

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 53 (1975)

Heft: 10

Artikel: Korrosionsprobleme bei und mit Erdungen = Problèmes de corrosion des mises à terre et des installations connexes

Autor: Vögli, Kurt / Brunold, Armin / Trachsel, Hans-Robert

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875616>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 05.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Korrosionsprobleme bei und mit Erdungen

Problèmes de corrosion des mises à terre et des installations connexes

Kurt VÖGTLI, Armin BRUNOLD, Hans-Robert TRACHSEL, Bern

620.193,7: 621.316.99

Zusammenfassung. Erdnetze dienen dem Stromaustausch zwischen einem metallischen Leitersystem und dem Erdboden. Als Erdermaterial wird häufig Kupfer und für ausgedehnte Anlagen oft auch Eisen verwendet. In korrosionstechnischer Hinsicht sind jedoch beide Metalle nicht unbedenklich. Während Eisen und andere unedle Metalle in der mehr oder weniger aggressiven Bodenfeuchtigkeit der Selbstkorrosion unterliegen, gefährdet Kupfer mitverbundene Fremdkonstruktionen aus unedleren Metallen (Wasserleitungen, Bleimantelkabel usw.) durch Bildung galvanischer Elemente. Die damit zusammenhängenden praktischen Aspekte, wie messtechnische Probleme und der Aussagewert von Potentialmessungen, werden besprochen. Ferner wird über Feldversuche mit verschiedenen Erdermaterialien berichtet. Dabei zeigt sich, dass feuerverzinktes Kupfer weder Fremdleitungen gefährdet noch selber korrodiert.

Résumé. Les réseaux de mise à terre servent à l'échange de courants entre un système de conducteurs métalliques et le sol. Les dispositifs de mise à terre sont fréquemment réalisés en cuivre ou, pour les grandes installations, souvent aussi en fer. En ce qui concerne l'aspect technique de la corrosion, les deux métaux présentent toutefois certains inconvénients. Alors que le fer et d'autres métaux communs se corrodent eux-mêmes sous l'effet de l'humidité plus ou moins agressive du sol, le cuivre met en danger les installations connexes réalisées en métaux moins nobles (conduites d'eau, câbles à gaine de plomb, etc.), vu qu'il forme avec eux des éléments galvaniques. Les auteurs examinent les aspects pratiques de ces problèmes, notamment la technique des mesures et le caractère représentatif des mesures de potentiel. Par ailleurs, des essais en campagne avec divers matériaux pour dispositifs de mise à terre sont décrits et révèlent que le cuivre zingué au feu ne provoque ni corrosion extrinsèque, ni corrosion intrinsèque.

Problemi di corrosione inerenti alle messe a terra

Riassunto. Le reti di messa a terra servono allo scambio della corrente tra un sistema di conduttori metallici e la terra. Quale materiale per la messa a terra si impiega sovente rame e, per impianti importanti, spesso anche ferro. Dal punto di vista tecnico della corrosione entrambi i metalli presentano tuttavia qualche problema. Mentre il ferro e altri metalli non pregiati sono esposti all'autocorrosione dell'umidità più o meno aggressiva, il rame, formando elementi galvanici, compromette le strutture estranee di metalli meno pregiati ai quali è collegato (condotte d'acqua, guaine di piombo dei cavi, ecc.). Si discutono gli aspetti pratici riguardanti le questioni della tecnica delle misurazioni e l'attendibilità delle misurazioni dei potenziali. L'articolo presenta quindi i risultati di prove in campagna eseguite con diversi materiali di messa a terra. A questo proposito è stato stabilito che il rame zincato a fuoco non danneggia le condutture estranee e non è soggetto ad autocorrosione.

1 Einleitung

Erdnetze dienen dem Stromaustausch zwischen einem metallischen Leitersystem und dem elektrolytisch leitenden Untergrund. Häufig darf ein maximal zulässiger Übergangswiderstand nicht überschritten werden, was sich in der Ausdehnung und Gestaltung der Erdungssysteme auswirkt. In einigen Fällen, zum Beispiel bei Blitzableitern, ist auch noch die Belastbarkeit von Bedeutung, das heisst, die Erder müssen so dimensioniert sein, dass sie die abzuleitenden Ströme aufnehmen können, ohne sich dabei übermässig zu erwärmen.

Wären bei der Konstruktion von Erdnetzen nur die elektrischen Forderungen zu erfüllen, so könnten praktisch alle gebräuchlichen Metalle als Erdermaterialien verwendet werden. Neben den elektrischen sind aber noch eine Reihe weiterer Gesichtspunkte zu berücksichtigen. So etwa, ob die Bänder und Drähte geschmeidig genug sind, um leicht verlegbar zu sein, ob sich das Material leicht verbinden lässt (Löten, Hartlöten oder Schweissen) und nicht zuletzt, ob der Materialpreis tragbar ist. Schliesslich können auch die Korrosionseigenschaften eines Materials wichtiger sein als die elektrischen und thermischen Kennwerte, weil diese häufig zum vorneherein mehr als genügen.

2 Eigenkorrosion und Fremdkorrosion

Was das Korrosionsverhalten von Erdern anbelangt, so sind vor allem zwei Forderungen zu stellen. Einmal soll ein Erder im Boden selber nicht korrodieren und überdies soll er für andere erdverlegte Konstruktionen, die mit ihm metallisch verbunden sind, keine Korrosionsgefahr darstellen. Er soll also die Korrosion bei Fremdanlagen nicht fördern.

1 Introduction

Les réseaux de mise à terre servent à l'échange de courants entre un système de conducteurs métalliques et le sous-sol à conduction électrolytique. Souvent, une résistance de passage admissible maximale ne doit pas être dépassée, ce qui se répercute sur la dimension et l'aménagement du système de mise à terre. Dans certains cas, notamment pour les parafoudres, la capacité de charge est aussi un paramètre important, les dispositifs de mise à terre devant être dimensionnés de manière à pouvoir absorber les courants à évacuer sans s'échauffer excessivement.

S'il ne devait être satisfait qu'aux exigences électriques lors de la construction des réseaux de mise à terre, tous les métaux usuels pourraient pratiquement être utilisés à cet effet. Toutefois, une série d'autres facteurs doivent encore être considérés en plus des caractéristiques électriques. Il faut notamment examiner si les rubans et les fils sont assez souples pour permettre une pose aisée, si les connexions sont faciles à réaliser (soudure, brasure ou soudure autogène) et, en dernier lieu, si le coût du matériel est supportable. Finalement, le comportement du matériau à l'égard de la corrosion peut être plus important que les caractéristiques électriques et thermiques, ces dernières étant généralement d'emblée plus que suffisantes.

2 Corrosion intrinsèque et corrosion extrinsèque

En ce qui concerne la corrosion des dispositifs de mise à terre, il faut de prime abord poser deux exigences: Le matériau de mise à terre ne doit d'une part pas se corroder lui-même (corrosion intrinsèque), ni représenter un danger de corrosion pour d'autres installations posées sous terre avec

Diese beiden Forderungen sind nun aber leider widersprüchlich, indem ein Metall, das im Boden nicht korrodiert, ein anderes Metall, das weniger korrosionsbeständig ist, zum verstärkten Korrodieren bringt, falls es mit ihm verbunden wird. Die physikalisch-chemischen Grundlagen, die dieses Verhalten begründen, sind in der einschlägigen Literatur immer wieder dargestellt worden, so dass wir uns hier auf die praktischen Aspekte beschränken können. Eine praxisbezogene Annahme soll auch den Ausgangspunkt für die weiteren Erörterungen bilden.

Beabsichtigte zum Beispiel jemand ein Erdnetz aus Eisendrähten von 1 mm Durchmesser zu verlegen, so müsste man diesem Vorhaben sehr skeptisch gegenüberstehen, weil allgemein bekannt ist, dass solche Drähte im Erdboden in kurzer Zeit verrosten. Keinesfalls dürfte man erwarten, dass ein derartiges Erdnetz jahrzehntelang betriebsfähig bleibt.

