

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 105 (1987)
Heft: 33-34

Artikel: Streustromschutzmassnahmen bei Boden- und Felsankern
Autor: Hunkeler, F. / Stalder, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76680>

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: 13.01.2026

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

Streustromschutzmassnahmen bei Boden- und Felsankern

Von F. Hunkeler und F. Stalder, Zürich

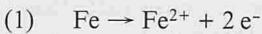
Streuströme von Gleichstrombahnen können in verschiedenen Gegenden der Schweiz an ganz unterschiedlichen Bauwerken wie Tunnel, Brücken, Rohrleitungen usw. festgestellt werden. Ob und wie schnell Schäden infolge Streustromeinwirkung eintreten, hängt von verschiedenen Faktoren wie Ausmass der Streustrombelastung, Art und erwartete Lebensdauer des Bauwerks, Bodenverhältnisse usw. ab. So ist es durchaus möglich, dass Schäden im einen Fall schon nach wenigen Jahren eintreten (kleine, dünnwandige Rohre), während dazu im andern Fall Jahrzehnte verstreichen können (armierter Beton).

Im folgenden werden grundsätzliche Überlegungen zur Streustromgefährdung und zum Streustromschutz von permanenten Boden- und Felsankern angestellt. Anhand eines aktuellen Beispiels, nämlich der Anker der Pfahlwand im Bahnhof Stadelhofen in Zürich, werden die Schutzmassnahmen und deren Kontrollmöglichkeit ausführlich diskutiert.

Grundlagen der Streustromkorrosion

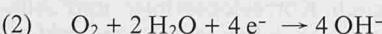
Die Korrosion von Eisen im Erdboden oder im Beton ist ein elektro-chemischer Vorgang, ein Redoxvorgang, der in zwei getrennten Teilschritten abläuft.

An der Anode findet als anodische Teilreaktion die Oxidation des Metalls, hier die Eisenauflösung, statt:

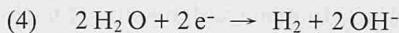


Das Potential, bei dem sich diese Reaktion unter normalen Umständen im Gleichgewicht (d.h. Auflösung und Abscheidung gleich gross und daher keine Korrosion) befindet, wird *Gleichgewichtspotential* genannt und hat für Eisen/Stahl unter praktischen Bedingungen einen Wert von $-0,98 \text{ V}_{\text{CSE}}$ (Der Index CSE steht für die Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode).

An der Kathode erfolgt die *kathodische Teilreaktion*. Dabei werden entweder der im umgebenden Elektrolyten (Boden, Beton, Wasser usw.) gelöste Sauerstoff gemäss Gleichung (2) oder, in saurem Milieu, Wasserstoffionen (Protonen) gemäss Gleichung (3) reduziert.



In sauerstofffreien Elektrolyten oder bei hohen Stromdichten an der Kathode (bei sehr negativen Potentialen) wird auch Wasser gemäss Gleichung (4) reduziert, d.h. zersetzt (Wasserelektrolyse).



Die Gleichgewichtspotentiale der kathodischen Teilreaktionen sind praktisch nur vom pH-Wert des umgebenden Elektrolyten abhängig.

Bei der normalen Korrosion von Eisen/Stahl sind die anodischen und kathodischen Bereiche auf der Metallocberfläche nahe beieinander, d.h. die Anoden und Kathoden sind kurzgeschlossen. Das Potential, das sich in diesem Fall einstellt, liegt zwischen den Gleichgewichtspotentialen der anodischen und kathodischen Teilreaktionen und wird *Korrosionspotential* genannt. Wie aus der Tabelle 1 hervorgeht, ist das Korrosionspotential von Stahl stark von der Art der Umgebung abhängig.

Durch den *Einfluss von Streuströmen* kann nun dieses an sich konstante Korrosionspotential sowohl in die negative (kathodische) wie auch in die positive (anodische) Richtung verschoben werden.

Man spricht dann von kathodischer und anodischer Polarisation eines Metalls.

Die klassische Form der Streustromproblematik tritt bei Gleichstrombahnen auf, die als Stromrückleitung zum speisenden Gleichtrichter die Schienen benützen. Das Erdreich mit allen seinen erdvergraben, metallischen Strukturen ist zu den Schienen elektrisch parallel geschaltet, so dass entsprechend der Widerstandsaufteilung auch eine Aufteilung der Rückströme erfolgt. Ein Teil des gesamten Rückstromes tritt daher von den Schienen in das umgebende Erdreich aus und fliesst als Streustrom durch den Erdboden zum Gleichtrichter zurück (Bild 1). Bieten sich dabei auf diesem Rückweg ausgedehnte, niederohmige, metallische Strukturen als elektrische Leiter (Armierungseisen, Rohrleitungen usw.) an, so tritt ein Teil des Streustromes in diese Strukturen ein, um erst wieder in der Nähe des Gleichtrichters aus ihnen auszutreten und über den Erdboden zu den Schienen zurückzukehren.

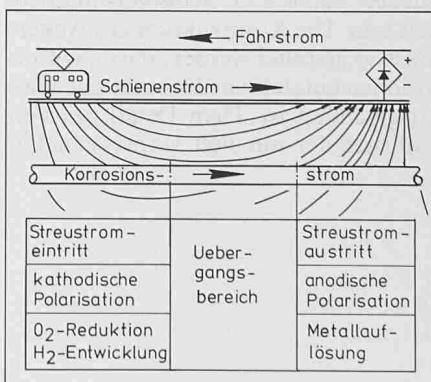
Gefährdung durch Streustromaustritt

Beim Streustromaustritt findet die anodische Teilreaktion gemäss Gleichung (1) statt. Dabei wird das Korrosionspotential zu positiveren Werten angehoben, was über Potentialmessungen leicht nachgewiesen werden kann. Im Gegensatz zur normalen Korrosion von Eisen bildet sich unter diesen Umständen am Ort des Angriffs keine den Korrosionsprozess verlangsamen Korrosionsprodukte.

