

Zementmörtelauskleidungen von Rohren aus Eisenwerkstoffen

Teil 1: Physikalische und korrosionschemische Aspekte

Cement-mortar linings for ferrous-material pipes

Part 1: Physical and corrosion-chemical aspects

Der Einsatz von Zementmörtel als innerer Korrosionsschutz von Wasserleitungen aus Guss und Stahl ist seit mehr als 100 Jahren bekannt. Die Kombination dieser beiden Werkstoffe hat sich unter physikalischen bzw. mechanischen Gesichtspunkten, aber auch aus korrosionschemischer Sicht nicht nur im Rohrleitungsbau sondern auch im Hochbau als perfekte Paarung erwiesen. Dieser Beitrag gibt einen Überblick der in der Praxis häufig diskutierten Fragestellungen rund um die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen einer Zementmörtelauskleidung im Trinkwasserbereich.

For more than 100 years cement mortar has been used as internal corrosion protection for water pipes of steel and ductile iron. The combination of these 2 components has proved to be a perfect solution – not only regarding the physical and mechanical aspects, also with respect to the corrosion chemical side for pipelines and construction pipes.

This report gives a survey on questions that are often discussed in practical use concerning the possibilities and limits for the use of cement mortar linings in the drinking water area.

Einleitung

Die Kombination von Stahl und Eisen mit zementgebundenen Werkstoffen hat sich sowohl im Bauwesen als auch im Rohrleitungsbau seit mehr als 100 Jahren bestens bewährt. Die fehlende Zugfestigkeit des Betons, die normalerweise nur etwa ein Zehntel der Druckfestigkeit beträgt, wird im Bauwesen häufig vom Stahl übernommen. Konstruktionstechnisch von Bedeutung sind die

bei Stahl und zementgebundenen Werkstoffen etwa gleichen Wärmeausdehnungskoeffizienten. Auch aus korrosionsschutztechnischer Sicht stellt diese Werkstoffkombination eine optimale Lösung dar. Die korrosionsschützende Wirkung einer Beton- oder Mörtelmatrix in Bezug auf eingelagerte Konstruktionselemente aus Eisenwerkstoffen beruht im Wesentlichen auf dem alkalischen Porenmedium. Die Alkalität des Porenmediums ist auf das Calciumoxid als Hauptbestandteil

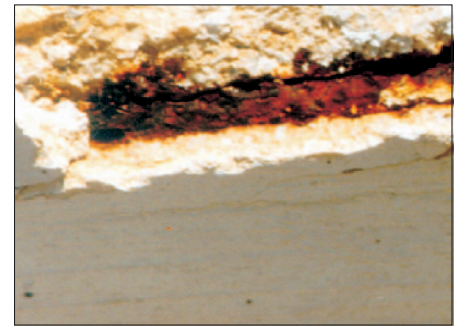


Bild 1: Schädigung des Werkstoffverbundes aus Stahl und Beton aufgrund zu geringer Überdeckungen

Fig. 1: Damage of the concrete and steel composite by a too small concrete covering

des Zementes, aber insbesondere auch auf die Nebenbestandteile, den Alkalioxiden Natrium- und Kaliumoxid zurückzuführen. Der hohe pH-Wert innerhalb der Beton- oder Mörtelmatrix begünstigt die Passivierung der vom Zementmörtel umgebenen Eisenwerkstoffe.

Speziell diese korrosionsschützende Wirkung wird auch in der Kombination einer Zementmörtelauskleidung mit Guss- und Stahlrohren genutzt. Dabei ergeben sich jedoch grundlegende Unterschiede für den Anwendungsbereich einer Kombination von Stahl und Beton im Bauwesen und der Zementmörtelauskleidung von Guss- und Stahlrohrleitungen. Im Bauwesen sind wechselnde Beanspruchungen durch Nass- und Trockenphasen zu berücksichtigen, die sich in den geforderten Mindestüberdeckungen des Betons nach DIN 1045 (Beton und Stahlbeton) beim Moniereisen widerspiegeln.

Dieser schwankende Gehalt an Feuchtigkeit begünstigt den Stofftransport in die poröse Mörtel- oder Betonmatrix. Hier ist insbesondere das CO₂ der Luft mit seiner für das Porenmedium neutralisierenden Wirkung zu berücksichtigen, aber auch korrosionsfördernde Komponenten wie Chloride oder der Sauerstoff als korrosionsrelevanter Partner für die im Beton oder Mörtel gebetteten Eisenwerkstoffe. Bei zu geringer Überdeckung heben lokal unterschiedliche Carbonatisierungsgrade im Bereich der eingelagerten Konstruktionselemente aus Eisen den passivierenden Schutz durch das alkalische Porenmedium auf und führen zur Korrosion, die sich durch Abplatzungen aufgrund der sich bildenden voluminösen Eisenkorrosionsprodukte bemerkbar macht (**Bild 1**).

