Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115 (1997)
Heft: 5

Artikel: Schäden an Pipelines
Autor: Stalder, Ferdinand
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79199

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: 07.08.2025

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

Ferdinand Stalder, Zürich

Schäden an Pipelines

Die Rohrleitungen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- und Treibstoffe werden in der Schweiz sehr gut überwacht, so dass Schadenfälle durch normale, vorhersehbare Ereignisse praktisch nicht vorkommen. An zwei Beispielen wird gezeigt, dass Naturkatastrophen oder als nicht gefährlich betrachtete Phänomene wie die Wechselspannungsbeeinflussung trotzdem zu grossen Schäden führen können.

In der Schweiz ist in den letzten Jahrzehnten ein respektables Rohrleitungsnetz für Erdölprodukte und Erdgas gebaut worden. So gibt es heute vier Pipelines, die Erdölprodukte vom Mittelmeer her in die Schweiz zu den Raffinerien in Cressier und Collombey sowie zu den Umschlagplätzen in Sennwald und Genf-Vernier führen. Dazu wurde seit 1963 ein Hochdruck-Erdgasleitungsnetz gebaut (Innendruck bis 70 bar), das heute eine Länge von 250 km aufweist.

Zur Begutachtung von Fragen der Sicherheit der Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- und Treibstoffe setzte der Bundesrat die eidgenössische Kommission für die Sicherheit von Rohrleitungsanlagen ein, die im Rohrleitungsgesetz vom 4. Oktober 1963 verankert wurde. Die Plangenehmigung sowie die Überwachung des Baus und des Betriebs der Rohrleitungen wurde dem Eidg. Rohleitungsinspektorat (ERI), einer Abteilung des Schweizerischen Vereins für technische Inspektionen (SVTI), übertragen.

Die Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz (SGK) wurde 1922 als neutrale, unabhängige Stelle für die Bearbeitung von Streustromproblemen gegründet. Seit 1964 bearbeitet die SGK als Expertin des ERI spezielle Probleme beim kathodischen Schutz und Korrosionsschutz der Rohrleitungen.

Zwei Ereignisse auf der Erdgasleitung Rhonetal haben die Sicherheitskommission, das ERI und die SGK und natürlich auch die Mitarbeiter der Swissgas AG in den letzten Jahren enorm beschäftigt, nämlich die Folgen des Unwetters über der Zentralschweiz für die Erdgasleitung Rhonetal (GdR) im Goms sowie die Wechselstromkorrosion, die in der Schweiz zuerst auf der GdR festgestellt wurde.

Unwetter im Urnerland und im Goms

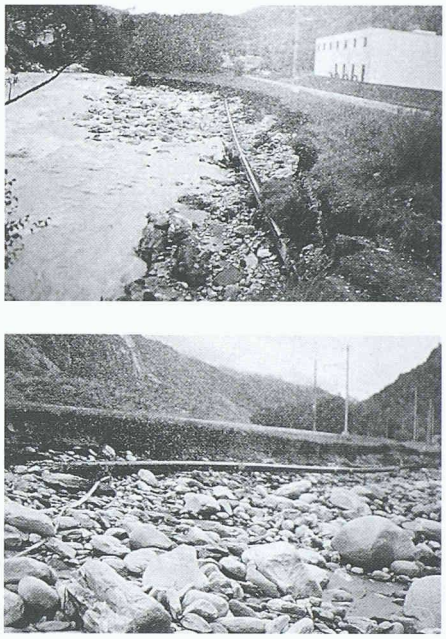
Die Erdgasleitung Rhonetal ist eine der Hauptversorgungsleitungen für die Romandie. In Oberwald zweigt sie von der Transitgasleitung ab und führt durch das Goms und das Rhonetal an den Genfersee. Sie wurde 1974 erstellt. Ihre Länge beträgt 141 km, ihr Durchmesser 35 cm, und sie wird mit einem Innendruck bis 70 bar betrieben. Gegen Korrosion ist sie mit einer PE-Umhüllung (Polyäthylen-Schichtdicke: 3 mm) sowie mit sechs Gleichrichteranlagen für den kathodischen Schutz gerüstet. Zur Kontrolle des kathodischen Schutzes existieren 144 Messstellen für Potentialmessungen, die alle 2 km entlang der GdR sowie bei wichtigen Kreuzungen mit Bahnen, Flüssen und Strassen angeordnet sind.

