

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: 51 (1973)

Heft: 11

Artikel: Betoneisen, eine immer häufigere Korrosionsursache : Les fers d'armatures du béton armé, une cause de corrosion toujours plus fréquente

Autor: Vögtli, Kurt

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875315>

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: 30.04.2026

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

Betoneisen, eine immer häufigere Korrosionsursache

Les fers d'armatures du béton armé, une cause de corrosion toujours plus fréquente

Kurt VÖGTLI, Bern

620.193.7:620.197.5:693.554.001.5

Zusammenfassung. Es wird gezeigt, unter welchen Bedingungen und weshalb Betoneisen ausgedehnter Armierungen für andere erdverlegte Metallkonstruktionen zu einer Korrosionsgefahr werden.

Résumé. L'auteur montre dans quelles conditions et pourquoi les fers d'armature des constructions en béton armé importantes peuvent représenter un danger de corrosion pour les autres constructions métalliques enfouies dans le sol.

Tondini per cemento armato, sempre più spesso fonti di corrosioni

Riassunto. L'autore spiega le circostanze e le ragioni per cui tondini per cemento armato di importanti armamenti creano un pericolo di corrosione per altre costruzioni di metallo collegate a terra.

1. Betoneisen und Batterien

Nicht jede Batterie hat dieselbe Spannung. Dies gilt nicht nur für Batterien, die aus mehreren Zellen zusammengesetzt sind, sondern auch für eine Einzelzelle. So besitzt zum Beispiel ein Bleiakкумуляtor eine Zellenspannung von rund 2 V, eine Monozelle vom Leclanché-Typ dagegen von nur 1,5 V.

Jedermann weiss auch um den Einfluss des Elektrolyten. So kann der Ladungszustand eines Bleiakкумуляtors durch eine Dichtebestimmung der Akkusäure geprüft werden. Diese Methode wird sogar einer Messung der Klemmenspannung vorgezogen, obwohl auch diese von der Dichte der Schwefelsäure abhängt. Einen weit grösseren Einfluss als Konzentrationsunterschiede haben allerdings Unterschiede in der Elektrolytzusammensetzung auf die Spannung. So passiert zum Beispiel kaum etwas, wenn bei einer Autobatterie der Elektrolyt infolge Wasserverdunstung etwas konzentriert wird. Dagegen sind die Folgen verheerend, wenn statt Schwefelsäure in einen Bleiakкумуляtor Salzsäure eingefüllt wird.

Muss eine Batterie nur einen kleinen Strom liefern, so genügt ein kleiner Typ. Mit zunehmender Belastbarkeit werden die Batterien immer grösser. Speichervermögen je Kilogramm Batteriegewicht, innerer Widerstand und Polarisierbarkeit der Elektroden sind Grössen, die bei der Beurteilung des Leistungsvermögens besonders wichtig sind.

Die Erfahrungen des täglichen Umgangs mit Batterien sollen nun auf das Phänomen der Betoneisenkorrosion übertragen werden, indem das Korrosionselement – Eisen in Kontakt mit Beton, Eisen in Kontakt mit neutraler Bodenfeuchtigkeit – als Batterie aufgefasst wird.

Um die Verhältnisse möglichst einfach zu machen, soll nur Eisen im Spiel sein, also zum Beispiel ein Gasrohr, das bei einer Hauseinführung die Betonarmierung berührt. An dieser Stelle soll zwischen dem mit neutraler Bodenfeuchtigkeit umgebenen Stahlrohr und den im Beton eingebetteten Armierungseisen ein metallischer Kontakt bestehen. Metallischer Kontakt bedeutet durchgehende metallische Stromleitung. Bewegliche Elektronen sind also beidseits dieser Kontaktstelle die Elemente der elektrischen Stromleitung.

Bei der Batterie werden die Spannungen in den Grenzschichten Metall/Elektrolyt erzeugt. Es ist deshalb belang-

1. Fers d'armature et batteries

Toutes les batteries n'ont pas la même tension. Cette remarque est valable, tant pour les batteries composées de plusieurs cellules que pour les mono-éléments. Ainsi, par exemple, la tension par élément d'un accumulateur au plomb est de l'ordre de 2 V, alors que celle d'un élément Leclanché n'est que de 1,5 V seulement.

Chacun connaît également le rôle joué par l'électrolyte. L'état de charge d'un accumulateur au plomb peut être vérifié par une mesure de la densité de l'électrolyte. Cette méthode est du reste préférée à la mesure de la tension aux bornes, bien que celle-ci dépende de la densité de l'acide sulfurique. La composition de l'électrolyte a, sans contredit, une influence beaucoup plus importante sur la tension que les différences de densité. Une augmentation de densité par suite d'évaporation d'eau n'a pas de conséquences graves. Par contre, le fait de remplir un accumulateur au plomb avec de l'acide chlorhydrique plutôt qu'avec de l'acide sulfurique conduit à la destruction de la batterie.

Le volume d'une batterie augmente avec sa capacité et l'importance du courant à fournir. La capacité d'accumulation par kilogramme de batterie, la résistance interne et les conditions de polarisation des électrodes sont des grandeurs particulièrement importantes, lorsqu'il s'agit de déterminer la puissance disponible.

Appliquons les expériences faites avec les batteries utilisées dans la vie courante au phénomène de la corrosion par les fers d'armatures, en ce sens que l'élément de corrosion – le fer en contact avec le béton et le fer en contact avec l'humidité neutre du sol – est considéré comme une batterie.

Pour simplifier autant que possible l'exposé, envisageons la seule influence du fer. Considérons par exemple le cas d'une conduite de gaz en fer, qui, au point d'introduction dans un bâtiment, entre en contact avec l'armature de la construction en béton armé. Un contact métallique se produit donc entre le fer enrobé de béton et le tuyau de gaz plongé dans l'humidité du sol, créant ainsi une possibilité de passage pour un courant électrique. Les électrons libres présents des deux côtés du point de contact entrent en jeu dans l'établissement de ce courant.

Dans les batteries, les tensions sont engendrées dans les couches limites métal/électrolyte. Il est donc sans impor-

los, ob in einem Bleiakкумуляtor die Platten sehr nahe beieinanderliegen oder durch grössere Zwischenräume voneinander getrennt sind.

Da in unserem Fall als Elektrodenmaterial ausschliesslich Eisen angenommen wurde, müssen allfällige Spannungsdifferenzen durch Unterschiede in den Kontaktzonen Eisen/Elektrolyt verursacht werden. Da angenommen werden darf, dass die Qualität der Armierungseisen nur unwesentlich von jener der Stahlrohre abweicht, bleiben als einzige Ursache einer Spannungsbildung die Unterschiede in der Elektrolytzusammensetzung. Tatsächlich wirken die Betoneisen nur deshalb als Batterie, weil sie im Beton mit einem stark alkalischen Elektrolyten in Kontakt sind, während die Gasleitung ausserhalb des Gebäudes im Boden liegt und damit von nahezu neutral reagierender Bodenfeuchtigkeit umgeben ist.

Treibt man einen Eisenstab in den Boden und versenkt daneben einen gleichen Stab, der vorgängig mit einer einige Zentimeter dicken Betonschicht umgeben wurde, so kann man zwischen den beiden Stäben eine Spannung von einigen 100 mV messen, wobei das mit Beton umgebene Eisen stets den positiven Pol darstellt. Wie entstehen nun derartige Spannungen, deren Bildungsort, wie eben erwähnt, in den Grenzschichten Metall/Elektrolyt zu suchen ist?

2. Was sind Normalpotentiale?

Die Theorie von *Nernst* veranschaulicht die Potentialbildung durch folgenden Mechanismus: In einem Metall sind die Atome in einem wohldefinierten Gitterverband vorhanden. Sie sind fest an ihre Plätze gebunden. Anders an der Grenzfläche Metall/Elektrolyt. Hier herrschen dynamische Verhältnisse, indem Atome aus dem Gitterverband aus- und in den Elektrolyten eintreten und andere Atome aus dem Elektrolyten in das feste Gitter hinüberwechseln. Gleichgewicht herrscht dann, wenn Auflösung und Abscheidung einander die Waage halten.

Wenn ein Metallatom aus dem Gitterverband austritt, so tut es dies nicht als neutrales Atom, sondern unter Zurücklassung von Elektronen als positiv geladenes Ion. Dadurch wird das Metall negativ, der Elektrolyt positiv aufgeladen. Umgekehrt kann ein positives Ion aus dem Elektrolyten direkt in das Metallgitter eingebaut werden. Nehmen wir einmal an, eine gewisse Zahl Metallatome sei als Ionen in den Elektrolyten übergetreten. Da die Ionen im Elektrolyten beweglich sind, werden sie unter dem Einfluss des elektrischen Feldes zwischen der negativen Metallelektrode und dem positiven Elektrolyten in die Nähe der Oberfläche der Metallelektrode wandern. An der Grenzfläche Metall/Elektrolyt entsteht dann eine Doppelschicht von Ladungsträgern. Warum entladen sich nun aber die gegensinnig geladenen

tance, dans un accumulateur au plomb, que les plaques soient placées très près les unes des autres, ou, au contraire, séparées par de grands espaces.

Vu que dans notre cas, nous avons admis que le matériel composant les électrodes était uniquement du fer, les différences de potentiel éventuelles doivent être provoquées par des différences dans les zones de contact fer/électrolyte. Etant donné que l'on peut admettre que la qualité des fers d'armature ne diffère que très peu de celle des tuyaux, les causes d'apparition de tensions doivent être recherchées dans les compositions différentes de l'électrolyte. En réalité, le fer d'armature et le tuyau de gaz ne peuvent former un élément que parce que l'un, dans le béton, est en contact avec un électrolyte fortement alcalin, et l'autre, reposant dans le sol, est plongé dans un milieu humide, pratiquement neutre.

Si l'on enfonce une tige de fer dans le sol et que, tout à côté, on y introduit une même tige enrobée préalablement d'une couche de quelques centimètres de béton, on peut mesurer, entre les deux tiges, une différence de potentiel de quelques centaines de millivolts, la tige de fer enrobée de béton constituant le pôle positif de l'élément. Comment apparaissent de telles tensions, dont il faut rechercher la naissance dans les couches limites métal/électrolyte?

2. Que faut-il comprendre par potentiels normaux?

La théorie de *Nernst* explique la formation des différences de potentiel par le mécanisme suivant: A l'intérieur d'un métal, les atomes sont groupés selon une structure de réseau bien définie. Leur position relative est fixe. Il n'en est pas de même dans la couche limite métal/électrolyte. Cette zone est le siège de phénomènes dynamiques. Des atomes métalliques quittent le réseau structuré alors que des atomes d'électrolyte pénètrent dans le métal. L'équilibre est atteint lorsque la vitesse de solution est égale à la vitesse de transformation inverse.

Lorsqu'un atome métallique quitte le réseau structuré, il le fait en perdant un ou plusieurs électrons et il passe sous forme de ion positif (cation) dans l'électrolyte. Le métal est alors polarisé négativement et l'électrolyte positivement. Inversement, un ion positif de l'électrolyte peut s'insérer directement dans le réseau métallique. Admettons qu'un certain nombre d'atomes métalliques aient passé, sous forme de ions, dans l'électrolyte. Les ions dans l'électrolyte étant mobiles, ils vont se déplacer, sous l'effet du champ électrique régnant entre l'électrode métallique négative et l'électrolyte positif, à proximité de l'électrode métallique. Une double couche de porteurs de charges se crée ainsi à la surface limite métal/électrolyte. Mais pourquoi les particules porteuses de charges de signes contraires ne se déchargent-elles pas instantanément? *Nernst* en indique

Teilchen nicht momentan? Nernst nennt als Grund den sogenannten Lösungsdruck: Man muss sich vorstellen, dass die positiven Metallionen aktiv bestrebt sind, aus dem Gitterverband auszutreten. Erst die zurücktreibende Kraft des entstehenden Feldes erlaubt die Bildung eines Gleichgewichtszustandes.

Wir wollen gleich zwei Konsequenzen dieser Vorstellung festhalten. Offenbar lädt sich eine Metallelektrode desto stärker negativ auf, je grösser der Lösungsdruck des betreffenden Metalls ist. Und es wird sich kein Gleichgewichtszustand bilden und deshalb immerzu weiteres Material auflösen, wenn durch Ableiten der Ladungen der Aufbau des elektrischen Gleichgewichtsfeldes verhindert wird.

Die Nernstsche Theorie vermag die Ausbildung der Normalpotentiale anschaulich zu erklären, während sie zur Deutung der heterogenen Elektrodenprozesse weniger geeignet ist.

