

Korrosionsprobleme erdvergrabener Metalle

Autor(en): **Böhni, Hans / Stalder, Ferdinand**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 33-34

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74536>

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.

Korrosionsprobleme erdvergrabener Metalle

Von Hans Böhni und Ferdinand Stalder, Zürich

Grundlagen

Erscheinungsformen der Korrosion

Die Korrosionserscheinungen an metallischen Werkstoffen lassen sich in etwa vereinfachender Weise in drei verschiedene Erscheinungsformen unterteilen (Bild 1 und 2). Beim *Flächenangriff* erfolgt der Metallabtrag mehr oder weniger gleichmässig über die gesamte Metalloberfläche, wobei im Mikrobereich gewisse Unterschiede auftreten können, die zu einer allgemeinen Aufrauung der Metalloberfläche führen. Solche Korrosionsangriffe treten häufig bei wenig korrosionsbeständigen Werkstoffen wie etwa bei unlegierten Stählen unter homogenen Angriffsbedingungen auf, so zum Beispiel an der Atmosphäre oder auch in Erdböden. Naturgemäss bieten solche Angriffe bei nicht zu hohen Korrosionsgeschwindigkeiten wenig Schwierigkeiten, kann doch der Metallabtrag durch eine entsprechende Dimensionierung berücksichtigt werden.

Bei *lokalen Korrosionsangriffen* (Bild 1) hingegen sind die Angriffsverhältnisse weit weniger gut überblickbar. Charakteristisch für diese zweifellos häufigste Erscheinungsform der Metallkorrosion ist das gleichzeitige Auftreten aktiver (= korrodierender) und passiver (= geschützter) Oberflächenbereiche. Eine wesentliche Voraussetzung für die Art von Korrosionserscheinungen ist somit die Anwesenheit von Schutzschichten, welche lokal zerstört werden können. Der Korrosionsangriff kann dabei wie etwa bei der Lochfrasskorrosion mehr oder weniger statistisch verteilt überall auf der Metalloberfläche einsetzen oder sich auch gefügeabhängig auf die Korngrenzgebiete beschränken (interkristalline Korrosion). In beiden Fällen ist der für eine Zerstörung des Werkstoffs notwendige Metallverlust wesentlich geringer als beim Flächenangriff. Allgemeine Angaben über den Metallabtrag ohne Berücksichtigung der lokalen Natur des Angriffs sind hier verständlicherweise nicht aussagekräftig.

Risskorrosionserscheinungen können grundsätzlich immer dann auftreten, wenn ein metallischer Werkstoff einer komplexen, das heisst chemischen und mechanischen Belastung ausgesetzt ist

(Bild 2). Die mechanische Belastung kann statisch (Spannungsrissskorrosion) oder auch dynamisch erfolgen (Schwingungsrissskorrosion). Charakteristisch ist dabei der – zumindest makroskopisch – praktisch verformungslose Bruch des Werkstoffes, der infolge von Wechselwirkungen zwischen den elektrochemischen Korrosionsvorgängen an der Metalloberfläche, den metallkundlichen Eigenschaften des Werkstoffes und der einwirkenden mechanischen Belastung auftritt. Vom Werkstoff her ist zu erwähnen, dass im allgemeinen hochfeste Materialien eine grössere Empfindlichkeit gegenüber Risskorrosionserscheinungen aufweisen. Ferner nimmt diese mit steigender mechanischer Belastung im allgemeinen ebenfalls zu. Im Bauwesen treffen diese Verhältnisse vor allem auf die Spannstähle zu, welche relativ empfindlich sind gegenüber Risskorrosionserscheinungen, speziell gegenüber der Wasserstoffversprödung. In der Praxis treten sie dabei häufig zusammen mit lokalen Korrosionsangriffen auf (Lochfrassinduzierte Wasserstoffversprödung).

Mechanismus der Korrosion

Korrosionsvorgänge bei metallischen Werkstoffen sind von wenigen Ausnahmen abgesehen stets *elektrochemische Vorgänge*. Die Gesamtreaktion kann dabei in gleichzeitig ablaufende Oxidations- und Reduktionsprozesse aufge-

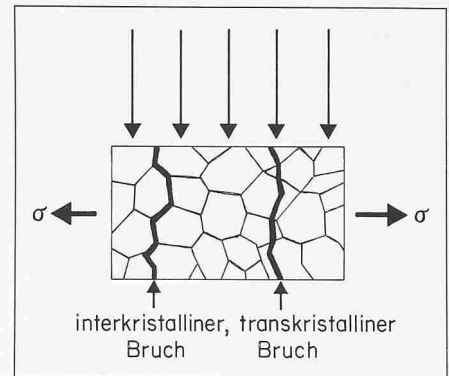
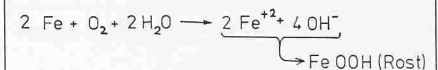


Bild 2. Erscheinungsformen der Korrosion: Risskorrosionserscheinungen bei komplexer Beanspruchung

Gesamtreaktion:



Teilreaktionen:

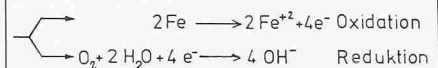
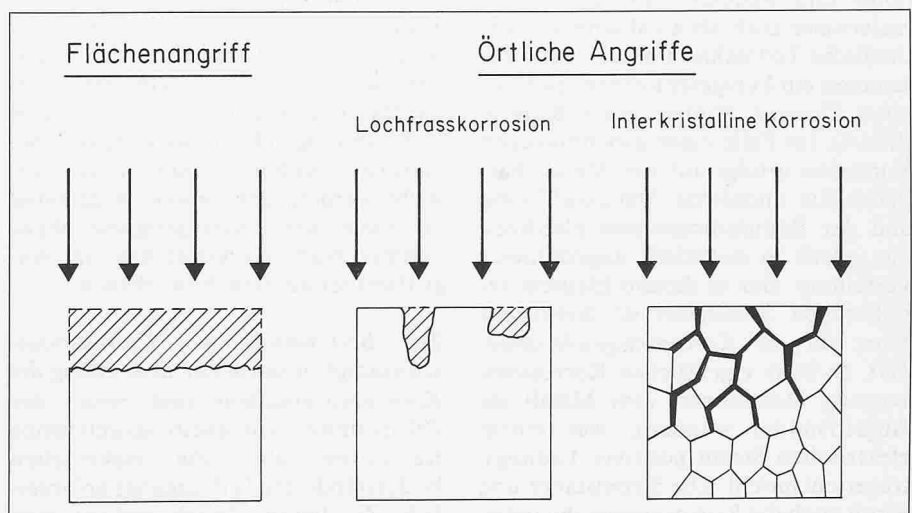


Bild 3. Reaktionsvorgänge bei der Korrosion von Stahl in neutralen, sauerstoffhaltigen Angriffsmedien

teilt werden. Die bei der Metallauflösung frei werdenden Elektronen (= Oxidationsprozess) müssen aus Elektroneutralitätsgründen von einem im Angriffsmittel enthaltenen Oxidationsmittel aufgenommen werden (= Reduktionsprozess). In neutralen wässrigen Angriffsmitteln wirkt normalerweise der im Wasser gelöste Sauerstoff, in sauren Angriffsmitteln hingegen das Proton als Oxidationsmittel (Bild 3).

