

Bodenwiderstandsmessungen als kostengünstiger Baustein zur Zustandsbewertung alter Graugussleitungen – Theorie und Praxis

Das physikalische Messverfahren der Bodenwiderstandsmessung nach WENNER bietet eine kostengünstige und zeiteinsparende Methode, die Korrosionsgefahr für eine nicht kathodisch geschützte, erdüberdeckte Leitung zu bestimmen. Es ist als Feldverfahren in Anhang A des DVGW-Arbeitsblatts GW 9 [1] genannt. Mit Hilfe der erstellten Statistik über die Korrosionswahrscheinlichkeiten einer Leitung in verschiedenen Böden ist nun auch ein wissenschaftlicher Beleg für die Funktionalität dieses Verfahrens gegeben.

Die Instandhaltung der Netzinfrastruktur ist eine der wesentlichen Aufgaben der Wasserversorgungsunternehmen. Hierbei stehen die Versorgungssicherheit und -qualität sowie der Substanzerhalt gleichermaßen im Fokus. Auch heute noch bestehen die Netze – Transportleitungen wie auch Verteilnetze – zu einem erheblichen Anteil aus Rohren, die aus Eisenwerkstoffen, z. B. Grauguss, hergestellt wurden und über keinen modernen aktiven oder passiven Korrosionsschutz verfügen, sondern lediglich, wenn überhaupt, mit einer Deckbeschichtung auf Basis von Bitumen o. ä. versehen sind. Derartige Rohre sind anfällig gegenüber einer flächenhaften oder punktuellen Außenkorrosion aufgrund aggressiver Böden (**Bild 1**). Da eine korrosionsschutzgerechte Bettung der Rohre zum Einbauzeitpunkt nicht üblich war, hatten die natürlich anstehenden Böden unmittelbaren Kontakt zu den Rohren.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Verfahren behandelt, das geeignet ist zur

- » „Vorsorge“ – Zustandserfassung
- » Eingrenzung aggressiver Bodenbereiche – nach Schadenseintritt
- » Risikobegrenzung – Festlegung von Korrosionsschutzmaßnahmen beim Neubau.

Dieses Verfahren ist als Baustein zur schnellen effizienten Zustandsbeurteilung nichtüberbauter Transportleitungen zu betrachten.

In einem von der Gelsenwasser AG, Gelsenkirchen und der Saint-Gobain PAM Deutschland GmbH, Saarbrücken unterstützten Projekt an der Technischen Universität Kaiserslautern wurde die Möglichkeit der präventiven Beurteilung des Korrosionspotentials mit dem sogenannten Wenner-Verfahren, einem relativ einfach handhabbaren, geoelektrischen Messverfahren zur Bestimmung des elektrischen Bodenwiderstandes, untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren als Baustein zur schnellen effizienten Zustandsbeurteilung nichtüberbauter Transportleitungen aus Grauguss geeignet ist. Geotechnische Messverfahren sind gemäß DVGW-Merkblatt GW 19-1 [2] geeignet, eine korrosionschemische Bewertung des Bodens in der Leitungszone vorzunehmen.

Wenner-Verfahren

Das Wenner-Verfahren ist ein geoelektrisches Messverfahren, das zur Bestimmung des Bodenwiderstandes dient. Es gehört zu den Feldverfahren der Gleichstrom-Widerstandsgeoelektrik, d. h. es wird unmittelbar vor Ort angewendet und misst den mittleren Bodenwiderstand durch Einleitung von Gleichstrom in den Erdboden. Die erforderliche Messapparatur ist schnell und einfach auf- und abzubauen. Für eine Messung benötigt man lediglich vier 40 cm lange metallische Erdspeie, die als Elektroden dienen und über jeweils ein Kabel mit einem Messgerät verbunden sind und in einer Flucht oberhalb der Rohrleitung wenige cm in den Boden gesteckt werden. Der Abstand der Erdspeie