Am 23. und 24. August 1987 fielen im Goms 150 mm Regen, die zu grossen Überschwemmungen führten. Der obere Bereich des Goms von Münster bis Oberwald war total von der Umwelt abgeschnitten, Strassen, Bahn, Strom und Telefon waren unterbrochen. Die hochgehende Rotte hatte sich enorm verbreitert und Erdreich bis 20 m neben dem alten Flussufer und bis zu einer Tiefe von 2,5 m weggeschwemmt. Im Goms wurde dabei die Erdgasleitung GdR in drei Sektoren auf einer Länge von etwa 250 m freigespült, wie in Bild 1 zu sehen ist.

Die Rohrleitung musste sofort entleert werden. Sie wurde dann später in einem grösseren Abstand zum Fluss neu verlegt. Sehr interessant war die Beobachtung der PE-Oberfläche der freigeschwemmten Leitung. Obwohl die Rotte enorm viele Steine und Geschiebe transportiert hatte, war die PE-Umhüllung praktisch nicht beschädigt. Die Oberfläche war nur leicht aufgerauht, wie nach einem feinen Sandstrahlen.

Wechselstromkorrosion

Bis vor etwa 10 Jahren war die ganze Fachwelt der Ansicht, dass durch Wechselströme keine Korrosionsgefährdung verursacht wird. Im Zeitraum von 1958 bis 1988 gibt es auch praktisch keine Literatur, die sich mit dem Thema Wechselstromkorrosion an erdverlegten Strukturen befasst. Die letzten Arbeiten aus dem Jahre 1958 [1] zeigen, dass es das Phänomen der Wechselstromkorrosion zwar gibt, dass es aber

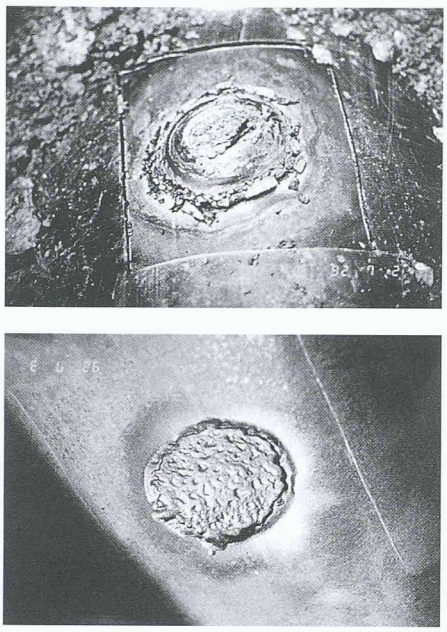


1
Durch das Unwetter im August 1987 freigespülte Teile der Erdgasleitung Rhontetal im Goms

erst bei Stromdichten auftritt, die bei erdfühlig verlegten Strukturen gar nicht vorkommen können, ohne dass die durch die Personensicherheit vorgegebenen Berührungs- und Schrittspannungen überschritten werden. Diese Einschränkung wurde in der Zwischenzeit vergessen. Geblieben war die Ansicht: Wechselstromkorrosion gibt es nicht.

Seit 1958 hat sich die Rohrleitungstechnik wesentlich verändert. Während früher alle kathodisch geschützten Rohrleitungen mit 4 bis 6 mm Bitumen mit Glasvlieseinlagen umhüllt wurden, kamen ab 1970 die ersten Rohre mit PE-Umhüllungen auf den Markt. Die Vorteile waren offensichtlich. Die Verlegung der Rohre vereinfachte sich, da PE wesentlich weniger empfindlich war gegen mechanische Verletzungen. Dadurch wies die PE-Umhüllung viel weniger Fehlstellen auf. Die Planung und Überwachung des kathodischen Schutzes wurde ebenfalls einfacher, da der Schutzstrombedarf von 50 bis 100 $\mu A/m^2$ auf unter 5 $\mu A/m^2$ sank.

