

Kathodischer Korrosionsschutz einer Stahlrohrleitung im Kunststoffmantelrohr

Fachreferat, gehalten von Dipl.-Phys. R. Deiss, Neckarwerke Stuttgart AG,
auf der Jahreshauptversammlung 1998 in Würzburg

1 Problembeschreibung

Ein Düker, bestehend aus zwei Stahlrohrleitungen DN 200 PN 25 bzw. PN 16 mit PE- und zusätzlicher Faserzementmörtel (FZM)-Umhüllung, Länge 150 m, sollte grabenlos verlegt werden.

Schon der Einzug des ersten der beiden Rohre in den teilweise kiesigen Untergrund mußte nach wenigen Metern gestoppt werden. Vermutlich hatten sich Teile der FZM-Umhüllung gelöst und sich mit dem kiesigen Untergrund derart verzahnt, daß es unmöglich war, den Düker weiter als ein paar Meter einzuziehen.

Bautechnischerseits gab es deshalb zur Lösung des Problems nur die Möglichkeit, für jede Dükerrohrleitung jeweils ein Kunststoffmantelrohr einzuziehen, in welches die Rohrleitung selbst in einem zweiten Arbeitsschritt eingezogen werden mußte. Daraus ergaben sich für den KKS folgende Probleme:

- Der Schutzstrom kann nur an den beiden Ringflächen am Anfang und Ende des Mantelrohres eintreten. Doch dieser Strompfad bis zu einer potentiellen Fehlstelle in der Umhüllung des Produktrohres ist sehr hochohmig.
- Der Nachweis der Wirksamkeit des KKS mittels einer Potentialmessung mit aufgesetzter Elektrode ist aufgrund der Abschirmwirkung des Kunststoffmantelrohres nicht möglich.

2 Elektrisches Ersatzschaltbild für eine Fehlstelle in der Mitte des Mantelrohres

Um die Problemstellung nochmals zu verdeutlichen ist es sinnvoll, sich das nachfolgend dargestellte elektrische Ersatzschaltbild zu betrachten. (Abbildung 1)

Das Ersatzschaltbild bezieht sich auf den Widerstand, den eine Fehlstelle in der Mitte des Mantelrohres „sieht“. Dies ist der sogenannte Worstcase-Fall. Er wird bestimmt durch den Ausbreitungswiderstand R_A der Ringflächen am Anfang und am Ende des Mantelrohres und dem Gesamtwiderstand R_{FM} , den das Füllmaterial des Ringraums dem Strom entgegensetzt. Es wird im weiteren von einem homogenen Stromfluß ausgegangen. Inhomogenitäten im Stromverteilungsbild, mit denen in solchen Konstruktionen zu rechnen ist und die natürlich einen Einfluß auf den resultierenden Widerstand haben, sind in diesem einfachen Modell nicht berücksichtigt.

Allerdings ist dieses einfache Modell aussagekräftig genug, um realistische Abschätzungen durchführen zu können.

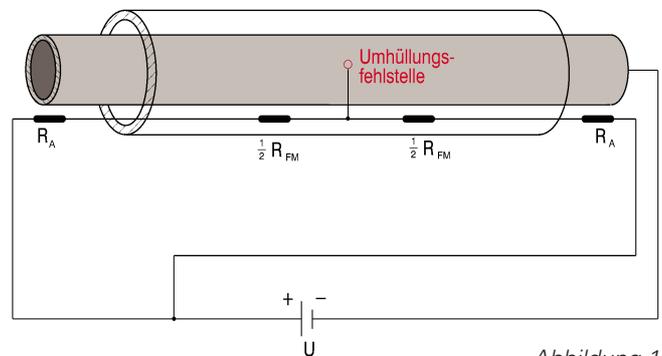


Abbildung 1

Um nun in unserem Fall den Widerstand für eine solche Fehlstelle berechnen zu können, sind folgende Rohrleitungsdaten notwendig:

- Produktrohr 219,1 x 5,0
→ Außendurchmesser inkl. FZM-Umhüllung: 238,0 mm
- Mantelrohr 355 x 13,7
→ Innendurchmesser: 328,0 mm
- Spezifischer Widerstand des Bentonit-Lehmbo-
den-Flußwassergemisches im Mantelrohr: 11,0 Ω m
- Theoretische Spaltbreite: 45,0 mm
- Mantelrohrlänge: 150,0 m.