Bild 1: Stark korrodiertes Leitungsrohr aus Grauguss

ist prinzipiell frei wählbar, muss allerdings zwischen allen Elektroden gleich sein und entspricht etwa der Messtiefe. Da Wasserleitungen gewöhnlich bis zu 1,60 m tief im Erdboden liegen, sollte der Bodenwiderstand auch bis zu dieser Tiefe gemessen werden. Aus diesem Grund wählt man für den Abstand der Erdspeieße eine Strecke von 1,60 m. Dabei werden alle bis zu dieser Tiefe vorkommenden Bodenschichten berücksichtigt (mittlerer Bodenwiderstand). Eine Verkleinerung der Abstände liefert den mittleren Bodenwiderstand über dem Rohr. Der Vergleich der so gewonnenen Daten verbessert die Aussage bezüglich des Widerstandes in der Leitungszone.

Nach Anlegen eines Gleichstroms auf die beiden äußeren Elektroden (A und B in **Bild 2**), entsteht im Boden ein halbraumförmiges elektrisches Feld, in dem die beiden Spannungspotenziale U an den beiden inneren Elektroden gemessen werden. Ihre Differenz ΔU wird schließlich im Gerät mit der aufgebrachten Stromstärke I nach dem Ohmschen Gesetz zu einem Widerstand R verrechnet:

$$R = \frac{\Delta U}{I}$$

Da Quell- und Messpunkte an der Oberfläche eines Halbraumes liegen, ergibt sich der spezifische Bodenwiderstand schließlich zu

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R$$

wobei a den Abstand zwischen den Elektroden darstellt. Dieser spezifische mittlere Bodenwiderstand erlaubt die Charakterisierung des Bodens bezüglich seines Gefährdungspotentials durch Korrosion metallischer Leitungen (s. Abschnitt Auswertung **Bild 3**).

Um sich einen Gesamtüberblick über das Bodenprofil entlang einer erdüberdeckten Rohrleitung zu verschaffen, sollten erfahrungsgemäß im Abstand von etwa 100-200 m jeweils ein bis zwei Messungen durchgeführt werden. Dies reicht vollkommen aus, um korrosionsgefährdete Bereiche zu ermitteln und abzugrenzen. Ein solcher Bereich, der der Leitung „gefährlich“ werden könnte, liegt ebenfalls vor, wenn anthropogen veränderte Böden anstehen oder die Leitung in der Nähe von Grundwasser und Starkstromleitungen liegt. In diesen Fällen ist es empfehlenswert, zusätzlich eine Bodenprobe zu entnehmen, um bei der späteren Messergebnisauswertung auf der sicheren Seite zu liegen. Das Wenner-Verfahren liefert mit vergleichsweise wenig Aufwand zuverlässige Ergebnisse im Sinne eines ersten Anhaltspunktes zur Erfassung der Beurteilung des Gefährdungspotentials durch Korrosion. Vertiefende Untersuchungen können dann zielgerichtet durchgeführt werden. Das Verfahren wurde bislang selten genutzt, da die zur Beurteilung der Messergebnisse vorliegende Datenbasis zur Erklärung des Zusammenhangs zwischen spezifischem Bodenwiderstand und Gefährdungspotential durch Korrosion nicht existierte bzw. nicht zugänglich war (**Bild 4** und **5**).