Bild 1. Erscheinungsformen der Korrosion: Flächenangriff und lokale Korrosionsangriffe



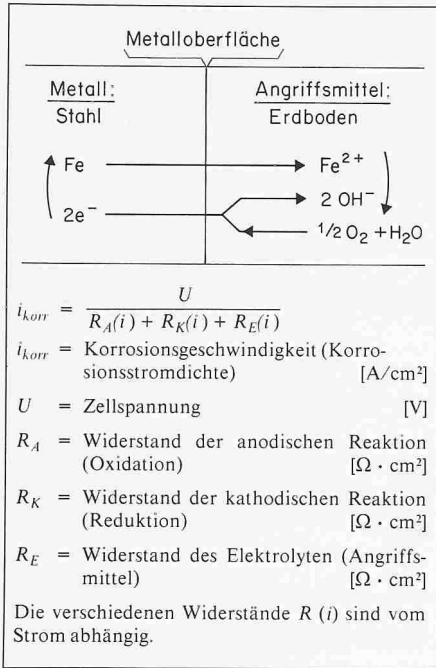


Bild 4. Korrosion als kurzgeschlossenes galvanisches Element

Tabelle 1. Korrosionspotentiale von Stahl in Erdböden

Material	ϵ_{korr} [V]*
Sand	-0,4
Lehm	-0,8
Mischböden	-0,6
Stahl/Beton	-0,15

* Potentiale gemessen gegen die gesättigte Kupfer/Kupfersulfat-Bezugselektrode

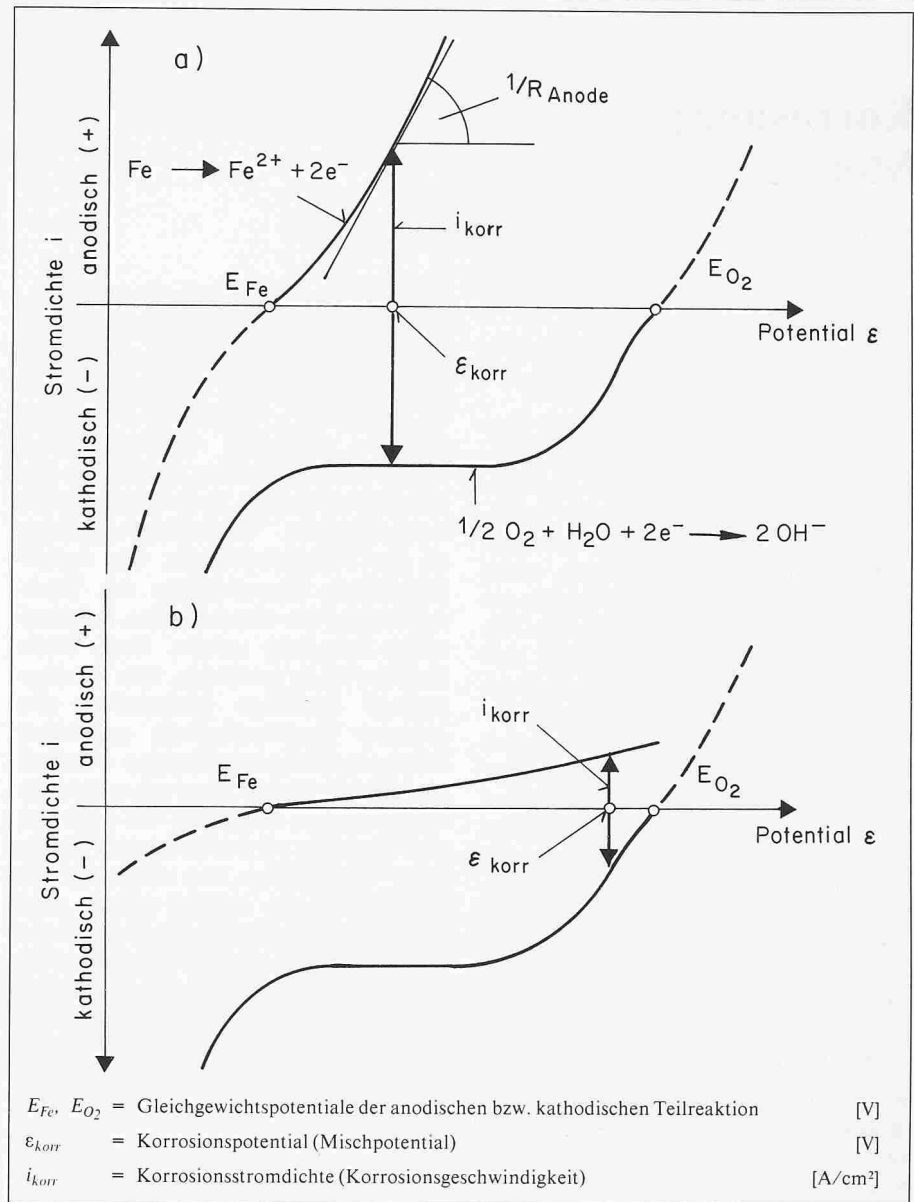


Bild 5. Stromspannungskurven und Korrosionspotential von Stahl a) in einem Mischboden b) in Beton

Da sowohl das Metall wie auch das umgebende Angriffsmittel im allgemeinen elektrische Leiter sind, bilden Oxidations- und Reduktionsprozess - normalerweise auch als anodische und kathodische Teilreaktion bezeichnet - zusammen ein kurzgeschlossenes galvanisches Element, ähnlich einer Batterie (Bild 4). Im Falle einer gleichmässigen Korrosion erfolgt auf der Metalloberfläche die anodische Metallauflösung und der Reduktionsprozess gleichzeitig, jedoch in statistisch ungeordneter Verteilung. Der in diesem Element resultierende Stromfluss ist direkt ein Mass für die Korrosionsgeschwindigkeit, da beim eigentlichen Korrosionsvorgang Metallionen vom Metall ins Angriffsmittel wandern, was einem elektrischen Strom positiver Ladungsträger entspricht. Die Stromstärke und damit auch die Korrosionsgeschwindigkeit

werden von der Zellspannung des galvanischen Elementes und den innern Widerständen des Stromkreises bestimmt (Bild 4). Das Konzept des kurzgeschlossenen galvanischen Elementes ist auch für das Verständnis der möglichen Korrosionsschutzmethoden wichtig. Da in der Praxis die resultierenden Zellspannungen kaum wirkungsvoll beeinflusst werden können, muss versucht werden, den innern Widerstand des Elementes durch geeignete Massnahmen beim Werkstoff bzw. im Angriffsmittel wesentlich zu erhöhen.

Zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit sowie zur Beurteilung des Korrosionsverhaltens sind neben der Zellspannung vor allem ausreichende Kenntnisse über die elektrischen Widerstände der Teilvorgänge erforderlich. Zu diesem Zweck bedient man

sich heutzutage vielfach Stromspannungskurven, wie das am Beispiel eines unter O₂-Reduktion (O₂-Typ Korrosion) korrodierenden Stahles in Bild 5 dargestellt ist. Aus dem Verlauf der Stromspannungskurven der beiden Teilreaktionen lassen sich die zugehörigen Widerstände bestimmen, welche zur Ermittlung der Korrosionsgeschwindigkeit notwendig sind. Besonders einfache und übersichtliche Verhältnisse erhält man bei der gleichmässigen Korrosion. Da der anodische und der kathodische Teilvorgang unmittelbar nebeneinander ablaufen, ist der Widerstand und damit auch der ohmsche Spannungsabfall im Angriffsmittel gering und das Elektrodenpotential besitzt an jeder Stelle der Metalloberfläche denselben Wert. Da im ausenstromlosen Zustand die anodische und kathodische Stromdichte aus Elektroneutralitäts-