Gemäss der Richtlinie C 3, «Richtlinie zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen» der Korrosionskommission [2] gelten für Eisenwerkstoffe folgende Höchstwerte für die mittlere positive Beeinflussung als unkritisch:

- Stahl in gesundem Beton + 500 mV
- Stahl in Erdboden + 50 mV
- Gusseisen in Erboden + 100 mV

Bild 1. Entstehung und Wirkung von Streuströmen aus Gleichstrombahnen auf eine Leitung



| | |
|---|---|
| Stahl in gesättigter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung | bis $-1.1 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in gesundem, wassergesättigtem, sauerstoff-freiem Beton | bis $-1.1 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in gesundem, feuchtem, sauerstoffhaltigem Beton | 0 bis $-0.3 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in chloridverseuchtem, feuchtem, sauerstoffhaltigem Beton | bis $-0.6 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in karbonatisiertem Beton | -0.2 bis $-0.5 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in anaeroben Böden | bis $-0.95 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in Lehm | -0.65 bis $-0.8 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in Mischböden | -0.5 bis $-0.6 \text{ V}_{\text{CSE}}$ |
| Stahl in gewaschenem Sand oder Betonkies | -0.4 V_{CSE} |

Der für Stahl im Beton zugelassene Wert ist deshalb so hoch, da Eisen in gesundem Beton eine schützende Oxidschicht aufweist. Bei chloridverseuchten bzw. rissigem Beton hingegen, oder wenn beispielsweise bei Ankern die Injektion mit Mörtel oder Fett nicht vollständig ist, erhöht natürlich jegliche anodische Polarisation die Auflösungsgeschwindigkeit des Stahls. Bei gespannten Ankern kann dies zu einer erleichterten Rissbildung und zu einem beschleunigten Risswachstum bei den Spanndrähten (spannungsüberhöhende Wirkung der Angriffsstelle, Spannungsrißkorrosion) und damit zu einem vorzeitigem Versagen des Ankers führen. Schon «Korrosionsnarben» von wenigen Zehnteln mm Tiefe können unter Umständen Spannungsrißkorrosion auslösen [3].

Gefährdung durch Streustromeintritt

Beim Streustromeintritt erfolgt die kathodische Teilreaktion. Ist das Sauerstoff-Angebot in neutralem oder alkalischen Milieu ausreichend, so läuft die kathodische Reaktion gemäß Gleichung (2) ab. Ist das Sauerstoff-Angebot jedoch zu klein bzw. die Nachlieferung zu langsam (hohe Stromdichte an der Kathode) wird auch Wasser gemäß Gleichung (4) zersetzt. Dabei wird das Korrosionspotential zu negativeren Werten verschoben, oder mit anderen Worten, das Metall wird kathodisch polarisiert. Aus der Art der Reaktionsprodukte, die beim Streustromeintritt entstehen, lässt sich die Art Gefährdung von Eisenwerkstoffen ableiten. Erfolgt der Übergang des Streustromes vom Erdreich in die metallische Struktur vornehmlich gemäß Gleichung (2), so bewirkt dies an der Metallocberfläche einen pH-Anstieg. Für Eisenwerkstoffe ist dies eher ein günstiger Effekt. Läuft der Streustromeintritt aber über Gleichung (4) ab, so entsteht Wasserstoff, der bekanntlich bei hochfesten Werkstoffen zur Wasserstoffversprödung und damit zum plötzlichen Versagen eines Bauteils führen kann. Diese Gefahr besteht insbesondere bei hochfesten Stählen, wie sie auch für Fels- und Bodenanker verwendet werden.

Über die maximal zulässige kathodische Polarisation von hochfesten Stählen im Erdboden oder Beton gibt es *keine anerkannten Grenzwerte* weder hinsichtlich des Potentials noch hinsichtlich der kathodischen Stromdichte.

Neuere Laboruntersuchungen an hochfesten Stählen in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösungen (simulierte Bedingungen von Stahl in Beton, wie sie auch bei mit Zementmörtel ausinjizierten Ankern vorhanden sind), haben jedoch gezeigt, dass bei negativeren Potentialen als etwa -0,98

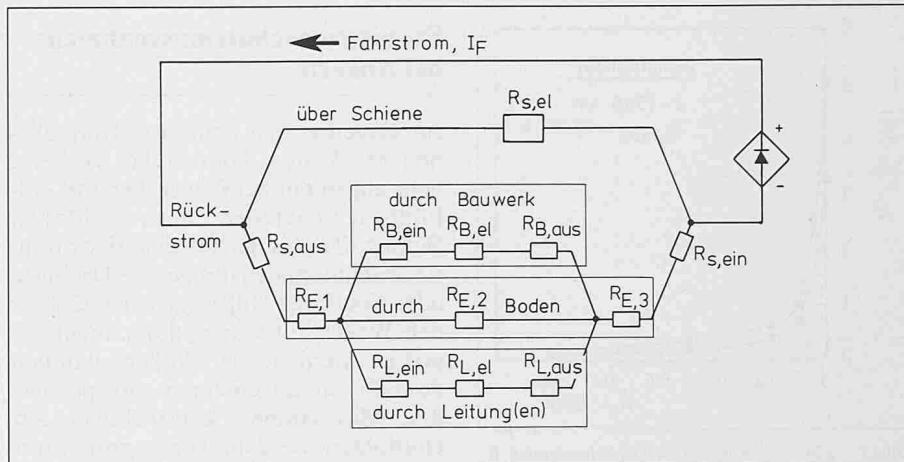


Bild 2. Vereinfachtes Prinzipschema des Streustromflusses von den Schienen (Index S) durch ein Bauwerk (Index B), eine Leitung (Index L) und durch die Erde (Index E). Die Aus- bzw. Eintrittswiderstände sind mit R_{aus} bzw. R_{ein} , die Widerstände der elektrischen Leitung mit R_{el} gekennzeichnet. Die elektrochemischen Widerstände R_{aus} und R_{ein} verhalten sich nicht rein ohm'sch

V_{CSE} mit Wasserstoffversprödung gerechnet werden muss [4]. Gemäß einer älteren Arbeit [5] liegt die Grenze für das Auftreten von Wasserstoffversprödung allerdings eher etwas tiefer und ist stark von der angelegten Zugspannung abhängig. Bei tieferen, d.h. bei neutralen bis sauren pH-Werten des umgebenden Milieus (hochfester Stahl in Kontakt mit Erdreich oder Wasser) verschiebt sich diese Grenze zu positiveren Werten. Dies gilt vor allem dann, wenn sogenannte Promotoren für die Wasserstoffversprödung wie Schwefelwasserstoff u.a. in der Umgebung des Stahles vorhanden sind [6].