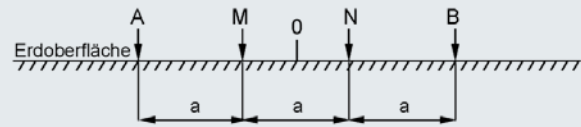


Bild 2: Wenner-Verfahren, Aufbau im Feld [3]
(A, B = Einspeiseelektroden; M, N = Messelektroden;
 a = Elektrodenabstand; o = Rohrachse)

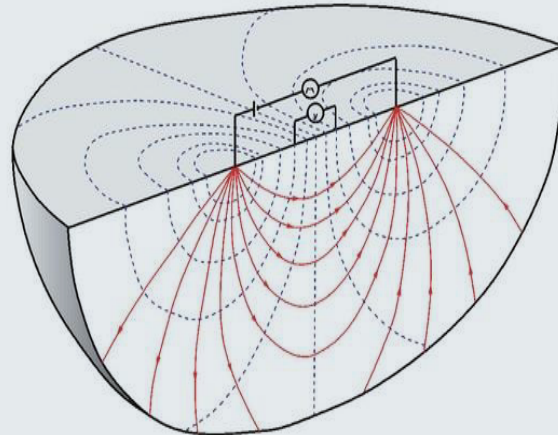


Bild 3: Stromdipol (rot) und Potentialfeld (blau) bei homogener Verteilung des spezifischen Widerstandes im Untergrund [4]



Bild 4: Bodenwiderstandsmessung im Feld



Bild 5: Messgerät

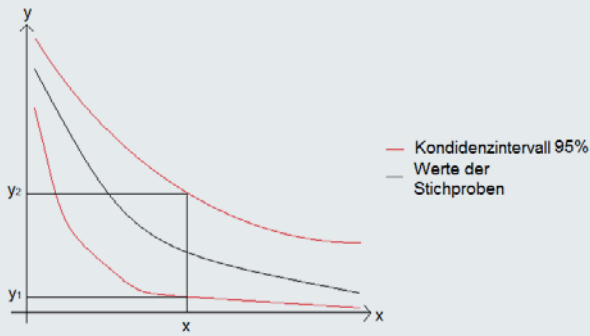


Bild 6: Konfidenzintervall [5]

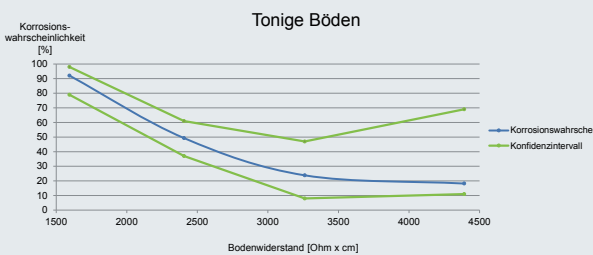


Bild 7: Korrosionswahrscheinlichkeit toniger Böden in Abhängigkeit des Bodenwiderstandes [5]

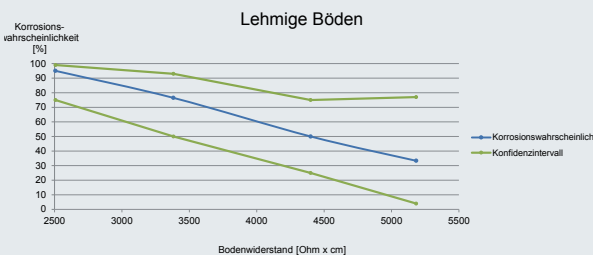


Bild 8: Korrosionswahrscheinlichkeit lehmiger Böden in Abhängigkeit des Bodenwiderstandes [5]

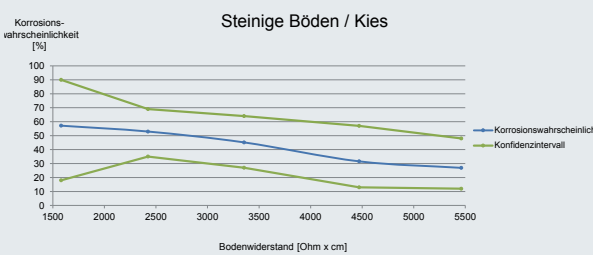


Bild 9: Korrosionswahrscheinlichkeit steiniger Böden in Abhängigkeit des Bodenwiderstandes [9]