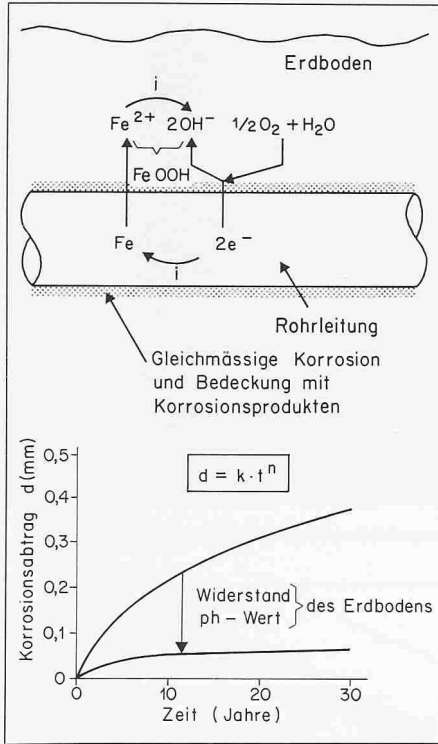


Bild 6. Korrosionsmechanismus bei homogenen Bodenverhältnissen: Mikroelementbildung

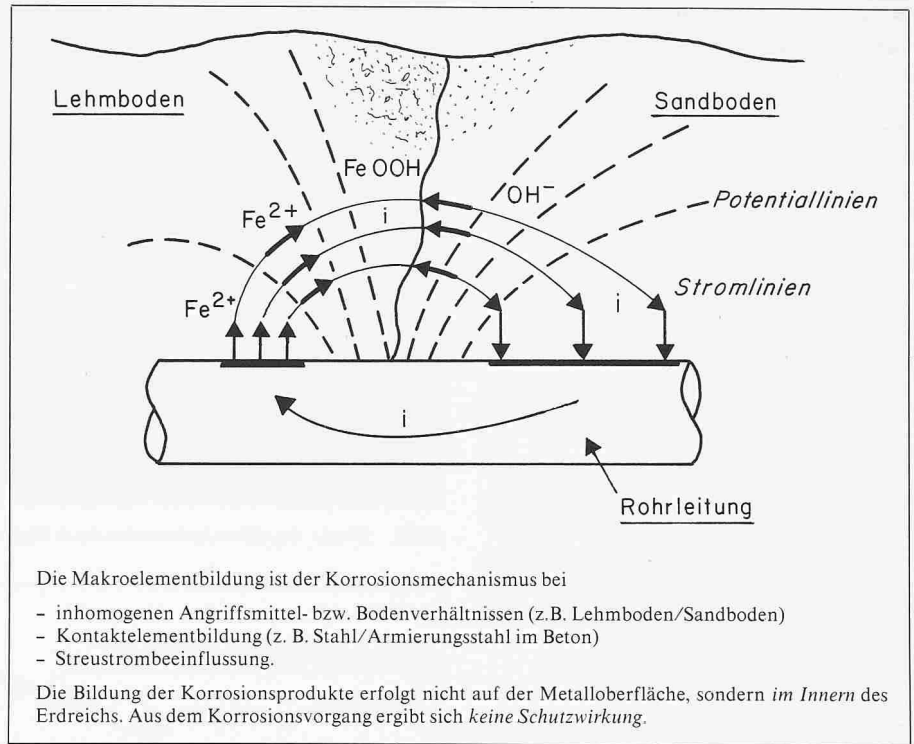


Bild 7. Makroelementbildung

gründen entgegengesetzt gleich gross sein müssen, lassen sich die resultierende Korrosionsstromdichte i_{korr} und das zugehörige Korrosionspotential ϵ_{korr} leicht graphisch ermitteln. Aus Bild 5 geht auch hervor, dass diese beiden Grössen vom Verlauf der Stromspannungskurven der beiden Teilreaktionen abhängen. In Tabelle 1 sind als Beispiele die Korrosionspotentiale von unlegiertem Stahl in verschiedenen Erdböden aufgeführt. Wie aus dieser Zusammenstellung hervorgeht, treten *beachtliche Unterschiede* auf, welche vor allem in Zusammenhang mit der *Makroelementbildung in Erdböden* von grosser Bedeutung sind.

Zur Bestimmung von Korrosionsgeschwindigkeiten auf elektrochemischem Wege verwendet man heute entweder Gleichstrom- oder Wechselstrommethoden (Tab. 2). Bei beiden Methoden ermittelt man die Korrosionsstromdichte aus dem *Polarisationswiderstand* R_p , welcher definitionsgemäss dem Kehrwert der Neigung der Summenstromspannungskurve beim Korrosionspotential entspricht. Zwischen dem Polarisationswiderstand R_p und der Korrosionsstromdichte i_{korr} besteht folgende Beziehung:

$$i_{korr} = 0,434 \frac{b_a \cdot b_k}{b_a + b_k} \cdot \frac{1}{R_p} \text{ [mA/cm}^2\text{]}$$

b_a und b_k sind Konstanten, die die Potentialabhängigkeit der anodischen und kathodischen Teilreaktion charakterisieren.

Mikro- und Makroelementbildung

Bei erdvergrabenen Metallen (z. B. unlegierte Stähle) kommt es bei *homogenen* Bodenverhältnissen in Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff auf der Metalloberfläche normalerweise nur zur Bildung von *Mikroelementen* (Bild 6a). Da die anodischen und kathodischen Teilvorgänge nahe beieinander ablaufen, entstehen auch die Reaktionsprodukte unmittelbar nebeneinander. Die Metalloberfläche bedeckt sich in der Folge mehr oder weniger gleichmässig mit Korrosionsprodukten. Der zeitliche Verlauf des Metallabtrages (Bild 6 b), welcher sich im allgemeinen durch eine einfache Potenzfunktion darstellen lässt, zeigt, dass sich die *Korrosionsgeschwindigkeit* infolge der gebildeten Korrosionsprodukte *verlangsam*. Allerdings werden die resultierenden Korrosionsgeschwindigkeiten stark von der Beschaffenheit des Erdbodens beeinflusst. Eine *erhöhte elektrische Leitfähigkeit* und *tiefe pH-Werte* verschlechtern das Korrosionsverhalten jedoch ganz erheblich, wie zahlreiche Untersuchungen im Labor und wie auch die Erfahrungen aus der Praxis zeigen.

Neben der Bildung von Mikroelementen entstehen bei erdvergrabenen Metallen hauptsächlich als Folge von inhomogenen Bodenverhältnissen oder von Kontaktelementen mit andern vergrabenen Metallen *Makroelemente*, welche das Korrosionsverhalten ganz ent-

scheidend beeinflussen können (Bild 7). Die anodischen und kathodischen Teilvorgänge laufen infolge der unterschiedlichen Potentialverhältnisse örtlich getrennt voneinander ab. Die entstehenden Reaktionsprodukte wandern entlang der vorherrschenden Stromlinien ins Erdreichinnere und die Korrosionsprodukte bilden sich erst in grösserer Entfernung von der Metalloberfläche. Die im anodischen Bereich korrodierte Oberfläche ist häufig *völlig blank* (Bild 8) und ein korrosionshemmender Einfluss der gebildeten Reaktionsprodukte kann nicht wirksam werden. Es kommt zu wesentlich *erhöhten Korrosionsgeschwindigkeiten*.

Tabelle 2. Elektrochemische Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit

Gleichstrommethode:	$R_p = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta I_S}$
Wechselstrommethode:	
$Z = R_{Elektrolyt} + \frac{R_p}{1 + I \cdot 2 \cdot f \cdot R_p \cdot C}$	
Z = Wechselstromimpedanz	[Ω]
C = Doppelschichtkapazität	[Farad]
f = Frequenz	[s^{-1}]
R_p = Polarisationswiderstand = Steigung der Stromspannungskurve beim Korrosionspotential	[Ω]
I = Grösse des Messstromes	[A]
$R_{Elektrolyt}$ = ohmscher Spannungsabfall im Elektrolyt	[Ω]
ϵ = Potential	[V]

Neben der Makroelementbildung ist ausserdem auch auf das *Flächenverhältnis Kathode/Anode* zu achten. Bei grossflächigen Kathoden und kleinen Anodenflächen wird die anodische Stromdichte und damit die Korrosionsgeschwindigkeit zwangsläufig erhöht, wie aus dem Beispiel des Kontaktelementes Bauwerkarmierung/beschichtete Wasserleitung in Bild 9 hervorgeht. Der Armierungsstahl im Beton verhält sich infolge des vorhandenen Passivfilms sehr edel ($\epsilon_{korr} \sim -0,15$ Volt) und wirkt gegenüber dem unlegierten Stahl im Erdboden als grossflächige Kathode. Defektstellen und Poren in der beschichteten Wasserleitung hingegen sind stark gefährdete kleine anodische Bereiche. Durch ungünstige Kathoden/Anoden-Flächenverhältnisse können die *Korrosionsgeschwindigkeiten lokal* leicht um Grössenordnungen erhöht werden.