Mit diesen Daten ergeben sich folgende Widerstandswerte:
 $R_A = 12,70 \Omega$ = Ausbreitungswiderstand der Mantelrohrstirnfläche (Ringfläche)
 $R_{FM} = 41,24 \text{ k}\Omega$ = Gesamtwiderstand des Bentonit-Lehmbo-
den-Flußwassergemisches im Ringraum
des Mantelrohres zwischen den beiden Mantelrohrenden.

Für den Gesamtwiderstand R_{ges} , den eine Fehlstelle im Inneren des Mantelrohres „sieht“, ergibt sich dann folgender Wert:

$$R_{ges} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} R_{FM} + R_A \right) = 10,32 \text{ k}\Omega$$

Bei einer treibenden Spannung von 1 V ergäbe sich ein möglicher Schutzstrom von 97 μ A. Kurzzeitversuche mit sogenannten künstlichen Fehlstellen (Blechproben) vor Ort haben ergeben, daß ein derartiger Schutzstrom gerade ausreicht, um eine Polarisation einer ca. 0,5 cm² großen Fehl-

stelle aufrechtzuerhalten. Es ist im Langzeitverhalten davon auszugehen, daß der Schutzstrombedarf zur Aufrechterhaltung einer Polarisation erheblich sinkt (was durch Versuche auch bestätigt werden konnte). Trotzdem ist es leicht nachvollziehbar, daß unter diesen Bedingungen die Wirksamkeit des KKS stark in Frage gestellt ist.

3 Maßnahmen zur Senkung des Widerstandes im Mantelrohr

3.1 Anbringen weiterer Strompfade

Durch das Anbringen von Löchern im Mantelrohr wird der Widerstand, der sich dem Strom auf dem Weg zu einer Umhüllungsfehlstelle des Produktrohrs im Mantelrohr entgegenstellt, gesenkt. Dabei ist folgendes zu beachten:

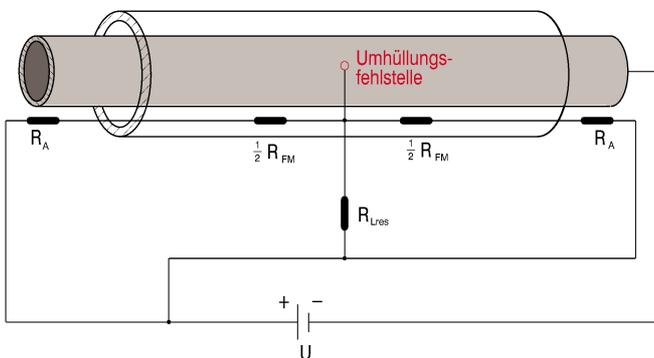
- Der Widerstand bis zu einer Umhüllungsfehlstelle des Produktrohrs innerhalb des Mantelrohrs sinkt mit der Zahl der Löcher. Er ist umgekehrt proportional zum Lochdurchmesser.
- Die mechanische Festigkeit des Mantelrohrs ist umgekehrt proportional zur Anzahl und zum Durchmesser der Löcher.

Es gilt also einerseits, so wenig wie möglich Löcher anzubringen, um die mechanische Stabilität nicht zu gefährden, und andererseits, so viel wie möglich Löcher anzubringen, um den Widerstand bis zu einer Umhüllungsfehlstelle des Produktrohrs im Mantelrohr entscheidend zu senken. In unserem Fall wurde dabei folgender Kompromiß umgesetzt:

Spiralförmiges Anbringen von Löchern mit Ø 8 mm im Abstand von 25 cm.

Basis für die Anzahl und Dimensionierung der Löcher war die Vorgabe, dadurch den Strom zum Schutz einer blanken Schweißnaht, deren Umhüllung z. B. beim Einzug abgerissen wurde, aufzubringen. Unter Berücksichtigung der Bodenverhältnisse, der Rohrdimensionen sowie einer treibenden Spannung von 1 V durfte der Widerstand den Wert von 500 Ω nicht überschreiten.