Nach dem Bau der ersten mit PE umhüllten Rohrleitungen wurde bei Kontrollmessungen des kathodischen Schutzes festgestellt, dass PE-umhüllte Leitungen bei Parallelführungen mit Hochspannungs-Freileitungen oder Wechselstrombahnen eine erhöhte Wechselspannung gegen neutrale Erde aufwiesen. Auf der GdR im Goms wurden Wechselspannungen bis 100 V mit einer Frequenz von $16\frac{2}{3}$ Hz gemessen. Diese Wechselströme wurden von der Fahrleitung der Furka-Ober-



2
Durch Wechselstrom verursachter Korrosionsangriff

alp-Bahn her in die GdR induziert. In langen Tälern wie dem Goms sind lange Parallelführungen von Erdgasleitungen und Bahnen sowie Hochspannungs-Freileitungen nicht zu umgehen.

Die Ursache für diesen Anstieg der Wechselspannung gegen neutrale Erde war die neue Umhüllung aus Polyäthylen. Die alten mit Bitumen umhüllten Rohrleitungen wiesen dank der vielen Fehlstellen eine natürliche Erdung auf und konnten deshalb gar nie so hohe Wechselspannungen annehmen wie die neuen mit PE umhüllten Rohrleitungen.

Aus Personenschutz-Gründen wurden 1983 auf der GdR im Goms in den Zonen, in denen die Rohrleitung berührt werden konnte, wie bei Schieberstationen oder in Stollen, Schutzmassnahmen gegen die induzierten Wechselspannungen ergriffen [2]. Dazu wurde zwischen den Stationserdungen und der Erdgasleitung eine Potentialausgleichsleitung für Wechselströme erstellt. In diese Potentialausgleichsleitung musste eine Abgrenzeinheit eingebaut werden, damit der kathodische Schutzstrom (Gleichstrom) auf der GdR blieb, die Wechselströme aber abgeleitet werden konnten. Als Abgrenzeinheit wurden Polarisationszellen nach Kirk verwendet, die aus den USA importiert wurden. Mit dieser Massnahme konnte in dem für Personen zugänglichen Bereich der Personenschutz gewährleistet werden.

Erste Hinweise auf das Auftreten von Wechselstromkorrosion kamen 1987 aus Südbayern, ebenfalls aus einem Tal mit einer langen Parallelführung zwischen einer Bahn und einer Erdgasleitung [3].

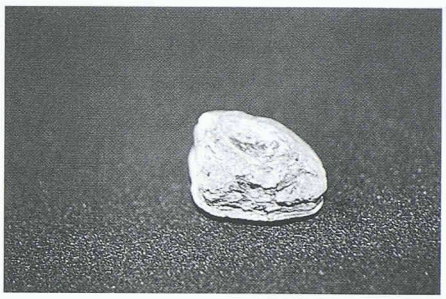
Im Sommer 1987 kam dann der erste Alarm über einen Korrosionsschaden an der Erdgasleitung Rhonetal. Dieser Schaden wurde durch einen Mitarbeiter der Swissgas AG entdeckt. Er hatte den Verdacht, dass im Bereich des Rohreintritts in den Stollen Grengiols etwas nicht in Ordnung sei. Er erhielt von der Direktion die Erlaubnis, die Rohrleitung freizuschaufeln und stiess dabei auf die in Bild 2 gezeigte, neue und bisher unbekannte Angriffsform. Die Angriffsfläche war bis zehnmal grösser als die Fehlstelle im PE. Zwischen dem PE und dem Stahlrohr hat sich über der angegriffenen Fläche ein festes, steinartiges Korrosionsprodukt gebildet (Bild 3). Die Angriffsform war mulden-, nicht kraterförmig und flach.

Die Ursache für den bekannten kraterförmigen Angriff auf Rohrleitungen sind Gleichströme, wobei diese Gleichströme als Streuströme von Gleichstrombahnen oder als galvanische Ströme aus Makroelementen (Belüftungselemente, Fremdkathoden) stammen können (Bild 4). Die Kraterform entsteht dadurch, dass die entstehenden Eisenionen als Ionenstrom in den Boden einwandern, während aggressive Anionen wie Chloride und Sulfate sich im Krater ansammeln. Dadurch wird der Elektrolyt im Krater mit der Zeit immer aggressiver und die Geschwindigkeit des Kraterwachstums nimmt zu. Ein Korrosionsangriff durch einen Gleichstrom konnte anhand des Angriffbilds ausgeschlossen werden.