Eine permanent feuchte Mörtelmatrix, wie sie in zementmörtelausgekleideten Rohrleitungen für den Transport wässriger Medien zwangsläufig vorliegt, führt zu einer erheblichen Reduzierung solcher Transportvorgänge [1, 2]. Die für einen wirkungsvollen Korro-



Dr. Hans-Jürgen Kocks

Röhrenwerk Gebr. Fuchs GmbH,
Siegen
Tel. +49(0)271/691-0
E-Mail: hans-juergen.kocks@fuchsrohr.de



Dipl.-Ing. Werner Siedlarek

Fachhochschule Südwestfalen,
Labor für Korrosionsschutz-
technik, Iserlohn

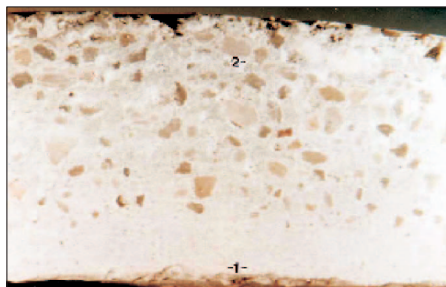


Bild 2: Zementmörtelauskleidung nach Verfahren I

Fig. 2: Cement mortar lining – method I

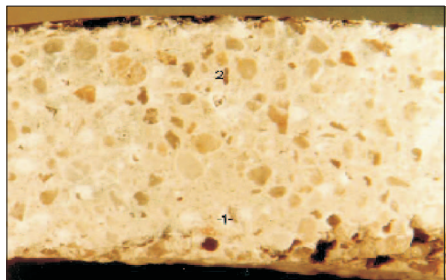


Bild 3: Zementmörtelauskleidung nach Verfahren II

Fig. 3: Cement mortar lining – method II



Bild 4: Inkrustationen auf ungeschützten Rohrrinnenflächen

Fig. 4: Incrustation on inner pipe surface without protection

sionsschutz erforderlichen Schichtdicken einer Zementmörtelauskleidung sind daher deutlich geringer.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied in der Kombination von Beton und Stahl im Bauwesen und den Zementmörtelauskleidungen von Guss- und Stahlleitungsrohren ergibt sich unter statischen Erwägungen. Bei Bauwerken sind Risse unter statischen Gesichtspunkten besonderer Aufmerksamkeit zu widmen und in der Regel unzulässig. Im Fal-

le zementmörtelausgekleideter Rohre wird die Statik vollständig vom Eisengrundwerkstoff übernommen. Der Gewölbeeffekt eines Rohres stützt die Mörtelauskleidung auch im gerissenen Zustand. Bei den Rissen einer Zementmörtelauskleidung von Guss- und Stahlrohren handelt es sich in der Regel um Schwindrisse, die insbesondere bei der Lagerung unter starker Sonneneinstrahlung durch das Austrocknen des Mörtels auftreten können. Bei Kontakt der Mörtelauskleidung mit wässrigen Medien schließen sich diese Risse durch das Quellen des Mörtels oder durch die Reaktion des Calciumoxids aus der Mörtelmatrix mit dem im Wasser gelösten Kohlendioxid unter Bildung von Calciumcarbonat. Aus diesem Grunde spricht man im Falle der Zementmörtelauskleidung von einem aktiven Schutzsystem. Passive Schutzsysteme wie organische Beschichtungen können im Falle einer Rissbildung dem Grundwerkstoff keinen Schutz mehr bieten.

Die Nachteile unbeschichteter aber auch beschichteter Rohre werden heute offensichtlich angesichts der immer wieder auftretenden Diskussionen rund um die organische Beschichtung als Alternative zur Zementmörtelauskleidung verdrängt. Aufgrund der, in Bereichen mit unzureichender Schichtdicke oder Poren möglichen Diffusion korrosiv wirkender Komponenten wie beispielsweise der Chloride und insbesondere des für die Korrosion in wässrigen Medien erforderlichen Sauerstoffs, können organische Beschichtungen eine Zementmörtelauskleidung kaum ersetzen. Unter Einfluss von Temperaturdifferenzen ist die Möglichkeit der Permeation von Wasserdampf in die Beschichtung und daraus resultierend eine Blasenbildung zu berücksichtigen. Je nach Durchfluss und auftretenden Druckschwankungen öffnen sich diese Blasen. Das freiliegende Grundmaterial bietet dann ggf. die Angriffsfläche für Korrosion und Inkrustationen. Die Herstellung beständiger Beschichtungen erfordert eine aufwändige Oberflächenvorbereitung, den Einsatz hochwertiger Kunstharze und eine sorgfältig Schichtdickenkontrolle. Bei Rohrleitungen im begehbaren Bereich der Rohrdimensionen sind entsprechende Kontrollen und ggf. Nacharbeiten noch realisierbar, bei nicht begehbaren Rohrdimensionen wirtschaftlich kaum möglich. Dieses gilt insbesondere auch für die an der Baustelle erforderliche Nachbearbeitung der Innenbeschichtung im Bereich der Schweißverbindungen [3, 4].