Anwendung in der Praxis

Die Untersuchung einer Trasse mittels Bodenwiderstandsmessung liefert eine große Menge an Messergebnissen. Um letztlich die Korrosionsgefahr für eine Leitung einschätzen zu können, müssen diese Ergebnisse ausgewertet und interpretiert werden. Dies bedeutet, dass in Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Bodenart eine bodenspezifische Korrosionswahrscheinlichkeit für den hierzu gemessenen Bodenwiderstandswert bestimmt werden muss. Bislang konnte die Auswertung nur von Fachleuten übernommen werden, da hierfür geologische Grundkenntnisse und längere Erfahrung im Umgang mit dem Wenner-Verfahren notwendig sind.

Um dieses Verfahren für alle Wasserversorger zugänglich zu machen, hat das Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern in Zusammenarbeit mit Saint-Gobain PAM Deutschland und der Gelsenwasser AG eine statistische Auswertung durchgeführt, mit der sich Korrosionswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit von Bodenwiderstandswerten für verschiedene Bodenarten festlegen lassen. Zu diesem Zweck stellte der Rohrersteller sämtliche Messergebnisse und deren Bewertung von Fachleuten der letzten 30 Jahre zur Verfügung. Hierzu wurden die bundesweit vorliegenden Daten über die Häufigkeit von Rohrleitungsschäden durch Korrosion in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenwiderstandswert ausgewertet. Insgesamt wurden auf diese Weise ca. 760 Datensätze mit Angaben bezüglich Korrosionsereignis, Baujahr, Bodenart, Bodenwiderstand, teilweise pH-Wert, Wassergehalt u. a. zur Verfügung gestellt.

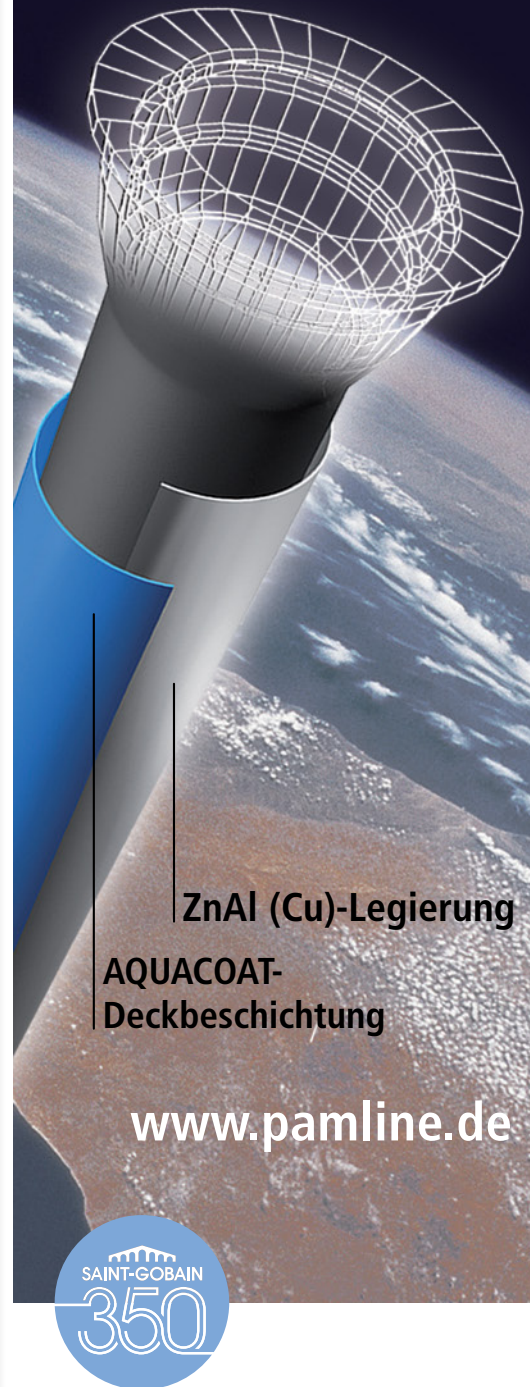
Aus mathematischer Sicht sind die genau berechneten Korrosionswahrscheinlichkeiten jedoch nicht ganz korrekt. Die vorliegende Datensammlung bei Saint-Gobain PAM ist zwar sehr umfangreich, beschreibt aber nur eine Stichprobenmenge im Vergleich zu der Grundgesamtheit an Werten, die man an allen Rohrleitungen in ganz Deutschland messen würde. Es ist durchaus möglich, dass einige Werte dieser sogenannten Stichproben mit der Grundgesamtheit übereinstimmen, jedoch ist dies keineswegs der Regelfall. Sicheres Wissen über die Grundgesamtheit kann man also anhand von Stichprobendaten grundsätzlich nicht erhalten. Aber mit Hilfe statistischer Überlegungen kann eine Bandbreite angegeben werden, innerhalb derer sich der Wert in der Grundgesamtheit wahrscheinlich bewegt. Diese Bandbreite nennt man Konfidenzintervall, das gleichzeitig mit einer Wahrscheinlichkeit belegt werden muss. Das bedeutet im Fall der Daten bei Saint-Gobain, dass die Korrosionswahrscheinlichkeit der Leitung bei einem Bodenwiderstandswert von $x \Omega \text{cm}$ mit 95%iger Wahrscheinlichkeit zwischen $y_1 \%$ und $y_2 \%$ liegt (**Bild 6**). Die Daten wurden hinsichtlich der Bodenarten „tonige Böden“, „lehmige Böden“ und „steinige Böden/Kies“ geclustert und statistisch ausgewertet. Diese Auswertungen einschließlich der Konfidenzintervalle zeigen die **Bilder 7 bis 9**.