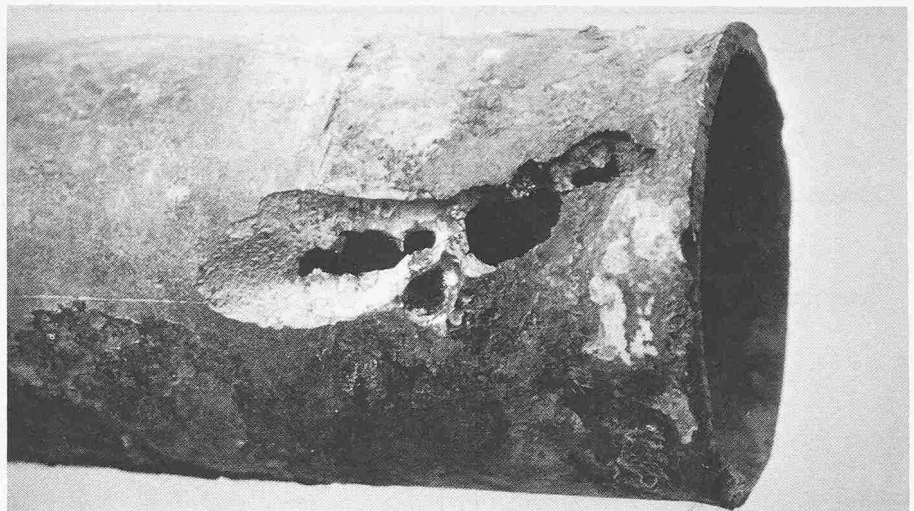


Bild 8. Blanke Angriffsstelle bei einem durch Makroelementbildung bewirkten Korrosionsangriff

Zusammenfassung

- Die *Korrosionsvorgänge* im Erdboden sind *elektrochemischer Natur*. Sie können formal als kurzgeschlossenes galvanisches Element dargestellt werden.
- Die *Korrosionsgeschwindigkeit* hängt von der Beschaffenheit des Erdbodens ab. Wichtige Einflussgrössen sind: elektrischer Widerstand, pH-Wert, Wasser- und Sauerstoffgehalt, chemische Natur der gelösten Salze.
- Die *Makroelementbildung* infolge inhomogener Bodenverhältnisse oder auch infolge Kontaktelementbildung fördert die Korrosion.
- Ungünstige *Kathoden/Anoden-Flächenverhältnisse* erhöhen die Korrosionsgeschwindigkeit.

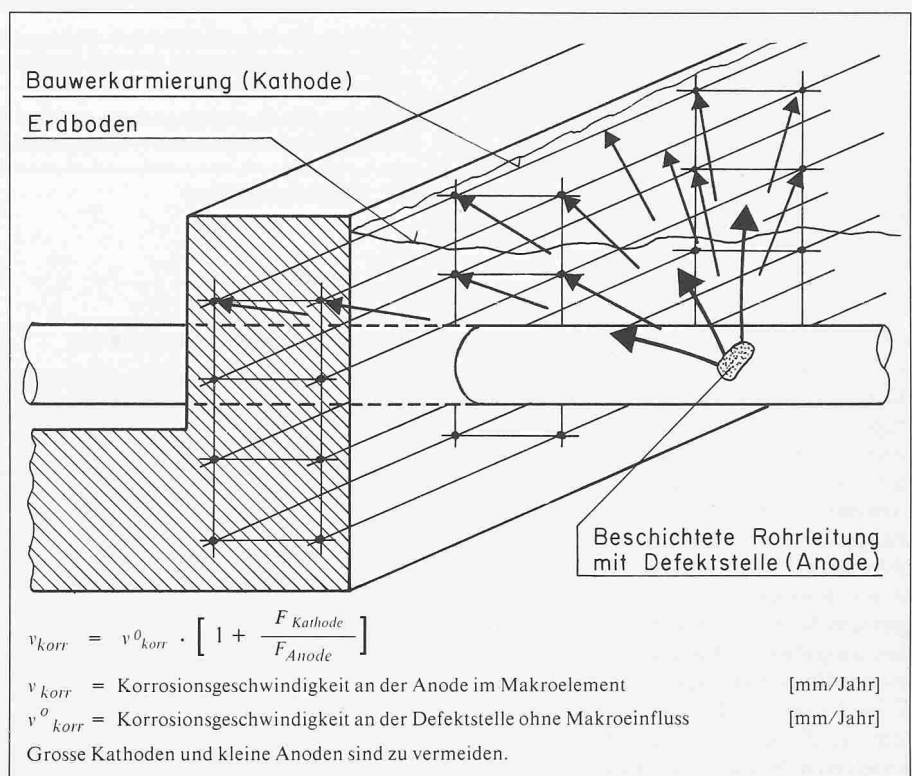


Bild 9. Einfluss des Kathoden/Anodenverhältnisses

Bauwerke aus bewehrter Erde: Korrosionstechnische Anforderungen

Werkstoffwahl für die Bewehrung

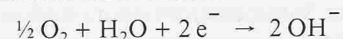
Die Lebensdauer der Bauwerke aus bewehrter Erde hängt von der Korrosionsbeständigkeit der Bewehrung ab. In der Praxis wurde aus der ganzen Palette von Werkstoffen wie Kunststoffe, Stähle, nichtrostende Stähle usw. *verzinkter Stahl* als Bewehrungswerkstoff ausgewählt. Mit diesem Werkstoff wurde eine bezüglich Korrosionsverhalten und Wirtschaftlichkeit *optimale Wahl* getroffen, falls bei der Konstruktion und beim Bau die im folgenden erwähnten Regeln eingehalten werden. Über das Korrosionsverhalten von ver-

zinktem Stahl im Erdboden liegen Erfahrungen von etwa 100 Jahren vor [1,2]. Die verschiedenen *Einflussgrössen*, die das Korrosionsverhalten bestimmen, sind heute bekannt. Durch Wahl eines geeigneten Erdreichs und durch bauliche Massnahmen kann eine *gewünschte Lebenserwartung mit Sicherheit* erreicht werden.

Korrosion von verzinktem Stahl im Erdboden

Die *elektrochemischen Reaktionen*, die bei der Korrosion von verzinktem Stahl im Erdboden ablaufen, sind in Bild 10

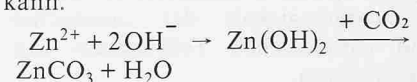
dargestellt. Nach dem Vergraben befindet sich der Boden in direktem Kontakt mit der Verzinkung (Bild 10a). Angegriffen wird die Verzinkung durch gelösten Sauerstoff (O₂) als Angriffsmittel und Wasser nach der folgenden kathodischen Teilreaktion:



Die Elektronen dafür stammen von der anodischen Zink-Auflösung:



Als Reaktionsprodukt entsteht Zinkhydroxid, das mit Kohlensäure (CO₂) in Zinkkarbonat umgewandelt werden kann.