Im Gegensatz zu den Beschichtungen ist eindringende Feuchtigkeit für eine Zementmörtelauskleidung ohne jede Bedeutung. Im feuchten Zustand erfüllt die Zementmörtelauskleidung die gleiche passive Barrierewirkung, wie eine organische Beschichtung. Die aktive Schutzwirkung der Zementmörtelauskleidung gewinnt bei Rissbildungen

oder aber im Falle der etwa 5 – 10 mm breiten Spalten der Verbindungsbereiche stumpfgeschweißter Stahlrohre aufgrund der Selbstheilung und Begünstigung der Passivschichtbildung an Bedeutung. Hinzu kommen die guten hygienischen Eigenschaften der Zementmörtelauskleidungen während des Betriebes. Aufgrund dieser Vorteile fordert die DIN 2460 (Stahlrohre für Wasserleitungen) für den Einsatz im Trinkwasserbereich: „Rohre für Trinkwasserleitungen sind mit Zementmörtel auszukleiden“.

Historischer Rückblick

Der Einsatz von Zementmörtel als Korrosionsschutz in Wasserleitungsrohren aus Eisenwerkstoffen wurde erstmalig in einer Publikation der französischen Akademie der Wissenschaften im Jahr 1836 beschrieben. Unter den verschiedenen dabei betrachteten Verfahren für den Innenschutz dieser Rohre wurde eine mind. 2,5 mm dicke Zementmörtelschicht als besonders wirtschaftliche Lösung dargestellt, die eine gute Handhabung und Schutz gegen Korrosionen und damit Inkrustationen gewährleistet. Es ist nicht auszuschließen, dass aufgrund dieser Publikation nur wenige Jahre später die ersten Zementmörtelauskleidungen in den Vereinigten Staaten zum Einsatz kamen. So wurde bereits 1845 die Verlegung zementmörtelausgekleideter Rohre in Jersey City, New Jersey dokumentiert. In den Vorschriften der Stadt Brooklyn, des Staates New York, wird die Zementmörtelauskleidung bereits 1859 erwähnt [5].

Die frühen Verfahren zur Auskleidung von Rohren bereiteten noch außerordentliche Probleme. So wurden beispielsweise sogenannte Durchziehverfahren entwickelt, um Zementmörtelauskleidungen mit Hilfe eines Dorns zu applizieren. Die Schichtdicke der Zementmörtelauskleidung unterliegt hierbei jedoch bei schlechter Zentrierung großen Schwankungen. Große Rohre wurden zur Auskleidung eingeschalt, wie dies beispielsweise im Fall einer 10 km langen New Yorker Wasserleitung mit Durchmessern von 2,9 und 3,4 m praktiziert wurde. Aufgrund der guten Erfahrungen im ersten Bauabschnitt dieser Leitung, der in den Jahren von 1910 bis 1913 fertiggestellt wurde, folgte auch die Vollendung der Leitung in den Jahren von 1922 bis 1924 mit dieser Rohrausführung. Die Schichtdicke dieser mit Hilfe von Schalungen hergestellten Zementmörtelauskleidung lag im Bereich von 50 mm [5].

Die heute noch üblichen Schleuderverfahren wurden um 1920 entwickelt. Die Rohre werden nach dem Einbringen des Zementmörtels in Rotation versetzt, um glatte und gleichmäßig dicke Auskleidungen zu erzielen.