Wenn jedoch statt des Eisens Kupferdraht verwendet wird, kann man vom Korrosionsstandpunkt aus nichts dagegen einwenden, da Kupfer im Boden kaum korrodiert. Aus elektrischen Gründen sind allerdings in der Regel grössere Drahtquerschnitte erforderlich.

Was passiert aber, wenn ein Erdnetz aus Kupfer mit einem Wasserleitungsnetz aus Stahlrohren verbunden wird?

Solche Verbindungen werden häufig absichtlich hergestellt, denn je mehr Metall in einem Erdnetz leitend miteinander verbunden ist, desto kleiner wird der Übergangswiderstand. Zwei verschiedene Metalle, die miteinander metallisch verbunden sind – zum Beispiel durch Schraubverbindungen, Schweiss- oder Lötstellen oder auch nur durch Berührung – und in einem gemeinsamen Elektrolyten liegen, bilden ein kurzgeschlossenes Element. In unserem Fall bildet der feuchte Boden den gemeinsamen Elektrolyten; Eisen und Kupfer sind die verschiedenen Metalle. Sind die Röhren verzinkt, so ist die Metallkombination natürlich Kupfer/Zink und nicht Kupfer/Eisen, denn die elektrochemischen Prozesse spielen sich in der Grenzschicht Metall/Elektrolyt ab. Wir wollen annehmen, das Wasserleitungssystem bestehe aus blanken Stahlrohren und das kupferne Erdnetz sei mit ihm nur an einer einzigen Stelle verbunden. Dies könnte zum Beispiel in einem Keller sein, wo eine Verbindung zwischen dem Nulleiter und dem Wassernetz hergestellt wurde, während der Nulleiter seinerseits wieder mit dem kupfernen Erdnetz verbunden ist. Falls wir diese einzige metallische Verbindung zwischen dem Kupfer und dem Eisen auftrennen, erhalten wir statt des kurzgeschlossenen Elements zwei offene Halbelemente. Was ist darunter zu verstehen? Jedes Metall, das in Kontakt mit einem Elektrolyten steht, nimmt gegenüber diesem eine bestimmte Spannung an. Dabei denkt man sich den Elektrolyten vielleicht zunächst als eine reine Flüssigkeit, etwa wie die Säure in einer Autobatterie. Aber auch der Boden, das heisst die Bodenfeuchtigkeit auf und zwischen den isolierenden Sandkörnern und Tonpartikeln, bildet einen Elektrolyten. Eine im Boden liegende Metallkonstruktion stellt somit ebenfalls ein Halbelement dar. Wie gross ist nun aber die Potentialdifferenz zwischen Metall und Elektrolyt? Das hängt von vielen Faktoren ab. Die beiden wichtigsten sind die Art des Metalls und die Zusammensetzung des Elektrolyten. Von grossem Einfluss kann ferner eine Deckschicht sein. Verrostetes Eisen wird zum Beispiel gegenüber dem Boden ein wesentlich anderes Potential annehmen als ein blankes Blech. Daneben spielt noch die Temperatur eine untergeordnete Rolle, und kleine Unterschiede entstehen zum Beispiel auch, wenn das Material stark deformiert ist.

lesquelles il est relié métalliquement (corrosion extrinsèque). La corrosion d'installations connexes ne doit donc pas être favorisée.

Ces deux exigences sont malheureusement contradictoires, car un métal qui ne se corrode pas dans le sol a tendance à accentuer l'attaque d'un autre métal, moins sujet à la corrosion, en cas de connexion. Les principes physico-chimiques régissant ce comportement ont été souvent exposés dans la littérature spécialisée, si bien que nous nous limiterons ici à en examiner les aspects pratiques et les explications qui suivent se fondent sur une hypothèse inspirée de la pratique.

Si l'on voulait, par exemple, poser un réseau de mise à terre constitué d'un fil de fer de 1 mm de diamètre, il y aurait lieu de se montrer très sceptique, chacun sachant que de tels fils se rouillent très rapidement dans le sol. En aucun cas, il ne faudrait donc s'attendre qu'un tel réseau de mise à terre subsiste pendant des décennies.

Si, en revanche, le fil de fer était remplacé par du fil de cuivre, il n'y aurait aucune objection à formuler au point de vue de la corrosion, le cuivre se corrodant en effet à peine dans le sol. Pour des raisons découlant des lois de l'électricité, il est toutefois généralement nécessaire d'utiliser des fils de diamètre supérieur à 1 mm. Que se passe-t-il alors, si un réseau de mise à terre en cuivre est relié à un réseau de distribution d'eau constitué de tuyaux d'acier?

De telles connexions sont souvent effectuées à dessein, car plus la surface métallique d'un réseau de mise à terre est importante, plus la résistance de passage diminue. Deux métaux différents reliés métalliquement, par exemple par vissage, brasure, soudure ou simple contact et placés dans un électrolyte commun forment un élément en court-circuit. Le sol humide constitue l'électrolyte commun, le fer et le cuivre étant les différents métaux des électrodes. Si les tuyaux sont zingués, la combinaison des métaux est évidemment cuivre/zinc et non pas cuivre/fer, car les processus électrochimiques se déroulent dans la couche limite extérieure métal/électrolyte. Admettons que le système de conduites d'eau consiste en tuyaux d'acier nus et que le réseau de mise à terre en cuivre y soit relié en un seul point qui pourrait, par exemple, être situé dans une cave où le conducteur du neutre aurait été relié à une conduite d'eau, ce même conducteur du neutre étant à son tour connecté au réseau de mise à terre en cuivre. En interrompant cette unique connexion métallique entre le cuivre et le fer, nous obtenons deux semi-éléments en circuit ouvert au lieu d'un élément court-circuité. Que faut-il entendre par là? Chaque métal en contact avec un électrolyte adopte une tension donnée par rapport à celui-ci. Par électrolyte, on pensera peut-être de prime abord à l'acide d'un accumulateur d'automobile. Toutefois, l'humidité contenue dans le sol, c'est-à-dire celle qui existe entre les particules de sable et d'argile isolantes, constitue elle aussi un électrolyte. Une construction métallique enfouie dans le sol représente donc également un semi-élément. A combien s'élève alors la différence de potentiel entre le métal et l'électrolyte? Cela dépend de plusieurs facteurs, dont les plus importants sont le genre du métal et la composition de l'électrolyte. De plus, la présence d'une couche recouvrant la surface métallique peut revêtir une grande importance. Du fer rouillé adoptera par exemple un potentiel sensiblement différent de celui de la tôle non oxydée. La température joue également un rôle secondaire et de fortes déformations du matériau peuvent engendrer des différences minimes.

Da in unserem Fall die beiden Halbelemente zwar einen gemeinsamen Elektrolyten, nämlich den feuchten Boden, haben, aber aus verschiedenen Metallen (Kupfer oder Eisen) bestehen, wird an der offenen Kontaktstelle zwischen dem Nulleiter und dem Eisenrohr eine Spannung zu messen sein. Die Spannung wäre natürlich anders, wenn das Wasserleitungssystem aus galvanisierten Röhren bestünde, denn das Halbelement Zink/Boden hat ein anderes Potential als das von Eisen/Boden. Wieder andere Verhältnisse würden wir antreffen, wenn der Nulleiter mit einem Bleikabelmantel verbunden wäre. Aber nicht nur verschiedene Metalle in ein und demselben Elektrolyten ergeben Potentialdifferenzen, sie können auch bei gleichen Metallen auftreten, sofern verschiedene Elektrolyte beteiligt sind. So kann zum Beispiel ein System von Eisenstäben, das die Armierung in einer Betonkonstruktion bildet, gegenüber einem Wasserleitungssystem aus Stahlrohren (also auch Eisen) ähnlich grosse Spannungen aufweisen wie ein Kupfernetz, weil sich die Kombination Eisen/Betonfeuchte ganz ähnlich verhält wie das System Kupfer/Boden.