Deshalb wurden bei der Angriffstelle weitere Untersuchungen durchgeführt. Der Sand, in dem der Angriff entstanden war, hatte einen spezifischen Widerstand von 2200 Ωm, war also überhaupt nicht aggressiv. Im Mittel wies die Rohrleitung eine Wechselspannung von 36 V gegen neutrale Erde mit Spitzen bis zu 60 V auf. Die Wechselspannung hatte eine Frequenz von 16⅔ Hz. Etwa 5 m neben der Angriffstelle befand sich ein Messpfosten, bei dem mindestens zweimal jährlich die Wirkung des kathodischen Schutzes überprüft wurde. Alle protokollierten Werte zeigten an, dass der kathodische Schutz korrekt funktioniert hatte.

Auch der entstandene «Korrosionsstein» (Bild 4) wurde weiter untersucht. Die Analyse eines wässerigen Auszugs ergab einen leicht alkalischen pH-Wert von 9,3 bis 9,5. Es wurden grössere Mengen der Kationen Natrium und Kalium sowie der Anionen Karbonat, Hydrogencarbonat und Sulfat sowie Spuren von Chlorid und Sulfid festgestellt.

Röntgenographisch wurden grosse Mengen von Göthit (α-FeOOH) und beträchtliche Mengen Wegscheiderit ($Na_2CO_3 \times 3NaHCO_3$) und $KNaSO_4$



3
Korrosionsprodukte («Korrosionssteine»), die durch den Wechselstromangriff entstanden sind

nachgewiesen. Auffallend war, dass kein Ca^{2+} gefunden wurde.

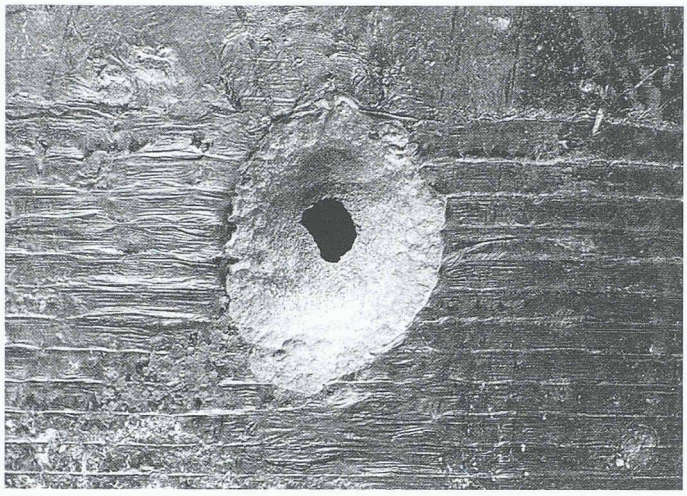
Alle diese ersten Ergebnisse deuteten auf etwas Neues, Unbekanntes hin. Da eine grosse Ähnlichkeit mit dem südbayrischen Fall bestand, wurde ein Korrosionsangriff durch die induzierten Wechselströme vermutet. Da über diese Korrosionsart keine Erfahrungen vorlagen und keine Schutzkriterien bekannt waren, musste in kurzer Zeit für die folgenden Fragen eine Antwort gesucht werden:

- Weist die Rohrleitung weitere Anfressungen auf und wo sind diese?
- Darf diese Rohrleitung weiter betrieben werden?
- Wie kann diese Rohrleitung vor dieser Angriffsart geschützt werden?
- Gibt es eine messbare Grösse (Schutzkriterium), mit der gezeigt werden kann, ob eine Rohrleitung durch Wechselströme gefährdet ist oder nicht?
- Gibt es in der Schweiz auch andere Rohrleitungen, die durch diese «neue» Korrosionsart angegriffen sind ?

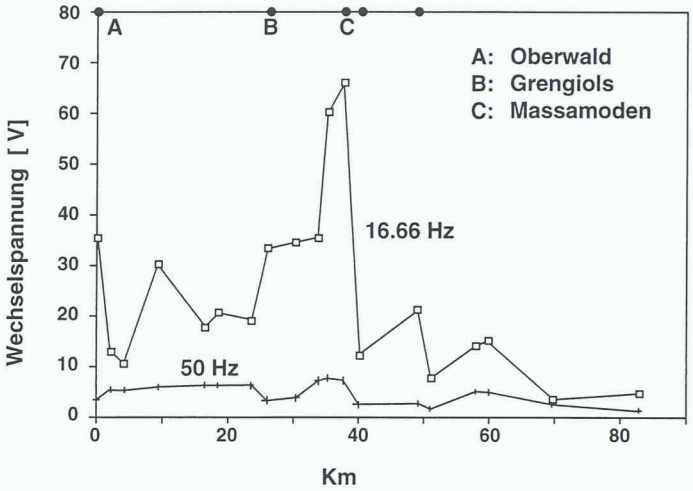
Um Antworten auf diese Fragen zu finden, wurden die Sicherheitskommission, die SGK, das ERI und natürlich der Besitzer der Rohrleitung richtiggehend gefordert. Die folgenden Lösungen wurden gefunden und realisiert.