Prinzipiell sind zwei Verfahren zur Auskleidung der Rohre zu unterscheiden:

- Beim *Rotationsschleuderverfahren* wird ein wasserreicher Mörtel in das Rohr eingebracht und anschließend durch Rotation über den Rohrumfang verteilt, verdichtet und geglättet. Bei diesem Verfahren wird überschüssiges Wasser ausgetrieben. Zementmörtelauskleidungen nach diesem Verfahren zeichnen sich durch die Bildung einer deutlichen Schicht aus Feinanteilen aus, die im Wesentlichen aus Zement besteht (**Bild 2**).
- Beim *Anschleuderverfahren* wird der Mörtel in einem ersten Arbeitsgang an die Innenfläche des Rohres angeworfen. In einem zweiten Arbeitsgang folgt das Glätten und Verdichten des Mörtels durch die Rotation des Rohres. Je nach Rotationsgeschwindigkeit und Ausgangswassergehalt können dabei Auskleidungen mit homogener Kornverteilung hergestellt werden (**Bild 3**).

Die Erfahrungen mit Zementmörtelauskleidungen waren 1933 Gegenstand eines Symposium in den Vereinigten Staaten [6]. Dabei wurde über Rohrleitungen berichtet, die bereits 50 Jahre ohne Beeinträchtigungen betrieben wurden. Im Vordergrund standen dabei die guten Erfahrungen in Bezug auf eine Vermeidung von Inkrustationen, die bei innen ungeschützten oder aber mit Bitumen oder Teerpech beschichteten Rohren je nach geförderter Wasserqualität im Laufe der Betriebsjahre unvermeidbar waren. Solche Inkrustationen führten zur Reduzierung der Rohrquerschnitte und erforderten zum Erhalt der Durchflussmengen immer größere Pumpleistungen (**Bild 4**).

Ausgehend von diesen positiven Erfahrungen wurde 1941 die erste Auflage der AWWA C 205 (Cement Mortar Protective Lining and Coating for Steel Water Pipe) publiziert. In Deutschland erschien 1978 das DVGW-Arbeitsblatt W 342 (Werksseitig hergestellte Zementmörtelauskleidungen für Guss- und Stahlrohre) nachdem erst ab Mitte der 60er Jahre Zementmörtelauskleidungen hier zu Lande verstärkt zum Einsatz kamen. Dieses Arbeitsblatt wurde 1986 durch das DVGW-Arbeitsblatt W 344 (Zementmörtelauskleidungen von erdverlegten Guss- und Stahlrohrleitungen) für die Herstellung von Zementmörtelauskleidungen an den Baustellen ergänzt. 1990 wurden diese DVGW-Arbeitsblätter in die heute noch gültige Fassung der DIN 2614 (Zementmörtelauskleidungen für Gussrohre, Stahlrohre und Formstücke) überführt [7].

Im Zuge der europäischen Normung ließen die ersten Entwürfe der DIN EN 10298 (Steel tubes and fittings for onshore and offshore pipelines - Internal lining with cement mortar) erwarten, dass der nicht unbeträchtliche informative Teil der DIN 2614 im Falle

Tab. 1: Schichtdicke der Werksauskleidungen für Guss- und Stahlleitungen

Tab. 1: Thickness of cement mortar linings for ductile iron pipes and steel pipes

Guss (DIN EN 545)		Stahl (DIN 2614)		Stahl (Entwurf DIN EN 10298)	
Nennweite (DN)	Nennschichtdicke (mm)	Nennweite (DN)	Nennschichtdicke (mm)	Nennweite (DN)	Nennschichtdicke (mm)
40 – 300	3,5	100 – 150	5	≤ 250	4,5
350 – 600	5	150 – 300	6	250 < D ≤ 600	6
700 – 1200	6	300 – 600	7	600 < D ≤ 914	8
1400 – 2000	9	600 – 900	9	914 < D ≤ 1220	10
		900 – 1200	13	1220 < D	14
		> 1200	15		

Tab. 2: Zulässige min. Biegeradius zementmörtelausgekleideter Stahlrohre (DIN 2880, St 37.0)

Tab. 2: Minimum bending radius for cement mortar lined steel pipes

Nennweite (DN)	Biegeradius (m)	Nennweite (DN)	Biegeradius (m)	Nennweite (DN)	Biegeradius (m)	Nennweite (DN)	Biegeradius (m)
80	44	250	135	600	300	1200	600
100	56	300	160	700	350	1400	700
125	69	350	175	800	400	1600	800
150	83	400	200	900	450	1800	900
200	108	500	250	1000	500	2000	1000

eines Ersatzes durch die DIN EN 10298 verloren geht. Aus diesem Grunde wurde mit Erscheinungsjahr 1999 die DIN 2880 (Anwendungen von Zementmörtelauskleidungen für Gussrohre, Stahlrohre und Formstücke) publiziert, die den informativen Teil der DIN 2614 beinhaltet [7].