3.2 Elektrisches Ersatzschaltbild für eine Fehlstelle in der Mitte des perforierten Mantelrohrs



Das oben dargestellte elektrische Ersatzschaltbild für eine Fehlstelle in der Mitte eines mit Löchern versehenen Mantelrohrs unterscheidet sich nur durch den Widerstand R_{Lres} vom vorherigen Fall. R_{Lres} beschreibt einen resultierenden Widerstand, der sich aus der Parallelschaltung der Widerstände aller durch die Löcher hinzugekommenen Strompfade ergibt.

Allgemein ergibt sich für R_{Lres} folgender Ausdruck:

$$R_{Lres} = \frac{1}{2 \left(\sum_{n=1}^{2l} \left[\frac{1}{2R_{Laus} + R_L + nR_{FM}^{(0,25m)}} \right] + \frac{1}{2R_{Laus} + R_L} \right)}$$

mit $R_{FM}^{(0,25m)}$ = Widerstand eines 0,25 m dicken Bentonit-Lehmboden-Flußwassergemisches im Ringraum des Mantelrohrs

R_L = Widerstand des Bentonit-Lehmboden-Flußwassergemisches in einem Mantelrohrbohrloch

R_{Laus} = Ausbreitungswiderstand eines einzelnen Mantelrohrbohrlochs

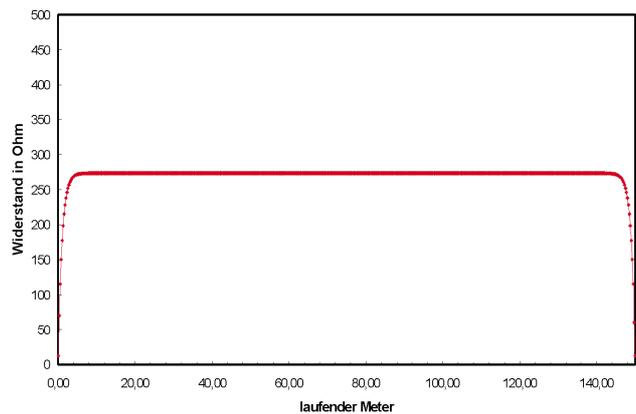
l = Mantelrohrlänge.

Für den Gesamtwiderstand R_{ges} ergibt sich dann der Ausdruck:

$$R_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{0,5(0,5R_{FM} + R_A)} + \frac{1}{R_{Lres}}}$$

In unserem Fall erhält man $R_{ges} = 273,6 \Omega$. D. h. durch das Anbringen der Löcher im Mantelrohr konnte der Widerstand für eine Fehlstelle im Inneren des Mantelrohres ca. um dem Faktor 38 verringert werden.

Betrachtet man den nachfolgend dargestellten Widerstandsverlauf innerhalb des Mantelrohrs so erkennt man, daß der Widerstand überall, mit Ausnahme ein paar weniger Meter am Mantelrohranfang bzw. -ende, gleich ist.



Die Reduzierung des Widerstandes um den Faktor 38 bedeutet eine erhebliche Verbesserung der allgemeinen Schutzsituation. Trotzdem ist die Durchführung weiterer Maßnahmen erforderlich.

4 Zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der Schutzsituation

Durch Einziehen von speziellen Anoden (z. B. Lidaanoden oder Anodflex) in das Mantelrohr könnten auch hohe Ströme aufgebracht werden. Bei einer solchen Lösung könnte man auch daran denken, dieses Mantelrohr mittels Isolierstücken völlig herauszutrennen und den KKS mit Hilfe derartiger Anoden zu realisieren. Allerdings hätten sich dabei aufgrund der geringen Ringraumgröße erhebliche Probleme ergeben, so daß wir von dieser Lösung Abstand nehmen mußten.

Statt dessen wurden pro Mantelrohr jeweils 2 Stahlseile eingezogen. Mit dieser Maßnahme konnte zum einen der Widerstand im Mantelrohr weiter herabgesetzt werden, zum

anderen ergibt sich dadurch eine zusätzliche Einspeisemöglichkeit, die für den Nachweis der Wirksamkeit des KKS von entscheidender Bedeutung ist.