Eine Metallelektrode hat definitionsgemäss dann ein Normalpotential, wenn sie in eine Lösung eintaucht, die bezüglich der an der Potentialbildung beteiligten Ionen gerade einnormal ist. Im ersten Augenblick, da die Metallelektrode in den Elektrolyten eingetaucht wird, steht also dem Lösungsdruck des Metalls ein der einnormalen Lösung entsprechender Abscheidungsdruck gegenüber. Das Bestreben in Lösung zu gehen, ist nun aber bei den verschiedenen Metallen stark unterschiedlich. Der Lösungsdruck ist um so kleiner, je edler ein Metall ist, das heisst je leichter es reduziert und je schwieriger es oxydiert werden kann. Dabei wollen wir unter Oxydation ganz allgemein die Abgabe, unter Reduktion die Aufnahme von Elektronen verstehen.

Taucht eine Elektrode aus einem edlen Metall (zum Beispiel Silber) in eine einnormale Lösung eines ihrer löslichen Salze, so ist der Lösungsdruck der Metallatome kleiner als die Abscheidungstendenz der Metallionen im Elektrolyten. Es werden deshalb zunächst mehr Ionen aus dem Elektrolyten in das Metallgitter eingebaut, als von diesem in die Lösung übertreten. Dadurch wird die Elektrode positiv aufgeladen. Das entstehende elektrische Feld verhindert dann schliesslich eine weitere Ionenabscheidung.

Verdünnt man die Elektrolytlösung, so nimmt der Abscheidungsdruck ab, und das Gleichgewicht wird schon bei einem weniger positiven Elektrodenpotential erreicht. Elektroden mit negativen Normalpotentialen nehmen bei weiterer Verdünnung des Elektrolyten noch negativere Potentiale an. Dieses Verhalten der Elektroden kommt formelmässig in der Nernstschen Gleichung im zweiten Glied zum Ausdruck

$$E = E_0 - \frac{0,059}{n} \log (M^{n+}) \quad (V)$$

Eine Konzentrationsänderung um einen Faktor 10 hat also höchstens ($n=1$) eine Potentialverschiebung von 59 mV zur

la cause dans la tendance à la formation de cations. Il y a lieu de se représenter que les ions métalliques positifs tendent activement à quitter le réseau structuré. Seule la force répulsive du champ électrique engendré permet d'atteindre un état d'équilibre.

Retenons deux conséquences de cette conception. Il est évident que la polarisation d'une électrode métallique sera d'autant plus forte que la tendance à la formation de cations du métal considéré sera importante. Un état d'équilibre ne pourra pas s'établir, et il y aura transfert de matériel, tant que l'établissement du champ électrique d'équilibre sera contrecarré par l'écoulement des charges.

Si la théorie de Nernst permet d'expliquer la formation des potentiels normaux, elle convient moins bien à la mise en lumière du comportement hétérogène des différentes électrodes.

Une électrode métallique a, par définition, un potentiel normal lorsqu'elle est plongée dans une solution qui, sous le rapport des ions entrant dans la formation du potentiel, est une solution normale. A la tendance de formation de cations correspond, au début, lorsque l'électrode métallique est plongée dans l'électrolyte, une tendance des cations de l'électrolyte à s'incorporer dans le réseau atomique de l'électrode métallique (transformation inverse), en fonction des caractéristiques de la solution normale. La tendance à la formation de cations varie fortement selon le métal considéré. Elle est d'autant plus faible que le métal est plus noble, c'est-à-dire qu'il pourra être plus facilement réduit et plus difficilement oxydé. D'une façon tout à fait générale, il faut comprendre par oxydation la perte, et par réduction le gain d'électrons.

Lorsqu'une électrode en métal noble (par exemple en argent) plonge dans une solution normale de l'un de ses sels solubles, la tendance à la formation de cations métalliques est plus faible que le phénomène de transformation inverse des ions métalliques dans l'électrolyte. C'est pourquoi le nombre des ions qui passent de l'électrolyte dans le réseau métallique est tout d'abord supérieur à celui des ions qui passent dans la solution. Ils s'ensuit que l'électrode se charge positivement. Le champ électrique qui se forme alors empêche finalement un transfert plus important de ions.

Si l'on dilue la solution d'électrolyte, la tendance à la fixations d'ions à la surface du métal diminue et l'équilibre est déjà atteint pour un potentiel d'électrode moins positif. Les électrodes dont le potentiel normal est négatif deviennent encore plus négatives avec la dilution de l'électrolyte. Ce phénomène est explicité dans le second membre de la formule de Nernst

$$E = E_0 - \frac{0,059}{n} \log (M^{n+}) \quad (V)$$

Folge. In erster Linie sind also die Potentialdifferenzen durch die Unterschiede im Lösungsdruck der verschiedenen Metalle gegeben. Aber was bedeuten eigentlich die Normalpotentialwerte, wie sie für einige Metalle in der *Tabelle I* aufgeführt sind?

Tabelle I. Normalpotentiale einiger Metalle im Vergleich zur Wasserstoffnormalelektrode

Metall	Ion	Normalpotential (V)
Silber	Ag ⁺	+ 0,81
Kupfer	Cu ⁺⁺	+ 0,32
Wasserstoff (Platin)	H ⁺	0
Blei	Pb ⁺⁺	— 0,13
Eisen	Fe ⁺⁺	— 0,44
Zink	Zn ⁺⁺	— 0,76
Magnesium	Mg ⁺⁺	— 2,4

Sind dies die Spannungen, die zwischen Metallelektrode und Elektrolyt auftreten?

Ursprünglich wollte man tatsächlich mit den Normalpotentialen für einen ganz bestimmten Zellenzustand die Potentialdifferenzen zwischen Metall und Elektrolyt angeben. Die Messung derartiger Potentialdifferenzen bietet indessen grosse Schwierigkeiten. Man kann nicht einfach ein Millivoltmeter nehmen, die eine Klemme mit der Metallelektrode verbinden und die andere in den Elektrolyten eintauchen, weil an der Grenzfläche Elektrolyt/Klemme sofort eine neue Potentialdifferenz entsteht, deren Grösse ebenso unbekannt ist, wie die zu messende Spannung.

Hätte man eine Anordnung, bei der Lösungsdruck und Abscheidungstendenz gerade so wären, dass weder Metallatome im Überschuss aus dem Gitterverband der Metallelektrode in den Elektrolyten wandern, noch aus diesem im Überschuss Metallionen zum Einbau ins Gitter gelangten, und dies vom ersten Augenblick der Kontaktbildung Metall/Elektrolyt an, so würde zwischen der Metallelektrode und dem Elektrolyten dauernd keine Spannung vorhanden sein. Man hätte dann ein stabiles Nullsystem, auf das man alle Messungen beziehen könnte. Man hätte eine Metallelektrode, um die zweite Klemme des Millivoltmeters anzuschliessen, und man wüsste gleichzeitig, dass zwischen dieser Elektrode und dem Elektrolyten keine Potentialdifferenz besteht. Das Voltmeter würde damit einzig die gesuchte Potentialdifferenz anzeigen.

Man hat viel Mühe und Scharfsinn auf die Lösung dieser Aufgabe verwendet. Aber schliesslich musste man doch resignieren, weil es einfach nicht gelang, ein derartiges Nullsystem mit genügender Genauigkeit herzustellen. Man hat dann die sogenannte Normalwasserstoffelektrode als Vergleichselektrode gewählt und ihr das Potential 0 zugeschrieben, obwohl man mit aller Bestimmtheit weiss, dass bei diesem System die mit Wasserstoff bespülte Platin-

Une modification de la concentration d'un facteur 10 a donc pour conséquence un déplacement de potentiel de 59 mV au maximum (n = 1). Les différences de potentiel sont définies en premier lieu par les écarts de tendance à la formation de cations des différents métaux. Mais que signifient en réalité les valeurs de potentiel normal, telles qu'elles sont indiquées dans le *tableau I* pour quelques métaux?

Tableau I. Potentiels normaux de quelques métaux comparés à celui de l'électrode normale à hydrogène

Métal	Ion	Potentiel normal (V)
Argent	Ag ⁺⁺	+ 0,81
Cuivre	Cu ⁺⁺	+ 0,32
Hydrogène (Platine)	H ⁺	0
Plomb	Pb ⁺⁺	— 0,13
Fer	Fe ⁺⁺	— 0,44
Zinc	Zn ⁺⁺	— 0,76
Magnésium	Mg ⁺⁺	— 2,4

Ces tensions apparaissent-elles entre l'électrode métallique et l'électrolyte?

A l'origine, on voulait faire correspondre la valeur des potentiels normaux à la différence de potentiel entre le métal et l'électrolyte. La mesure de telles différences de potentiel présente cependant de grandes difficultés. Il ne suffit pas de prendre un millivoltmètre et d'en raccorder l'une des bornes à l'électrode métallique et l'autre à l'électrolyte. En effet, une nouvelle différence de potentiel apparaît à la surface électrolyte/jonction à la borne de l'appareil, aussi inconnue que celle de la tension à mesurer.

Si l'on disposait d'un système dans lequel aucun atome métallique en excès ne passe du réseau structuré de l'électrode métallique dans l'électrolyte, et aucun ion métallique en excès dans l'électrolyte ne vienne se fixer sur l'électrode, et que cet état soit établi au premier moment du contact électrode/électrolyte, aucune tension n'apparaîtrait entre l'électrode métallique et l'électrolyte. On aurait ainsi un système de référence stable sur lequel pourraient se baser toutes les mesures. On aurait une électrode métallique permettant de raccorder la seconde borne du millivoltmètre, tout en sachant qu'entre cette électrode et l'électrolyte aucune différence de potentiel n'est engendrée. L'appareil de mesure indiquerait alors uniquement la différence de potentiel recherchée.

Ni les efforts, ni la perspicacité n'ont été ménagés pour trouver une solution à ce problème. En définitive il fallut se résigner à l'abandon, dans l'impossibilité de construire un

elektrode und die saure Lösung, in die sie eintaucht, nicht dasselbe Potential aufweisen. Man kennt den Wert der Spannung aber nicht genau, man weiss nur, dass sie mit sehr guter Konstanz hergestellt werden kann. Man kann also sagen, dass alle Normalpotentiale, die auf die Wasserstoffelektrode bezogen sind, um einen gewissen Betrag falsch sind, falls man in den Normalpotentialen die Spannungen zwischen Metall und Elektrolyt verstehen will. Bei sorgfältigen Messungen wird zudem der Fehler stets genau gleich gross sein, so dass Differenzen bei Normalpotentialen unterschiedlicher Metalle genau erfasst werden. Weil die Absolutwerte der Normalpotentiale keine grosse Bedeutung haben, hat sich die getroffene Regelung bestens bewährt. Man kann sich höchstens fragen, warum man nicht eine einfacher zu handhabende Vergleichselektrode gewählt hat. Dafür kann man zunächst historische Gründe anführen. Bei den Versuchen, ein absolutes Nullsystem herzustellen, spielten Wasserstoffelektroden stets eine besondere Rolle. Zudem bekommt mit der Wahl der Wasserstoffnormalelektrode als Vergleichselektrode der Vorzeichenwechsel der Normalpotentiale eine besondere Bedeutung, indem negative Normalpotentiale eine Metallauflösung unter Wasserstoffbildung zulassen, positive dagegen nicht.

Die Wasserstoffelektrode ist ein Beispiel einer sogenannten Gaselektrode. Daneben können auch Oxyde oder Salze als Festelektroden wirken, der Mechanismus der Spannungsbildung bleibt derselbe. Ein adsorbiertes Gas verhält sich wie ein Atomgitter und ebenso eine dünne Deckschicht auf einem Metall. Von ihnen gehen Ionen in Lösung – manchmal auch negativ geladene – und werden aus der Lösung in den festen Verband aufgenommen.

3. Normalpotentiale und Korrosionen

In der Korrosionspraxis kann nur selten mit Normalpotentialen gearbeitet werden. Diese liefern zwar nützliche Hinweise, positive Werte bedeuten im allgemeinen gute, negative schlechte Korrosionseigenschaften. Es gibt aber so viele und wichtige Ausnahmen, dass aus den Normalpotentialen keine quantitativen Schlüsse gezogen werden können. Zudem sind die praktisch auftretenden Korrosionsbedingungen fast immer sehr verschieden von denjenigen, die bei Normalpotentialmessungen anzuwenden sind. Normalpotentiale setzen nämlich, wie wir bereits gesehen haben, ganz definierte Verhältnisse innerhalb der Kontaktzone Metall/Elektrolyt voraus. Das Silbernormalpotential wird sich zum Beispiel nur dann einstellen, wenn eine blanke Silberfläche in eine einnormale Silberionenlösung eintaucht. In der Korrosionspraxis sind dagegen die Verhältnisse, welche die Potentialbildung beeinflussen, alles andere als gut definiert. Um dies zu zeigen, wollen wir wieder zu unserem Betoneisenelement zurückkehren.

dispositif de référence suffisamment précis. Le choix fut porté sur l'électrode normale à hydrogène à laquelle on attribua le potentiel 0, bien que sachant avec certitude que ce système d'électrode en platine irriguée d'hydrogène, et de solution acide dans laquelle elle plonge, présente une différence de potentiel toute autre. On ne connaît pas la valeur de cette tension avec précision. On sait seulement qu'elle peut être reproduite avec une très bonne constance. Il est donc possible de prétendre que toutes les mesures de potentiels normaux par rapport à une électrode normale à l'hydrogène sont entachées d'une certaine erreur, si l'on comprend par potentiels normaux la tension apparaissant entre le métal et l'électrolyte. Pour autant que les mesures soient faites avec soin, l'erreur sera cependant toujours la même, si bien qu'il est possible de déterminer les différences de potentiels normaux pour les métaux les plus divers. Les valeurs absolues des potentiels normaux n'ayant pas grande signification, la méthode introduite a bien fait ses preuves. On peut tout au plus se demander pourquoi il n'a pas été fait appel à une électrode de référence plus simple à utiliser. Les raisons en sont tout d'abord historiques. Lors des recherches ayant trait à l'établissement d'un système de référence, les électrodes à hydrogène ont joué un rôle particulier. De plus, avec le choix de l'électrode normale à l'hydrogène en tant qu'électrode de référence, le signe des potentiels normaux mesurés prend un sens particulier, vu que les potentiels normaux négatifs permettent une dissolution du métal accompagnée de formation d'hydrogène, alors que ce n'est pas le cas pour les potentiels positifs.