Physikalische Eigenschaften der Zementmörtelauskleidung

Bei der Bewertung der physikalischen Eigenschaften einer Zementmörtelauskleidung für die Praxis sind vor allem Festigkeiten, Porosität und Oberflächenrauheit zu berücksichtigen. Diese Eigenschaften haben bei der Qualitätskontrolle in der Produktion, bei Verlegung und Inbetriebnahme sowie während des Betriebes zementmörtelausgekleideter Leitungen unterschiedliches Gewicht.

Mechanische Festigkeiten

Während die Druckfestigkeiten bzw. die Druckfestigkeitsentwicklung eines Betons für die statische Auslegung eines Bauwerks von gravierender Bedeutung ist, spielen die mechanischen Eigenschaften des Zementmörtels bei den vergleichsweise dünnen Schichtdicken in der Rohrstatik keine Rolle. **Tabelle 1** gibt einen Überblick der in den Normen festgelegten Auskleidungsschichtdicken für Guss- und Stahlrohre.

Trotzdem ist die regelmäßige Kontrolle der Druckfestigkeit Bestandteil jeder technischen Lieferbedingung für Zementmörtelauskleidungen. Die hier ermittelte Druckfestigkeit hat jedoch primär in der Qualitätssicherung ihre Bedeutung und dient zur Überwachung der Vormaterialien bzw. zur Überwachung der Dosiereinrichtungen in der Produktion.

Bei der Verlegung zementmörtelausgekleideter Stahlrohre wird immer wieder die zulässige Biegung der Rohre angesprochen. Solche Rohrbiegungen sind beispielsweise für die Pipelineverlegung (Strangverlegung) oder bei der Dimensionierung einer Startgrube für die grabenlose Rohrverlegung von Stahlrohren mit Schweißverbindung von Bedeutung. Für einen Werkstoff St 37.0 erlaubt die DIN 2880 einen zulässigen Biegeradius von etwa 500 Da. Über die zulässigen Mindestbiegeradien der Rohre aus St 37.0 informiert **Tabelle 2**.

Generell gilt zur Berechnung die Gleichung:

$$R_{\min} = \frac{d_a}{2} \cdot \frac{E}{\sigma_{b \text{ zul.}}} = \frac{d_a}{2} \cdot \frac{E \cdot S}{R_p}$$

wobei

d_a = Außendurchmesser (mm)

E = Elastizitätsmodul des Werkstoffes (N/mm²)

$\sigma_{b \text{ zul.}}$ = zul. Biegespannung (N/mm²)

S = Sicherheitsbeiwert der gegen die 0,2 % Dehngrenze abgesicherten Biegespannung ($S = 1,1$)



Bild 5: 4-Punkt-Biegeeinrichtung

Fig. 5: Bending device

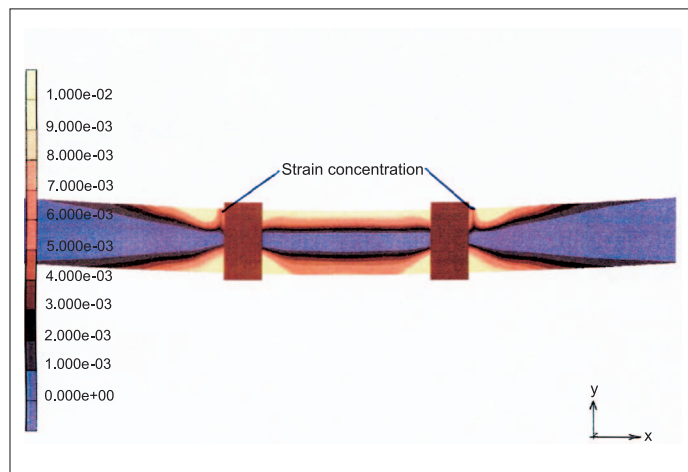
$$R_p = 0,2 \text{ \%Dehngrenze des Rohrwerkstoffes (N/mm}^2\text{)}$$

Vielfach unbekannt ist die Tatsache, dass diese Biegeradien nicht aufgrund der Zementmörtelauskleidung, sondern primär zur Einhaltung der elastischen Biegeradien des Stahlrohres festgelegt sind. Eine Unterschreitung dieser Biegeradien führt zur plastischen Verformung der Rohre. In Versuchen konnte gezeigt werden, dass zementmörtel ausgekleidete Stahlrohre bis in den plastischen Bereich hinein gebogen werden könnten, ohne dass die Zementmörtelauskleidung dabei Schaden nimmt. Bild 5 zeigt einen solchen Biegeversuch an einem 6 m langen zementmörtel ausgekleideten Stahlrohr, bei dem nach einer 4-Punkt-Biegung von 200 Da lediglich im Bereich der Biegelager umlaufende Risse in einer Breite von max. 0,5 mm festgestellt wurden.