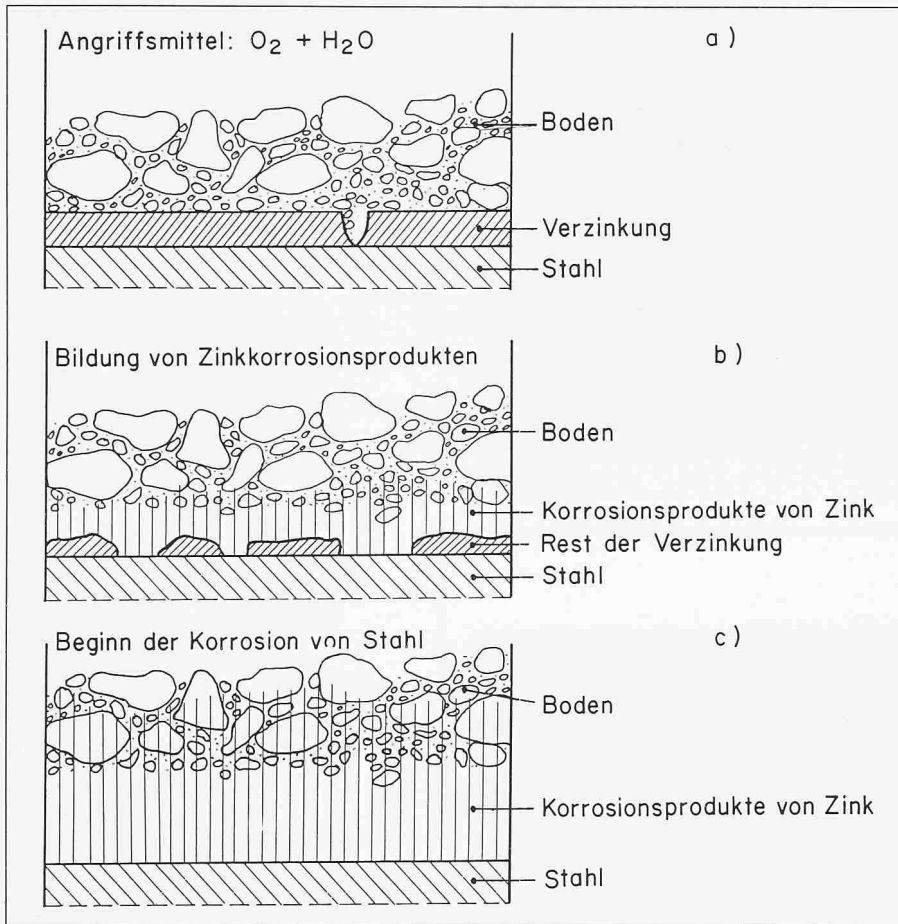


Bild 10. Angriffsmechanismus auf verzinkten Stahl im Erdboden

Da Zink unedler ist als Eisen, wird freiliegendes Eisen in Poren der Verzinkung kathodisch geschützt, d. h. Sauerstoff, der als Angriffsmittel an die freie Eisenoberfläche gelangt, wird dort durch Elektronen, die von der Zinkauflösung stammen, reduziert.

Mit der Zeit wird die Zinkschicht auf der Stahloberfläche abgebaut (Bild 10b). Der kathodische Schutzmechanismus für den Stahl funktioniert, solange noch Reste der Verzinkung vorhanden sind. Beim Korrosionsvorgang (Umwandlung von Zink in Zinkhydroxid) findet eine Volumenzunahme um

den Faktor 3,6 statt. Dadurch wird das anstehende Erdreich von der Metalloberfläche weggedrückt und verdichtet. Zinkhydroxid dringt auch zwischen die Körner des Bodens ein und verklebt sie. Durch diesen Vorgang wird die Diffusion des angreifenden Sauerstoffs zur Metalloberfläche erschwert, die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt ab.

Erst wenn die gesamte Zinkschicht wegkorrodiert ist, kann die Korrosion des Stahls beginnen (Bild 10c). Der Stahl ist nun aber von einer verdichteten, mit Zinkhydroxid verklebten Bodenschicht umgeben. In dieser homogenisierten

Umgebung erfolgt der Korrosionsabtrag auf Stahl viel langsamer und gleichmäßiger als bei einer direkten Einbettung von Stahl in Erdreich.

Die Korrosionsgeschwindigkeit von verzinktem Stahl im Erdboden erfolgt nach dem in Bild 6b erläuterten Zeitgesetz:

$$d = k \cdot t^n$$

Dabei bedeuten:

d = Abtrag in mm

t = Zeit in Jahren

k, n = von der Bodenzusammensetzung abhängige Konstanten

Aus Literaturdaten und eigenen Untersuchungen hat die *Terre Armée S.A.* die Konstanten k und n für verschiedene Bodenzusammensetzungen bestimmt. Für n wurden Werte zwischen 0,2 und 0,8 erhalten. Für ihre Bauwerke wird ein Mittelwert von 0,44 für das Erdreich angestrebt.

Die Lebenserwartung eines Bauwerkes kann mit Hilfe der Resultate in Bild 12 abgeschätzt werden. Beim angegebenen Beispiel wurde die Bewehrung mit einem Korrosionszuschlag von 1 mm versehen. Nach einer beidseitigen Abrostung von 0,5 mm weist die Bewehrung immer noch die aus statischen Gründen notwendige Dicke auf. Die Kurven von Bild 12 wurden nach der in Bild 11 dargestellten Methode ermittelt. Danach wird an die experimentell gemessene Kurve des Korrosionsabtrags als Funktion der Zeit nach 10 Jahren die Tangente gezeichnet und deren Steigung für die Extrapolation über längere Zeiträume verwendet.

Damit die Lebensdauer eines Bauwerkes nach dieser Methode ermittelt werden kann, setzt man voraus, dass der Korrosionsmechanismus effektiv nach dem in Bild 10 dargestellten Schema abläuft. Makroelementbildungen nach Bild 7, bei der die Korrosionsprodukte als Ionenstrom vom Ort ihrer Entstehung wegwandern und irgendwo zwi-

Bild 11. Korrosionsabtrag von verzinktem Stahl im Erdboden als Funktion der Zeit

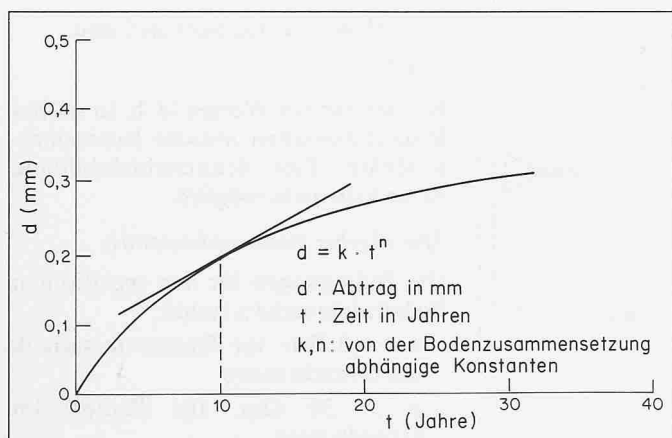
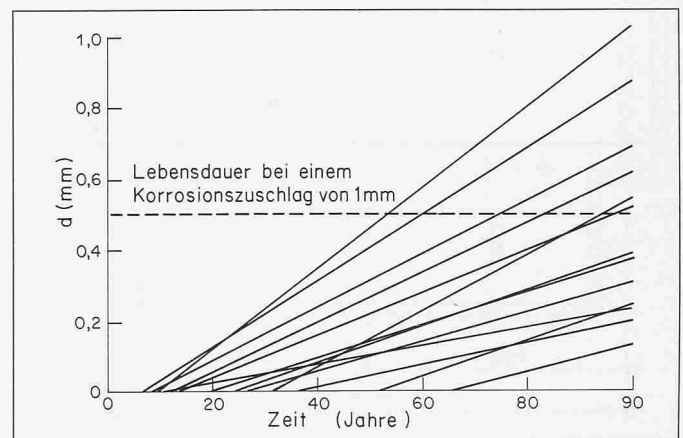