L'électrode à l'hydrogène est un exemple d'électrode à gaz. D'autres systèmes faisant appel aux oxydes ou aux sels, peuvent également être utilisés en tant qu'électrodes solides, le mécanisme d'établissement de la tension restant le même. Un gaz adsorbé se comporte comme un réseau atomique et il en est de même des couches minces recouvrant un métal. Des ions – parfois également chargés négativement – passent dans la solution ou quittent celle-ci pour se fixer dans le réseau.

3. Potentiels normaux et corrosions

Dans la pratique touchant la corrosion, on ne peut que rarement s'appuyer sur les valeurs des potentiels normaux. Elles fournissent, il est vrai, des indications utiles, les valeurs positives correspondant à de bonnes propriétés, les négatives à un mauvais comportement vis-à-vis de la corrosion. De plus, il faut compter avec un tel nombre d'exceptions qu'il n'est pas possible de tirer des conclusions quantitatives de la mesure des potentiels normaux. En outre, les conditions de corrosion rencontrées en pratique sont presque toujours très différentes de celles qui sont appli-

Vielleicht würde man vermuten, bereits der Umstand, dass die Zusammensetzung der Armierungseisen ziemlich stark streut, bedinge grössere Abweichungen in der Potentialbildung. Dies ist aber nicht der Fall, Kohlenstoffgehalt und Anteil weiterer Fremdelemente spielen in den üblichen Konzentrationen bezüglich der Potentialbildung nur eine geringe Rolle. Dasselbe gilt für die Stärke und die Art der Verformung. Viel wichtiger ist der Umstand, dass wir bei Betonelementen in der Grenzzone Eisen/Elektrolyt gar keine saubere Eisenoberfläche haben, sondern Deckschichten, die sich an der Eisenoberfläche gebildet haben. Rost und Zunder verhalten sich aber in bezug auf Potentialbildung ganz anders als metallisches Eisen.

Dies wird sofort klar, wenn wir uns nach Nernst vorstellen, wie die Potentialbildung mit dem Lösungsdruck der Eisenatome zusammenhängt. Dieser wird bei einer blanken Oberfläche ganz anders sein als bei einer, die eine Deckschicht aufweist. Aber nicht nur die feste Phase der Kontaktzone fest/flüssig beziehungsweise metallische/elektrolytische Leitung ist nur mangelhaft bekannt. Auch der Elektrolyt ist hinsichtlich seiner Wirkung auf das Potential schlecht definiert. So ist die Eisenionenkonzentration in der Zementfeuchtigkeit nicht bekannt. Dazu kommt noch der Umstand, dass durch die Alkalinität der Zementfeuchtigkeit auch die Deckschichtbildung beeinflusst wird. Man braucht sich deshalb nicht zu wundern, wenn die Betoneisenpotentiale keinen bestimmten Wert aufweisen, sondern innerhalb einer grösseren Bandbreite streuen. Wir sind deshalb immer wieder genötigt, das Betoneisenpotential an Ort und Stelle zu bestimmen. Wie das Potential im einzelnen entsteht, wird überhaupt nicht zu erfassen sein. Dagegen kann die Spannung der Betoneisen gegenüber einer Normalwasserstoffelektrode oder der viel häufiger gebrauchten, weil leichter zu handhabenden Kupfersulfatelektrode leicht gemessen werden. Da derartige Messungen bei der Abklärung von Schadenfällen eine wichtige Rolle spielen, soll die Aufgabe und Konstruktion der Kupfersulfatelektrode noch etwas genauer beschrieben werden.

4. Die Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode

Nehmen wir an, wir hätten im Untergrund einen armierten Betonblock – vielleicht eine Abspannung für einen Mast – und nun soll das Potential der Betoneisen bestimmt werden. Wir benötigen dazu ein hochohmiges Voltmeter mit einem Messbereich von etwa 1 V. Das eine Messkabel kann man ohne Schwierigkeiten mit den Betoneisen verbinden, sofern diese an irgendeiner Stelle zugänglich sind, was wir voraussetzen wollen. Aber was machen wir jetzt mit dem zweiten Anschluss? Man könnte nun einfach einen weiteren Eisenstab in den Boden rammen, aber sofort würde zwischen diesem und der Bodenfeuchtigkeit eine neue, in ihrer Grösse

quées pour les mesures. L'apparition de potentiels normaux suppose des conditions bien définies dans la zone de contact métal/électrolyte. Le potentiel normal de l'argent ne s'établira, par exemple, que si une surface d'argent nue est plongée dans une solution normale d'ions du même métal. En ce qui concerne les phénomènes de corrosion dans la pratique, les conditions influençant la formation des potentiels sont loin d'être bien définies. Pour le démontrer, revenons à notre élément de fer d'armature dans les constructions de béton armé.

On pourrait supposer que les différences relativement importantes quant à la composition des fers d'armature entraînent des écarts non négligeables en ce qui concerne l'établissement des potentiels. Tel n'est cependant pas le cas. La teneur en carbone et en traces de métaux non ferreux, aux concentrations usuelles, ne joue qu'un rôle minime dans la formation des potentiels. Le fait que dans les éléments de béton, dans la zone limite fer/électrolyte, nous ne soyons pas en présence de surfaces métalliques propres, mais plutôt des couches qui ont pu se former et qui recouvrent les fers d'armature, est beaucoup plus important. Sous le rapport de la formation des potentiels, la rouille et la croûte de laminage se comportent tout autrement que le fer métallique.

Cela est clair si l'on se représente, selon la théorie de Nernst, dans quelle mesure l'établissement des potentiels dépend de la tendance des atomes de fer à former des cations. Celle-ci sera différente pour une surface nue et pour une surface recouverte d'une couche d'oxyde. Les conditions régnant dans la partie solide des zones de contact ne sont pas les seules à être mal connues. Celles qui interviennent dans la zone transitoire solide/liquide ou métal/électrolyte le sont également. Les effets de l'électrolyte sur le potentiel sont mal définis. Nous n'avons pas d'indications quant à la concentration des ions de fer dans l'humidité du ciment. De plus, il ne faut pas perdre de vue que l'alcalinité de l'humidité du ciment a une influence sur la formation des couches apparaissant sur les fers. C'est pourquoi il n'y a pas lieu de s'étonner que les potentiels des fers d'armature n'aient pas une valeur définie, mais que, bien au contraire, ils varient dans de grandes limites. Il est donc nécessaire de déterminer sur place, dans chaque cas particulier, les potentiels engendrés. Le mécanisme de leur formation ne peut pas être saisi dans le détail. Par contre, les tensions par rapport à une électrode normale à l'hydrogène ou par rapport à une électrode au sulfate de cuivre, plus fréquemment utilisée parce que plus simple à manipuler, peuvent être facilement mesurées. Etant donné que de telles mesures jouent un rôle important dans l'examen des dégâts dus à la corrosion, il est utile de décrire d'un peu plus près le rôle et la construction des électrodes au sulfate de cuivre.

unbekannte Potentialdifferenz entstehen. Würde man den in den Boden gerammten Eisenstab mit dem Voltmeter verbinden, so würde dieses zwar die Differenz der Potential-sprünge Betoneisen/Beton und Eisen/Boden anzeigen, nicht aber die gesuchte Grösse des Potentialsprungs in der Grenzschicht Betoneisen/Zementfeuchtigkeit. Dies wird erst möglich, wenn eine besondere Vergleichselektrode verwendet wird, deren Potential immer gleich bleibt und nicht wie bei unserem eingerammten Eisenstab davon abhängt, ob der Boden sauer, neutral oder alkalisch ist, ob er gut durchlüftet wird oder Sauerstoffmangel herrscht, ob der Eisenstab noch blank ist oder sich schon Deckschichten bilden konnten.

In der Praxis hat sich die Verwendung der Kupfersulfatelektrode mit gesättigtem Elektrolyten allgemein eingeführt. Diese besteht aus einem Kupferstab, der in eine gesättigte Kupfersulfatlösung eintaucht. Wenn man eine derartige Zelle auf den Boden setzt, so wird der Elektrolyt in der Form von Bodenfeuchtigkeit durch einen Zusatz in der Form von gesättigter Kupfersulfatlösung ergänzt. In dieses definierte Milieu taucht dann der Kupferstab, dessen Potential damit immer gleich bleibt. Warum aber verwendet man gesättigte Kupfersulfatlösung und nicht zum Beispiel einnormale? Bei der Kupfersulfatelektrode taucht eine Metallelektrode (Kupferstab) in eine Lösung eines ihrer Salze (Kupfersulfat), und damit ist das Potential von der Konzentration der Lösung abhängig. Sie muss also bei verschiedenen Messungen konstant gehalten werden, damit sie die Messergebnisse nicht durch Veränderungen des Bezugspunktes in unkontrollierter Art beeinflusst. An sich könnte man auch eine Zelle mit einnormaler Lösung verwenden, aber in unserem Fall ist eine gesättigte Lösung besonders praktisch. Um sie herzustellen, kann man nämlich in das Elektrolytgefäss einfach einen Überschuss an festem Kupfersulfat geben. Verdunstet etwas Wasser, so scheidet sich zusätzlich etwas festes Kupfersulfat ab, sollte dagegen etwas Feuchtigkeit in den Raum mit dem Elektrolyten gelangen, so löst sich noch etwas Kupfersulfat vom Überschuss auf. Die Möglichkeit von Feuchtigkeitsverlust und Feuchtigkeitszutritt besteht bei einer Vergleichselektrode immer, da man sie nicht hermetisch abschliessen kann. In unserem Fall würde man zum Beispiel die Kupfersulfatelektrode in der Nähe des armierten Betonblocks auf den Boden stellen und den Kupferstab mit der einen Klemme des Voltmeters verbinden, die Betoneisen mit der anderen. Damit nun überhaupt ein Messstrom fließen kann und die Potentialverhältnisse definiert sind, muss zwischen der Bodenfeuchtigkeit und der Kupfersulfatlösung eine leitende Verbindung sein. Um diese zu erhalten, wird jeweils der Boden der Vergleichszelle als poröse Wand ausgebildet. In den Poren stehen dann der Elektrolyt der Messzelle und die Bodenfeuchtigkeit miteinander in Verbindung. Der Stromkreis ist also folgender-

4. L'électrode cuivre/sulfate de cuivre

Admettons que nous ayons un bloc de béton armé enfoui dans le sol – par exemple un massif d'ancrage pour un pylône – et qu'il faille déterminer le potentiel des fers d'armature. Nous avons besoin à cet effet d'un voltmètre à haute résistance interne, dont la plage de mesure est de l'ordre de 1 V. L'un des câbles de mesure peut être raccordé sans difficulté au fer de l'armature, pour autant qu'il soit accessible, ce que nous supposons être le cas. Mais que faisons-nous avec le second câble de raccordement? On pourrait enfoncer une tige de fer dans le sol, mais une nouvelle différence de potentiel, dont la valeur n'est pas connue, naîtrait entre la tige et l'humidité du sol. Si l'on reliait ensuite le voltmètre avec la tige enfichée dans le sol, ce dernier mesurerait la différence des écarts de potentiel fer d'armature/béton et fer/ sol et non la valeur recherchée des écarts de potentiel dans la couche limite fer d'armature/humidité du ciment. Cette mesure n'est possible qu'en utilisant une électrode de référence particulière, dont le potentiel reste toujours le même, et ne varie pas comme dans le cas de la tige de fer, selon que le sol est acide, neutre ou alcalin, selon qu'il est bien aéré ou manque d'oxygène, ou selon que la surface de la tige de fer est nue ou déjà recouverte d'oxydes.