Derartige Rissbreiten liegen entsprechend den Anforderungen der DIN 2614 sogar für den Einsatz einer Auskleidung im Abwasserbereich noch im zulässigen Bereich. Ursache für die hier beobachteten Risse im Bereich der Biegelager sind jedoch Verformungen aufgrund der lokal wirkenden Kräfte. Zum Biegen des 6 m langen Stahlrohres müssen im Bereich der Biegelager erhebliche Kräfte aufgebracht werden, die eine Verformung über den Rohrumfang zur Folge haben. In der FEM-Berechnung werden die Wirkung der Biegelager und damit die lokal auftretende Verformung des Rohres besonders deutlich (Bild 6). Bei der Pipelineverlegung oder dem Einzug eines Rohres über die Startgrube in den Bohrkanal während einer Verlegung im HDD-Verfahren treten solche punktuell wirkenden Kräfte erst gar nicht

Bild 6: FEM-Analyse zur Wirkung der Biegelager

Fig. 6: FEM-analysis on the effect of bending bearing



auf. Die hier beobachtete Rissbildung unterbleibt.

Porosität

Die Porosität einer Zementmörtelauskleidung macht sich insbesondere bei der Druckprobe einer Wasserleitung bemerkbar. Aus diesem Grunde existierte in der Normung neben DIN 4279 Teil 1 (Innendruckprüfung von Druckrohrleitungen für Wasser) als allgemeine Grundlage mit DIN 4279 Teil 3 (Innendruckprüfung von Druckrohrleitungen für Wasser-Druckrohre aus duktilem Gusseisen und Stahlrohre mit Zementmörtelauskleidung) ein separater Teil für die Druckprüfung an zusätzlich mit Zementmörtel ausgekleideten Rohrleitungen. Während der Druckprüfung ist zu berücksichtigen, dass der Mörtel in Abhängigkeit vom Prüfdruck Wasser aufnimmt. Die Normenreihe DIN 4279 wurde teilweise durch die DIN EN 805 (Anforderungen an Wasserversorgungssysteme und deren Bauteile außerhalb von Gebäuden) ersetzt. Die auf europäischer Ebene nicht berücksichtigten Aspekte wurden im DVGW-Arbeitsblatt W 400 Teil 2 (Technische Regeln Wasserverteilung – Bau und Prüfung von Wasserverteilungsanlagen) aufgenommen.

In der DIN EN 805 sind die Druckprüfverfahren zu einer einheitlichen Vorgehensweise unabhängig vom Rohrwerkstoff zusammengefasst. Auf eine Vorprüfung, die letztlich für eine zementmörtel ausgekleidete Leitung aufgrund der Mörtelporosität zur Wassersättigung generell vorzusehen ist, kann der Planer hier optional zurückgreifen. Das zukünftige DVGW-Arbeitsblatt W 400 differenziert hier ähnlich der DIN 4279 in Bezug auf die verschiedenen Rohrmaterialien. Hier sind jedoch für die zementmörtel ausgekleideten Leitungen statt der, ursprünglich in DIN 4279 Teil 3 festgelegten drei Verfahren, nur noch das „Normalverfahren“ und das „beschleunigte Normalverfahren“ aufgenommen worden.

Beim Normalverfahren wird unter Aufrechterhaltung des Prüfdruckes im Verlauf von 24 Stunden der Mörtel mit Wasser gesättigt. Die Prüfdauer der Hauptprüfung ist abhängig von der Nennweite der Leitung und wird nach der üblichen Kontrolle auf Lufteinschlüsse durchgeführt. Im Falle des beschleunigten Normalverfahrens wird die Sättigungsphase von 24 Stunden auf 30 Minuten reduziert. Je nach Dimension und Leitungslänge ist ein zulässiger Druckverlust festgelegt.

Oberflächenrauheit

Die Auslegung der Pumpenleistungen für den Betrieb einer Rohrleitung erfordert für einen gewünschten Durchsatz die Abstimmung von Pumpen- und Anlagenkennlinien unter Berücksichtigung der geodätischen Höhenunterschiede. Bei der Berechnung der Anlagenkennlinie sind die Rauheiten der Rohrleitung zu berücksichtigen. Dazu finden sich für den Betrieb von Rohrleitungen im DVGW-Arbeitsblatt W 302 (Hydraulische Berechnung von Rohrleitungen und Rohrnetzen) Rauheiten, die nur bedingt von der materialspezifischen Oberflächenrauheit der eingesetzten Rohrwerkstoffe bzw. Rohrausführungen abhängen. Das DVGW-Arbeitsblatt in der Fassung vom August 1981 nennt die folgenden Rauheiten k_i :