Versorgungssicherheit für die Romandie

Als Sofortmassnahme wurde die GdR nur noch mit einem reduzierten Druck von etwa 40 bar betrieben, bis die Abklärungen über den Umfang der Angriffe abgeschlossen sowie allfällige Sanierungsmassnahmen durchgeführt waren. Da damit nicht genügend Gas in die Romandie transportiert werden konnte, musste die Einspeisung über die Unigaz-Leitung von Mülchi in Richtung Orbe vergrössert werden. Dazu wurde in Kanada ein Gaskompressor gekauft, in die Schweiz eingeflogen und in Altavilla installiert.



4
Durch einen Gleichstrom verursachter Korrosionsangriff auf eine Rohrleitung



5
Induzierte Wechselspannung auf der Erdgasleitung Rhonetal, gemessen gegen neutrale Erde im Bereich von Oberwald bis Sierre

Untersuchung der GdR auf Korrosionsangriffe

Zur Untersuchung der ganzen Rohrleitung von 141 km Länge auf Korrosionsangriffe wurde die Rohrleitung mit einem intelligenten Molch untersucht. Der sogenannte intelligente Molch ist ein Gerät, das mit einem magnetischen Prüfverfahren lokale Anfressungen an der Rohrwand feststellen kann. Die Messdaten werden im Gerät gespeichert, das mit dem Gasstrom durch die Rohrleitung gepresst wird.

Das Problem dieses Geräts ist, dass nicht nur lokale Anfressungen, sondern alle Änderungen und Fehler im Material wie Schweissnähte oder Doppelungen im Blech angezeigt werden. Deshalb wurden mit einer zweiten Methode, der sogenannten Intensivmessung, alle Fehlstellen in der PE-Umhüllung der Rohrleitung geortet. Diese Intensivmessung beruht darauf, dass zu jeder Fehlstelle in der Umhüllung ein kathodischer Schutzstrom fliesst. Dieser Schutzstromfluss ist mit Hilfe von zwei Referenzelektroden auf der Erdoberfläche messbar, und zwar als ohmscher Spannungsabfall (I×R-Abfall). Bei der Intensivmessung trägt der Mann A ein Rohrsuchgerät. Er lokalisiert damit die Rohrleitung und steckt genau über der Rohrleitung die Referenzelektrode in den Erdboden. Der Mann B trägt ein Voltmeter und eine Registriervorrichtung. Er bewegt sich seitlich in einem Abstand von 10 m zu Mann A und steckt für die Messung ebenfalls eine Referenzelektrode in den Erdboden. Sind keine Fehlstellen vorhanden, fliesst in diesem Bereich kein Schutzstrom, und es wird keine Spannungsdifferenz gemessen. Ist eine Fehlstelle vorhanden, so fliesst ein Schutzstrom. Die Grösse des Schutzstroms und damit die Grösse des messbaren Spannungsabfalls ist proportional zur Oberfläche der Fehlstelle. Bei der Intensivmessung wird alle 5 m entlang der Rohrleitung eine Messung durchgeführt.

Nachdem diese Messkampagnen durchgeführt waren, wurden die Resultate ausgewertet. Als kritisch wurden die Stellen betrachtet, bei denen sowohl mit den Intensivmessungen wie mit dem intelligenten Molch eine Anzeige erhalten wurde. Bei diesen insgesamt 150 Stellen wurde dann die Rohroberfläche freigelegt. Bei etwa 100 Aufgrabungen wurden lokale Anfressungen festgestellt. Eine eigentliche Perforation wurde aber nur an der Stelle festgestellt, die zuerst auf eine reine Vermutung hin von einem Mitarbeiter der Swissgas AG aufgegraben worden war. Bei der Reparatur der Rohrleitung wurden feine Anfressungen auspoliert und nachisoliert, bei grösseren Anfressungen wurden Halbschalen aufgeschweisst. Die grossen Anfressungen wurden aus dem Rohr ausgeschnitten und ein neues Rohrstück eingeschweisst.