Anwendung des Verfahrens in der Praxis

Die Bodenwiderstandsmessung dient der ersten Beurteilung der korrosiven Wirkung des Umgebungsbodens auf metallische Wasserrohrleitungen ohne passiven bzw. aktiven Korrosionsschutz. Mittels der Bodenwiderstandsmessung können Bereiche mit erhöhtem Korrosionspotential aufgefunden und eingegrenzt werden. Die Anwendung der Bodenwiderstandsmessung bezieht sich auf Leitungen in unbefestigten Bereichen und nahezu unge-

BioZinalium

Korrosionsschutz in Perfektion. Auf Dauer!



störtem Boden. Messungen beispielsweise im Bereich von Städten oder Industrieanlagen sind nicht aussagekräftig, da eine Beurteilung der korrosiven Wirkung des Bodens auf die Leitung aufgrund des stark gestörten Bodengefüges schwierig ist.

Die Vorbereitung und Durchführung der Bodenwiderstandsmessung erfolgt in folgenden Schritten:

- » Informationen über die Lage und Art der Leitung sind aus Planunterlagen heranzuziehen. Gegebenenfalls sind Angaben zu dem anstehenden Boden in den Einbaudokumentationen beziehungsweise Ausführungsskizzen vorhanden. Vielerorts stehen Bodenschätzungskarten beziehungsweise geologische Bodenkarten frei zur Verfügung. Diese Informationen können zu einer ersten Beurteilung der zu erwartenden Bodenwiderstände genutzt werden.
- » Die Messung erfolgt entlang der Leitungsstrasse etwa alle 100 m. Die Messergebnisse sind zu protokollieren. Die Messpunkte sind auf einem mitgeführten Plan zu markieren.
- » Um ein sicheres Messergebnis zu erzielen, sollten möglichst alle umliegenden und ggf. einflussnehmenden Parameter erfasst werden.
- » Es wird empfohlen, senkrecht zur Einbaurichtung der Leitung zu messen.