Wie bereits erwähnt, sind für die elektrochemischen Prozesse die Vorgänge in der Grenzschicht Metall/Elektrolyt entscheidend. Es ist deshalb wichtig, die Zusammensetzung, des Elektrolyten unmittelbar bei der Kontaktfläche Metall/Elektrolyt zu kennen, was zum Beispiel bei Leitungen und Kabeln mit einer Schutzhülle aus saugfähigem Material eine weitere Komplikation darstellt. Es ist deshalb bei kompliziert aufgebauten Elektrolyten – und Bodenfeuchtigkeit gehört dazu, ganz besonders wenn sie noch in einer Schutzhülle aufgesogen ist – praktisch unmöglich, den Potentialwert der Halbzelle rechnerisch zu ermitteln. Umgekehrt sagen die sogenannten Normalpotentiale, die auf wohl definierten Elektrolytzusammensetzungen basieren, wenig aus über die in der Praxis auftretenden Spannungen.

Halten wir also fest, dass Metalle gegenüber einem sie umgebenden Elektrolyten eine Spannung annehmen, die von der Art des Metalls, dem Zustand der Oberfläche und der Zusammensetzung des Elektrolyten abhängt. Sagt nun diese Spannung etwas über die Korrosionsverhältnisse beim betrachteten System aus?

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass wir jetzt nur den Fall betrachten, dass ein einheitliches Metall mit einem einheitlichen Elektrolyten in Kontakt steht. Also etwa ein Kupfererdnetz mit dem Boden oder das Stahlrohrsystem einer Wasserversorgung mit dem Boden, aber jedes System soll für sich allein betrachtet werden, das heisst ohne metallische Verbindung untereinander. Unter diesen Umständen beeinflussen sich auch örtlich benachbarte Systeme nicht, selbst dann nicht, wenn sie sich örtlich überlappen. Die Spannung zwischen Metall und Elektrolyt kann also – wenn überhaupt – nur für das Korrosionsverhalten des betrachteten Halbelements signifikant sein. Nun ergibt sich aber für die Bestimmung der interessierenden Spannung Metall/Elektrolyt eine messtechnische Schwierigkeit. Man kann zwar sehr einfach mit Hilfe eines Voltmeters die Spannung zwischen dem Kupfererdnetz (oder dem damit verbundenen Nulleiter) und dem Wasserleitungssystem messen, aber so erfasst man nur die Differenz der Spannungen Kupfer/Boden und Eisen/Boden. Wenn man aber wissen möchte, ob die Wasserleitungen schon korrodiert sind und noch weiter korrodieren, und wenn man einmal annimmt, der Korrosionszustand wäre eindeutig aus der Grösse der Spannung zwischen dem Eisen und dem Boden ablesbar, dann muss man versuchen, diese Spannungen absolut und nicht als

En ce qui concerne l'exemple cité, les deux semi-éléments ont bien le même électrolyte, soit le sol humide, mais sont formés de métaux différents (cuivre, respectivement fer); par conséquent, une tension peut être mesurée entre le conducteur du neutre et le tuyau de fer au point de coupure de la connexion. La tension serait naturellement différente si le système de conduites d'eau était réalisé en tuyaux galvanisés, car le potentiel délivré par le semi-élément zinc/sol est différent de celui que fournit le semi-élément fer/sol. Nous rencontrerions à nouveau d'autres conditions si le conducteur du neutre était relié à la gaine de plomb d'un câble téléphonique par exemple. Des différences de potentiel n'apparaissent pas seulement lorsque divers métaux sont plongés dans un même électrolyte, mais aussi lorsque des métaux identiques sont soumis à l'action d'électrolytes différents. Ainsi, un système de barres de fer formant la carcasse d'une construction en béton armé peut présenter, à l'égard d'un système de conduites d'eau en acier (ce qui équivaut à du fer), des tensions tout aussi élevées qu'un réseau de cuivre, vu que la combinaison fer/humidité du béton se comporte de façon analogue à celle du système cuivre/sol.

Comme nous l'avons déjà dit, les phénomènes qui se produisent dans la couche limite métal/électrolyte sont déterminants pour les processus électrochimiques. Il est dès lors important de connaître la composition de l'électrolyte en contact direct avec la surface métallique, ce qui représente notamment une complication supplémentaire dans le cas de conduites et de câbles pourvus d'une enveloppe de protection absorbante. Il est de ce fait pratiquement impossible de déterminer par calcul le potentiel du semi-élément lorsque la composition de l'électrolyte est complexe, ce qui est le cas pour l'humidité du sol, tout particulièrement quand elle est absorbée par une enveloppe de protection. Inversement, les potentiels normaux découlant de compositions d'électrolytes bien définies n'ont pas de grande valeur indicative quant aux tensions survenant en pratique. Retenons donc que les métaux adoptent par rapport aux électrolytes qui les entourent une tension qui dépend du genre du métal, de l'état de la surface et de la composition de l'électrolyte. Cela étant, cette tension exprime-t-elle quelque chose sur les conditions de corrosion du système considéré?

Rappelons que nous nous bornons à examiner le cas d'un seul métal en contact avec un seul électrolyte. Considérons par exemple un réseau de cuivre enfoui dans le sol ou les conduites d'acier enterrées d'un réseau de distribution d'eau, chaque système étant examiné isolément, c'est-à-dire sans interconnexion métallique. Dans ces conditions, des systèmes voisins ne s'influencent pas mutuellement, même s'ils se chevauchent. Le cas échéant, la tension entre le métal et l'électrolyte ne peut donc être significative que pour le comportement quant à la corrosion du semi-élément considéré. Or, une difficulté relevant de la technique des mesures apparaît lorsqu'il s'agit de déterminer la tension métal/électrolyte recherchée. Il est simple de mesurer à l'aide d'un voltmètre la tension entre le réseau de mise à terre en cuivre (ou du conducteur neutre auquel il est relié) et le système de conduites d'eau mais, ce faisant, on ne relève que la différence entre les tensions cuivre-sol et fer-sol. Toutefois, si l'on veut savoir si les conduites d'eau sont déjà corrodées et continuent à se détériorer, et si l'on admet que l'état de corrosion pourrait ressortir de la valeur de la tension entre le fer et le sol, il faut essayer d'en déterminer la valeur absolue et non pas se contenter de mesurer une différence de tensions.

Differenz zu bestimmen. Dazu noch folgende Ergänzung: Wird ein Eisenstab in den Boden gerammt, so entsteht zwischen ihm und dem Boden eine Spannung. Die Grösse dieser Spannung könnte allenfalls ein Mass dafür sein, ob das Eisen im Boden rasch verrostet. Stecken wir in der Nähe auch noch einen Kupferstab in den Boden, so ist sofort zwischen dem Eisenstab und dem Kupferstab eine Spannung zu messen. Ersetzen wir den Kupferstab durch einen aus Aluminium, so wird man eine andere Spannung finden. Gegenüber Zink, Blei, rostfreiem Stahl, Magnesium usw. sind immer wieder andere Werte zu messen.

Das Problem besteht also darin, den Einfluss der Vergleichselektrode zu eliminieren. Dies wird durch die Verwendung einer speziellen Bezugselektrode möglich, die immer dieselbe Vergleichsspannung entwickelt. Es ist dies gleichsam ein Metallstab, der unabhängig davon, wo man ihn einsetzt, immer gegenüber dem Elektrolyten dieselbe Spannung annimmt. Als Bezugselektrode wird in der Feldpraxis heute vor allem ein Halbelement verwendet, bei dem ein Kupferstab in eine gesättigte Kupfersulfatlösung taucht. Damit ist die Spannung Metall/Elektrolyt eindeutig definiert. Die Kupfersulfatlösung befindet sich in einem porösen Gefäss, zum Beispiel in einem Behälter mit einer Glasfritte als Boden, und hat deshalb mit der Bodenfeuchtigkeit Kontakt, falls sie auf den Boden gestellt wird. Zwar entsteht nun über der leicht durchlässigen Trennwand der Zelle zwischen der Kupfersulfatlösung und der Bodenfeuchtigkeit auch wieder eine Spannung, aber diese ist so klein, dass sie im allgemeinen vernachlässigt werden kann. Damit haben wir die Möglichkeit, die gesuchte Spannung Metall/Elektrolyt bis auf einen immer gleichbleibenden Betrag (nämlich die Spannung der Vergleichszelle) direkt zu bestimmen.