Bild 12. Korrosionsabtrag von verzinktem Stahl in Böden mit unterschiedlicher Zusammensetzung



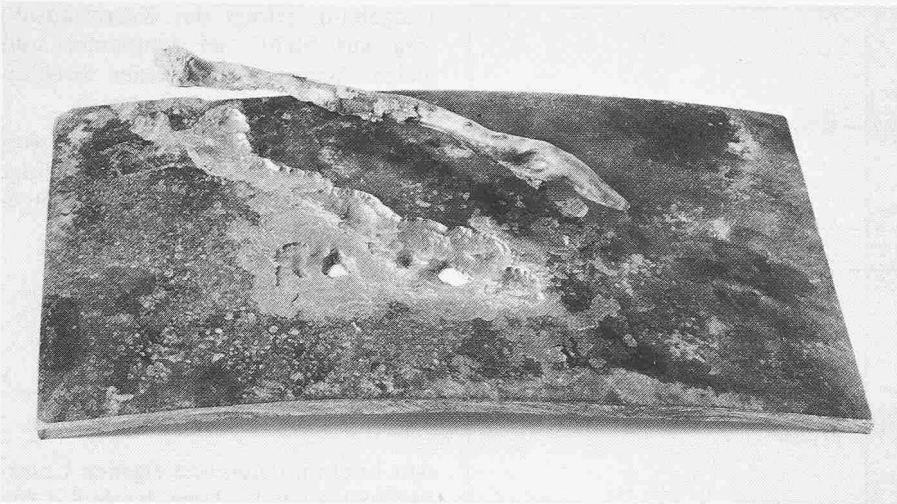


Bild 13. Korrosionsschaden an einem Öltank. Ursache: Makroelementbildung, verursacht durch einen faulenden Ast



Bild 14. Korrosionsangriff, ausgelöst durch chloridhaltige Eluate aus Müllschlacke (nach [3])

Bild 15. Verhinderung der Makroelementbildung zwischen Bewehrung und Armierung der Schuppen durch konsequente Trennung der verzinkten Laschen von der Armierung

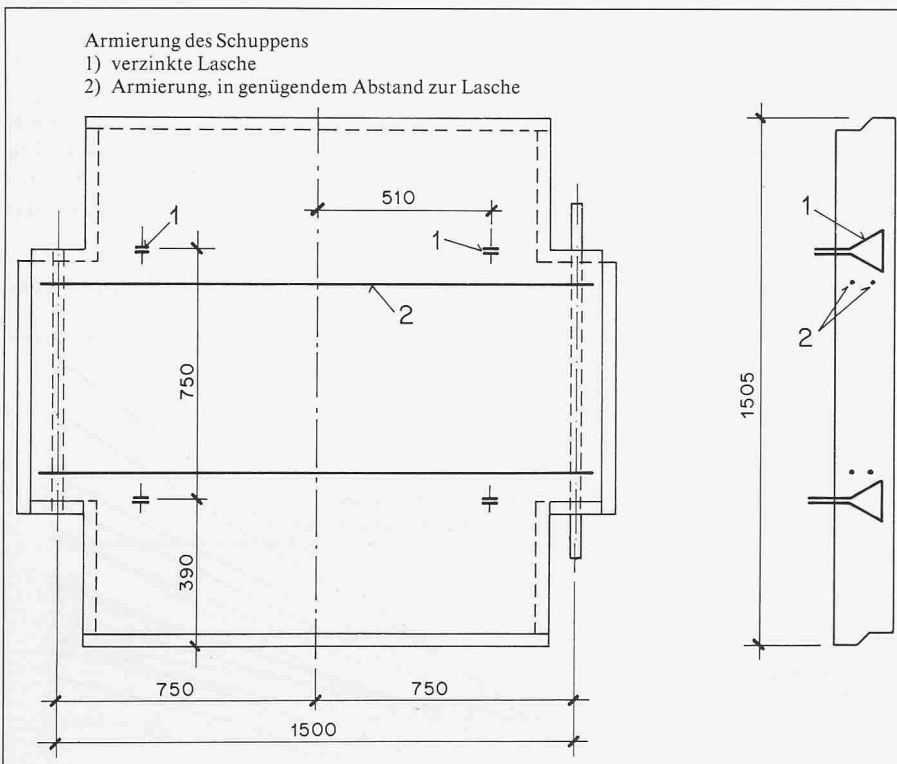


Tabelle 3. Einfluss der Einbettung auf die Korrosionsgeschwindigkeit in einem Makroelement

Makroelement		
Kathode:	Fundamenterde	
Anode:	beschichtete Wasser-Leitung mit 1 cm ² Fehlstelle	
Bettung der Leitung		
Beispiel 1:	Betonkies	
Beispiel 2:	Lehm	
Formeln		
i_{korr}	$= \frac{U}{R_A(i) + R_K(i) + R_E(i)} \approx \frac{\Delta\epsilon_K}{R_A(i)}$	
$R_A(i)$	$\approx \frac{\rho}{2 \cdot d}$	
$\Delta\epsilon_K$	= Differenz der Korrosionspotentiale nach Tabelle 1	
d	= Durchmesser der Fehlstelle in der Beschichtung	
ρ	= spezifischer Bodenwiderstand	
v_K	= Korrosionsgeschwindigkeit in mm/Jahr	
	<i>Beispiel 1</i>	<i>Beispiel 2</i>
Rohrbettung	Betonkies	Lehm
ρ	300 Ωm	10 Ωm
$\Delta\epsilon_K$	0,25 V	0,65 V
i_{korr}	0,0188 mA	1,47 mA
v_K	0,021 mm/a	16,6 mm/a

schen Anode und Kathode ausgeschieden werden, müssen deshalb *unbedingt verhindert* werden. Wie in Tabelle 1 dargestellt, können Makroelemente durch inhomogene Bettungen, die unterschiedliche Korrosionspotentiale ergeben, sowie durch elektrischen Kontakt mit andern Metallstrukturen entstehen. Um solche Makroelementbildungen auf jeden Fall zu vermeiden, muss die Zusammensetzung des Bodens die im folgenden Abschnitt zusammengestellten Forderungen erfüllen.

Anforderungen an die Zusammensetzung des Erdreichs

Damit die entstehenden Korrosionsprodukte die Korrosion verlangsamen können, muss die Zusammensetzung des Erdreichs *folgende Bedingungen* erfüllen:

pH-Wert

Der pH-Wert soll grösser als 5 sein.

$pH > 5$

Bei tieferen pH-Werten (d. h. in sauren Böden) entstehen lösliche Korrosionsprodukte. Eine Schutzschichtbildung ist deshalb nicht möglich.

Spezifischer Bodenwiderstand ρ

Die Bedingungen für den spezifischen Bodenwiderstand ρ lauten:

$\rho > 10 \Omega\text{m}$, für Bauten ausserhalb des Grundwassers

$\rho > 30 \Omega\text{m}$, für Bauten im Grundwasser

Der spezifische Bodenwiderstand begrenzt im Makroelement den Stromfluss zwischen Anode und Kathode. Da die Korrosionsgeschwindigkeit im Makroelement direkt proportional zum fließenden Strom ist, kann durch eine *Erhöhung des spezifischen Bettungswiderstandes* die Auswirkung eines Makroelementes stark reduziert werden. In Tabelle 3 (Berechnungsbeispiel) wird die Hauptursache für Korrosionsschäden an Wasserleitungen, die Makroelementbildung mit Fundamentern, dargestellt (siehe auch Bild 9). Nach der in Bild 4 abgeleiteten Formel wird der Korrosionsstrom für eine Lehm- und eine Kiesbettung berechnet, wobei für die Zellspannung des Elementes die Differenz der Korrosionspotentiale nach Tabelle 1 eingesetzt wird. An einer Fehlstelle von 1 cm^2 erhält man an der Wasserleitung in der Lehm- und in der Kiesbettung eine Korrosionsgeschwindigkeit von $16,6 \text{ mm/a}$, an der Wasserleitung in der Kiesbettung eine Korrosionsgeschwindigkeit von $0,21 \text{ mm/a}$. Allein durch die *Wahl der Bettung* kann folglich die Korrosionsgeschwindigkeit um den Faktor 80 verändert werden.