On a généralement recours, dans la pratique, à une électrode au sulfate de cuivre avec électrolyte saturé. Celle-ci se compose d'une tige de cuivre plongeant dans une solution saturée de sulfate de cuivre. Si l'on pose une telle cellule sur le sol, l'électrolyte sous forme d'humidité du sol est complété par la solution saturée de sulfate de cuivre. La tige de cuivre plonge dans ce milieu défini et son potentiel reste constant. Mais pourquoi utilise-t-on une solution saturée de sulfate de cuivre et non une solution normale, par exemple? Dans l'électrode au sulfate de cuivre, la partie métallique (la tige de cuivre) plonge dans une solution de l'un de ses sels (le sulfate de cuivre) et le potentiel engendré dépend de la concentration de l'électrolyte. Celle-ci doit être maintenue constante pour les différentes mesures afin que les résultats ne soient pas faussés par un déplacement incontrôlable du point de référence. Il est vrai que l'on pourrait utiliser une cellule contenant une solution normale mais, dans notre cas, l'emploi d'une solution saturée est plus pratique. En effet, pour l'obtenir, il suffit d'introduire un excès de sulfate de cuivre solide dans le bac contenant l'électrolyte. Lorsqu'une partie de l'eau s'évapore, une certaine quantité de sulfate de cuivre passe à l'état solide par cristallisation. Si au contraire, une certaine humidité pénètre dans le récipient, une partie du sulfate de cuivre en excès se dissout. La possibilité de gain ou de perte d'humidité dans une électrode de référence existe toujours, étant donné qu'on ne peut pas la fermer hermétiquement. Pour faire la mesure dans le cas qui nous

massen aufgebaut: Voltmeter – Armierungseisen – Zementfeuchtigkeit – Bodenfeuchtigkeit – gesättigte Kupfersulfatlösung – Kupfer-Voltmeter. Zwischen den Armierungseisen und der Zementfeuchtigkeit und der Kupfersulfatlösung und dem Kupferstab bestehen Potentialsprünge, deren Differenz das Voltmeter anzeigt. Im Gegensatz zum Versuch mit dem eingerammten Eisenstab als Vergleichselektrode kennen wir das Potential der Vergleichselektrode (Cu/CuSO_4 ges./Normalwasserstoffelektrode = +0,32 V), und der Potentialsprung in der Kupfersulfatzelle ist immer derselbe, unabhängig vom Standort. Hierzu ist allerdings eine Einschränkung zu machen: Potentialsprünge entstehen nämlich nicht nur an den Grenzflächen Metall/Elektrolyt, sondern auch bei Kontakten unterschiedlicher Elektrolyte. Es entstehen also auch noch Potentialdifferenzen zwischen dem Beton und dem Boden sowie dem Boden und der Kupfersulfatlösung. Glücklicherweise sind diese Spannungen normalerweise nur klein, so dass sie nicht berücksichtigt werden müssen, sofern die Messgenauigkeit auf etwa ± 20 mV beschränkt bleibt.

5. Die Potentiale von Betonarmierungen und erdfühligem Metallkonstruktionen

In der *Tabelle II* sind einige Angaben zusammengestellt, die auf vielen Messungen basieren, die mit Hilfe von Kupfersulfatvergleichselektroden an verschiedenen, im Boden vergrabenen Metallkonstruktionen und Betoneisen gemacht wurden.

Tabelle II. Streubereich der Potentiale für einige Metalle unter praktischen Bedingungen. Extremwerte sind im angegebenen Streubereich noch nicht enthalten

Metall	Elektrolyt	Potential gegen Cu/CuSO_4 ges.
Blei	Bodenfeuchtigkeit	-0,5...-0,7 (V)
Eisen (Stahl)	Bodenfeuchtigkeit	-0,5...-0,8
Eisen verrostet	Bodenfeuchtigkeit	-0,4...-0,6
Guss verrostet	Bodenfeuchtigkeit	-0,2...-0,4
Zink		
(auch Eisen verzinkt)	Bodenfeuchtigkeit	-0,7...-1,0
Kupfer	Bodenfeuchtigkeit	0,0...-0,2
Eisen in Beton	Zementfeuchte	-0,1...-0,3

Im Gegensatz zu den Normalpotentialen sind die praktischen Potentiale nicht genau festgelegt, denn je nach Oberflächenbeschaffenheit des Metalls (zum Beispiel dem Verrostungsgrad) und Zusammensetzung des Elektrolyten (zum Beispiel Karst- oder Moorwasser) können die Potentiale erheblich streuen. Trotzdem kann man sagen, dass Kupfer, Betoneisen und abgerostete Gussleitungen Potentiale aufweisen, die praktisch immer positiver sind als die

occupé, il suffirait de poser l'électrode au sulfate de cuivre sur le sol, à proximité du bloc de béton, et de relier l'une des bornes du voltmètre à la tige de cuivre et l'autre au fer d'armature. Cependant, afin qu'un courant puisse circuler, il faut qu'une liaison s'établisse entre l'humidité du sol et la solution de sulfate de cuivre. A cet effet, le fond du bac de l'électrode est constitué d'une matière poreuse, dans les pores de laquelle l'humidité du sol et l'électrolyte entrent en contact. Le circuit du courant s'établit de la façon suivante: Voltmètre – fer d'armature – humidité du ciment – humidité du sol – solution saturée de sulfate de cuivre – cuivre – voltmètre. Des écarts de potentiel, indiqués par le voltmètre, existent entre le fer d'armature et l'humidité du ciment et la solution de sulfate de cuivre et la tige de cuivre. A l'encontre de ce qui se passait lors de l'essai avec la tige de fer en tant qu'électrode de comparaison, le potentiel de l'électrode au sulfate de cuivre est connu (Cu/CuSO_4 sat./électrode normale à l'hydrogène = + 0,32 V) et l'écart de potentiel de la cellule au sulfate de cuivre est toujours le même, quel que soit le lieu d'utilisation. Une restriction s'impose cependant: Des écarts de potentiel n'apparaissent pas seulement aux surfaces limites métal/électrolyte, mais encore aux points de contact entre électrolytes différents. Des différences de potentiel sont donc engendrées entre le béton et le sol et entre le sol et la solution de sulfate de cuivre. Ces tensions sont normalement faibles, si bien qu'il n'est pas nécessaire d'en tenir compte, pour autant que la précision de mesure puisse être limitée à ± 20 mV.

5. Les potentiels des fers d'armature et des constructions métalliques en contact avec le sol

Le *tableau II* contient quelques indications reposant sur de nombreuses mesures faites à l'aide d'électrodes au sulfate de cuivre sur des constructions métalliques enfouies dans le sol et des fers d'armatures.

Tableau II. Plages de variation des potentiels pour quelques métaux sous conditions pratiques. Les valeurs extrêmes ne sont pas encore indiquées dans les limites

Métal	Electrolyte	Potential par rapport à Cu/CuSO_4 sat.
Plomb	Humidité du sol	-0,5...-0,7 (V)
Fer (acier)	Humidité du sol	-0,5...-0,8
Fer rouillé	Humidité du sol	-0,4...-0,6
Fonte rouillée	Humidité du sol	-0,2...-0,4
Zinc (également fer zingué)	Humidité du sol	-0,7...-1,0
Cuivre	Humidité du sol	0,0...-0,2
Fer dans le béton	Humidité du ciment	-0,1...-0,3

Potentiale erdfühlicher Stahl- und Bleikonstruktionen. Damit bilden aber grössere Kupfererdnetze, Armierungen von ausgedehnten, unterirdischen Bauten und auch grossflächige Gussleitungen eine ernsthafte Korrosionsgefahr für andere Leitungen, sofern diese an irgendeiner Stelle metallisch miteinander verbunden sind. Wie hängen nun aber Potentiale, Ströme und Korrosionen miteinander zusammen?

6. Potentiale und Korrosionsströme

Die Korrosion eines Metalls ist durch den Übergang vom neutralen in den Ionenzustand gekennzeichnet. Da Metallionen positiv geladen sind, ist dieser Oxydationsprozess durch die Wegnahme von Elektronen charakterisiert. Wenn von einer Metallelektrode die negativen Ladungen abgeführt werden, so kann, wie wir bereits gesehen haben, der Lösungs-Abscheidungsprozess zwischen Metall und Elektrolyt nicht mehr im Gleichgewicht sein, vielmehr muss sich ständig neues Metall in Metallionen umwandeln. Der Abfluss der negativen Ladungen (Elektronenstrom) bedeutet einen Stromzufluss in der üblichen Kennzeichnung der Stromrichtung, die auf der Annahme basiert, positive Ladungen würden den Strom vermitteln. Daraus ergibt sich folgender, für die Praxis sehr wichtige Schluss: Eine metallische Struktur ist immer dann korrosionsgefährdet, wenn ein elektrischer Strom in sie hineinfließt. Das Metall wird an den Stellen aufgelöst, wo der Strom vom Metall in den Elektrolyten übertritt. Diese Aussage darf nun aber nicht so interpretiert werden, dass kein Stromzufluss, auch keine Korrosion bedeutet. Häufig sind nämlich die Gebiete mit Stromeintritt so nahe bei den Flecken mit Stromaustritt, dass der Korrosionsstrom nicht gemessen werden kann. Man spricht dann von Lokalelementen und unterscheidet diese Art von Korrosion von der galvanischen Korrosion, die durch den Zusammenschluss von ausgedehnteren metallischen Strukturen mit unterschiedlichem Potential entstehen. Weil im Elektrolyten der Ladungstransport durch wandernde Ionen geschieht, ist mit dem Stromfluss ein um so grösserer Stofftransport verbunden, je grösser die Ionen sind und je kleiner ihre Ladung ist. Die Wirkung des Stromdurchgangs ist also proportional zur Atommasse und umgekehrt proportional zur Wertigkeit. Es sind 96 500 Ampere-sekunden (= 1 Faraday) nötig, um ebensoviele Gramm eines einwertigen Ions abzuschneiden (oder aus neutralem Material zu bilden), wie die Massezahl des betreffenden Ions beträgt. In der Praxis wird man eher mit Stromstärken während einer gewissen Zeit als mit Faradays rechnen, zum Beispiel mit mA während eines Jahres. Die *Tabelle III* gibt einige Werte, die es ermöglichen, die Wirkung eines Korrosionsstromes durch die Menge des aufgelösten Metalls zu charakterisieren.

A l'encontre des potentiels normaux, les potentiels mesurés en pratique n'ont pas une valeur définie avec précision. Ils peuvent varier assez fortement selon la structure de la surface métallique (par exemple selon le degré d'oxydation) et selon la composition de l'électrolyte (eau fortement calcaire ou sans teneur en calcaire). On peut cependant déduire que le cuivre, les fers d'armature et les conduites de fonte rouillées présentent des potentiels toujours plus positifs que ceux des constructions en acier ou en plomb enfouies dans le sol. Cela revient à dire que les réseaux étendus de mise à terre en cuivre, l'armature des constructions souterraines importantes et les conduites de fonte de grande surface constituent un danger sérieux de corrosion pour les autres conduites posées dans le sol, dans la mesure où elles entrent en contact métallique en un point quelconque. Mais quelles sont les relations liant les potentiels, les courants et les corrosions?

6. Potentiels et courants de corrosion

La corrosion d'un métal est caractérisée par le passage de l'état neutre à l'état ionisé. Etant donné que les ions métalliques sont chargés positivement, ce procédé d'oxydation correspond à une soustraction d'électrons. Si les charges négatives quittent l'électrode métallique, l'équilibre dans le processus de formation des cations ne pourra pas être atteint et de nouveaux atomes seront transformés en ions métalliques. Le transfert des charges négatives correspond à l'écoulement d'un courant dans le sens conventionnel usuel, qui repose sur la supposition que les charges positives transmettent le courant. On peut en tirer la déduction suivante, très importante pour la pratique: La pénétration d'un courant dans une structure métallique représente toujours un danger de corrosion. En effet, la structure du métal se corrode aux endroits où le courant ressort du métal pour passer dans l'électrolyte. Il ne faut cependant pas interpréter cette affirmation en ce sens que l'absence de courant signifie l'absence de corrosion. Les zones de pénétration du courant sont souvent si près de celles d'où il ressort qu'aucune mesure de courant de corrosion n'est possible. On parle alors d'éléments locaux et l'on distingue ce genre de corrosions des corrosions galvaniques engendrées par le contact de structures métalliques plus étendues, dont les potentiels sont différents. Le transfert des charges dans l'électrolyte étant le fait des ions en déplacement, le transport de matériel lié au courant est d'autant plus important que les ions sont plus gros et leur charge plus faible. L'effet du passage du courant est donc proportionnel à la masse atomique et inversement proportionnel à la valence. Le transport (ou la formation à partir de matériel neutre) d'une quantité de ions de valence 1, égale en grammes au chiffre de masse atomique de ce ion, nécessite 96 500 ampères-secondes (= 1 faraday). Dans la pratique, les calculs se

Tabelle III. Die Wirkung der Korrosionsströme

Metall	Aufgelöste Menge in Gramm, falls ein Jahr lang 1 mA Strom fließt	Aufgelöste Menge in cm ³ , falls ein Jahr lang 1 mA Strom fließt
Eisen	9,1	1,2
Kupfer	10,5	1,2
Blei	34	3,0
Zink	10,7	1,5
Aluminium	2,9	1,1
Magnesium	4,0	2,3

In jedem Fall ist die Metallauflösung proportional zum Ladungsdurchgang, und man kann deshalb folgern, dass nicht die Grösse der Potentiale, sondern nebst der Zeitdauer die Stromstärken für das Korrosionsgeschehen massgebend sind.