Nachdem ein definierter Bezugspunkt gefunden ist, können wir uns der Frage zuwenden: Inwiefern sagt die Spannung eines Metalls gemessen gegen die Cu/CuSO₄-Elektrode etwas über den Korrosionszustand bzw. die Korrosionsbeständigkeit dieses Metalls aus? Leider nicht allzuviel! So ist es zum Beispiel nicht möglich, aus derartigen Messungen abzuleiten, wie stark eine Wasserleitung angegriffen ist oder wie tief die am weitesten fortgeschrittenen Korrosionen bei einem Bleimantel sind. Die vorher gemachten Annahmen sind also viel zu optimistisch. Man muss sich mit viel weniger detaillierten Feststellungen begnügen. So kann man etwa sagen, dass Metalle, die im Boden kaum korrodieren, gegenüber dem Boden ähnliche Spannungen annehmen wie der Kupferstab der Vergleichszelle gegenüber der Kupfersulfatlösung. Stellt man fest, dass ein Metall gegenüber der Kupfersulfatvergleichselektrode nicht negativer als etwa -200 mV ist, so darf man annehmen, dass dieses Material im Boden nicht oder nur sehr langsam angegriffen wird. In diesem Bereich liegen zum Beispiel Kupfer, rostfreier Stahl und Eisen als Betonarmierung. Metalle, die dagegen im Boden stark korrodieren, zum Beispiel frisches Zink, Magnesium und Aluminium, zeigen besonders negative Werte (-1 V und negativer).

Was passiert nun aber, wenn man zwei Halbelemente (in unserem Fall zum Beispiel das Kupfererdnetz und die Wasserleitungen) miteinander verbindet? Dann wird ein Strom vom positiveren Metall zum weniger positiven oder vom positiven zum negativen oder vom negativen zum negativeren fliessen, wobei die relative Lage der Potentiale, wie wir gesehen haben, von der Art der Vergleichselektrode abhängt. In unserem Beispiel wird jedenfalls Strom aus dem Kupfererd-

En effet, une tension apparaît entre une tige de fer et le sol dans lequel on l'enfonce dont la valeur pourrait éventuellement représenter un critère indiquant la rapidité avec laquelle le fer se rouille dans le sol. Enfichons encore à proximité une tige de cuivre dans le sol: une tension peut immédiatement être mesurée entre celle-ci et la barre de fer. Si nous remplaçons la tige de cuivre par une tige en aluminium, la tension sera différente. Nous trouverons chaque fois d'autres valeurs si nous procédons à des essais successifs avec des tiges de zinc, de plomb, d'acier inoxydable, de magnésium, etc.

Le problème consiste donc à éliminer l'influence de l'électrode de référence. On y parvient en utilisant une électrode spéciale. Il s'agit, en l'occurrence, d'une tige métallique qui adopte toujours la même tension par rapport à l'électrolyte, quel que soit l'endroit où elle est utilisée. Dans la pratique en campagne, l'électrode de référence employée généralement aujourd'hui est un semi-élément formé d'une tige de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de cuivre. Ainsi la tension métal/électrolyte est clairement définie. La solution de sulfate de cuivre est contenue dans un récipient poreux, dont le fond est, par exemple, constitué par du verre fritté permettant d'établir le contact avec l'humidité du sol lorsque l'électrode est posée sur celui-ci. Il est vrai qu'une tension s'établit à nouveau entre la solution de sulfate de cuivre et l'humidité du sol, par l'intermédiaire de la paroi de séparation poreuse, mais elle est si faible qu'elle peut en général être négligée. Il est ainsi possible de déterminer directement la tension métal/électrolyte recherchée, à la différence près d'une valeur constante (à savoir la tension de l'élément de référence). Après avoir trouvé un point de référence défini, nous pouvons étudier la question: «A quel point la tension décelable entre un métal et l'électrode Cu/CuSO₄ renseigne-t-elle sur l'état de corrosion ou la résistance à la corrosion de ce métal?» Malheureusement, dans une mesure restreinte! Des mesures de tension ne permettent notamment pas de déterminer à quel point une conduite d'eau est rongée ou jusqu'à quelle profondeur la corrosion la plus forte d'une gaine de plomb a progressé. Les hypothèses formulées plus haut sont donc beaucoup trop optimistes et il y a lieu de se contenter d'indications nettement moins détaillées. Il sera par exemple possible de dire que les métaux se corrodant peu dans le sol engendrent des tensions comparables à celles qui s'établissent entre la tige de cuivre de l'élément de référence et la solution de sulfate de cuivre. Si l'on constate que la tension d'un métal par rapport à l'électrode de référence à sulfate de cuivre n'est pas plus négative que quelque -200 mV, on peut admettre que ce matériau n'est pas attaqué dans le sol ou qu'il n'est attaqué que très lentement. Se situent par exemple dans cette plage le cuivre, l'acier inoxydable et le fer d'armature du béton armé. Les métaux qui, en revanche, se corrodent fortement dans le sol, par exemple le zinc neuf, le magnésium et l'aluminium, engendrent des tensions particulièrement négatives (-1 V ou plus). Mais que se passe-t-il lorsqu'on relie deux semi-éléments (dans notre exemple le réseau de mise à terre en cuivre et les conduites d'eau)? Un courant s'écoule entre les métaux, du plus positif au moins positif, du positif au négatif, ou du négatif au plus négatif, la plage relative du potentiel dépendant, comme nous l'avons vu, du genre de l'électrode de référence. Dans l'exemple retenu, un courant s'écoulera en tout cas du réseau de mise à terre en cuivre au réseau de conduites d'eau, par l'intermédiaire de la connexion métallique. A la surface de contact fer/sol, ce courant pénétrera dans le

netz über die metallische Verbindung in das Wasserleitungsnetz hineinfliesen. An der Kontaktfläche Eisen/Boden wird dieser Strom in den Untergrund austreten, und vom Kupfernetz wird ein gleichgrosser Strom aus dem Boden aufgenommen. Dort, wo ein Strom aus dem Metall in den Elektrolyten übertritt, in unserem Fall also beim Kontakt Eisen/Boden, entsteht eine durch den Ausgleichsstrom erzeugte Korrosion, indem proportional zur transportierten Ladung Metall vom neutralen in den ionisierten Zustand übergeführt wird. Die quantitativen Verhältnisse ergeben sich aus dem 2. Faradayschen Gesetz. Für uns genügt zu wissen, dass der Materialabtrag proportional zum Produkt Strom mal Zeit erfolgt. Die Korrosionsgefahr ist also um so grösser, je mehr Strom in eine erdverlegte Konstruktion fliesst, wobei natürlich Strom, der metallisch weitergeleitet wird und nicht in den Elektrolyten übertritt, nicht wirksam ist, denn Korrosionen entstehen nur beim Übergang von metallischer zu elektrolytischer Stromleitung. Damit ergibt sich aber ein neues Messproblem. Nehmen wir wieder unser Kupfererdnetz und das Rohrnetz der Wasserversorgung: An der Verbindungsstelle, also im Keller, wo der Nulleiter auf die Wasserleitung geführt ist, soll im aufgetrennten Zustand zwischen Kupfernetz und Eisensystem eine Spannung von 400 mV mit dem Kupfer als positivem Pol zu messen sein. Wenn wir jetzt über ein niederohmiges Strommessinstrument die beiden Systeme miteinander verbinden, so fliesst ein Strom, nämlich der Kurzschlussstrom des Elementes Kupfer-Boden-Eisen. Dieser Strom soll 100 mA betragen. Ist das gefährlich? Die Frage liegt auf der Hand, eine Antwort ist aber schwierig zu geben, und dies aus folgenden Gründen:

Wir können zwar sagen, dass ein Strom von 100 mA im Jahr 0,9 kg Eisen vom Wasserleitungsnetz abträgt, sofern er vollständig in den Boden übertritt und nicht etwa teilweise über irgendwelche metallischen Umwegleitungen abgeleitet wird. Damit weiss man aber immer noch nicht, ob der gemessene Strom gefährlich ist oder nicht, und zwar auch dann nicht, wenn eindeutig feststeht, dass der gesamte Strom (oder allenfalls ein bekannter Teilstrom) im betrachteten System von der metallischen zur elektrolytischen Stromleitung hinüberwechselt. Zwar können wir ausrechnen, wieviel cm^3 Eisen der abgetragenen Menge Metall entsprechen, aber wir wissen nicht, wo der Abtrag erfolgt ist, ob über die ganze Oberfläche gleichmässig verteilt oder nur an einer oder einigen wenigen Stellen. Uns interessiert es aber wenig, dass ein Wasserleitungssystem jährlich um einen gewissen Betrag leichter geworden ist, wir möchten wissen, ob es Löcher gegeben hat. Leider gibt eine Strommessung diesbezüglich keine Hinweise. Man ist zunächst ganz auf Vermutungen angewiesen. Sind die Wasserleitungsrohre nicht isoliert, so wird man zum Beispiel annehmen dürfen, dass der Stromaustritt verbreitet erfolgt. Sind die Rohre dagegen gut isoliert, so ist zu befürchten, dass der Stromaustritt auf einige Fehlerstellen konzentriert ist. Es würde zu weit führen, wenn wir hier auch nur einige der Möglichkeiten und Verfahren diskutieren wollten, die in diesem Zusammenhang schon vorgeschlagen wurden, um weitere Informationen zu erhalten. Es soll nur erwähnt werden, dass die Spannung, die man bei durchverbundenen Systemen gegenüber einer Kupfersulfatelektrode misst, einen brauchbaren Hinweis über die Korrosionsgefährdung liefert. Diese Gefährdung ist nämlich um so grösser, je stärker die Spannung des gefährdeten Materials (also des negativen Pols) als Folge der Durchverbindung in positiver Richtung verschoben wird.

sol et, pour sa part, le réseau de conducteurs en cuivre absorbera un courant équivalent venant du sol. A l'endroit où un courant passe du métal à l'électrolyte, soit au point de contact fer/sol, une corrosion engendrée par le courant de compensation apparaît, du fait qu'une quantité de métal proportionnelle à la charge transportée passe de l'état neutre à l'état ionisé. Les conditions quantitatives résultent de la deuxième loi de Faraday. Pour notre exemple, il suffit de savoir que la quantité de matériau évacué est proportionnelle au produit du courant par le temps. Le danger de corrosion est donc d'autant plus grand que le courant qui s'écoule dans une construction enfouie est important, bien que le courant transmis par voie métallique et ne pénétrant pas dans l'électrolyte soit sans effet sur la corrosion, vu que celle-ci n'apparaît que lorsque du courant passe d'un circuit métallique à un circuit électrolytique. Et pourtant il en résulte un nouveau problème de mesure.

Revenons au réseau de mise à terre en cuivre et au réseau de conduites de l'installation de distribution d'eau. Au point d'interconnexion, soit dans la cave où le conducteur du neutre est relié à la conduite d'eau, une tension de 400 mV doit pouvoir être mesurée à l'état ouvert de la jonction, entre le réseau de cuivre et celui des conduites en fer, le cuivre étant le pôle positif. Lorsque les deux systèmes sont reliés à l'aide d'un instrument de mesure à basse résistance, un courant s'établit, à savoir le courant de court-circuit de l'élément cuivre-sol-fer. Il doit être de 100 mA. Est-il dangereux? Bien que cette question s'impose, il est difficile d'y répondre pour les raisons suivantes:

Nous savons qu'un courant de 100 mA évacue 0,9 kg de fer par an du réseau des conduites d'eau, en tant que ce courant passe entièrement dans le sol et n'est pas partiellement dérivé par de quelconques conducteurs de déviation métalliques. Et pourtant on ignore encore si le courant mesuré est dangereux ou non, même s'il est clairement établi que le courant total (ou le cas échéant un courant partiel connu) passe du circuit métallique au circuit électrolytique dans le système considéré. Il est possible de calculer combien de cm^3 de fer correspondent à la quantité de métal évacuée, mais nous ne savons pas si l'évacuation a porté sur toute la surface ou seulement sur un ou quelques points déterminés du système. Le fait de savoir qu'un réseau de distribution d'eau a diminué annuellement d'un certain poids nous intéresse bien moins que d'apprendre si des perforations se sont effectivement produites. Malheureusement, une mesure de courant ne renseigne pas à ce sujet et l'on en est réduit à des suppositions. Si les conduites d'eau ne sont pas isolées, on peut, par exemple, admettre que le courant quitte le réseau sur une surface étendue. Si, en revanche, les tuyaux sont bien isolés, il est à craindre que les écoulements de courant soient concentrés sur quelques points défectueux de la protection. Or, examiner ici seulement quelques-unes des possibilités et méthodes proposées à ce sujet pour obtenir de plus amples informations mènerait déjà trop loin. Bornons-nous dès lors à dire que la tension mesurée par rapport à une électrode à sulfate de cuivre dans un système interconnecté fournit des indications utilisables sur le danger possible de corrosion. Ce danger est d'autant plus grand que la tension du matériau exposé à la corrosion (donc du pôle négatif) est déplacée en direction positive en raison de l'interconnexion. En ce qui concerne les câbles à gaine de plomb, un écart de potentiel de 10 mV peut suffire à faire naître un danger de corrosion, bien que la valeur la plus souvent admise se situe généralement à 20 mV au maximum. Pour

Bei Bleikabeln genügt eine Verschiebung um wenige 10 mV, um eine Korrosionsgefahr heraufzubeschwören, wobei man meistens 20 mV als den noch zulässigen Maximalwert betrachtet. Bei Eisen ist man dagegen der Meinung, 50 mV, allenfalls sogar 100 mV seien tolerierbar. Es ist zu beachten, dass diese zulässigen Verschiebungen nur für normale Bodenfeuchtigkeit als Elektrolyt gelten. Bei sehr gut leitenden Elektrolyten (zum Beispiel in galvanischen Bädern) wirken sich Spannungsverschiebungen um einige 10 mV bereits bedeutsam aus.

3 Geeignete Erdermaterialien

Soll vom korrosionstechnischen Standpunkt aus die Eignung eines Materials für die Konstruktion von Erdnetzen beurteilt werden, so müssen nach den bisherigen Ausführungen vor allem die beiden Fragen «Selbstkorrosion?» und «Gefährdung mitverbundener Konstruktionen?» beantwortet werden.

Dabei muss hinsichtlich einer möglichen Selbstkorrosion auch untersucht werden, ob das Material zur interkristallinen Korrosion oder zum Lochfrass neigt oder ob allfällige Abtragungen gleichmässig erfolgen. Diese zusätzlichen Angaben sind vor allem dann wichtig, wenn man sich auf Angaben stützt, die Gewichtsverluste beinhalten, die auf eine bestimmte Versuchsfläche und Versuchszeit bezogen sind. Bei rostfreiem Stahl wird man zum Beispiel immer kleine Gewichtsverluste feststellen. Weil dieses Material aber ausgeprägten Lochfrass erleidet, können trotzdem empfindliche Querschnittsverluste auftreten. Auch bei Blei, das oft nur in den Korngrenzflächen korrodiert, können Gewichtsangaben sehr irreführend sein. Was nützt es, wenn in einem solchen Fall die Bleikörner noch absolut intakt sind, das Gefüge aber wie ein Haufen Pflastersteine auseinanderfällt?

Bei der Abschätzung der Gefährdung von Drittanlagen ist zunächst abzuklären, ob ein Material in eine mitverbundene Konstruktion Strom abgibt oder aus ihr Strom aufnimmt. Da nur eine Stromabgabe eine Korrosionsgefahr bedeuten kann, wäre man vielleicht geneigt anzunehmen, ein Material mit grosser Stromaufnahme wäre besonders geeignet. Stromaufnahme bedeutet aber verstärkte Eigenkorrosion! Eine Stromaufnahme ist dann weniger zu fürchten, wenn das Material gleichmässig korrodiert, denn Erdnetze werden stets blank verlegt, und eine gleichmässige Stromverteilung kann deshalb angenommen werden. Trotzdem wäre es erwünscht, wenn zwischen benachbarten Konstruktionen möglichst kein Stromaustausch stattfinden würde.