Das Wenner-Verfahren zur Bestimmung des Bodenwiderstandes spiegelt einen Mittelwert über die gesamte gemessene Tiefe h wider. Dieser Mittelwert gibt keinen Rückschluss auf die im Boden vorhandenen Schichtverhältnisse. Daher ist es ratsam, den Bodenwiderstand über verschiedene Tiefen aufzunehmen, um einen Rückschluss auf die Homogenität des Bodens zu ermöglichen.

Messprotokoll

Zu jeder Messung müssen die Umgebungsbedingungen und die Messergebnisse entsprechend dem Messprotokoll festgehalten werden.

Messpunkt	Benennung des Messpunktes und Markierung des Messpunktes auf dem mitgeführten GIS-Plan zur späteren eindeutigen Zuordnung.
Topografie	Beschreibung der topografischen Verhältnisse, wie Senke oder Anhöhe (diese Beschreibung dient u. a. auch der späteren genaueren Zuordnung der Messstelle in einen Plan).
Bemerkungen	Nennung eventueller Besonderheiten oder anderer Bemerkungen.
Messstelle	Angaben zu der Messstelle inklusive Umgebungsbedingungen wie ggf. hoher Grundwasserstand oder sichtbare Veränderung des geologischen Aufbaus (diese Beschreibung dient u. a. auch der späteren genaueren Zuordnung der Messstelle in einen Plan).
Abstand Messsonden	Angabe des gewählten Abstandes a zwischen den Erdspießen in m.
Bodenwiderstand	Angabe des gemessenen Bodenwiderstandes gemäß Messgerät in Ωm .

Auswertung

Die Auswertung und Interpretation erfolgt mit den im Messprotokoll festgehaltenen Messergebnissen und Umgebungsbeurteilungen. Im Allgemeinen ist, wie in **Tabelle 1** aufgeführt, ein erhöhtes

Tabelle 1: Korrosionswahrscheinlichkeiten i. A. des Bodenwiderstandes [5]

Spezifischer Bodenwiderstand [Ωcm]	Gefährdungspotential (Korrosion der Leitung von außen)
< 1.000	Sehr wahrscheinlich
1.000 - 5.000	Wahrscheinlich
> 5.000 - 20.000	Wenig wahrscheinlich
> 20.000	Auszuschließen

Korrosionspotential bei spezifischen Bodenwiderständen $\leq 5.000 \Omega\text{cm}$ zu erwarten. In Geländesenken besteht die Möglichkeit eines hohen Grundwasserspiegels, der wie der Punkt „Gewässernähe/hoher Grundwasserstand“ den spezifischen Bodenwiderstand senkt. Auch sichtbare Veränderungen des geologischen Aufbaus geben Hinweise auf eine mögliche Beeinflussung der Messergebnisse. So kann die Veränderung, beispielsweise durch den Straßenaufbau, den spezifischen Bodenwiderstand anheben. In Abhängigkeiten der Resultate sind ggf. ergänzende Untersuchungen sinnvoll und zur genauen Beurteilung des Leitungszustands erforderlich, z. B. eine Aufgrabung bei lehmigen Böden mit einem spezifischen Bodenwiderstand $\leq 4.500 \Omega\text{cm}$. Bei tonigen sowie steinigten Böden und Kies liegt eine erhöhte Korrosionswahrscheinlichkeit bei spezifischen Bodenwiderstandswerten $\leq 2.500 \Omega\text{cm}$ vor. Da die vorhandenen Bodenschätzungen und Bodenkarten allerdings örtliche Ungenauigkeiten aufweisen, wird z. B. als ergänzende Untersuchung eine Aufgrabung ab einem spezifischen Bodenwiderstand $\leq 4.500 \Omega\text{cm}$ empfohlen.

Entlang einer Leitungstrasse muss nicht an jedem Messpunkt, der die angegebenen Werte unterschreitet, eine ergänzende Untersuchung erfolgen. Es ist ausreichend, wenn Bereiche mit geringen spezifischen Bodenwiderständen zusammengefasst werden und an der Stelle mit dem geringsten Bodenwiderstand z. B. eine Aufgrabung durchgeführt wird. Die Beurteilung des Leitungszustandes erfolgt in Abhängigkeit des ergänzend gewonnenen Untersuchungsergebnisses.