- $k_i = 0,1 \text{ (mm)}$: Fernleitungen und Zubringerleitungen mit gestreckter Leitungsführung aus Stahl- oder Gussrohren mit ZM-Auskleidung bzw. Bitumenauskleidung sowie Spannbeton- oder Asbestzementrohren
- $k_i = 0,4 \text{ (mm)}$: Hauptleitungen mit weitgehend gestreckter Leitungsführung aus denselben Rohren aber auch aus Stahl- und Gussleitungen ohne Auskleidung, sofern Wassergüte und Betriebsweise nicht zu Ablagerungen führen.
- $k_i = 1,0 \text{ (mm)}$: Neue Netze; durch den Übergang von $k_i = 0,4 \text{ (mm)}$ auf $k_i = 1,0$

Tab. 3: Vergleich der Druckverlusthöhen von zementmörtelausgekleideten und hydraulisch glatten Rohrleitungen auf der Basis der materialspezifischen Oberflächenrauheit

Tab. 3: Pressure loss of cement mortar lined pipes and hydraulic plain pipes

Dimensionen	Druckverlusthöhe m/km	
	Zementmörtelausgekleidete Rohre	Hydraulisch glatte Rohre
DN 300	11.28	8.90
DN 400	7.95	6.47
DN 600	4.89	4.00
DN 1000	2.65	2.21

(mm) wird der Einfluss starker Verma-schung näherungsweise berücksichtigt.

In einem Verteilungsnetz wird der Strömungswiderstand primär durch Abgänge, Formteile und Armaturen bestimmt. Gleiches gilt für eine weniger gestreckte Leitungsführung. Für den Idealfall einer gestreckten Leitungsführung sind in **Tabelle 3** exemplarisch die Druckverlusthöhen auf 1000 m Leitungslänge für zementmörtelausgekleidete und hydraulisch glatte Rohre einander gegenübergestellt. Dabei wurde eine für Transportleitungen übliche Durchflussgeschwindigkeit von 2 m/s angenommen.

Die dabei ermittelten theoretischen Unterschiede sind unter Berücksichtigung geodätischer Höhenunterschiede, dem erforderlichen Druck am Ende der Leitung und die Strömung beeinträchtigende Faktoren, wie Umlenkungen und Querschnittsverengungen durch Formteile und Armaturen vernachlässigbar. Des Weiteren gilt die üblicherweise bei Zementmörtelauskleidungen genannte Sandrauheit $k_s = 0.1$ nur für eine neue Auskleidung. Mit der Betriebszeit nimmt die Rauheit einer Zementmörteloberfläche aufgrund der Bildung feiner Schichten aus Eisen- und Manganoxiden ab. In der Praxis findet daher keine Differenzierung zwischen den heute üblichen Rohrmaterialien und Rohrausführungen statt. Diese Vorgehensweise wurde mit den 1985 publizierten Ergänzungen zum DVGW-Arbeitsblatt W 302 für die neu aufgenommenen Kunststoffrohre festgelegt.

Korrosionschemische Eigenschaften der Zementmörtelauskleidung

Der Einsatz von Zementmörtelauskleidungen im Trinkwasserbereich ist unter korrosionschemischen Gesichtspunkten an Grenzwerte geknüpft, die in der DIN 2614 bzw. der DIN 2880 festgelegt sind. Diese Grenzwerte betreffen den Calciumgehalt (1 mg/l) und den Summenparameter Q_C aus den molaren Konzentrationen CO_2 , CO_3^{2-} und HCO_3^-

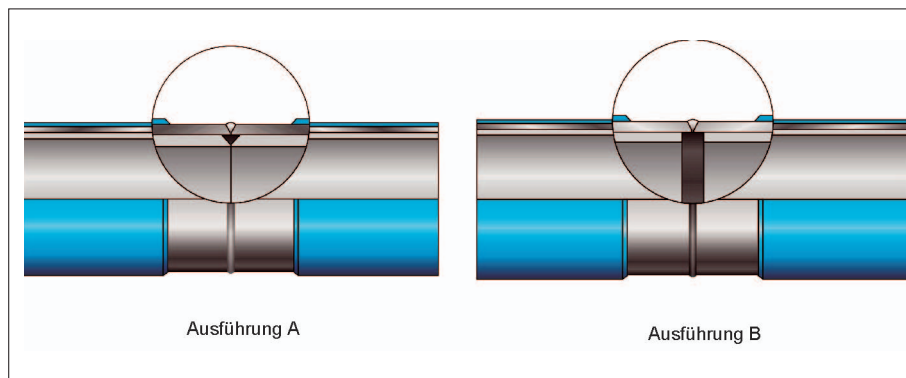


Bild 7: Stumpfschweißverbindungen nicht begehbare Rohrdimensionen

Fig. 7: Butt weld joints for small pipe diameter (type A) (type B)