4 Praxisnahe Versuche mit verschiedenen Erdermaterialien

Um die Korrosionseigenschaften eines Materials, das für Erdnetze in Frage kommt, unter ähnlichen Bedingungen prüfen zu können, wie sie in der Praxis auftreten, wird man geeignete Stücke, zum Beispiel einige Meter Band, so zu verlegen versuchen, dass nach einiger Zeit aus dem Zustand der Proben eine Aussage über das Korrosionsverhalten im Normalfall gemacht werden kann. Aber was ist noch Normalfall und was Ausnahme? Bei der grossen Vielfalt unserer Böden hinsichtlich Aufbau (Grösse und Anteil der Komponenten), chemischer Zusammensetzung von Trockensubstanz und Elektrolyt, Grad der Durchnässung, Belüftung und Potentialbeeinflussung durch mitverbundene Konstruktionen und Streuströme können Feldversuche immer nur Ausgangspunkt für eine viel weitergehende Erprobung durch die Pra-

die fer, on est en revanche d'avis que 50 voire 100 mV sont tolérables. Il y a lieu de considérer que ces écarts admissibles ne s'appliquent qu'à une humidité normale du sol en tant qu'électrolyte. Des écarts de potentiel de quelques dizaines de millivolts ont déjà des conséquences plus graves dans le cas d'électrolytes très bons conducteurs (par exemple les bains galvaniques).

3 Matériaux de mise à terre appropriés

Si l'on veut juger dans quelle mesure un matériau convient à la construction de réseaux de mise à terre, du point de vue de la corrosion, il est nécessaire, vu ce qui précède, de répondre en premier lieu aux deux questions suivantes: Y a-t-il «corrosion intrinsèque?» et «mise en danger d'installations connexes?»

En ce qui concerne une corrosion intrinsèque possible, il convient aussi d'examiner si le matériau a une tendance à la corrosion intercrystalline ou à la corrosion avec formation de cratères ou si d'éventuels transferts électrolytiques de matière ont lieu régulièrement. Ces renseignements supplémentaires sont surtout importants quand les recherches sont fondées sur des pertes de poids se rapportant à une surface et à une durée d'essai déterminées. Pour l'acier inoxydable, par exemple, on constatera toujours de faibles pertes de poids. Ce matériau étant toutefois particulièrement sujet à la corrosion avec formation de cratères, il peut malgré tout se produire des diminutions de section sensibles. Pour le plomb également, se corrodant souvent juste aux surfaces limitant les grains, les pertes de poids peuvent induire en erreur. A quoi cela sert-il, en pareil cas, que les grains soient absolument intacts, si la structure se désagrège à la manière d'un tas de pavés?

En évaluant le danger auquel sont exposées les installations connexes, il faut d'abord examiner si un matériau cède du courant à une construction à laquelle il est relié ou s'il lui en prélève. Seule une cession de courant signifiant un danger de corrosion, on aurait peut-être tendance à admettre qu'un matériau prélevant beaucoup de courant est particulièrement approprié. Toutefois, un prélèvement de courant se traduit par une corrosion intrinsèque accrue! Un prélèvement de courant est cependant moins à craindre si le matériau se corrode régulièrement, car les réseaux de mise à terre sont toujours posés à l'état nu, ce qui permet d'admettre une répartition régulière du courant. Il serait toutefois souhaitable que, dans toute la mesure du possible, aucun échange de courant ne se produisît entre installations voisines.

4 Essais proches de la pratique avec divers matériaux de mise à terre

Afin d'examiner dans des conditions très proches de la pratique comment un matériau entrant en considération pour les réseaux de mise à terre se comporte, sous le rapport de la corrosion, on tentera d'enfourer des échantillons, quelques mètres de ruban, par exemple, de manière qu'après un certain temps leur état renseigne sur les effets des attaques en cas normal. Mais quand faut-il parler de cas normal et quand d'exception? Vu l'énorme diversité de structure de nos sols (grandeur et proportion des composants), la composition de la substance sèche et de l'électrolyte, le degré d'humidité et d'aération, les influences dues aux potentiels d'installations interconnectées et aux courants vagabonds, les tests en campagne ne peuvent être que le point de départ d'essais pratiques beaucoup plus étendus. Malgré cela, on

xis selber sein. Trotzdem wird man versuchen, sie so anzulegen, dass möglichst viele Faktoren mitbeteiligt sind. Man wird also nicht einen homogenen Sandboden aussuchen, sondern die Proben mit Vorteil in einem Moränenboden vergraben, denn in einem solchen sind gleichzeitig die Bedingungen für verschiedene Sand-, Kies- und Lehmböden vorhanden.

Bei der Auswertung der Versuche wird man auf den Allgemeinzustand wenig Gewicht legen, vielmehr wird man durch sehr eingehende Untersuchungen festzustellen versuchen, ob das Material unter gewissen Bedingungen Lochfrass oder interkristalline Korrosion erleidet. Sollte dies der Fall sein, so ist Vorsicht am Platz, obwohl auch in einem solchen Fall erst die Praxis die Unterlagen für eine definitive Verwertung liefern kann. Stellt man gleichmässige Korrosionsangriffe fest, so ist zu berücksichtigen, dass in andern, nicht untersuchten Bodentypen die Korrosionsrate unter Umständen wesentlich höher sein kann. Auch hier wird erst die praktische Anwendung im grossen erweisen, ob das Material genügend korrosionsfest ist. Nützliche Hinweise können Vergleiche mit Materialien ergeben, über die langjährige Erfahrungswerte vorliegen. Es sollten daher auch bewährte Materialien in die Versuche einbezogen werden. Um die Gefährdung mitverbundener Anlagen abschätzen zu können, wird man verschiedene Metalle verlegen und an zugänglichen Verbindungsstellen periodisch die notwendigen Messungen vornehmen, um abschätzen zu können, in welchem Ausmass und mit was für Folgen die verschiedenen Metalle einander beeinflussen. Dabei ist eine weitere Schwierigkeit zu beachten: Ein Stücklein Kupferdraht, das an einem Bleikabelmantel angelötet ist, wird das Kabel nicht gefährden, während ein ausgedehntes Erdnetz aus Kupferbändern für die mitverbundenen Kabel eine grosse Gefahr sein kann. Neben der Art der Metalle spielt bei Beeinflussungsfragen die Ausdehnung der Konstruktionen eine entscheidende Rolle. Dies äussert sich in der Grösse der Spannungsverschiebungen, von denen bereits gesagt wurde, dass sie ein brauchbares Kriterium für die Abschätzung der Korrosionsgefährdung darstellen. Ein Material, das negativer ist als ein anderes, wird stets vom positiven gefährdet – nie umgekehrt. Dabei bedeutet Material hier nicht nur ein bestimmtes Metall, sondern ein ganzes Halbelement Metall/Elektrolyt, denn das an sich harmlose Eisen im Boden wird zum Beispiel sehr suspekt in der Form von Armierungseisen im Beton.

5 Einige Ergebnisse praktischer Versuche

Im Areal EKZ¹-Einsiedeln und beim Unterwerk Sulgen EKTh² wurden Erdbänder und Erdungsdrähte aus verschiedenen Materialien vergraben, längere Zeit liegen gelassen, wieder ausgegraben und auf ihren Korrosionszustand untersucht. Es hätte wenig Sinn, alle Einzelheiten dieser Versuche aufzuzählen, denn bei der Vielzahl der mitspielenden Faktoren würde es trotzdem nicht gelingen, die für die einzelnen Feststellungen wesentlichen Parameter herauszuschälen. Es genügt zu erwähnen, dass bei beiden Stellen die Proben in heterogene Moränenböden verlegt wurden, dass durch Düngung mit einem Volldünger die Leitfähigkeit und Aggressivität vor allem der obersten Bodenschichten periodisch erhöht wurden und dass verschiedene Metallpaarungen die Wirkung der gegenseitigen Beeinflussung zu beobachten erlaubten. Die Anlage Einsiedeln bestand vom

¹ EKZ = Elektrizitätswerk des Kantons Zürich

² EKTh = Elektrizitätswerk des Kantons Thurgau

essayera de les concevoir de manière à y associer autant de facteurs que possible. On ne choisira donc pas un terrain sablonneux homogène, mais on enfouira de préférence les échantillons dans un terrain morainique réunissant les conditions propres aux sols sablonneux, limoneux et argileux.

