgetragen ist, ergeben sich die für die Stahlkorrosion erkennbaren Zusammenhänge.

Bei unverzinkten Stählen erwies sich die örtliche Korrosion in geringerem Maße von der Temperatur abhängig als der mittlere Abtrag. Erhöhte Temperaturen wirken offenbar mehr in Richtung einer Vermehrung von Narben als in Richtung deren Vertiefung.

### Schrifttum

- [1] M. Romanoff: Underground Corrosion, Nat. Bureau of Standard, Circular 579, April 1957.
- [2] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten von Bewehrungsbändern in Bauwerken aus Bewehrter Erde, Werkstoffe und Konstruktion, Eigenverlag FMFA Baden-Württemberg (1984) 198-218.
- [3] U. Nürnberger: Korrosionsverhalten feuerverzinkter und unverzinkter Bewehrungsbänder bei Bauwerken aus Bewehrter Erde, Deutscher Verzinkerei Verband e.V., Düsseldorf (1988).
- [4] G. Heim: Korrosionsverhalten von feuerverzinkten Bandstahl-Erdern, Technische Überwachung 18 (1977) 257-262.
- [5] Merkblatt 400: Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf (1983) 16-17.
- [6] T. Markovic: Bodenkorrosion und ihre Verhütung. Tuzla/Jugoslawien (1963), Vertrieb durch Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin (1963).
- [7] H. Klas, H. Steinrath: Die Korrosion des Eisens und ihre Verhütung, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf (1974).
- [8] H. Kaesche: Die Korrosion der Metalle. 2. Aufl., Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York (1979).
- [9] H. Hildebrand, W. Schwenk: Untersuchungen zur Korrosion von unlegiertem Stahl in Erdböden mit und ohne Elementbildung, Werkst. Korros. 29 (1978) 92-97.
- [10] Durability of Reinforcing Strips, Terre armée, confidentiel No. 10, La terre armée S.A., 52, Quai national, 92806 Puteaux, France (1977).
- [11] Corrosion Effects after 3 Years upon Buried Galvanized Steel, Terre armée, confidentiel No. 13, La terre armée S.A., 52, Quai national, 92806 Puteaux, France. Ergebnisse der Auslagerungsversuche nach 8 Jahren in: Terre armée: Durability of Reinforced Earth Structures; the Results of a Long-Term Study Conducted with Galvanized Steel, France (1986).
- [12] H. Böhni: Die Bedeutung des Zinks beim Korrosionsschutz feuerverzinkter Stähle. Schweizerische Bauzeitung 96 (1978) 22, 454-457.
- [13] H. Böhni, F. Stalder: Korrosionsprobleme erdvergrabener Metalle, Schweizer Ingenieur und Architekt 33-34 (1981) 703-710.
- [14] W. Wiederholt: Korrosionsverhalten von Zink, Band 2 - Verhalten von Zink in Wässern, Metall-Verlag GmbH, Berlin (1965).
- [15] T. Markovic, B. Sribar: Über den Mechanismus der Korrosion des Eisens im Erdreich, Werkst. Korros. (1955) 334-337.

(Eingegangen: 15. August 1988)

W 2609