Bei Kabelmänteln, Stahlbehältern und Röhren interessiert man sich vor allem für die Eindringtiefe der Korrosionen. In diesen Fällen wäre also die Stromdichte – der Strom je Flächeneinheit Austrittsfläche – eine geeignete Bezugsgrösse. Aber leider ist es in der Praxis fast nie möglich, diese Grösse auch genügend sicher zu messen. Dazu ein Beispiel: Man kann in einem bestimmten Fall leicht feststellen, dass von einer Muffe aus 10 mA Strom in ein abgehendes Kabel fliesst. Jetzt stellt sich zunächst die Frage, ob wirklich der ganze Strom aus dem Kabelmantel dieses Kabels in den Boden übertritt. Es könnte nämlich auch eine metallische Verbindung zu andern Strukturen (etwa dem Wasserleitungsnetz) bestehen – und wenn dies der Fall sein sollte, dann würde diese vielleicht einen Teil des Stromes übernehmen. Am besten wird man eine zweite Strommessung – zum Beispiel 50 m von der Muffe entfernt ausführen – um aus der Differenz zur ersten Messung die Grösse des austretenden Stromes innerhalb eines bestimmten Teilstücks berechnen zu können. Damit ist das Problem aber noch nicht gelöst. Nehmen wir einmal an, der Stromwert habe bei der Muffe 10 mA nach 50 m noch 4 mA betragen. Dann wissen wir, dass wir auf den ersten 50 Kabelmetern einen Stromaustritt von 6 mA haben. Ist das jetzt gefährlich oder nicht? Nach der Tabelle III entspricht einem Strom von 6 mA eine Bleiauflösung von 200 g/J oder 20 cm³/J. Je nachdem, ob die Kabeloberfläche gleichmässig korrodiert oder nur einige kleine Stellen angegriffen werden, sind diese Werte harmlos oder sehr gefährlich. Könnte man auf einfache Art entscheiden, ob jeweils eine gleichmässige Korrosion entsteht oder Lochfrass, so wäre für die Schadenprognose schon viel gewonnen. Aus einer Strommessung allein kann man aber nicht auf die Grösse der korrodierenden Oberfläche schliessen. Die in unserem Fall angenommenen 6 mA Korrosionsstrom bedeuten zwar in jedem Fall eine gewisse Korrosionsbelastung. Diese kann gefährlich sein, sie muss es aber nicht unbedingt. Nämlich dann nicht, wenn der Strom gleichmässig aus der ganzen

feront à l'aide d'intensités de courant pendant un certain temps, plutôt qu'à l'aide de faradays. On utilisera, par exemple, le nombre de milliampères circulant pendant une année. Le *tableau III* indique quelques valeurs permettant de se rendre compte de l'effet de la corrosion au vu des quantités de métal évacuées.

Tableau III. Effet des courants de corrosion

Métal	Quantité en grammes de matière évacuée pour un courant de 1 mA pendant 1 an	Quantité en cm ³ de matière évacuée pour un courant de 1 mA pendant 1 an
Fer	9,1	1,2
Cuivre	10,5	1,2
Plomb	34	3,0
Zinc	10,7	1,5
Aluminium	2,9	1,1
Magnésium	4,0	2,3

Dans chaque cas, le transfert de matériel est proportionnel au passage de la charge et l'on peut en déduire que ce n'est pas la grandeur des potentiels, mais, en plus de la durée, les intensités de courant qui sont significatives dans les phénomènes de corrosion.

En ce qui concerne les armures de câbles, les réservoirs d'acier et les conduites métalliques, il est intéressant de connaître, avant tout, la profondeur de pénétration des corrosions. La densité de courant – soit l'intensité de courant par unité de surface – pourrait être une grandeur de référence appropriée. Il n'est malheureusement presque jamais possible, en pratique, de mesurer cette grandeur avec suffisamment de sûreté. Un exemple: Il est facile, dans un cas particulier, de constater qu'un courant de 10 mA s'écoule d'un manchon dans la gaine d'un câble. La première question qui se pose est de savoir si la totalité du courant passe ensuite de la gaine dans le sol. Une liaison métallique avec d'autres structures – par exemple le réseau de distribution d'eau – pourrait exister et, si tel était le cas, absorber une partie du courant. Le mieux sera de faire une seconde mesure de courant – par exemple à 50 m du manchon – et de déterminer, en calculant la différence d'avec la première mesure, l'intensité du courant sortant sur une portion du câble. Le problème n'est cependant pas encore résolu. Admettons que le courant, qui est de 10 mA près du manchon, ne soit plus que de 4 mA 50 m plus loin. Nous savons qu'un courant de 6 mA sort de la gaine sur les 50 premiers mètres de câble. Cette situation est-elle dangereuse ou non? Selon le tableau III, un courant de 6 mA correspond à l'évacuation annuelle de 200 g ou de 20 cm³ de plomb. Selon que la surface de la gaine est corrodée régulièrement ou attaquée en quelques endroits peu étendus, ces valeurs

Oberfläche austritt und so eine gleichmässige Flächenkorrosion erzeugt, deren Tiefenwirkung auf Jahrzehnte hinaus belanglos bleibt. Besonders schwierig sind die Verhältnisse bei isolierten Leitungen abzuschätzen. Wie soll man die Grösse der Fehlerstellen im Isolierbelag, die Porenhäufigkeit und den Einfluss unisolierter Teile (zum Beispiel Muffen bei Fernmeldekabeln) erfassen? Einen rohen Anhaltspunkt liefern Erdübergangsmessungen. Einiges wird man auch aufgrund von Erfahrungswerten aussagen können. Quantitative Werte sind aber nicht zu erhalten. Man kann die Situation auch so kennzeichnen: Korrosionsstrommessungen machen es möglich, auszurechnen, wie viele Gramm der Metallmantel einer Leitung leichter wird. Ob aber auch Löcher entstehen und nach welcher Zeit der erste Durchbruch erfolgt, ist mit einer Strommessung allein nicht auszusagen.

Glücklicherweise können zusätzliche Potentialmessungen noch einige weitere Informationen liefern, obwohl auch hier die Ergebnisse nicht absolut zwingend sind.

Zunächst wollen wir aber nochmals auf das Problem der Korrosionsstromerzeugung zurückkommen. Wir haben gesehen, dass Armierungseisen, je nach den Verhältnissen 200...500 mV positivere Potentiale aufweisen als Eisen und Blei im natürlichen Boden. Was passiert nun, wenn Armierungen mit andern metallischen Konstruktionen, etwa einer blanken Stahlrohrleitung, verbunden werden. Was passiert zum Beispiel, wenn die Armierung unseres Betonblocks mit dem in den Boden getriebenen Eisenstab metallisch durchverbunden wird? Solange der Eisenstab und die Betoneisen nicht miteinander verbunden sind, werden sie verschiedene Potentiale aufweisen; nehmen wir an, die Betoneisen -150 mV und der Eisenstab -550 mV. Misst man mit einem Voltmeter die Spannung zwischen Armierung und Eisenstab im natürlichen Untergrund, so findet man natürlich 400 mV. Betoneisen und erdfühliges Eisen bilden also eine Batterie mit 400 mV Klemmenspannung. Verbindet man nun die Armierung durch einen metallischen Leiter mit dem eingerammten Eisenstab, so fliesst sofort ein Strom, denn unsere Batterie wurde kurzgeschlossen. Ein Kurzschluss auf einer Batterie ist etwas, das man im Alltag gar nicht schätzt. Korrosionsbatterien funktionieren aber fast immer kurzgeschlossen. Der Strom wird dabei hauptsächlich durch zwei Grössen bestimmt. Einmal durch den Widerstand, den der Elektrolyt dem Stromdurchgang entgegensetzt, und dann durch das Polarisationsverhalten der Elektroden.

Die erste Grösse ist klar zu erfassen. Der innere Widerstand unserer Batterie wird von der Leitfähigkeit des Elektrolyten (Betonfeuchtigkeit, Bodenfeuchtigkeit) und der Grösse und Form – oder allgemeiner ausgedrückt von der Geometrie – abhängen. Was versteht man aber unter Polarisation? Dieser im allgemeinen nicht stromproportionale

peuvent être inoffensives ou très dangereuses. Si l'on pouvait déterminer de façon simple, dans chaque cas, le genre de corrosion auquel il faut s'attendre – corrosion uniformément répartie sur toute la surface de la gaine ou au contraire concentrée en quelques points et conduisant à des perforations – on aurait fait de grands progrès quant à la prévision des dégâts. Une seule mesure de courant ne permet pas de tirer des conclusions au sujet de la grandeur des surfaces corrodées. Dans l'exemple choisi, le courant de 6 mA représente une charge corrodante qui peut être dangereuse, bien que ne l'étant pas a priori. Il n'y a pas de danger si la totalité du courant sort de la gaine de câble uniformément réparti, entraînant la corrosion de l'ensemble de la surface de l'enveloppe, dont les effets en profondeur seront sans grande signification pendant des décennies. Il est particulièrement difficile d'évaluer les conditions pour les conduites isolées. Comment déterminer l'importance des défauts dans l'isolation, la fréquence des pores, l'influence des parties non isolées (par exemple les manchons dans les installations de câbles)? La mesure de résistance de passage à la terre peut fournir des indications grossières. Les valeurs d'expérience sont également des sources de renseignement utiles. Il n'en reste pas moins que des valeurs quantitatives ne peuvent pas être obtenues. On peut caractériser la situation ainsi: Les mesures de courants de corrosion permettent de calculer la diminution de poids d'une gaine de câble. Elles ne permettent pas, à elles seules, de prédire s'il y aura perforation et à quel moment elle aura lieu.

Des mesures de potentiels supplémentaires peuvent heureusement fournir des indications précieuses, bien que n'ayant pas un caractère absolu.

Mais revenons tout d'abord au problème de la création des courants de corrosion. Nous avons vu que, selon les conditions, les fers d'armature pouvaient présenter un potentiel de 200...500 mV plus positif que le fer et le plomb enfouis dans un sol naturel. Que se passe-t-il si les armatures sont reliées aux autres constructions métalliques, par exemple à une conduite d'acier nu. Que se passe-t-il, par exemple, si l'armature de notre bloc de béton est reliée à la tige de fer enfichée dans le sol? Tant que la tige de fer et le fer d'armature ne sont pas reliés, ils auront des potentiels différents; admettons -150 mV pour le fer d'armature et -550 mV pour la tige. Si l'on mesure la tension entre l'armature et la tige de fer enfichée dans le sol, la valeur indiquée par le voltmètre est de 400 mV. Le fer d'armature et la tige en contact avec le sol forment une batterie dont la tension aux bornes est de 400 mV. La jonction de ces deux électrodes provoque la circulation d'un courant, la batterie étant court-circuitée. Le court-circuit d'une batterie est une chose peu appréciée dans la vie quotidienne. Les batteries rencontrées dans les phénomènes de corrosion fonctionnent

Anteil des Spannungsabfalls hängt mit der Tatsache zusammen, dass der Übergang eines Stromes von einem metallischen Leiter in einen Elektrolyten stets stoffliche Veränderungen bewirkt. Im metallischen Teil des Stromkreises fließt der Strom vom positiven zum negativen Batteriepol, in unserem Fall von der Betonarmierung zum eingerammten Eisenstab.

Innerhalb der Grenzschichten Metall/Elektrolyt wird der Strom indessen gezwungen, gegen die Potentialverhältnisse zu fließen (Lösungsdruck gegen elektrisches Feld), im Boden und Beton fließt der Strom also vom Eisenstab in Kontakt mit der Bodenfeuchtigkeit zum Eisen in Kontakt mit dem Beton, d. h. vom Minuspol zum Pluspol. Der Strom wird unter stofflichen Veränderungen erzeugt, die sehr oft den Charakter einer Korrosion haben. Stoffliche Veränderungen bedingen aber wieder andere Potentiale, und diese Potentialverschiebungen unter dem Einfluss des Stromes nennt man Polarisation. Natürlich kann der Stromfluss nur durch chemische Prozesse aufrechterhalten werden, die Energie zu liefern im Stande sind. Bei Metallen sind es Oxydationsvorgänge, womit schon gesagt ist, dass sie an der Elektrode auftreten, wo die Elektronen abfließen. Der konventionelle Strom tritt demnach in die korrodierende Elektrode ein und verlässt an ihrer Oberfläche den metallischen Leiter, um in den Elektrolyten überzugehen. Der Chemiker nennt diese Elektrode die Anode, und sie ist dadurch gekennzeichnet, dass an ihrer Oberfläche der konventionelle Strom in den Elektrolyten austritt. Diese Anoden-Definition hat schon zu vielen Missverständnissen Anlass gegeben.