Lors de l'analyse des essais, on attachera peu d'importance à l'état général des échantillons, mais on tentera de déterminer par un examen minutieux si le matériau a subi, dans des conditions données, une corrosion avec formation de cratères ou une corrosion interkristalline. Si tel est le cas, on se montrera prudent, bien que, là aussi, seule la pratique puisse fournir les données motivant un rejet définitif. Si la corrosion est régulière, il y a lieu de considérer que dans d'autres types de terrain non examinés le taux de corrosion pourrait être sensiblement plus élevé. En pareil cas aussi, seule la réalisation pratique à grande échelle pourra montrer si le matériau est suffisamment résistant à la corrosion. Des indications utiles peuvent être obtenues par comparaison avec des matériaux pour lesquels on possède des valeurs d'expérience depuis de longues années. Par conséquent, il y aura lieu de faire porter les essais sur des matériaux éprouvés. En vue de déterminer à quel point des installations interconnectées sont mises en danger, on enfouira divers métaux et on effectuera les mesures nécessaires aux points de jonction accessibles pour évaluer l'ampleur et les conséquences de l'interaction des divers métaux. A ce propos, il faudra faire face à une nouvelle difficulté. Un fil de cuivre de faible longueur soudé à la gaine de plomb d'un câble ne mettra pas ce dernier en danger, tandis qu'un réseau de mise à terre étendu, en ruban de cuivre, sera très dangereux pour le câble interconnecté. En plus du genre des métaux, l'étendue de la construction joue un rôle déterminant dans les problèmes d'influences. Cela se manifeste par l'importance des écarts de potentiel qui, comme nous l'avons déjà dit, sont un critère valable pour l'évaluation du danger de corrosion. Un matériau plus négatif qu'un autre sera toujours mis en danger par le matériau positif et jamais inversement. Le terme de matériau ne désigne pas seulement un métal déterminé, mais un semi-élément complet métal/électrolyte, car le fer enfoui dans le sol, inoffensif en soi, devient par exemple très suspect dès qu'il se présente sous forme des fers d'armatures du béton.

5 Quelques résultats d'essais pratiques

Dans l'enceinte de l'usine électrique d'Einsiedeln (EKZ)¹ et près de la sous-station de Sulgen (EKTh)², des rubans et des fils de mise à terre en divers matériaux ont été enfouis et laissés en place assez longtemps, puis déterrés et examinés quant à leur état de corrosion. Enumérer tous les détails de ces essais ne servirait pas à grand-chose, car, vu la multiplicité des facteurs entrant en jeu, il serait impossible d'isoler les paramètres essentiels rattachés à chacune des constatactions. Limitons-nous à dire qu'aux deux endroits les échantillons ont été enfouis dans des terrains morainiques hétérogènes, que la conductivité et l'agressivité des couches supérieures surtout ont été périodiquement augmentées par l'apport d'un engrais complet et que divers appariements de métaux ont permis d'observer l'effet des influences réciproques.

¹ EKZ = Elektrizitätswerk des Kantons Zürich – Services électriques du canton de Zurich

² EKTh = Elektrizitätswerk des Kantons Thurgau – Services électriques du canton de Thurgovie

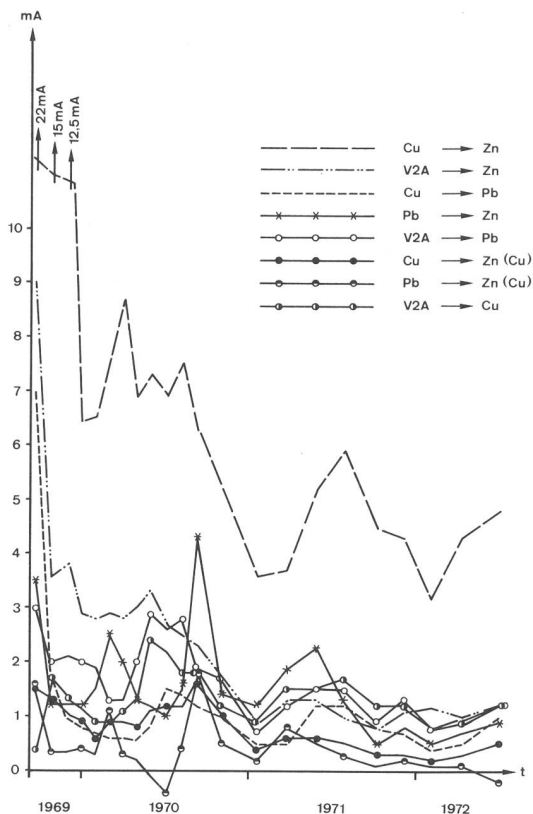


Fig. 1
Im Verlauf der Versuchsdauer gemessene Kurzschlussströme verschiedener Erdermaterialpaarungen – Courants de court-circuit pour différents appariements de matériaux de mise à terre mesurés au cours des essais

13. 1. 1965 bis zum 28. 9. 1966, jene in Sulgen vom 8. 7. 1968 bis zum 17. 7. 1972. Diese Versuche wurden von der Erdungskommission des SEV³ veranlasst. Das Korrosionslabor der Abteilung Forschung und Entwicklung PTT konnte vor allem an der Auswertung teilnehmen, was allen beteiligten Stellen nochmals bestens verdankt sei. Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass praxisnahe Versuche ihren Wert nicht in erster Linie in präzisen Zahlenwerten – etwa in Spannungsreihen und Stromtabellen – haben können, sondern in der Möglichkeit grundsätzlicher Feststellungen. Dazu gehören bezüglich Eigenkorrosion allfällige Tendenzen zur interkristallinen Korrosion und zum Lochfrass. Ferner, aber schon nur beschränkt aussagefähig, Beobachtungen bezüglich starker, gleichmässiger Abtragung. Bei der Fremdkorrosion steht die Frage im Vordergrund: Welches Metall beeinflusst welches ungünstig? Wünschenswert wären auch Hinweise über die Stärke dieser Beeinflussung.

Bezüglich der Eigenkorrosion haben die geprüften Materialien folgendes Verhalten gezeigt:

Blei neigt zur interkristallinen Korrosion. Dies hat sich besonders stark bei mit Blei umpressten Kupferdrähten ausgewirkt. Die dünnen Bleimäntel wurden durch die interkristallinen Korrosionen sehr rasch perforiert. Da das Blei mit dem Kupfer nicht verbunden war, konnte sich durch die Spalten eingedrungene Feuchtigkeit im Spaltraum zwischen dem Bleimantel und der Kupferader ausbreiten. Durch die Elementbildung Blei-Feuchtigkeit-Kupfer wurde in der Folge der Bleimantel von innen nach aussen weiter abgebaut. Das Kupfer blieb unversehrt. Wäre der Bleimantel durch eine metallische Zwischenschicht mit dem Kupfer verbunden gewesen, so wäre natürlich keine Innenelektrolyse entstanden.

L'installation d'Einsiedeln a été laissée en place du 13 janvier 1965 au 28 septembre 1966 et celle de Sulgen du 8 juillet 1968 au 17 juillet 1972. Ces essais ont été organisés par la commission des mises à terre de l'ASE³. Le laboratoire des corrosions de la Division des recherches et du développement des PTT a pu prendre part à l'analyse des résultats et nous tenons une fois de plus à remercier tous les services qui nous ont permis de participer aux recherches. Nous avons déjà attiré l'attention sur le fait que les essais proches de la pratique ne se révélaient pas en premier lieu précieux par l'obtention de chiffres précis – par exemple des séries de potentiels et des tableaux de courants – mais par la possibilité de faire des constatations fondamentales. En font partie, au point de vue de la corrosion intrinsèque, d'éventuelles tendances à la corrosion intercrystalline et à la corrosion avec formation de cratères. D'autres renseignements, d'une signification plus limitée pourtant, découlent de l'observation de transferts électrolytiques de matière importants et réguliers. Dans la corrosion extrinsèque, la question primaire est la suivante: Quel métal influence quel autre de manière défavorable? Des indications concernant l'importance de cette influence seraient aussi souhaitables.