Zusammenfassung und Ausblick

Das physikalische Messverfahren der Bodenwiderstandsmessung nach Wenner bietet eine kostengünstige und zeiteinsparende Methode, die Korrosionsgefahr für eine nicht kathodisch geschützte, erdüberdeckte Leitung zu bestimmen. Es ist als Feldverfahren in Anhang A des Arbeitsblatts GW 9 [1] des DVGW-Regelwerks genannt. Mit Hilfe der erstellten Statistik über die Korrosionswahrscheinlichkeiten einer Leitung in verschiedenen Böden ist nun auch ein wissenschaftlicher Beleg für die Funktionalität dieses Verfahrens gegeben. Die Statistik liefert in Form von Diagrammen eine Übersicht über hochkritische, kritische und weniger kritische Bereiche für Leitungen, anhand derer der Wasserversorger erkennen kann, ob die Leitung poten-

ziell Gefahr läuft, zu korrodieren. Um die Aussageschärfe zu vertiefen, sollte die statistische Datenbasis verbreitert werden und somit weitere Messungen erfolgen.

Leitungsbereiche und -abschnitte mit geringem, mittlerem und hohem Korrosionspotential lassen sich relativ einfach lokalisieren, so dass zielgerichtet die weiteren erforderlichen Untersuchungen geplant werden können. Damit wird der Anspruch einer kostengünstigen oder wirtschaftlich darstellbaren präventiven Instandhaltung im Sinne eines Screenings des Transportleitungsbestandes als ein Baustein für die zustandsorientierte planbare Instandsetzung möglich.

Literatur

- [1] DVGW-Arbeitsblatt GW 9: Beurteilung der Korrosionsbelastungen von erdüberdeckten Rohrleitungen und Behältern aus unlegierten und niedrig legierten Eisenwerkstoffen in Böden (05.2011)
- [2] DVGW-Merkblatt GW 19-1:Erfassung von Zustandsdaten von nicht kathodisch geschützten metallischen Rohrleitungen der Gas- und Wasserversorgung; Teil 1: Einzelerfassung, -bewertung und Handlungsempfehlungen (07.2015)
- [3] Dirkgeo „Goelektrik“ de.wikipedia.org/wiki/Goelektrik; [01.09.2015]
- [4] TRICON Geophysik und Systemtechnik GmbH: „Goelektrik“ <http://www.tricon-online.de/html/geoelektrik.html> [01.09.2015]
- [5] Statistische Auswertung von Korrosionsereignissen an Wasserversorgungsnetzen. Unveröffentlichte Untersuchung am FG Baubetrieb und Bauwirtschaft der TU Kaiserslautern im Auftrag der Saint-Gobain PAM Deutschland GmbH & Co. KG, Saarbrücken (2013).

SCHLAGWÖRTER: Zustandserfassung, Wenner-Verfahren

AUTOREN



Dipl.-Ing. **EVA LUCIA KRÖGER**
GELSENWASSER AG, Gelsenkirchen
Tel. +49 209 708-390
eva-lucia.kroeger@gelsenwasser.de



Prof. Dr.-Ing. **KARSTEN KÖRKEMEYER**
Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Baubetrieb und Bauwirtschaft
Tel. +49 631 205-3467
karsten.koerkemeyer@bauing.uni-kl.de



Dipl.-Ing. **PETER BRUNE**
SAINT-GOBAIN PAM Deutschland GmbH, Saarbrücken
Tel. +49 681 8701-0
info@pam-d.saint-gobain.com
www.pamline.de

10. Praxistag Korrosionsschutz

SAVE THE DATE

22. Juni 2016

Neuer Veranstaltungsort: Bochum