Für den Elektrotechniker ist nämlich stets der positive Pol die Anode, für den Elektrochemiker gilt diese Festlegung nicht. Ein sehr geeignetes Streitobjekt ist wiederum die Batterie. Der Elektrotechniker wird stets den Pluspol als Anode bezeichnen. Bei einer Leclanché-Zelle wird dies der Kohlestab sein. Kathode ist dann der Zinkbecher. Der Chemiker betrachtet dagegen den Stromfluss. Im metallischen Teil des Stromkreises fließt der Strom vom Plus- zum Minuspol. Im Elektrolyten, also im Innern der Zelle, fließt er aber vom Minus- zum Pluspol. Der konventionelle Strom verlässt also am Minuspol den metallischen Leiter, um in den Elektrolyten zu gehen, beim Pluspol tritt er dann wieder in den metallischen Leiter ein. Also sagt der Chemiker dem Minuspol seiner Definition gemäss «Anode». An der Anode wird das Metall aufgelöst, oxydiert und korrodiert, und wer dies nicht glaubt, kann selber einmal den Zustand des Zinkbeckers einer verbrauchten Leclanché-Batterie untersuchen.

Bei einer galvanischen Anlage, einer Elektrolysiervorrichtung sind sich dagegen Elektriker und Chemiker einig. Beim positiven Pol wird der Strom in das Bad geleitet, beim positiven Pol tritt er auch in den Elektrolyten über. Die Anode

presque toujours en court-circuit. Le courant circulant est déterminé principalement par deux grandeurs qui sont, d'une part, la résistance opposée au passage du courant par l'électrolyte et, d'autre part, le comportement des électrodes à l'égard de la polarisation.

La première grandeur peut être déterminée facilement. La résistance interne de la batterie dépend de la conductibilité de l'électrolyte (humidité du béton, humidité du sol) ainsi que de la grandeur et de la forme – d'une façon plus générale de la géométrie. Que faut-il comprendre par polarisation? Ce facteur de chute de tension, qui en général n'est pas proportionnel à l'intensité du courant, dépend du fait que le passage du courant d'un conducteur métallique dans un électrolyte entraîne toujours des modifications chimiques. Dans la partie métallique du circuit, à l'extérieur, le courant s'écoule du pôle positif au pôle négatif de la batterie, dans notre cas, de l'armature du béton à la tige de fer enfichée dans le sol.

A l'intérieur des couches limites métal/électrolyte, le courant est cependant contraint de circuler à l'encontre des conditions de potentiel (tendance à la formation de cations contre champ électrique). Dans le sol et dans le béton, le courant s'écoule de la tige de fer en contact avec l'humidité du sol au fer de l'armature en contact avec le béton, c'est-à-dire du pôle négatif au pôle positif. La création du courant s'accompagne de modifications matérielles qui ont très souvent le caractère d'une corrosion. Ces modifications sont la cause de l'apparition d'autres potentiels, et ce sont ces décalages de potentiel sous l'influence du courant que l'on nomme polarisation. Le flux de courant ne peut naturellement être maintenu que grâce à des procédés chimiques en mesure de livrer de l'énergie. Pour les métaux, il s'agit de processus d'oxydation, ce qui veut déjà dire qu'ils apparaissent sur l'électrode où les électrons quittent le métal. Il s'ensuit que le courant conventionnel entre dans l'électrode corrodée et quitte, à sa surface, le conducteur métallique pour passer dans l'électrolyte. Le chimiste donne le nom d'anode à cette électrode, qui est caractérisée par le fait, qu'à sa surface, le courant conventionnel quitte le métal pour passer dans l'électrolyte. Cette définition de l'anode a déjà donné lieu à de nombreux malentendus.

Pour l'électricien, le pôle positif est toujours l'anode, convention qui n'est pas valable pour l'électro-chimiste. Un objet de discussion parfaitement convenable est de nouveau la batterie. L'électricien désignera toujours le pôle positif comme étant l'anode. Dans un élément Leclanché, il s'agit de la tige de charbon. La cathode est constituée par l'enveloppe de zinc. Le chimiste, pour sa part, considère le sens d'écoulement du courant. Dans la partie métallique du circuit, le courant circule du pôle positif au pôle négatif. Dans l'électrolyte, c'est-à-dire à l'intérieur de l'élément, il s'écoule du pôle négatif au pôle positif. Donc, le courant

wird deshalb abgebaut, wogegen an der Kathode Metall abgeschieden wird. Die Anode wird oxydiert, an der Kathode finden Reduktionsprozesse statt, alles ist hier in bester Ordnung.

Aber kehren wir nochmals zu den Anodenprozessen als Energielieferanten zurück. Jeder Stromfluss hat eine gewisse Polarisierung zur Folge. Je grösser die Stromdichte ist, desto grösser ist auch die Polarisierung. Natürlich gibt es sowohl eine anodische wie eine kathodische Polarisierung, aber häufig sind die anodischen und kathodischen Stromdichten ganz verschieden. Eine gut isolierte Wasserleitung mit einigen wenigen Fehlerstellen in der Isolation, die mit der Armierung eines grossen Kellerkomplexes verbunden ist, wird zum Beispiel viel grössere anodische als kathodische Stromdichten aufweisen. Damit wird die anodische Polarisierung auch viel stärker ausfallen als die kathodische. Dies kann so weit gehen, dass die Anode bis ganz nahe an das Potential der Kathode polarisiert wird. Damit nimmt natürlich auch die Klemmenspannung der Batterie ab, so dass die Stromstärke tatsächlich in starkem Mass von den Polarisierungseigenschaften der Elektroden abhängt.

Wie kann man nun die Polarisierungsstärke messen? Eine Methode besteht darin, den Stromfluss kurzzeitig zu unterbrechen und in der Strompause das Elektrodenpotential gegen eine Vergleichselektrode zu bestimmen. Den Strom unterbricht man, um den Spannungsabfall im Elektrolyten zu eliminieren. Schwierigkeiten kann es geben, wenn eine sehr rasche Depolarisation auftritt, so dass man genötigt sein kann, den Potentialverlauf zu registrieren oder eine Wechselstrommethode anzuwenden.

Nehmen wir an, es sei gelungen, das Polarisierungspotential zuverlässig zu messen. Wie ist jetzt das weitere Vorgehen? Da die Grösse des Polarisierungspotentials für ein bestimmtes Metall nur von der Stromdichte und der Zusammensetzung des Elektrolyten abhängt, aber nicht vom Gesamtstrom, der in eine metallische Konstruktion fliesst, kann aus den Polarisierungspotentialen auch einiges über die Korrosionsgefährdung ausgesagt werden. Es ist aber nicht zu verhehlen, dass die Unsicherheit hinsichtlich der Elektrolytzusammensetzung den Wert derartiger Messungen beschränkt. Immerhin kann man sagen, dass eine grössere anodische Polarisierung auf eine ernste Korrosionsgefahr hinweist. Aber was heisst in diesem Zusammenhang «grössere Polarisierung»?

Vor dem Zusammenschluss der Betoneisen mit dem eingerammten Stab bestand zwischen den beiden Eisen eine Spannung von 400 mV. Dann wurde verbunden und damit die Spannung eliminiert. Aber wohin verschwanden die Potentialdifferenzen? In Spannungsabfälle im Elektrolyten und Spannungsänderungen an den Grenzflächen Metall/Elektrolyt. Gegen eine weit entfernte Vergleichselektrode würde man ein Potential zwischen -150 und -550 mV messen,

conventionnel quitte le conducteur métallique au pôle négatif pour passer dans l'électrolyte et pénétrer à nouveau dans l'électrode métallique au pôle positif. Conformément à sa définition, le chimiste donne le nom d'«anode» au pôle négatif. Sur l'anode, le métal passe dans la solution, s'oxyde et se corrode, et l'incrédule peut examiner l'enveloppe de zinc d'un élément Leclanché qui a été utilisé.

Dans les installations de galvanoplastie par contre, électriciens et chimistes sont de nouveau d'accord. Le courant est conduit dans le bain au pôle positif, où il pénètre dans l'électrolyte. L'anode se détruit, alors que le métal est déposé sur la cathode. L'anode est oxydée et la cathode soumise à des procédés de réduction. Tout est pour le mieux.

Mais revenons une fois de plus à nos procédés anodiques en tant que fournisseurs d'énergie. Chaque flux de courant a une certaine polarisation pour conséquence. Plus grande est la densité de courant, plus importante est aussi la polarisation. Il est clair que tant l'anode que la cathode seront polarisées. Cependant, les densités de courant anodique et cathodique sont souvent très différentes. Une conduite d'eau bien isolée, avec quelques défauts d'isolation, qui est reliée à l'armature d'un complexe étendu de caves, présentera une densité de courant anodique beaucoup plus élevée que celle qui règne sur la cathode. La polarisation de l'anode sera donc plus forte que celle de la cathode, à tel point qu'elle peut prendre des valeurs proches du potentiel de cathode. Il s'ensuit une diminution de la tension aux bornes de la batterie, si bien que l'intensité du courant dépend réellement dans une grande mesure des propriétés de polarisation des électrodes.

Comment peut-on mesurer l'importance de la polarisation? Une méthode consiste à interrompre brièvement le passage du courant et à mesurer, pendant ce temps, le potentiel de l'électrode par rapport à une électrode de référence. On interrompt le courant pour éliminer la chute de tension dans l'électrolyte. Des difficultés peuvent apparaître en cas de dépolarisation rapide, si bien qu'il est nécessaire d'enregistrer la variation de potentiel ou d'avoir recours à une mesure en courant alternatif.

Admettons que l'on soit parvenu à mesurer correctement le potentiel de polarisation. Comment continuer? La valeur du potentiel de polarisation pour un métal donné dépendant de la densité de courant et de la composition de l'électrolyte, et non pas de la totalité du courant s'écoulant dans une construction métallique, la connaissance des potentiels de polarisation permet certaines déductions quant au danger de corrosion. Il ne faut cependant pas dissimuler que les incertitudes au sujet de la composition de l'électrolyte limitent la valeur de ces mesures. On peut cependant prétendre qu'une polarisation anodique importante indique

das nicht durch Spannungsabfälle im Elektrolyten beeinflusst wäre. Welcher Wert gefunden würde, wäre vom Verhältnis der anodischen zu den kathodischen Flächen abhängig und von der Polarisierbarkeit der Elektroden. In unserem Fall könnte man vielleicht noch zweifeln, ob das Potential eindeutig durch die Betoneisen bestimmt würde. Wenn aber ein armierter, mehrgeschossiger Kellerkomplex mit einer Wasserleitung in Verbindung steht, die nur an einigen wenigen Stellen eine verletzte Isolation aufweist, so wird diese ganz sicher bis nahe an das Betoneisenpotential polarisiert. Dies ist aber nur möglich im Zusammenhang mit einer anodischen Stromdichte, die erfahrungsgemäss als sehr gefährlich bezeichnet werden muss. Eine starke positive Polarisation weist also stets auf eine erhebliche Korrosionsgefahr hin.

Umgekehrt bildet ein kleiner blanker Kupferdraht, der auf einem Bleimantel aufgelötet wurde und mit diesem im Boden liegt, für das Kabel keine Gefahr, da dieses Kupfer durch das Blei auf Bleipotential polarisiert wird, ohne dass an der Bleioberfläche gefährliche Korrosionsstromdichten oder Potentialverschiebungen auftreten.

In manchen Fällen wird es nicht möglich sein, den Stromfluss zu unterbrechen, um Potentialmessungen auszuführen. Was dann? Es gibt auch hier verschiedene Möglichkeiten des Vorgehens. Die einfachste Massnahme um ohmsche Spannungsabfälle im Boden zu vermeiden, besteht darin, die Vergleichselektrode möglichst nahe an das Messobjekt heranzubringen.

Immer noch offen ist die Frage nach der unteren Grenze, ab welcher Potentialverschiebungen als gefährlich bezeichnet werden müssen. Dafür gibt es keine Regel, die in jedem Fall Gültigkeit hat. In einem konzentrierten Elektrolyten können schon geringe Potentialunterschiede erhebliche Korrosionsstromdichten erzeugen. In natürlichen Böden gelten allgemein Polarisierungen um +20 mV für ungefährlich. Was über +100 mV hinausgeht, wird auch unbestritten als gefährlich erachtet. Zwischen 20 und 100 mV gibt es dagegen immer wieder Fälle, bei denen die Potentialverschiebungen ernste Korrosionen auslösen und andere, wo nichts passiert. Bei einer vollen Betoneisenpolarisation passiert aber ganz sicher etwas, nämlich eine rasche Korrosion, sofern Metalle, wie Stahl, Zink und Blei, betroffen werden. Weniger gefährdet ist Guss, da dieser beim Verrosten an der Oberfläche Graphit anreichert und deshalb selber ein ähnlich positives Potential annimmt wie Betoneisen.