En ce qui concerne la corrosion intrinsèque, les matériaux soumis aux essais se sont comportés de la façon suivante:

Le plomb tend à la corrosion intercrystalline; cela s'est manifesté d'une manière particulièrement marquée pour des fils de cuivre enrobés sous pression d'une couche le plomb. Cette mince gaine de plomb fut très rapidement perforée par la corrosion intercrystalline. Le plomb n'étant pas allié avec le cuivre, de l'humidité put s'introduire par les fissures dans l'interstice existant entre la gaine de plomb et le conducteur de cuivre. La combinaison plomb-humidité-cuivre constituant un élément, la gaine de plomb fut progressivement détruite de l'intérieur vers l'extérieur. Le cuivre resta tel quel. Eût-on relié la gaine de plomb au cuivre par une couche interstitielle métallique, l'électrolyse interne ne se serait naturellement pas produite.

Dans les rubans en acier inoxydable (V2A), une corrosion avec formation de cratères a été constatée. Aux points où les rubans sortaient du sol, soit aux points de transition sol-air, les corrosions étaient particulièrement prononcées. Vu l'apport périodique d'engrais, les conditions d'agressivité à ces endroits étaient spécialement accentuées. Des corrosions isolées avec formation de cratères ont néanmoins aussi été découverts sur des rubans qui avaient été entièrement enfouis. Pour le cuivre on constata également une destruction considérable du matériau par corrosion au point de transition sol-air. En revanche, le cuivre entièrement enfoui dans le sol ne fut pratiquement pas corrodé. Pour le fer et le zinc, une évacuation plus ou moins régulière eut lieu.

Des constatations intéressantes purent être faites au sujet des influences réciproques des divers métaux. Quelques mètres de rubans et de fils, par exemple 4 m de fil de cuivre (8 mm \varnothing) et 6 m de ruban d'acier inoxydable V2A (30 mm \times 3 mm) ont été reliés. La figure 1 montre l'allure en fonction du temps des courants de court-circuit pour les différents appariements. On remarque l'effet néfaste du cuivre connu de longue date, la diminution rapide de l'intensité du courant après le début de l'essai étant due à des phénomènes de polarisation dépendant non seulement du matériel mais encore de la dimension des anodes (anode = métal cédant du courant à l'électrolyte) et de celle des cathodes

³ SEV = Schweizerischer Elektrotechnischer Verein

³ Association suisse des électriciens

Lochfrass wurde bei den Bändern aus rostfreiem Stahl (V2A) festgestellt. Dort, wo die Bänder aus dem Boden herausgeführt waren, also an den Übergangsstellen Boden/Luft, waren die Angriffe besonders stark. Wegen der periodischen Düngung herrschten an diesen Stellen besonders aggressive Verhältnisse.

Vereinzelte Lochfrass wurde aber auch auf den Stücken festgestellt, die normal vergraben waren.

Beim Kupfer wurde beim Austritt aus dem Boden ebenfalls beträchtlich Material wegkorrodiert. Im Boden blieb das Kupfer dagegen praktisch unkorrodiert.

Eisen und Zink wurden mehr oder weniger gleichmässig abgetragen.

Interessante Beobachtungen konnten bezüglich der gegenseitigen Beeinflussung verschiedener Metalle gemacht werden.

Es wurden je einige Meter Band oder Draht miteinander gekoppelt, zum Beispiel 4 m Cu-Draht (8 mm \varnothing) mit 6 m V2A-Band (30 mm \times 3 mm). Die *Figur 1* zeigt den zeitlichen Verlauf der Kurzschlussströme bei den verschiedenen Paarungen. Man erkennt die schon lange bekannte ungünstige Wirkung des Kupfers, wobei die rasche Abnahme der Stromstärke nach Versuchsbeginn auf Polarisierungseffekte zurückzuführen ist, die ausser vom Material auch von der Grösse der beteiligten Anoden (Anode = Metall mit Stromabgabe in den Elektrolyten) und Kathoden (Kathode = Metall mit Stromaufnahme aus dem Elektrolyten) abhängen.

Noch schlimmer als Kupfer ist hinsichtlich der anodischen Belastung V2A. Durch dieses Material wird selbst Kupfer ungünstig beeinflusst.

Interessant ist das Verhalten von verzinktem Kupfer (vgl. Techn. Mitt. PTT 52 (1974) Nr. 10 u. 11 S. 361...408).

Es wurde bereits gesagt, dass ein ideales Erdermaterial keine Eigenkorrosion und Beeinflussung zeigen sollte. Feuerverzinktes Kupfer kommt diesem Ideal recht nahe. Wird nämlich dieses Material mit einem andern Metall verbunden, so stellt sich nach einiger Zeit bezüglich der Beeinflussung ein Neutralzustand ein. Nehmen wir zum Beispiel den Fall, dass verzinktes Kupfer mit Bleikabeln verbunden ist. Am Anfang wird die äusserste Schicht der Verzinkung mit dem Boden in Kontakt sein. Daraus resultiert eine stark negative Spannung, und es wird ein Kurzschlussstrom vom Blei in das verzinkte Kupfer fliessen. Das Zink beginnt also gleichmässig zu korrodieren. Dadurch werden tieferliegende Schichten der Verzinkung freigelegt, die wegen ihres Kupfergehaltes positivere Spannungen annehmen. Die Folge ist eine Abnahme der Stromstärke, bis schliesslich eine Zwischenschicht innerhalb der Verzinkung freigelegt ist, die dasselbe Potential hat wie die Bleimäntel. Damit ist ein neutraler Zustand erreicht.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die Feldversuche die interkristalline Korrosionsanfälligkeit des Bleis bestätigt wurde. V2A zeigt eine gewisse Neigung zum Lochfrass und ungünstige Beeinflussungseigenschaften gegenüber Nachbarkonstruktionen. Diese wurden auch beim Kupfer bestätigt. Will man bei diesem bewährten Erdermaterial bleiben, so kann durch Verzinken die Korrosionsgefährdung mitverbundener Konstruktionen aus Eisen oder Blei ausgeschaltet werden. Verzinktes und blankes Eisen muss mit einem genügenden Querschnitt verwendet werden, damit die erforderliche Leitfähigkeit trotz gleichmässiger Korrosion erhalten bleibt.

(cathode = métal soutirant du courant à l'électrolyte) choisies. En ce qui concerne la charge anodique, l'acier inoxydable V2A est encore plus défavorable. Même le cuivre est influencé de façon néfaste.

Le cuivre zingué, notamment, se comporte aussi de manière intéressante (voir Bulletin technique PTT 52 (1974) nos 10 et 11, p. 361...408). Comme nous l'avons déjà dit, un matériau de mise à terre idéal ne devrait présenter ni corrosion intrinsèque ni influencer d'autres installations. Le cuivre zingué se rapproche considérablement de cet idéal.

En effet, lorsque ce matériau est relié à un autre métal, un état neutre s'établit après un certain temps sous le rapport des influences. Admettons par exemple que du cuivre zingué soit relié à des câbles à gaine de plomb. Au début, la couche extérieure du zingage sera en contact avec le sol. Il en résultera une tension très négative, si bien qu'un courant de court-circuit s'établira entre le plomb et le cuivre zingué. Le zinc commencera donc à se corroder régulièrement et des couches plus profondes du zingage seront dégagées, qui, vu leur teneur en cuivre, adopteront des tensions plus positives. Il s'ensuivra une diminution du courant, jusqu'à ce que soit finalement dégagée la couche intermédiaire du zingage ayant le même potentiel que la gaine de plomb: l'état neutre sera atteint.

Concluons en disant que les essais en campagne ont permis de confirmer la tendance à la corrosion interkristalline du plomb. L'acier inoxydable V2A a une certaine propension à la corrosion avec formation de cratères et il influence défavorablement les installations connexes. Il a été confirmé que le cuivre présente les mêmes caractéristiques. Si l'on veut continuer à utiliser ce matériau éprouvé, le zingage permet d'éliminer le danger de corrosion des constructions en fer ou en plomb reliées au réseau de mise à terre. En utilisant du fer zingué ou nu, il faudra veiller à ce que la section des conducteurs soit suffisante pour assurer la conductivité nécessaire malgré une corrosion régulière.