Gehalt an organischem Kohlenstoff

Die Bedingung für den organischen Kohlenstoffgehalt lautet:

$$\text{TOC} < 100 \text{ ppm}$$

Die Erde darf keine organischen Stoffe wie Holz, Gras, Blätter usw. enthalten. Beim Faulen dieser Stoffe im Erdreich können örtlich anaerobe Bedingungen entstehen, die zu *Makroelementbildungen* führen können. Auch können beim Fäulnisprozess Säuren entstehen. Ein Angriff auf einen Öltank, der durch einen kleinen faulenden Zweig verursacht wurde, ist in Bild 13 dargestellt.

Gehalt an Sulfat

Bedingungen für den Sulfatgehalt:
 $\text{SO}_4^{2-} < 1000 \text{ ppm}$, für Bauten ausserhalb des Grundwassers

$$\text{SO}_4^{2-} < 500 \text{ ppm}$$
, für Bauten im Grundwasser

Sulfate sind der *Nährboden für sulfatreduzierende Bakterien*, die grosse Angriffsgeschwindigkeiten im Erdboden bewirken können. Ihr Wachstum kann durch eine Limitierung des Sulfatgehaltes verhindert werden.

Gehalt an Chlorid

Bedingungen für den Chloridgehalt:

$$\text{Cl}^- < 200 \text{ ppm}$$
, für Bauten ausserhalb des Grundwassers

$$\text{Cl}^- < 100 \text{ ppm}$$
, für Bauten im Grundwasser

Wie neue Untersuchungen von *Petermann* [3] gezeigt haben, kann durch die Anwesenheit von Chlorid das Korrosionspotential bis um 300 mV absinken, was in einer an und für sich homogenen Bettung zur Bildung von *neuen Makroelementen* führen kann. Die Konzentration von Chlorid muss deshalb begrenzt werden. Wesentlich ist aber auch, dass die Chloridkonzentration *auch nachträglich*, z. B. durch Streusalzeinwirkungen, *nicht erhöht* wird. Gegen ein Einsickern von salzhaltigen Wässern in die Bauwerke müssen deshalb besondere Massnahmen ergriffen werden. Bild 14 zeigt einen Korrosionsangriff, der durch *chloridhaltige Müllschlacke* verursacht wurde.

Konstruktive Anforderungen an das Bauwerk

Durch konstruktive und bauliche Massnahmen muss dafür gesorgt werden, dass sich an der Bewehrung keine Makroelemente bilden können. Folgende *potentielle Gefahren* sind vorhanden:

- Makroelementbildung zwischen der *Armierung* des Schuppens und der *Bewehrung* (Bild 15). Um eine solche Elementbildung zu verhindern, darf zwischen der Armierung des Schuppens und der Lasche für die Befestigung der Bewehrung *kein elektrisch leitender Kontakt* bestehen. Die Lasche muss aus verzinktem Stahl hergestellt sein.
- Makroelementbildung durch *verschiedene Bodenarten*. Diese Gefahr ist relativ gering, da das Bauwerk ja schichtweise aufgebaut wird. Die Vorschriften bezüglich des *organischen Kohlenstoffgehaltes* (faulendes Holz oder Blätter) müssen allerdings beachtet werden.
- Makroelementbildung durch *unterschiedliche Bodenverdichtung*. Bei den Schuppen dürfte die Verdichtung des Erdreichs kleiner sein als im Zentrum des Bauwerkes. Dadurch entsteht ein Makroelement mit der Ka-

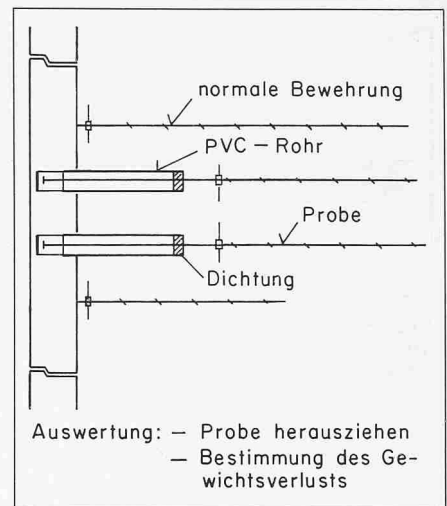


Bild 17. Überprüfung des Zustandes der Bewehrung durch Ausmessung von eingebauten Probestücken

thode bei den Schuppen und der Anode (Metallauflösung) im Zentrum. Die Korrosionsströme, die durch dieses Makroelement bewirkt werden, sind so klein, dass sie *vernachlässigt* werden können.

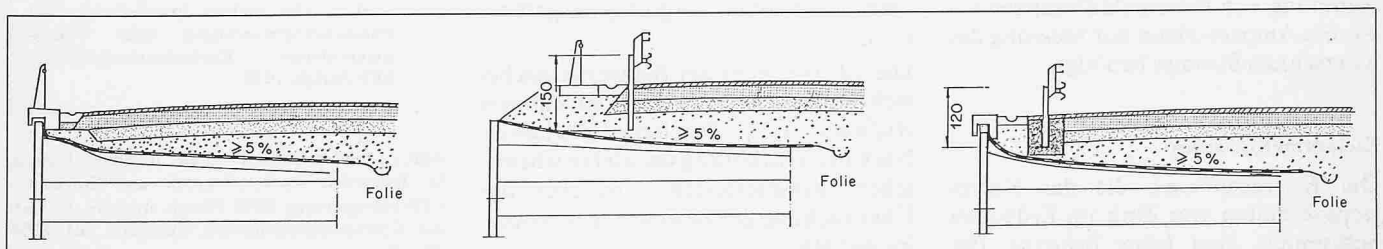
Auch *während des Betriebes* der Bauwerke dürfen sich *keine neuen Makroelemente* bilden. Damit das Bauwerk möglichst trocken bleibt und damit kein Streusalz eindringen kann, muss deshalb das Bauwerk oben mit Folien abgedichtet werden (Bild 16). Damit kein Spritzwasser von der Seite her in das Bauwerk eindringen kann, werden zwischen den Schuppen *Dichtungen* eingebaut.

Überwachung

Damit Bauwerke aus bewehrter Erde sicher betrieben werden können, muss der Zustand der Bewehrung *überwacht* werden können. Zu diesem Zweck werden pro Bauwerk 3 bis 4 Schuppen eingebaut, die je 4 *Probekörper* aus verzinktem Stahl enthalten (Bild 17). Diese Probekörper können aus dem Bauwerk gezogen werden. Durch Ausmessung der grössten Angriffstiefe sowie durch Bestimmung des Gewichtsverlustes kann das Ausmass des korrosiven Angriffes bestimmt werden.