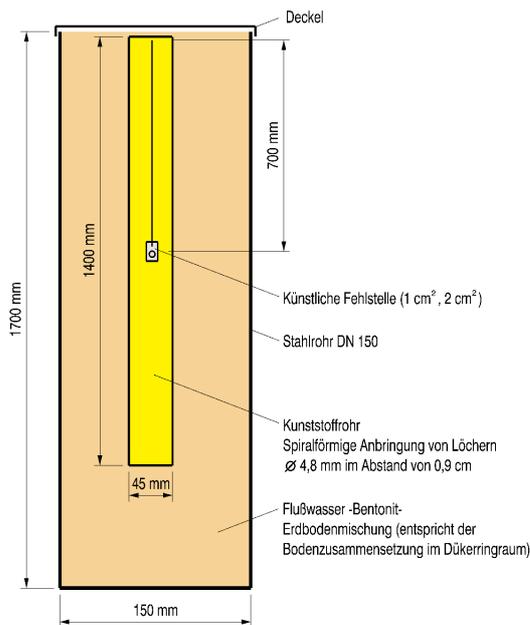
5 Problemstellung beim Nachweis der Wirksamkeit des KKS

Ein Nachweis der Wirksamkeit des KKS mit Hilfe von Potentialmessungen mit aufgesetzter Elektrode ist nicht möglich, da die Abschirmwirkung des Kunststoffmantelrohrs hier die Messung aussagefähiger Meßwerte unmöglich macht. Messungen mit Hilfe von Meßproben an Anfang und Ende des Mantelrohres sind ebenfalls nicht verwertbar, da dadurch nichts darüber ausgesagt werden kann, ob evtl. Fehlstellen im Inneren des Mantelrohres geschützt werden können.

Der Nachweis der Wirksamkeit des KKS kann deshalb nur über eine Stromvergleichsmessung geführt werden. Dazu bedarf es genauer Kenntnisse über den spezifischen Schutzstrombedarf einer Fehlstelle im Dükermedium.

Deshalb wurden an einem Labormodell, das die tatsächlichen Verhältnisse vor Ort so genau wie möglich nachbildete, eine ganze Reihe von Versuchen durchgeführt.

5.1 Versuchsaufbau



Der Versuchsaufbau ist im nachfolgendem Bild skizziert:

In ein 1700 mm langes Stahlrohr DN 150 wurde ein Kunststoffrohr mit 35 mm Durchmesser und 1400 mm Länge eingebracht. Das Stahlrohr wurde mit einem Flußwasser-Bentonit-Erdbodengemisch gefüllt, dessen Zusammensetzung dem Material innerhalb des Ringraums entsprach.

Zur Messung wurde genau in die Mitte des Kunststoffrohres ein Prüfblech einer definierten Größe eingeführt. Um die Konsistenz des Bodenmaterials so lange wie möglich zu bewahren, wurde das Stahlrohr unten mit einer Stahlplatte zugeschweißt und oben mit einer Kunststoffkappe verschlossen.

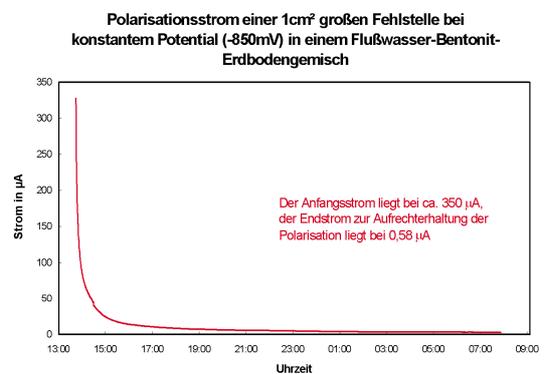
Durch die Versuche sollten im wesentlichen Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

- Wie sieht die zeitliche Stromkurve bei der Polarisation einer 1 cm² großen Fehlstelle auf exakt -850 mV aus?
- Wie hoch muß der Anfangsstrom mindestens sein, damit eine 1 cm² große Fehlstelle mit freiem Korrosionspotential sich auf -850 mV polarisiert?

Aufgrund des relativ hohen Widerstandes, der sich dem Strom auf dem Weg zu einer Fehlstelle innerhalb des Mantelrohres entgegenstellt, ist der Anfangsstrom entscheidend. Ob eine Fehlstelle geschützt werden kann oder nicht hängt also in erster Linie davon ab, ob der mindestens notwendige Anfangsstrom aufgebracht werden kann.

5.2 Die zeitliche Stromkurve

Nachfolgendes Bild zeigt die zeitliche Stromkurve für eine 1 cm² große Fehlstelle in einem Flußwasser-Bentonit-Erdbodengemisch bei einem Ausgangspotential von ca. -550 mV und konstantem Polarisationspotential von -850 mV.