Auch im Hinblick auf die kathodische Stromdichte deuten Laborversuche an, dass ein Grenzwert existiert, oberhalb dem Spannstähle verspröden [7]. Dieser Grenzwert ist stark vom pH-Wert des umgebenden Milieus abhängig. Er liegt in schwach sauren bis neutralen, schwefelwasserstoff-haltigen Lösungen im Bereich von 0,01 bis 1 A/m² [7].

Neben der Wasserstoffversprödung von hochfesten Bauteilen ist die Wasserstoffentwicklung generell dem Verbund Eisen/Beton abträglich, wie im Zusammenhang mit dem kathodischen Schutz von Armierungseisen im Beton festgestellt wurde [8,9]. Bezüglich des kathodischen Schutzes wird deshalb empfohlen, negativere Potentiale als -1,1 V_{CSE} zu vermeiden. Dieser Wert liegt nur unwesentlich tiefer als das für diese Bedingungen gültige Gleichgewichtspotential für die Wasserstoffentwicklung von -1,06 V_{CSE}.

Aus den obigen Erkenntnissen muss daher gefolgt werden, dass negativere Potentiale als etwa -0,95 V_{CSE} vermieden werden sollten. Nun ist es aber so, dass das Korrosionspotential von Stahl in sauerstoffarmem Beton oder von Spanndrähten bei Ankern in sauerstoffarmen Böden auch ohne Streustrombelastung diesen Grenzwert annehmen

kann (s. Tabelle 1). Da das Korrosionspotential eines Ankers in der Tiefe (Verankerungskörper) messtechnisch nicht erfasst werden kann, und in der Regel über die Sauerstoffkonzentration in tieferen Schichten des Erdreiches keine Angaben erhältlich sind, muss hinsichtlich der Vorsichtsmaßnahmen vom negativsten möglichen Korrosionspotential, d.h. also vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden. Demzufolge muss es das grundsätzliche Ziel sein, eine zusätzliche kathodische Polarisation durch Streustromeintritte bei Fels- und Bodenankern soweit wie möglich zu verhindern.

Streustrombelastung von Bauwerken mit Ankern

Der Streustromfluss durch ein Bauwerk ist von vielen, teilweise seriell, teilweise parallel geschalteten Widerständen abhängig, wie aus dem stark vereinfachten Prinzipschema in Bild 2 hervorgeht. Einige der in Bild 2 eingezeichneten Widerstände verhalten sich nicht rein ohm'sch, sondern sind spannungsabhängig. Eine allgemein gültige Beziehung zwischen diesen Größen herleiten zu wollen ist aussichtslos.

Das Ersatzschaltbild in Bild 2 ergibt aber wichtige qualitative Hinweise zur Beurteilung der Streustromgefährdung. So ist es ohne weiteres einsehbar, dass falls der totale Bauwerkswiderstand (= Summe der Teilwiderstände) zunehmend kleiner wird – der Streustromfluss nicht linear, sondern exponentiell zunimmt. Messungen an einer Wasserleitung bestätigen diese Folgerung (Bild 3).

Der Bauwerkswiderstand ist umgekehrt proportional zur Grösse des Bauwerks und direkt proportional zum Bodenwiderstand. Die Streustromgefährdung

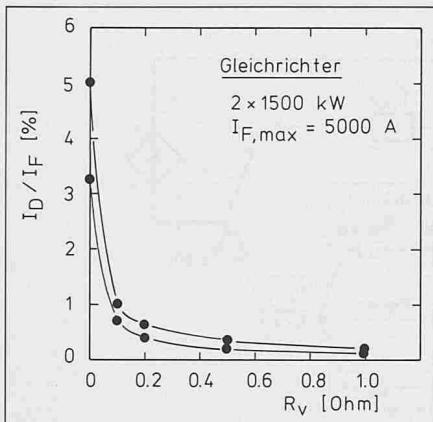


Bild 3. Einfluss eines Vorschaltwiderstandes R_V auf den Streustromfluss bei einer gerichteten Streustrom-Drainage in Oerlikon (I_D = Drainagestrom, I_F = Fahrstrom aus Gleichrichter). Bei einer Streustrom-Drainage werden die Widerstände R_B , aus bzw. R_L , aus und R_E , 3 sowie R_S , ein (s. Bild 2) durch einen niederohmigen elektrischen Leiter überbrückt (siehe [10])

von Ankern nimmt daher mit der Grösse des Bauwerkes tendenziell rasch zu.

Die Streustrombelastung einzelner Ankern wird zudem von der Anzahl der versetzten Ankern beeinflusst. Ankern sind elektrisch gesehen wie Antennen und stellen für den Streustromfluss einen zum Erdboden parallel geschalteten Strompfad vom Ankerfuß bis zur Armierung des Bauwerks dar. Daraus ist es unmittelbar verständlich, dass mit zunehmender Ankerlänge und Ankerdichte (Anzahl Ankern pro Flächeneinheit) die Streustrombelastung sowohl des gesamten Bauwerks wie auch der einzelnen Ankern tendenziell mit der Zahl der Ankern zunimmt. Abschätzungen haben ergeben, dass ab einem Verhältnis von Bauwerkswiderstand/Ankerwiderstand $> 10^{-3}$ der Einfluss der Zahl der Ankern nicht mehr relevant ist.