In Zukunft kann der Zustand der Bewehrung *mit zerstörungsfreien Messmethoden* beurteilt werden. Die Korro-

Bild 16. Schutz der Bauwerke gegen eindringende Streusalze mit einer Folie



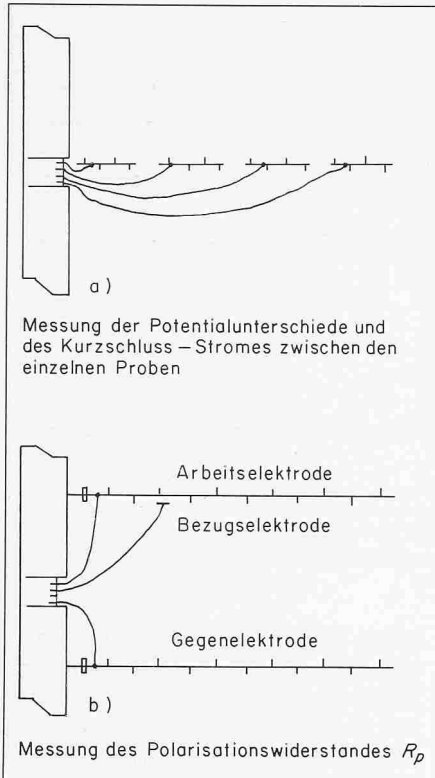


Bild 18. Kontrollmöglichkeiten der Zukunft
a) Feststellung der Makroelementbildung längs eines Bewehrungsseisens
b) Zerstörungsfreie Messung der Korrosionsgeschwindigkeit

Das Thema wurde von den Autoren an der Studententagung «Sonderbauwerke aus Lockergesteinen I (Bewehrte Erde und Gabions)» behandelt. Die Tagung fand am 6. März 1981 in Zürich statt und wurde von der Fachgruppe für Untertagebau (FGU) des Schweiz. Ingenieur- und Architektenvereins organisiert.

sionsgeschwindigkeit wird dabei durch Messung des Polarisationswiderstandes (Tabelle 2) ermittelt. Die Messanordnung ist in Bild 18 skizziert. Diese Methode wird zur Zeit im Labor erprobt. Zwischen traditionell ermittelten Werten aus Gewichtsverlustbestimmungen und elektrochemisch gemessenen Daten wird eine *sehr gute Übereinstimmung* erreicht (Bild 19).

Die Anwesenheit von Makroelementen kann mit einer Anordnung nach Bild 18a kontrolliert werden. Zur Kontrolle wird nur ein Voltmeter zur Bestimmung von Potentialdifferenzen sowie ein Ampère-Meter zur Messung des Kurzschluss-Stromes benötigt.

Zusammenfassung

Die Einflussgrößen, die das Korrosionsverhalten von Zink im Erdboden bestimmen, sind heute bekannt. Die

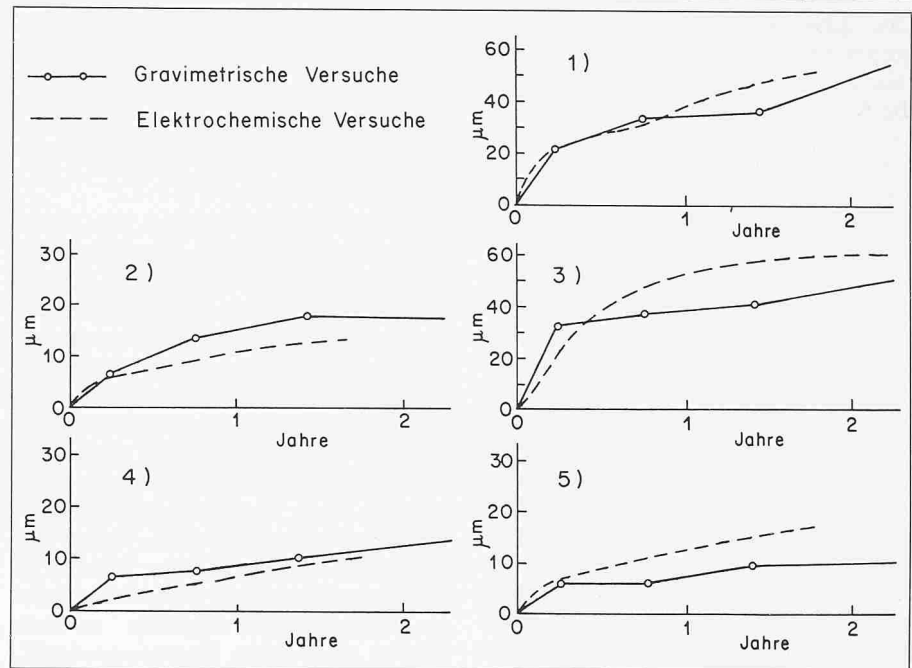


Bild 19. Vergleich der elektrochemisch ermittelten Werte für die Korrosionsgeschwindigkeit von verzinktem Stahl mit gravimetrisch bestimmten Daten

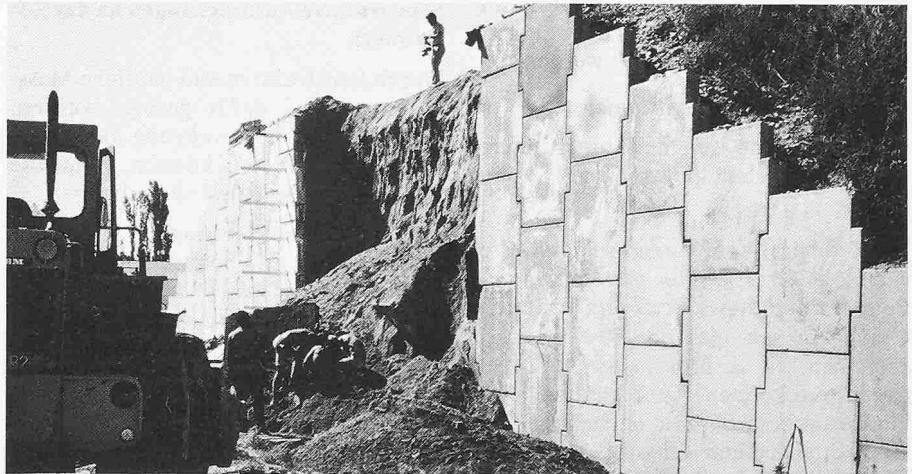


Bild 20. Versuchsbauwerk aus bewehrter Erde. Die speziell dünne Bewehrung wurde für eine Lebensdauer von 8 Monaten ausgelegt. Nach 9 Monaten ist das Bauwerk zusammengebrochen

Korrosionsgeschwindigkeit kann mit Hilfe der Bodenzusammensetzung anhand der vorhandenen Daten mit grosser Genauigkeit abgeschätzt werden. So ist zum Beispiel ein *Versuchsbauwerk in Spanien* (Bild 20), das für eine Lebensdauer von 8 Monaten ausgelegt war, nach 9 Monaten zusammengebrochen.

Damit die gewünschte *Lebensdauer* erreicht wird, müssen die Anforderungen an die *chemische Zusammensetzung* des verwendeten Bodens eingehalten sowie die *baulichen Massnahmen*, die ein Eindringen von Salzwasser in das Bauwerk verhindern sollen, sorgfältig ausgeführt werden.

Die *Überwachung* der Bauwerke aus bewehrter Erde ist heute *noch mit einigem Aufwand* und Problemen behaftet. Nach der Einführung der elektrochemischen Messmethoden wird aber die Überwachung der Bewehrung problemloser werden.

Literaturhinweise

- [1] Romanoff, M. (1957): «Underground Corrosion». NBS circular 579
- [2] Brachet, M. (1979): «Expérience et recherches concernant la durabilité des armatures de terre armée». Bull. liaison Labo. Pet. Ch., 25-39
- [3] Petermann, R. (1980): «Abklärung der Gefährdung erdverlegter, metallischer Rohrleitungen und Kabelmäntel durch Korrosion bei der Verwendung von Müllschlacke als Strassenbaumaterial». Gas - Wasser - Abwasser, 497-506
- [4] «Richtlinien zum Korrosionsschutz erdverlegter metallischer Anlagen bei Bauwerken oder andern Installationen mit Fundamentarmierungen oder Fundamentern». Korrosionskommission, SEV Zürich, 1976

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. H. Böhni, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich, und Dr. F. Stalder, Korrosionskommission, Seefeldstr. 301, 8008 Zürich