Da Betonarmierungen immer häufiger grosse Flächen aufweisen, wird es auch immer mehr zum Normalfall, dass die Betoneisen den mitverbundenen Kabeln, Leitungen und erdverlegten Tanks ihr Potential aufdrücken und dabei selber nur wenig polarisiert werden.

Feuchter Beton ist zudem ein verhältnismässig gut lei-

un danger de corrosion sérieux. Mais que faut-il comprendre en l'occurrence par « polarisation importante » ?

Avant le raccordement du fer d'armature avec la tige enfichée dans le sol, une différence de potentiel de 400 mV existait entre ces deux électrodes. Le contact fut alors établi, et la tension éliminée. Où ont disparu les différences de potentiel? Dans des chutes de tension dans l'électrolyte et des modifications de tension aux surfaces limites métal/électrolyte. La tension mesurée par rapport à une électrode de comparaison beaucoup plus éloignée serait comprise entre -150 et -550 mV, valeur qui ne serait pas influencée par les chutes de tension dans l'électrolyte. Quel que soit le potentiel mesuré, il dépendrait de l'importance de la surface anodique par rapport à la surface cathodique. Dans notre cas, on pourrait encore douter que le potentiel soit réellement déterminé par le fer d'armature. Si, par contre, un complexe de caves en béton armé, s'étendant sur plusieurs étages est en contact avec une conduite d'eau dont l'isolation ne présente des défauts qu'à quelques endroits peu nombreux, cette conduite sera certainement polarisée à une valeur très proche du potentiel des fers de l'armature. Cela n'est cependant possible qu'avec une densité de courant anodique qui, selon l'expérience, doit être qualifiée de très dangereuse. Une polarisation très positive témoigne toujours d'un danger de corrosion important.

Inversement, un petit fil de cuivre nu soudé sur la gaine de plomb d'un câble et enfoui dans le sol avec elle, ne présente pas de danger pour le câble, étant donné que le cuivre sera polarisé par le plomb à la valeur de potentiel du plomb et que des densités de courant ou des écarts de potentiel dangereux ne peuvent pas apparaître à la surface de la gaine.

Dans bien des cas, il n'est pas possible d'interrompre le passage du courant pour effectuer des mesures de potentiel. Que faire? Il existe plusieurs possibilités. La solution la plus simple pour éviter des chutes de potentiel ohmiques dans le sol est de placer l'électrode de référence le plus près possible de l'objet à examiner.

Une question qui n'a pas encore trouvé de réponse est de savoir à partir de quelle limite inférieure les écarts de potentiel doivent être désignés comme dangereux. Il n'existe pas de règle valable dans chaque cas. Dans un électrolyte concentré, de faibles différences de potentiel peuvent engendrer des densités de courant de corrosion importantes. Des polarisations de +20 mV dans un sol naturel sont considérées en général comme inoffensives, alors que les valeurs supérieures à 100 mV sont reconnues sans équivoque comme dangereuses. Pour des tensions comprises entre 20 et 100 mV, par contre, il y a toujours des cas pour lesquels ces écarts de potentiel déclenchent des corrosions sérieuses et d'autres, où il ne se passe rien. Pour une polarisation pratiquement totale, c'est à dire atteignant

tender Elektrolyt. Ausgedehnte Armierungen stellen deshalb sehr leistungsfähige Batterien dar. Entsprechend schwieriger wird es sein, durch einen kathodischen Schutz die Wirkung der Betoneisenkontakte zu neutralisieren. Tatsächlich sind dafür oft Ströme von 10 und mehr Ampere nötig. Dazu kommt noch der Umstand, dass Betoneisenelemente messtechnisch häufig schwierig zu erfassen sind. Der Grund liegt in vielen versteckten Kontaktpunkten, zum Beispiel bei Mauerdurchführungen, metallischen Halterungen, Berührungen mit metallischen Abdeckkanälen, die ihrerseits zum Beispiel durch einen Dübel mit den Betoneisen verbunden sind, durch Kontakte mit metallischen Gestellen und Kabelrechen usw. Schliesslich muss auch noch erwähnt werden, dass durch die Nullung ungünstige Betoneiseneinflüsse über den Nulleiter auf Strukturen weitergegeben werden können, die mit der Armierung sonst nicht verbunden und damit auch nicht gefährdet wären.

7. «Aber bis jetzt ist doch eigentlich nicht viel passiert!»

Diesen Einwand hört man immer wieder bei Diskussionen über die Gefährlichkeit der Betoneisenkorrosion. Wie steht es damit? Ganz sicher werden immer mehr Eisenbetonkonstruktionen errichtet. Gleichzeitig werden immer mehr nichtmetallische oder sehr gut isolierte Leitungen verlegt. Das Verhältnis Betoneisenfläche zur Fläche von Eisen und Blei in Kontakt mit dem natürlichen Boden verschiebt sich dadurch eindeutig zugunsten der Betoneisen. Damit steigt die anodische Polarisation der anderen Strukturen und damit die Korrosionsgefahr. Aber es wird immer noch einige Jahre dauern, bis im Normalfall eine Wasserleitung perforiert ist oder ein Telephonkabel durch Übersprechen anzeigt, dass durch Löcher im Bleimantel Feuchtigkeit ins Innere gelangt. Wäre aber jede durch Potentialeinflüsse von Betoneisen verursachte Korrosion als solche erkennbar, so würde der Einwand, es passiere doch eigentlich erstaunlich wenig, nicht so häufig erhoben. Im Erkennen oder Nichterkennen der Ursache liegt nämlich der Hauptgrund der Unterschätzung der Betoneisenwirkung! Durch den von den Armierungen abgeleiteten Korrosionsstrom sind zum Beispiel dünnwandige Stahlrohre besonders gefährdet. Diese werden heute praktisch stets mit hochwertigen Isolierschichten versehen, so dass der Strom nur noch an wenigen Fehlerstellen aus dem Metallrohr in den Boden übertreten kann. Derartige Zonen sind natürlich besonders stark gefährdet, da sich der Stromaustausch Metall/Elektrolyt auf sie konzentriert. Kommt es schliesslich zum Durchbruch und damit zum Schadenfall, so wird die Stelle freigelegt und der Schaden an der Isolation bemerkt (*Fig. 1*). Was liegt nun näher als zu behaupten, der Schaden sei primär durch den offenkundigen Defekt in der Isolierschicht verursacht

presque la valeur de polarisation des fers d'armature, il y a toujours corrosion rapide, lorsque les métaux touchés sont l'acier, le zinc et le plomb. Les objets en fonte sont moins exposés, du fait qu'en rouillant leurs surfaces s'enrichissent de graphite, et qu'il prennent ainsi un potentiel plus positif, analogue à celui des fers d'armature.

La surface des armatures du béton ayant tendance à augmenter, il sera de plus en plus fréquent que les fers d'armature imposent leur tension de polarisation aux câbles, conduites et réservoirs qui leur sont reliés. Les fers d'armature eux-mêmes seront de ce fait peu polarisés.

De plus, le béton humide constitue un électrolyte relativement bon conducteur. Les armatures étendues sont donc des batteries de grande capacité. Il sera d'autant plus difficile de neutraliser l'effet des contacts avec les fers d'armature par une protection cathodique. Les courants effectivement nécessaires sont souvent de 10 A ou plus. En outre, il est fréquemment malaisé de déterminer par la mesure les caractéristiques électriques d'un élément dont une électrode est un fer d'armature. Il faut en rechercher les raisons dans de nombreux points de contact cachés, tels qu'ils peuvent se produire dans les traversées de murs, avec des dispositifs de fixations métalliques, des couvercles de canaux métalliques, reliés à l'armature par l'intermédiaire d'un tampon de fixation, par exemple. Les contacts avec des bâtis métalliques ou des échelles à câbles sont également à craindre. Il y a lieu de mentionner encore que la mise au neutre des réseaux électriques entraîne la transmission, par l'intermédiaire du conducteur neutre de l'installation, d'influences défavorables sur des structures qui, sans cela, n'entreraient pas en contact avec les fers du béton armé et ne seraient donc pas mises en danger.

7. «Mais jusqu'ici il ne s'est vraiment pas passé grand-chose»

Cette remarque revient dans toutes les discussions ayant trait aux dangers de corrosion par les fers d'armature des constructions en béton armé. Qu'en est-il réellement? Il est certain que les constructions en béton armé deviendront de plus en plus nombreuses. De même, le nombre des conduites non métalliques ou bien isolées posées dans le sol est toujours plus important. La surface des fers d'armature comparée à celle des constructions en fer ou en plomb enfouies dans le sol augmente donc indubitablement. Il s'ensuit un accroissement de la polarisation anodique de ces dernières, donc du danger de corrosion. Il faudra cependant, dans le cas normal, encore plusieurs années, pour qu'une conduite d'eau soit percée ou pour qu'un câble accuse de la diaphonie par suite de pénétration d'humidité à travers les trous de sa gaine de plomb. Si toutes les corrosions dues aux influences des fers d'armature

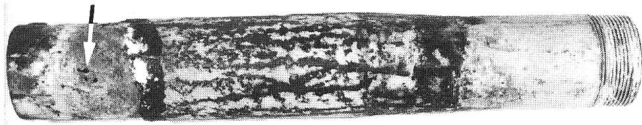


Fig. 1

Durch den Kontakt mit Betoneisen ausgelöste Korrosion einer Zweizoll-Wasserleitung. Das gut isolierte Rohr wurde dort angegriffen, wo beim Gewindschneiden durch die Haltevorrichtung die Isolation zerstört worden war

Corrosion d'une conduite d'eau de deux pouces, déclenchée par contact avec des fers d'armature. Le tuyau, bien isolé, a été attaqué à l'endroit où l'isolation fut détruite par le dispositif de fixation utilisé lors du taraudage

wurden. In unserem Fall (Fig. 1) hat der Monteur beim Gewindschneiden mit der Halteeinrichtung für das Rohr die Isolationsschicht abgeschürft und dann den Defekt nicht repariert. Soweit ist die Analyse des Schadenfalls auch durchaus in Ordnung. Wenn nun aber weiter gefolgert wird, an der ungeschützten Stelle hätten aggressive Bodenstoffe Zutritt zum Stahl gehabt und diesen zerstört, so ist diese Annahme nur bedingt richtig. Wäre nämlich das Rohr einfach im Boden verrostet, dann wäre eine dicke Rostschicht entstanden. Hier waren aber fast keine Korrosionsprodukte vorhanden. Der Kratergrund ist zudem mit kleinen Näpfchen übersät und eine Potentialmessung ergab den für Stahl hohen Wert von -400 mV (Fig. 2). Es handelt sich also nicht um

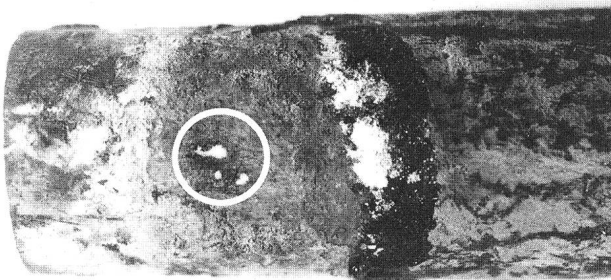


Fig. 2

Wenig Korrosionsprodukte, ein fast blanker Kratergrund mit wannenartigen Vertiefungen und dazu ein abnormal wenig negatives Potential sind typische Kennzeichen für eine «Betoneisenkorrosion»
 Peu de produits de corrosion, un fond de cratère presque lisse avec des cavités en forme de cuve et une tension de polarisation anormalement peu négative sont les signes d'une corrosion due aux fers d'armature

eine normale Verrostung, sondern um eine elektrolytische Abtragung. Nur in seltenen Fällen gelingt es indessen, die Kontaktstellen zu ermitteln, an welchen der Korrosionsstrom in die Struktur eintritt. Immerhin ist es uns auch schon gelungen, einzelne Dübel zu eruieren, die Korrosionsströme von der Größenordnung 1 A weiterleiteten. Wenn der Nullleiter das ungünstige Potential bringt, ist dies gewöhnlich etwas leichter festzustellen. Auffällig wenig negative Eisen-