Es sei hier nur am Rande vermerkt, dass Bauwerksabdichtungen, z.B. gegen Grundwasser, den Bauwerkswiderstand u.U. drastisch erhöhen.

Streustromschutzmassnahmen bei Ankern

Im Gegensatz zu andern erdvergraben Strukturen können bei Ankern, oder allgemein bei Bauwerken mit erdfühligen Bauteilen aus hochfesten Werkstoffen, in der Regel aktive Streustromschutzmassnahmen wie Drainage oder Soutirage [10] wegen der Gefahr der Wasserstoffversprödung nicht ergriffen werden. Bei Ankern können deshalb im allgemeinen nur passive, d.h. Massnahmen konstruktiver Art empfohlen werden. Diese *präventiven Schutzmassnahmen* müssen primär darauf abzielen, den Ankerwiderstand zu vergrössern. Der Bauwerkswiderstand kann in der Regel kaum verändert werden.

Um die Wirkung verschiedener, passiver Massnahmen besser beurteilen zu können, soll zunächst der Widerstand eines Ankern, R_A , genauer betrachtet werden. Er hängt von sehr verschiedenen, teilweise in einem weiten Bereich beeinflussbaren Teilwiderständen (R_2 bis R_5) ab. In der Tabelle 2 sind die verschiedenen Widerstände definiert und in Bild 4 eingezzeichnet. Aus Gleichung (5) geht hervor, wie R_A von diesen Teilwiderständen abhängig ist.

$$(5) \quad R_A = R_2 + (R_3^{-1} + R_4^{-1} + R_5^{-1})^{-1}$$

Im Extremfall, d.h. nackter Anker im Erdreich (Staberder), ist R_A nur von der Bodenleitfähigkeit, σ (= reziproker Bodenwiderstand), und von der Länge des Ankern, l_A , gemäss Gleichung (6) abhängig.

$$(6) \quad R_A = R_1 \sim (\sigma l_A)^{-1}$$

Selbstverständlich könnten die verschiedenen Teilwiderstände noch weiter aufgeteilt werden. Dies ist hier aber nicht notwendig.

Um die Streustromgefährdung von Ankern zu reduzieren, empfiehlt sich als erste Massnahme, über eine geegnete Abschirmung des Ankern den Widerstand R_2 zu erhöhen. Dies kann mit einem isolierend wirkenden äusseren Hüllrohr aus Kunststoff geschehen (= Anker mit doppeltem Korrosionsschutz). Um eine gute Abschirmung zu erreichen, darf das Hüllrohr aber keine Verletzungen aufweisen, da der Widerstand R_2 mit zunehmendem Durchmesser der Fehlstelle, D , und mit zunehmender Bodenleitfähigkeit, σ , gemäss Gleichung (7) sowie mit der Zahl der schadhaften Stellen abnimmt.

$$(7) \quad R_2 = (2 \sigma D)^{-1}$$

Die Forderung nach einem einwandfreien Hüllrohr dient gleichzeitig dazu, das Verwässern und Ausschwemmen sowie das Abfliessen des Korrosionsschutzfettes im Bereich der freien Ankerlänge zu verhindern [1].

Ein weitere Massnahme betrifft den *Ankerkopf* mit Ankerplatte. Dieser kann vom äusseren Ankerstutzen, und damit von der *Armierung des Bauwerks elektrisch isoliert* werden (s. Bild 4).

Hierfür ist eine Zwischenlage aus elektrisch nicht leitendem, druckfestem, gut haftendem und alkalibeständigem Material zu verwenden. Besondere Beachtung muss dem Wasseraufnahmevermögen einer solchen Zwischenlage geschenkt werden. Erhöhte Wassergehalte verschlechtern nämlich den Isolationswert drastisch. Mit dieser Massnahme soll ein Übertreten der Ströme vom Anker in das Bauwerk und umgekehrt möglichst unterbunden werden.

Gleichzeitig ist diese Massnahme auch wirksam gegen Makroelementströme zwischen Bauwerksarmierung und Anker im Ankerkopfbereich.

Tabelle 2. Widerstände bei einem Bauwerk mit Ankern, deren Werte und Einflussgrössen

| Widerstand | Wert | Einflussgrössen |
|---|--|--|
| R_B : Übergangswiderstand von armierten Bauwerken | 10^{-3} bis 10Ω | Fläche des erdfühligen, armierten Betons, Boden- und Betonwiderstand |
| R_1 : Übergangswiderstand nackter Anker im Erdreich | 0.1 bis 10Ω | Länge des Ankern, Bodenwiderstand |
| R_2 : Übergangswiderstand des Ankern auf der freien Ankerlänge und in der Verankerungszone: | | |
| ohne Hüllrohr aus PE | 1 bis 10Ω | Fläche des nackten Stahles, Art und Grösse der Verletzung des Hüllrohrs, Bodenwiderstand |
| mit Hüllrohr aus PE: - unverletzt, wassererdicht | 0.1 bis $> 200 \text{ M}\Omega$ | |
| - verletzt, nicht wassererdicht | 10^{-2} bis $100 \text{ k}\Omega$ | |
| R_3 : Widerstand zwischen Ankerkopf/Bauwerksarmierung | | |
| ohne elektrische Isolation | 0 Ω | Art, Grösse der Verletzung, Wassergehalt |
| mit elektrischer Isolation: - unverletzt | $> 100 \text{ k}\Omega$ | |
| - verletzt | 0 bis 100Ω | Fläche des nackten Stahles, Leitfähigkeit des Betons, Abstand zwischen den Stutzen |
| R_4 : Widerstand zwischen innerem und äusserem Ankerstutzen | 1 bis 10Ω | |
| R_5 : Widerstand zwischen Ankerkopf mit Platte (und, falls vorhanden, mit Schutzdeckel) und Bauwerksarmierung überdeckt, zubetoniert nicht überdeckt, nicht zubetoniert | 10 bis 100Ω $> 200 \text{ M}\Omega$ | Fläche des nackten Stahles, Betonwiderstand, Betonüberdeckung |

Streustromsituation beim Bahnhof Stadelhofen

Gemäss der Schweizerischen Verkehrsstatistik wiesen 1983 die städtischen Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich einen Gleichstromverbrauch von rund 57 Mio. kWh auf. Verglichen mit dem schweizerischen Gesamtverbrauch ist diese Zahl sehr hoch und entspricht annähernd 40% des mittleren schweizerischen Gleichstromes. Die erdvergrabenen, metallische Strukturen in der Stadt Zürich sind daher vergleichsweise einer sehr grossen Streustrombelastung ausgesetzt. Ein beredtes Zeugnis davon sind die vielen Schäden am Gas- und Wasserleitungsnetz, die direkt oder indirekt durch Streuströme verursacht werden [10].