Parallel mit diesen Messungen wurden an allen 144 Messstellen entlang der GdR die Wechselspannung gegen neutrale Erde während einer Stunde registriert sowie die Mittel-, Maximal- und Minimalwerte ermittelt. Die Resultate in Bild 5 zeigen, dass die Beeinflussungsspannungen vor allem im Goms im Einflussbereich der Furka-Oberalp-Bahn sehr gross waren.

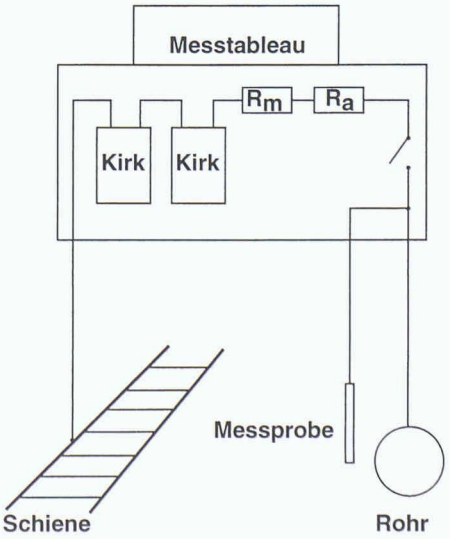
Schutzmassnahmen

Anhand der bei den lokalisierten Anfressungen gemessenen Wechselspannungsbeeinflussungen entlang der GdR wurde pragmatisch das folgende Schutzkriterium festgelegt:

Die Wechselspannung gegen neutrale Erde muss an allen Messstellen kleiner als 10 V sein.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden im Goms an vierzehn Stellen Wechselstromableiter über Polarisationszellen nach Kirk eingebaut. Die Polarisationszelle nach Kirk ist ein Plattenkondensator, dessen Platten in eine 30%ige KOH-Lösung eintauchen (Gefrierpunkt: -60 °C). Über diese Anordnung werden Wechselströme niederohmig abgeleitet, während Gleichströme (z.B. der kathodische Schutzstrom) bis zur Zersetzungsspannung des Wassers von 1,2 V gesperrt werden.

6
Konzept der Wechselstromableiter im Goms



Im Gegensatz zu den ersten Ableitern, die nur für den Personenschutz in den Potentialausgleichleiter eingebaut wurden, mussten diese Ableiter zu niederohmigen Erdern mit einem Ausbreitungswiderstand von 0,3 bis 0,5 Ω führen, um die induzierten Ströme ins Erdreich ableiten zu können. Da der Boden im Goms im allgemeinen sehr hochohmig ist, standen ausser den Schienen der FO praktisch keine Erder zur Verfügung, die diese Anforderungen erfüllt hätten. Obwohl diese Schienen den Traktions-Rückstrom von der Lokomotive zur Speisestelle zurückführen, haben sie gegen neutrale Erde nur eine Spannung von maximal 2 V, so dass sie nach dem Schema in Bild 6 als Erder verwendet wurden.

Mit diesen Massnahmen konnte die Wechselspannung im Goms auf Spannungen unter 10 V abgesenkt werden. Dieses Konzept kann bei Beeinflussungen durch die SBB nicht angewendet werden, da ihre Schienen durch den Transport des wesentlich grösseren Rückstroms auf Spannungen bis 20 V ansteigen.

Mechanismus der Wechselstromkorrosion

Kriterien für zulässige Beeinflussungen

Parallel zu diesen Arbeiten im Feld wurde von der SGK ein Forschungsprojekt gestartet, mit dem im Labor der Korrosionsmechanismus der Wechselstromkorrosion abgeklärt werden sollte. Ebenfalls sollte nach einem Kriterium für die zulässige Wechselspannungsbeeinflussung gesucht sowie eine Messmethode für die Beurteilung der Gefährdung im Feld entwickelt werden. Diese Arbeiten wurden von der SGK in den Laboratorien des Instituts für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion (IBWK) der ETH Zürich durchgeführt und mit einem Forschungsprojekt in Deutschland koordiniert.