Der Anfangsstrom betrug 350 µA. Zur Aufrechterhaltung der Polarisation ist eine spezifische Schutzstromdichte von 5,8 mA/m² notwendig.

Um die Ergebnisse dieses Versuchs zu bestätigen, wurde die Kurve an einer Fehlstelle, die das Anfangspotential von -780 mV hatte, nochmals aufgenommen. Der Anfangsstrom betrug hier 30 µA, zur Aufrechterhaltung der Polarisation von -850 mV wurde ein Wert von 5,5 mA/m² ermittelt, d.h. das Ergebnis des vorherigen Versuchs konnte im wesentlichen bestätigt werden.

5.3 Versuche zur Ermittlung des notwendigen Anfangsstroms

Bei diesen Versuchen wurde ein konstanter Strom eingestellt, danach wurde die Polarisationskurve gemessen. Das wichtigste Ergebnis dieser Versuche war, daß bei einer spezifischen Stromdichte ≤ 10 mA/m² keine Polarisation auf -850 mV stattfindet.

5.4 Weitere Versuche

Im Rahmen der zu klärenden Fragestellung wurden weitere Versuche gemacht, deren Ergebnisse hier kurz zusammengefasst werden sollen:

- Senkt man das Potential einer Fehlstelle auf < -1000 mV ab, depolarisiert sie dann (in unserem Fall auf -790 mV) und polarisiert sie dann wiederum konstant auf -850 mV, dann kann dieser Wert mit einer spezifischen Schutzstromdichte von 3 mA/m² aufrechterhalten werden.

- Der Versuch, eine zuvor auf -850 mV polarisierte Fehlstelle durch Trennen von der Stromquelle auf freies Korrosionspotential zu depolarisieren scheiterte. Es stellte sich ein konstantes Potential, das sich im Bereich von -790 mV bewegte, ein.

5.5 Fazit

Durch die Versuche wurde bestätigt, daß zur Polarisation der Fehlstelle ein Mindestanfangsstrom, der fast doppelt so groß ist wie der Strom zur Aufrechterhaltung der Polarisation, benötigt wird.

Weiterhin konnte eine Abhängigkeit des Stroms zur Aufrechterhaltung eines Potentials von -850 mV von früheren Polarisationszuständen festgestellt werden. So führt beispielsweise die Tatsache, daß das Potential einer Fehlstelle zuerst unter -1000 mV abgesenkt, danach durch Depolarisation auf ca. -790 mV angehoben und dann konstant auf -850 mV gehalten wurde, dazu, daß die zur Aufrechterhaltung der Polarisation notwendige Schutzstromdichte, verglichen mit den Ergebnissen der vorherigen Versuche, nur noch etwa halb so groß war.

Abschließend konnte anhand mehrerer Versuche nachgewiesen werden, daß eine Depolarisation der Fehlstelle durch Abklemmen der Stromquelle auf freies Korrosionspotential nicht möglich war. Es stellte sich dabei immer ein relativ konstantes Potential, das sich im Bereich von -790 mV bewegte, ein.

Dieses Verhalten beruht aller Wahrscheinlichkeit nach auf einigen Eigenschaften von Bentonit, die jedoch im Rahmen des Versuchs nicht weiter ergründet wurden.

6 Nachweis der Wirksamkeit des KKS mit Hilfe des Stromvergleichskriteriums

Da wie schon vermerkt Potentialmessungen zum Nachweis der Wirksamkeit des KKS nicht möglich sind, bleibt nur noch die Anwendung des Stromvergleichskriteriums, das wie folgt definiert ist:

$$I_1 \leq I^* = \frac{16}{J^* \pi} \left(\frac{\Delta U^*}{\rho^*} \right)^2 = 1,78 \text{ A}$$

Die Variablen sind dabei folgendermaßen definiert:

- I_1 = größter Einzelstrom einer Fehlstelle
- ρ^* = größter spezifischer Widerstand an einer Fehlstelle (11 Ωm)
- J^* = höchste Stromdichte an einer Fehlstelle (10 mA/m²)
- ΔU^* = $U_{\text{ein}} - U_s$ = Betriebswert (650 mV)
- U_{ein} = Einschaltpotential ($-1,5$ V)
- U_s = Schutzpotential (-850 mV)

Da es in der Praxis häufig unmöglich ist, die einzelnen Fehlstellenströme zu ermitteln, setzt man statt dessen den Gesamtstrom ein. Wenn der Gesamtstrom das Kriterium erfüllt, erfüllt es auch jeder Einzelstrom. Wichtig ist des weiteren noch, daß für J^* die Anfangsstromdichte eingesetzt wird.