Um in einem bestimmten Gebiet die Streustromsituation richtig zu beurteilen, ist es notwendig, sowohl die Standorte, die Leistung und die Speisepunkte der Gleichrichter sowie die Anschlusspunkte der Rückleiterkabel als auch die Schienenführung zu kennen. Mit in die Betrachtung einbezogen werden müssen im weiteren grössere zusammenhängende metallische erdvergrabene Strukturen wie Erdungsanlagen oder Leitungen, Tunnel, grössere Gebäude usw. Oftmals erlauben nur direkte Messungen detailliertere Aussagen bezüglich der Streustromgefährdung und der zu ergreifenden Schutzmassnahmen.

Bild 5 zeigt schematisch die Situation um den Bahnhof Stadelhofen nach der Fertigstellung der S-Bahn. Daraus geht hervor, dass die Pfahlwand im Einzugsbereich des Gleichrichters «Hohe Promenade», eines der stärksten Gleichrichters der Stadt, liegt. Sie ist elektrisch an das SBB-Schienennetz und an die Armierung der verschiedenen Tunnel angekoppelt. Aufgrund ihrer relativen Lage zum Gleichrichter bzw. zu den Rückleiteranschlusspunkten kann davon ausgegangen werden, dass im Bereich des Bahnhofs Stadelhofen Streuströme in die Pfahlwand und in die Schienen der SBB eintreten und in der Nähe des Gleichrichters bzw. bei Kreuzungspunkten des SBB- mit dem VBZ-Schienennetz (Rämistrasse usw.) wieder austreten. Im Rahmen der Untersuchungen hinsichtlich der Streustromschutzmassnahmen am Gas- und Wasserleitungsnetz konnte dieser Streustromfluss auch durch Messungen bestätigt werden.

Daraus ergibt sich, dass die Felsanker der Pfahlwand (rund 900 Stück mit einer Länge von etwa 25 bis 40 m) im Bahnhof Stadelhofen durch eintretende Streuströme bzw. durch kathodische

Polarisation als gefährdet zu betrachten und daher dementsprechend zu schützen waren.

Aufgrund dieser Beurteilung hat sich die Projektleitung für den Einsatz eines äusseren Hüllrohres aus Polyäthylen (doppelter Korrosionsschutz) entschieden. Um sicherzustellen, dass die Hüllrohre nach dem Versetzen keine grösseren Verletzungen aufwiesen, wurde eine Kontrolle jedes einzelnen Ankers angeordnet. Als Kriterium wurde ein Übergangswiderstand von $100\text{ k}\Omega$ festgelegt. Für den Fall, dass dieser Wert nicht erreicht werden konnte, wurde die elektrische Isolation des Ankerkopfes von der Bauwerksarmierung gefordert (vgl. Bild 4). Für diese Isolation, die einen direkten metallischen Kontakt zwischen Ankerkopfplatte und äusserem Ankerstutzen, und damit zur Armierung des Bauwerks, zu verhindern hat, wurde ein Übergangswiderstand von $10\text{ }\Omega$ festgelegt.

Zum Schutz der Tunnelarmierung gegen Korrosion durch austretenden Streuströme sind an dafür kritischen Stellen gerichtete Streustrom-Drainagen vorgesehen.

Kontrolle der elektrischen Isolation

Die Widerstandsmessung an den versetzten, ungespannten Ankern im Bahnhof Stadelhofen erfolgte nach der Ausinjektion und, nachdem das Bohrrohr gezogen worden war, jedoch von der Ausinjektion des Ankerkopfbereiches.

Von den ersten versetzten Ankern (Juni/Julii 1985) erreichten nur etwa 40% den geforderten Isolationswert von 100 k Ω . Nach dem Ausbau von Ankern mit ungenügenden Werten vor der Ausinjektion wurden Schäden (Risse und Löcher) im Bereich des Übergangs vom gewellten zum glatten Hüllrohr (Übergang Verankerungszone zur freien Ankerlänge) und am Ankerfuss beobachtet. Diese Schäden entstanden wahrscheinlich sowohl beim Transport wie auch beim Versetzen der Anker (vgl. auch [1]).

Weiter wurde festgestellt, dass der Isolationswert der Hüllrohre von Ankern, welche den Spannversuch nicht bestanden, zu über 50% ungenügend war.