Die Forschungsarbeit hat zu sehr interessanten Ergebnissen geführt. In den Serienversuchen im Labor wurde als Kriterium für das Auftreten von Wechselstromkorrosion eine Stromdichte von mehr als 30 A/m² ermittelt. Da diese Stromdichte nicht direkt gemessen werden kann, müssen Messproben mit einer definierten Oberfläche in den Boden eingebaut und an die Rohrleitung angeschlossen werden. Bei den Aufgrabungen auf der GdR entstanden die meisten Anfressungen bei einer Fehlstellengrösse in der PE-Umhüllung von etwa 1 cm², weshalb diese Grösse als Oberfläche für die Messproben festgelegt wurde.

Neben einigen weiteren Detailfragen konnte ebenfalls geklärt werden, warum in den extrem hochohmigen Böden des Wallis, in Böden, die normalerweise als nicht aggressiv gelten, überhaupt ein Korrosionsangriff erfolgen konnte. Die Ursache dafür ist die durch den kathodischen Schutz bewirkte Bildung von OH^- an der Phasengrenze Metall-Boden. Zusammen mit den zur Fehlstelle migrierenden Kationen wie Na^+ und K^+ entstehen in den sandigen Böden des Goms die stark hygroskopischen Salzbasen NaOH und KOH, die Wasser anziehen und dadurch den Widerstand an der Phasengrenze herabsetzen. Wenn Calzium-Ionen im Boden vorhanden sind, werden schwerlösliche Deckschichten gebildet, die den Widerstand zwischen Boden und Fehlstelle erhöhen.

Ein Ziel der bisherigen Forschungsprojekte, die Entwicklung einer direkten Messmethode, mit der festgestellt werden kann, ob eine Rohrleitung durch die Wechselströme gefährdet ist, konnte noch nicht abgeschlossen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde über CEOCOR (Europäische Kommission für das Studium der Korrosion und des Korrosionsschutzes von Rohrleitungen) ein EU-Projekt für prenormative Forschung ausgearbeitet, das auf sehr grosses Interesse stiess. Eines der Ziele war, die Bedingungen für einen Korrosionsangriff durch Wechselströme in möglichst allen in Europa vorkommenden Böden zu testen. Es wurde in Brüssel aber mit der Begründung abgelehnt, dass das Projekt mit der Teilnahme von 18 Partnern aus 13 Ländern zu gross sei. Das Ziel wird nun über ein CEOCOR-Projekt weiterverfolgt, das durch alle Teilnehmer selber finanziert werden muss.

Auch hier macht die SGK mit, und zwar im CorrTech im Technopark Zürich. Das CorrTech ist ein Gemeinschaftsprojekt des IBWK und der SGK unter der Leitung von Prof. Böhni. Seine Ziele sind die Erarbeitung der theoretischen Grundlagen, die Entwicklung von Mess- und Schutzmethoden im Bereich Korrosion und Korrosionsschutz sowie der Technologietransfer dieses Wissens und dieser Methoden in die Praxis. Bis jetzt sind durch CorrTech Arbeiten im Bereich Potentialfeldmessung, Wechselstromkorrosion, Inhibitoren für Beton usw. durchgeführt worden.

Literatur

[1]
Fuchs, W., Steinrath, H. und Ternes, H.: Untersuchungen über die Wechselstrom-Korrosion von Eisen in Abhängigkeit von der Stromdichte und der Frequenz. Gas Wasserfach, 99, S. 1-7, 1958

[2]
Stalder, F.: Hochspannungsbeeinflussungen auf kathodisch geschützten Rohrleitungen. Tagungsband des Int. Korrosionskolloquiums CEOCOR, Luxembourg, 1985

[3]
Heim, G. und Paez, G.: Wechselstrombeeinflussung einer kathodisch geschützten Erdgashochdruckleitung. 3R international, 27, S. 345-347, 1988

[4]
Meier, B.: Kontrollarbeiten an der Edgasleitung Rhonetal. GWA, 69, S. 193-197, 1989

[5]
Bindschedler, D. und Stalder, F.: Wechselstrominduzierte Korrosionsangriffe auf eine Erdgasleitung. GWA, 71, S. 307-313, 1991

Adresse des Verfassers:
Ferdinand Stalder, Dr. sc. techn., dipl. Chemiker-Metallurg ETH, SGK, Technoparkstrasse 1, 8005 Zürich