Zur Ermittlung des Schutzstroms für eine Fehlstelle innerhalb des Mantelrohrs ist in unserem Fall noch folgendes zu vermerken:

Ergebnisse, die aufgrund einer Stromeinspeisung außerhalb des Mantelrohrs erzielt wurden, können aufgrund des hohen Widerstandes, der sich dem Strom auf dem Weg zu einer Fehlstelle innerhalb des Mantelrohrs entgeggestellt, feh-

Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e. V.
Postfach 6004, 73717 Esslingen
PVSt., DPAG, Entgelt bezahlt E 13001

Impressum: Die Mitteilungen des Fachverbandes Kathodischer Korrosionsschutz e.V. werden vom Fachverband Kathodischer Korrosionsschutz e.V., Sitz Esslingen a. N., Postfach 6004, 73717 Esslingen, Telefon (07 11) 91 99 27 20, Telefax (07 11) 91 99 27 77 herausgegeben und erscheinen vierteljährlich. Der Bezugspreis ist durch den Mitgliedsbeitrag abgegolten. Für den Inhalt verantwortlich: Hans J. Spieth, Postfach 6050, 73717 Esslingen. Redaktion: Dipl.-Phys. W. v. Baeckmann, Essen, Hans J. Spieth, Esslingen. Für namentlich gekennzeichnete Beiträge trägt der Verfasser die Verantwortung. Nachdruck mit Quellenangabe und Übersendung von zwei Belegexemplaren erwünscht.

lerbehaftet sein. Zur Verifizierung muß dieser Versuch ein zweites Mal durchgeführt werden, wobei die Stromeinspeisung über die Stahlseile erfolgen muß.

Der Stromverbrauch der beiden Produktrohre betrug 195 μA bzw. 4,3 μA . Das Stromvergleichskriterium wurde also von beiden Mantelrohren erfüllt.

7 Schlußfolgerungen

Als Resümee können folgende Punkte zusammengefaßt werden:

- Um einen ausreichenden Schutzstromzutritt gewährleisten zu können, müssen zusätzliche Strompfade (z. B. durch Anbringen von Löchern im Mantelrohr) geschaffen werden.
- Der Widerstand, den eine Fehlstelle innerhalb des Mantelrohrs „sieht“, wird weitgehend durch die zusätzlichen Strompfade bestimmt, wenn diese in ihrer Gesamtheit niederohmig genug sind.
- Zur weiteren Verbesserung der allgemeinen Schutzsituation sollten zusätzliche Maßnahmen (z. B. Einziehen von Lidaanoden bzw. Anodflex oder von Stahlseilen) vorgesehen werden.
- Für die Beurteilung der Wirksamkeit des KKS an einer Fehlstelle ist der Anfangsstrom und nicht der Strom zur Aufrechterhaltung der Polarisation entscheidend. Diese können in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen zum Teil deutlich differieren. Entscheidend für die Wirksamkeit des kathodischen Schutzes ist es also, ob dieser Anfangsstrom an die Umhüllungsfehlstelle gelangen kann.

Es gilt trotz allem weiterhin der unter Korrosionsschützern sehr beliebte Spruch, daß nur ein nicht gebautes Mantelrohr ein gutes Mantelrohr ist. Insbesondere gilt das für Kunststoffmantelrohre. Die Verlegung einer kathodisch zu schützenden Rohrleitung in einem Kunststoffmantelrohr ist grundsätzlich zu vermeiden. Ein ausreichend wirksamer Schutz kann nur in Einzelfällen verwirklicht werden, wenn vor der eigentlichen Rohrverlegung bestimmte Maßnahmen durchgeführt werden können. Die nachträgliche Einrichtung des KKS ist in der Regel nicht möglich.

Zu guter Letzt

In zweifelhaften Fällen entscheide man sich für das Richtige.

Karl Kraus