Verschiedene Verbesserungen führten schliesslich dazu, dass über 90% der versetzten Anker dem geforderten Isolationswert für das Hüllrohr genügten. In den Monaten Dezember bis Februar 1985/86 sackte diese Erfolgsquote etwas ab. Schwierige Bodenverhältnisse und vermutlich die kalte Witterung (Ver-

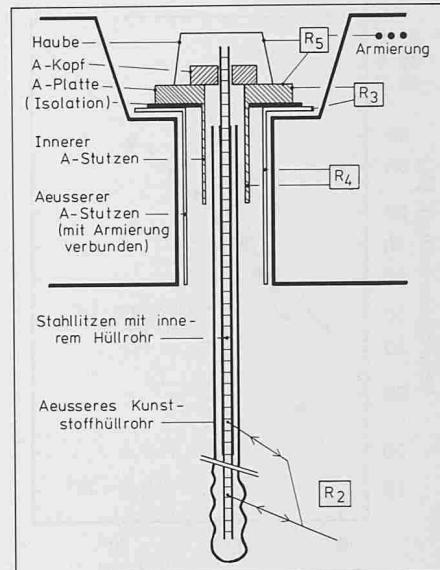
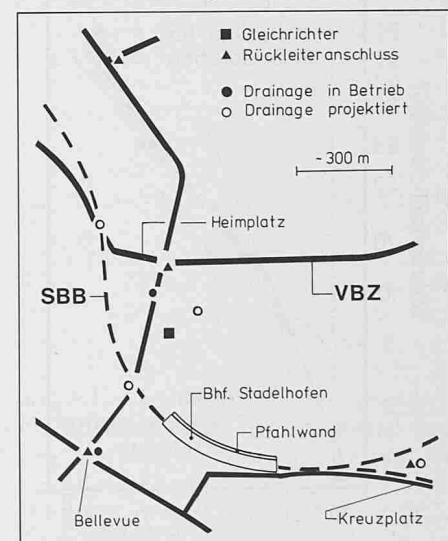


Bild 4. Prinzipieller Aufbau eines Ankers und dessen wichtigste Teilwiderstände (siehe dazu Tabelle 2 und 3)



sprödig von Polyäthylen), aber auch wahrscheinlich eine längere Kontrolle sind mögliche Gründe hierfür. Von den beinahe 800 untersuchten Ankern wiesen:

- rund 75% einen Widerstand von $>200\text{ M}\Omega$
 - rund 6 % einen Widerstand von 0,1 bis 100 M Ω
 - rund 19 % einen Widerstand von $<0,1\text{ M}\Omega$

auf. Insgesamt waren also etwa 140 Anker ungenügend und mussten mit einer Ankerkopfisolierung versehen werden.

Die nachfolgende statistische Analyse hilft diese Resultate besser zu interpretieren und erlaubt, die vor der Ausführung festgelegten Grenzwerte kritisch zu beurteilen. Die Weibullstatistik [11] ist hierfür geeignet. Sie erlaubt, verschiedene Fehlerarten und deren Häufigkeitsverteilung zu erkennen.

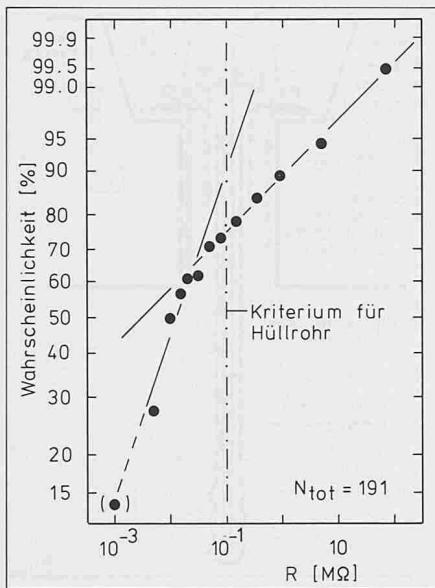
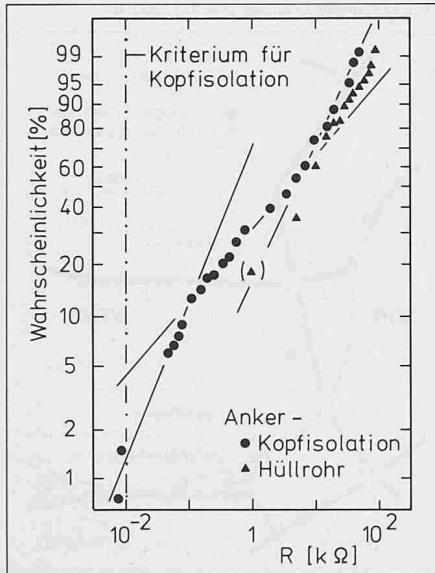


Bild 6. Weibullstatistik des Widerstandes des äusseren Hüllrohres aus Polyäthylen

Bild 7. Weibullstatistik der Ankerkopfisolation



Hüllrohr

Bild 6 zeigt die Weibullstatistik für die Hüllrohre von Ankern mit Widerständen $< 100 \text{ M}\Omega$. Daraus ist ersichtlich, dass zwei unterschiedlich geneigte Geraden, also zwei verschiedene Fehlerarten in den versetzten Hüllrohren auftreten.

Die gravierendere Fehlerart, vermutlich Risse oder Löcher, weist eine enge Häufigkeitsverteilung auf (1 1/2 Dekaden) und reduziert den Isolationswert auf Werte, die unterhalb von rund 50 $\text{k}\Omega$ und damit unterhalb der geforderten Grenze von 100 $\text{k}\Omega$ liegen. Als grobes Mass kann aus Gleichung (7) die Grösse der schlimmsten Verletzungen des Hüllrohres abgeschätzt werden. Unter der Annahme eines Boden- bzw. Betonwiderstandes von 100 Ω ergibt dies Löcher mit Durchmessern von mehreren Zentimetern.

Die andere Art Fehler, möglicherweise ein nicht ganz einwandfreier Verbund zwischen gewelltem und glatten Teil des Hüllrohres, haben Widerstände zur Folge, die in weiten Grenzen (über 3 1/2 Dekaden) variieren. Wie aus Bild 6 hervorgeht, kann diese Fehlerart auch zu Widerständen $> 200 \text{ M}\Omega$ führen. Dabei kann nicht mehr differenziert werden, ob in der Tat absolut keine Fehler vorhanden sind oder nicht.

Aus dieser Sicht ist das vor Ausführungsbeginn festgesetzte Kriterium von 100 $\text{k}\Omega$ als ausreichend zu betrachten.

Ankerkopfisolation

Die gleiche Art der statistischen Betrachtung kann auch für die Ankerkopfisolation durchgeführt werden. Bild 7 zeigt, dass in diesem Falle drei Geraden mit unterschiedlicher Steigung auftreten.