étaient reconnaissables comme telles, la remarque qu'il ne se passe presque rien ne serait pas si fréquente. Le fait de reconnaître ou de ne pas reconnaître la cause d'une corrosion est la raison principale de la sous-estimation de l'effet des fers d'armature. Les conduites d'acier à parois minces sont particulièrement mises en danger par les courants de corrosion circulant dans les armatures. Ces conduites sont pratiquement toutes recouvertes d'une isolation de haute qualité, si bien que le courant ne peut passer du tube métallique dans le sol qu'aux rares endroits où la protection est défectueuse. De telles zones sont particulièrement sujettes à la corrosion, étant donné que l'échange de courant métal/électrolyte s'y concentre. Lorsque finalement, il y a perforation, l'endroit du défaut est mis à jour et les dégâts à l'isolation sont constatés (voir fig. 1). Rien n'est plus simple alors que de prétendre que les dommages sont dus aux défauts manifestes de l'isolation. Dans le cas qui nous occupe, l'isolation a été détériorée par le dispositif de fixation utilisé lors du taraudage du tube, sans que réparation s'ensuive. Sous cette forme, l'analyse des causes de corrosion peut paraître valable. Ce postulat n'est cependant que partiellement juste, si, en continuant les déductions, on avait envisagé que des matières agressives en provenance du sol auraient pu accéder à la paroi métallique et la détruire. Si la conduite s'était simplement oxydée dans le sol, il y aurait eu formation d'une épaisse couche de rouille. Et pourtant, on ne remarquait presque aucun produit de corrosion. Le fond du cratère était semé de petites pustules et une mesure de potentiel devait donner 400 mV pour résultat, ce qui est une valeur élevée pour l'acier. Il ne s'agissait donc pas de formation normale de rouille, mais de transfert électrolytique de matière. Il est rare de pouvoir déterminer les points de contact par lesquels les courants de corrosion pénètrent dans la structure. Nous avons cependant réussi à découvrir des tampons de fixation dans un mur qui transmettaient un courant de l'ordre de 1 A. Il est ordinairement plus aisé de déceler l'apport d'un potentiel nuisible par le conducteur neutre de l'installation électrique. La mesure de potentiels étonnamment peu négatifs pour les constructions en fer ou en plomb, en l'absence de réseaux de cuivre étendus, permet toujours de supposer une influence des fers d'armature. Il est cependant sans autre possible qu'une ancienne conduite en fonte, aux parois épaisses, provoque des déplacements de potentiel analogues. Seule une analyse exacte du sens des courants, à l'aide d'un millivoltmètre sensible, peut apporter la preuve indéniable de la présence d'une batterie de fers d'armature. Lorsque la source de courant recherchée n'est rien d'autre que l'armature du bâtiment, toutes les conduites quittant l'immeuble seront parcourues par des courants se dirigeant vers l'extérieur de celui-ci. Les câbles et conduites posés à l'extérieur du bâtiment ne sont pas les seuls soumis au dange

und Bleipotentiale lassen in Abwesenheit grösserer Kupfernetze stets Betoneiseneinflüsse vermuten. Es ist indessen durchaus möglich, dass eine dicke, alte Gussleitung ähnliche Potentialverschiebungen bewirkt. Erst eine genaue Analyse der Richtungen der Ströme mit empfindlichen Millivoltmetern kann den eindeutigen Beweis für das Vorhandensein einer Betoneisenbatterie erbringen. Ist die gesuchte Stromquelle in der Form der Armierung im Gebäude selbst, so werden alle abgehenden Leitungen Ströme aufweisen, welche vom Gebäude wegfließen. Gefährdet sind aber nicht nur die aussenliegenden Kabel und Leitungen, auch im Gebäudeinnern sind metallische Objekte gefährdet, sofern folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- a) Die Metalle müssen, falls sie nicht mehr mit den Betoneisen metallisch verbunden sind, ein negativeres Potential annehmen. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn Stahlrohre aus irgendeinem Grund (beispielsweise Wärmeisolierung) in ein Material eingebettet wurden, das weit weniger alkalisch reagiert als Betonfeuchtigkeit.
- b) Die gefährdete Konstruktion muss mit der Armierung metallischen Kontakt haben.
- c) Zwischen der Armierung und der gefährdeten Konstruktion muss ein zusammenhängender elektrolytischer Leitungspfad bestehen. Da nur feuchtes Material einigermaßen gut leitet, kann diese Forderung nur erfüllt sein, wenn die Rohre in einer feuchten Bettung liegen. Dies ist vor allem bei Neubauten der Fall, wo derartige Schäden bevorzugt auftreten.

8. Was machen ?

Theoretisch sind verschiedene Gegenmassnahmen denkbar, um den ungünstigen Korrosionseinfluss der Betoneisen zu beheben; praktisch sind die Möglichkeiten leider aber sehr beschränkt. Dies gilt auch für Neuanlagen, wo man noch am ehesten erfolgreich eingreifen könnte. Man könnte versuchen:

- a) Materialien zu wählen, die kein derart positives (beziehungsweise wenig negatives) Potential entwickeln wie die normalen Betoneisen. Man könnte zum Beispiel feuerverzinkte Armierungen verwenden.
- b) Durch die Vermeidung metallischer Kontaktstellen könnte der Stromfluss vollständig unterbrochen werden.
- c) Verkleinert könnte der Korrosionsstrom dadurch werden, dass man die Armierung in viele kleine, nicht miteinander verbundene Felder zerlegen würde. Man könnte dazu Isolationsfolien an den Bundstellen und isolierte Bunddrähte verwenden.
- d) Würde man wieder vermehrt Gussrohre verwenden, so wären diese weniger gefährdet als die Stahlrohre, weil Guss ein ähnliches Potential annimmt wie die Betoneisen. Allerdings würde damit die Korrosionszone für Stahl und Blei noch erweitert.

de corrosion. Les objets métalliques à l'intérieur le sont également, dans la mesure où les conditions suivantes sont vérifiées:

- a) S'ils ne sont pas reliés métalliquement à l'armature du béton, les métaux doivent prendre un potentiel plus négatif. Tel est le cas, par exemple, lorsqu'une conduite d'acier est enrobée, pour une raison quelconque (isolation thermique), dans un matériau beaucoup moins alcalin que l'humidité du béton.
- b) La construction en danger doit être en contact métallique avec l'armature.
- c) Un circuit électrolytique sans discontinuité doit exister entre l'armature et la construction en danger. Etant donné que seul un matériau humide offre une conductibilité à peu près bonne, cette condition n'est remplie que lorsque les conduites sont placées dans un milieu humide. Tel est le cas dans les nouveaux bâtiments où les dégâts de ce genre se rencontrent le plus souvent.

8. Que faire ?

Théoriquement, on peut imaginer plusieurs mesures de protection contre les influences nuisibles de la corrosion due aux fers d'armature des constructions en béton armé. En pratique, malheureusement, les possibilités sont très limitées. Cette constatation est du reste valable également pour les nouveaux bâtiments, où il serait pourtant plus facile d'intervenir avec succès. On pourrait rechercher les palliatifs suivants:

- a) Choisir des matériaux pour réaliser les armatures, qui ne développent pas des potentiels aussi positifs (ou aussi peu négatifs) que le fer. On pourrait utiliser, par exemple, des fers zingués.
- b) Le flux de courant pourrait être complètement interrompu en évitant les contacts métalliques.
- c) Le courant de corrosion pourrait être réduit en posant les armatures par petits groupes, non reliés électriquement. A cet effet, on pourrait utiliser des feuilles et des fils isolants pour réaliser la ligature des fers.
- d) Le retour à une utilisation accrue de la fonte pour la fabrication des conduites diminuerait le danger de leur corrosion, ce métal prenant un potentiel analogue à celui des fers d'armature. Il est vrai que cette mesure entraînerait une extension de la zone de corrosion pour le plomb et l'acier.
- e) Les corrosions ne sont pas à craindre pour les matériaux non métalliques. En ce qui concerne les conduites métalliques protégées par une isolation de haute qualité, il est absolument nécessaire de veiller à la réparation soignée de tous les défauts de protection et à l'isolation de tous les manchons, raccordements soudés, vannes, etc.

- e) Keine Korrosionen sind natürlich bei nichtmetallischen Werkstoffen zu befürchten. Bei metallischen Leitungen mit hochwertigen Aussenisolationen ist es dagegen unbedingt nötig, dass alle Fehlerstellen sorgfältig nachisoliert werden, ebenso die Muffen, Schweissstellen, Schieber usw.
- f) Schliesslich bestünde die Möglichkeit, einen Betonblock durch eine isolierende Zwischenschicht von der Umgebung zu trennen. Dann wäre der Boden nicht mehr in elektrolytisch-leitender Verbindung mit dem Beton. Leider haben unsere bisherigen Messungen gezeigt, dass die Übergangswiderstände der Armierungen von isolierten Bauten trotzdem nur klein sind. Man sollte diese Möglichkeit aber noch genauer untersuchen.

Bei Altanlagen bleiben praktisch nur zwei Möglichkeiten, die natürlich auch bei Neuanlagen angewandt werden können:

- a) Begrenzte Abschnitte – zum Beispiel eine Brunnen-speisung – können durch Isoliermuffen den Potential-einflüssen entzogen werden. Dabei ist aber zu beachten, dass der zu schützende Abschnitt von der Umgebung vollständig isoliert sein muss, das heisst, es müssen so viele Isoliermuffen eingebaut werden, bis keine metal-lische Verbindung mit dem übrigen Netz mehr besteht.
- b) Man kann durch einen kathodischen Schutz das Beton-eisenpotential soweit absenken, dass nur noch aus der Hilfsanode Strom in den Elektrolyten austritt, sonst aber überall nur Strom aufgenommen wird. Der Schutzstrom wird durch eine korrosionsfeste Anode (Graphit, Si-Eisen) dem Boden zugeführt und zwar an einem Ort, der von den nächsten metallischen Elementen im Boden weit genug entfernt ist, damit diese nicht einen ge-fährlichen Anteil des Stromes aufnehmen und anderswo unter Korrosionserscheinungen wieder abgeben. In dichtbebauten Gebieten hat man häufig nur die Möglich-keit nach der Tiefe auszuweichen, eine an sich gute, aber sehr teure Lösung.

9. Schlussbemerkung

Betoneisen werden in Zukunft immer häufiger als Korrosionsursache auftreten und auch als solche erkannt werden. Erfolgversprechende Gegenmassnahmen bei Neubauten und die Sanierung älterer Anlagen setzen Kenntnisse über gewisse elektrochemische Vorgänge voraus, die die Baufachleute bis anhin nur wenig interessierten. Diese Grundlagen in einer möglichst einfachen, zusammenhängenden und auf die Praxis ausgerichteten Form darzustellen, war das Hauptanliegen dieser Arbeit. Denn mit dem Verständnis wächst das Interesse, und dieses ist wiederum die Voraussetzung für eine durchführbare Lösung des komplexen Problems. Sie zu finden, wird trotzdem nicht einfach sein.

- f) Finalmente, on pourrait envisager la possibilité de séparer un bloc de béton du milieu dans lequel il est placé en utilisant une couche intermédiaire isolante. Le sol ne serait alors plus en liaison conductrice électrolytique avec le béton. Les mesures que nous avons réalisées jusqu'ici ont malheureusement montré que la résistance de passage au sol des armatures isolées reste malgré tout faible. Il faudrait cependant examiner cette possibilité d'encore plus près.

Dans les installations existantes, il ne reste pratiquement que deux possibilités, qui peuvent naturellement être utilisées aussi dans les nouvelles constructions:

- a) Des sections limitées de réseaux de distribution d'eau – la conduite d'alimentation d'une fontaine par exemple – peuvent être soustraites à l'influence des potentiels en utilisant des manchons de raccordement isolants. Il faut cependant prendre garde au fait que la section à protéger doit être complètement isolée du reste du réseau, c'est-à-dire qu'il est indispensable de poser tous les manchons isolants nécessaires à la suppression d'un contact métallique quelconque avec le reste du réseau.
- b) La mise en place d'une protection cathodique permet de réduire le potentiel des fers d'armature à tel point que seule l'anode auxiliaire soit le siège d'un courant s'écoulant en direction de l'électrolyte, à l'encontre de toute autre construction métallique, qui reçoit du courant du milieu extérieur. Le courant de protection est délivré par une anode auxiliaire résistant à la corrosion enfichée dans le sol en un endroit suffisamment éloigné des éléments métalliques les plus proches, afin qu'ils ne puissent pas absorber une partie dangereuse du courant et la restituer ailleurs avec les effets de corrosion que cela implique. Dans les zones de grande densité de constructions, on est souvent contraint, pour remplir cette condition, de placer les électrodes auxiliaires à grande profondeur, ce qui représente une solution bonne en elle-même, mais très onéreuse.

9. Conclusions

A l'avenir, les fers d'armature seront toujours plus fréquemment la cause reconnue de corrosions. Appliquer avec succès des mesures de protection dans les nouveaux bâtiments, ou assainir des installations existantes, suppose la connaissance de certains phénomènes électro-chimiques, qui, jusqu'ici, n'ont que peu intéressé les spécialistes de la construction. Le but principal de cet exposé était de décrire certains principes aussi simplement que possible et sous une forme valable pour la pratique, car avec la compréhension croît l'intérêt. Cet intérêt qui est à la base de toute recherche d'une solution utilisable d'un problème complexe. Ne soyons pas dupes, trouver une telle solution ne sera toutefois pas facile.