Die schwerwiegendsten Schwachstellen der Ankerkopfisolation führen zu Widerständen, die unterhalb von etwa 100 Ω liegen. Die zweite Art Fehler ergibt Widerstände über 100 Ω . Die dritte Gerade im obersten Bereich ist, wie der Vergleich zeigt, durch den Widerstand des Hüllrohres und nicht durch die Ankerkopfisolation bestimmt. Dieser Befund ist nicht überraschend, da bei der Kontrollmessung Ankerkopf- und Hüllrohrwiderstand, elektrisch gesehen, parallel geschaltet sind (in Wirklichkeit sind diese Widerstände in Serie, wie aus Gleichung (5) ersichtlich).

Die obige Diskussion führt zur Erkenntnis, dass das für die Ankerkopfisolation festgesetzte Kriterium von 10 Ω als zu tief zu betrachten ist. Gemäss Bild 7 hätte ein Wert von 100 Ω gefordert werden müssen, um grobe Fehler in der Isolation zu eliminieren. Es ist anzunehmen, dass dieser Wert von der Art des Isolationsmaterials abhängig ist.

Beurteilung der Streustrom-Schutzmassnahmen

In der Tabelle 2 sind die Grenzwerte für die einzelnen Teilwiderstände eines Ankers aufgeführt, wie sie aus Messungen an Ankern im Bahnhof Stadelhofen und Museumsstrasse hervorgegangen sind (R_2 bis R_4). R_5 wurde rechnerisch abgeschätzt. Für Bauwerke ist in dieser Tabelle ein Widerstandsbereich angegeben.

Die Gleichung (5) erlaubt nun auf einfache Art die einzelnen Schutzmassnahmen zu beurteilen. In der Tabelle 3 sind die verschiedenen möglichen Fälle zusammengefasst.

Tabelle 3. Widerstand eines einzelnen Ankers gegen Streustromfluss

| Fall | Bemerkungen | Annahme(n) | Widerstand, R_A | Gefährdung durch Streuströme |
|------|--|--|--------------------------------------|--|
| 1 | Anker ohne Hüllrohr aus PE und ohne Ankerkopfisolation | $R_3 = 0$ | $= R_2$ | Ankerfuss, und Übergang zu freier Ankerlänge |
| 2.1 | Anker ohne Hüllrohr aus PE, aber mit intakter Ankerkopfisolation | $R_3 \gg R_2, R_4$ $R_5 \gg R_4$ | $= R_2 + R_4$ | wie 1 und innerer und äusserer Ankerstutzen |
| 2.2 | Anker ohne Hüllrohr aus PE, aber mit verletzter Ankerkopfisolation | $R_5 \gg R_4$ | $= R_2 + (R_3^{-1} + R_4^{-1})^{-1}$ | $R_3 = 0$; wie 1 $R_3 \gg R_4$; wie 2.1 $R_4 \gg R_3$; wie 1 und Ankerplatte und -stutzen |
| 3.1 | Anker mit intaktem Hüllrohr aus PE, und ohne Ankerkopfisolation | $R_3 = 0$ $R_2 \gg R_4, R_5$ | $= R_2$ | keine |
| 3.2 | Anker mit verletztem Hüllrohr aus PE, und ohne Ankerkopfisolation | $R_3 = 0$ | $= R_2$ | wie 1 |
| 4.1 | Anker mit intaktem Hüllrohr aus PE und mit intakter Ankerkopfisolation | $R_2 \gg R_4, R_5$ $R_3 \gg R_4, R_5$ | $= R_2 + R_3$ | keine |
| 4.2 | Anker mit intaktem Hüllrohr aus PE, aber mit verletzter Ankerkopfisolation | $R_2 \gg R_3$ | $= R_2$ | keine |
| 4.3 | Anker mit verletztem Hüllrohr aus PE, aber mit intakter Ankerkopfisolation | $R_3 \gg R_2$ $R_5 \gg R_4$ | $= R_2 + R_4$ | wie 2.1 |
| 4.4 | Anker mit verletztem Hüllrohr aus PE und mit verletzter Ankerkopfisolation | $R_5 \gg R_4$ | $= R_2 + (R_3^{-1} + R_4^{-1})^{-1}$ | wie 2.2 |

Daraus geht zum einen hervor, dass eine noch so gute Ankerkopfisolation grobe Fehlstellen im Hüllrohr nicht kompensieren kann; mit andern Worten: der Schutz gegen Streuströme wird vorab durch die Qualität des versetzten Hüllrohres bestimmt (R_2).

Zum andern ist aus der Tabelle 3 ersichtlich, dass die Isolation des Ankerkopfes u.U. zur verstärkten Korrosion an den Ankerstutzen führen kann. Dies ist sicher dann unerwünscht, wenn der innere Ankerstutzen die Spanndrähte und natürlich das Bauwerk selbst gegen eindringendes Wasser von aussen abschirmen sollte. Zum Schutze der Anker gegen Streuströme sollte deshalb der Ankerkopf nur bei gleichzeitigem Einsatz eines möglichst intakten Hüllrohres isoliert werden. Als Alternative zur Verwendung eines Hüllrohres, falls diesem nicht noch weitere Schutzfunktionen zukommt, käme allenfalls eine alkalibeständige, porenfreie Beschichtung der Ankerstutzen in Frage. Demgegenüber ist bei Abwesenheit von Streuströmen die Ankerkopfisolation auch ohne äusseres Hüllrohr als Schutzmaßnahme gegen Korrosion durch Makroelementströme im Ankerkopfbereich sehr zu empfehlen.

Zusammenfassung

Mit einer gewissen Streustromgefährdung von erdvergraben, metallischen Strukturen durch Gleichstrombahnen muss auch in Zukunft gerechnet werden. Während die meisten bahnfremden Strukturen hauptsächlich durch Streustromaustritte gefährdet werden können, besteht bei permanenten Fels- und Bodenankern zusätzlich die Gefahr der Wasserstoffversprödung der Spanndrähte durch Streustromeintritte.

Theoretische Überlegungen zeigen klar, dass unter gewissen Bedingungen,

Die Resultate der Widerstandsmessungen an den Hüllrohren der Anker im Bahnhof Stadelhofen wurden uns freundlicherweise von der Firma Paul Keller Ingenieurbüro AG, Hochbordstr. 9, 8600 Dübendorf, für die statistischen Analyse zur Verfügung gestellt. Dafür möchten wir uns herzlich bedanken.

d.h. hohe Streustrombelastung im Bereich des Bauwerkes und ungünstigen Widerstandsverhältnisse, Anker durch Streuströme sehr stark gefährdet sein können.

Permanent-Anker können und müssen daher vor Streustromeinwirkungen durch konstruktive Massnahmen geschützt werden. Geeignet hierfür sind ein Hüllrohr aus Polyaethylen und die elektrische Isolation des Ankerkopfes vom äusseren Ankerstutzen bzw. von der Bauwerksarmierung.

Die statistische Analyse der Resultate der Widerstandsmessungen an den Ankern der Pfahlwand im Bahnhof Stadelhofen in Zürich haben gezeigt, dass das Hüllrohr eines Ankers einen Widerstandswert $>100 \text{ k}\Omega$ aufweisen sollte. Mit diesem Kriterium kann sichergestellt werden, dass das Hüllrohr nicht in grösserem Ausmass (Löcher, Risse) beschädigt ist. Gleichzeitig bietet ein einwandfreies Hüllrohr einen ausgezeichneten Schutz gegen Verwässern, Ausschwemmen sowie gegen das Abfliesen des Korrosionsschutzfettes im Bereich der freien Ankerlänge.

Während bei den Ankern im Bahnhof Stadelhofen die Ankerkopfisolation nur gefordert wurde, wenn das Hüllrohrkriterium nicht erfüllt war, ist in Anbetracht des unbekannten zeitlichen Verhaltens des Hüllrohrwiderstandes für zukünftige Vorhaben die Isolation des Ankerkopfes bei allen Ankern sehr zu empfehlen. Dabei sollte der minimale Widerstand $100 \text{ }\Omega$ betragen. Als Nebeneffekt kann damit auch die Gefahr der Makroelementbildung Bauwerksarmierung/Spanndrähte im Bereich des Ankerkopfes praktisch eliminiert werden.

Darüber hinaus ermöglicht die Ankerkopfisolation Kontrollmessungen (Widerstand, Potential usw.) auch zu einem späteren Zeitpunkt. Im weiteren wurde gezeigt, dass bei intakter Ankerkopfisolation, aber sehr mangelhaftem oder fehlendem Hüllrohr neben der Gefährdung der Anker im Ankerfussbereich auch die Ankerstutzen durch Korrosionsangriffe zerstört werden können.

Adresse der Verfasser: F. Hunkeler, Dr. dipl. Ing. ETH und F. Stalder, Dr. dipl. Ing. ETH, Korrosionskommission, Seefeldstrasse 301, 8034 Zürich.

Literatur

- [1] A. Steiger und A.J. Hagmann, «Permanenteranker: Korrosionsschutz und Dauerhaftigkeit - Gefährdung, Schwachstellen, Erfahrungen, Massnahmen», Schweizer Ingenieur und Architekt, in diesem Heft und U. von Matt und R. Bressan, Boden- und Felsanker - Anmerkung zur Bemessung, Ausführung und Prüfung, Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 7, S. 150-155 (1987)
- [2] C 3: «Richtlinie zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstrombahnen», Korrosionskommision, 1981
- [3] M. O. Speidel, «Spannungsrißkorrosion hochfester Baustähle für das Bauwesen», Material und Technik, Nr. 3, S. 97-101 (1986)
- [4] R. N. Parkins, M. Elices, V. Sanchez-Galvez und L. Caballero, «Environment sensitive cracking of prestressing steels», Corrosion Science, Vol. 22, No. 5, pp. 379-405 (1982)
- [5] E. Riecke, «Über den wasserstoffinduzierten Sprödbruch hochfester Stähle», Arch. Eisenhüttenw. Vol.44, No. 9, S. 647-656 (1973)
- [6] H. Käsche, «Die Korrosion der Metalle», Springer-Verlag, Berlin, 2.Auflage, S. 288 ff. (1979)
- [7] H. Böhni, «Die Wasserstoffversprödung bei Spannstählen», Werkstoffe und Korrosion, Vol. 26, Nr. 3, S. 199-207 (1975)
- [8] J. B. Vrable, «Cathodic protection for reinforced concrete bridge decks - Laboratory Phase», NCHRP-Report No. 180, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 135 (1977)
- [9] R. E. Wyers und P.D. Cady, «Cathodic protection of concrete bridge decks», ACI Journal, Nov.-Dec., pp. 618-622 (1984)
- [10] F. Stalder und F. Hunkeler, «Korrosion durch Streuströme», Gas Wasser Abwasser, Vol. 66, Dez., S. 821-826 (1986)
- [11] W. A. Weibull, «A statistical distribution function of wide application», J. Appl. Mech., Vol. 18, p. 293 (1951)
- [12] N. J. M. Wilkins und P.F. Lawrence, «The corrosion of steel reinforcements in concrete immersed in seawater», in «Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction», Editor: A.P. Crane, Ellis Horwood Ltd., Chichester GB, pp. 119-141 (1983)
- [13] R. D. Browne, M.P. Geoghegan, and A.F. Baker, «Analysis of structural condition from durability results», wie Ref. [12], pp. 193-234
- [14] A. F. Baker, «Potential mapping techniques», Seminar on Corrosion in Concrete - Monitoring, Surveying, and Control by Cathodic Protection, London Press Centre, 13th May 1986
- [15] C 2: «Richtlinien zum Korrosionsschutz erdverlegter metallischer Anlagen bei Bauwerken oder andern Installationen mit Fundamentarmierungen oder Fundamenterdern», Korrosionskommision, 1984.