(0,25 mmol/l) sowie den Gehalt an überschüssiger Kohlensäure (7 mg/l) bzw. das Calcitlösevermögen (12 mg/l $CaCO_3$) des geförderten Trinkwassers. Unter Berücksichtigung dieser Grenzwerte ist die Zementmörtelauskleidung in Leitungen für den Transport und die Verteilung von Trinkwässern generell einsetzbar. Aggressive wässrige Medien wie Salzwässer, Solen oder Abwässer sind unter Zusatz von Kunststoffdispersionen, Verflüssigern oder unter Einsatz säurebeständiger Mörteltypen beherrschbar, sind jedoch nicht Gegenstand dieses Beitrages.

Die in DIN 2614 bzw. DIN 2880 festgelegten Einsatzgrenzen beruhen auf Praxiserfahrungen und den Ergebnissen von Forschungsarbeiten, die mit Mitteln des Bundesministers für Forschung und Technologie (BMFT) im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms „Korrosion und Korrosionsschutz“ im Verlaufe achtjähriger Untersuchungen in den unterschiedlichsten Wässern des Bundesgebietes gewonnen wurden. Eine zusammenfassende Übersicht dieser Aktivitäten wurde 1990 von Holtschulte, Heinrich und Schwenk veröffentlicht [8]. Dieser Bericht wurde 1991 und 1994 durch

Beiträge ergänzt, in denen weitere Resultate dieser Forschungsaktivitäten vorgestellt wurden [9, 10].

Neben den Untersuchungen zur Mörtelbeständigkeit und dem Abriebverhalten wurde in diesen Feldversuchen auch die Selbstheilung bzw. die Deckschichtbildung des Grundmaterials in Rissen und Spalten untersucht, wie sie beispielsweise im Bereich der Stumpfschweißverbindung von Stahlrohren vorliegen. Diese Stumpfschweißverbindung findet hauptsächlich Anwendung beim Bau von Trinkwassertransportleitungen. Der Vorteil dieser Verbindungstechnik liegt in der üblichen Montage einzelner Rohrstränge neben oder über dem Rohrgraben, eine Bauweise, die sich außerhalb der beengten Verhältnisse bebauter Gebiete hervorragend bewährt hat. Im Rahmen der zulässigen elastischen Biegeradien werden die vorgefertigten Rohrstränge in den Graben abgesenkt. Erfordern Verlegetiefe und Grabenprofil einen zusätzlichen Verbau, kann dieser auf den Verbindungsbereich der einzelnen Rohrstränge begrenzt werden.

Schweißtechnisch handelt es sich bei den Stumpfschweißverbindungen um Fallnaht-

Tab. 4: Beteiligte Wasserversorgungsunternehmen nach [9, 10]

Tab. 4: Involved water suppliers of the project [8, 9]

Forschungsstelle	Wasserversorgungsunternehmen / Ort	Wasserart	
		Trinkwasser, entsäuert	pH 7.85, ΔCO_2 0.6 mg/l O_2 6.5 mg/l
DO 1	Dortmunder Stadtwerke, Villigst	Trinkwasser, entsäuert	pH 7.85, ΔCO_2 0.6 mg/l O_2 6.5 mg/l
DO 2	Dortmunder Stadtwerke, Villigst	Rohwasser, sauer	pH 6.90, ΔCO_2 20.6 mg/l O_2 8.0 mg/l
H	Stadtwerke Hannover, Fuhrberg	Rohwasser, sauerstofffrei, und sauer	pH 6.53, ΔCO_2 57.5 mg/l O_2 < 0.1 mg/l
HI 1	Harzwasserwerke, Eckerntalsperre	Rohwasser, huminstoffreich	pH 9.11, ΔCO_2 0.0 mg/l O_2 11.5 mg/l
HI 2	Harzwasserwerke, Lewerberg (Granetalsperre)	Trinkwasser, sehr weich	pH 4.67, ΔCO_2 1.8 mg/l O_2 10.0 mg/l
REG	ZV Bayerischer Wald, Talsperre Frauenau	Rohwasser, weich und sauer	pH 6.10, ΔCO_2 6.3 mg/l O_2 11.0 mg/l

ΔCO_2 = überschüssige Kohlensäure, Grenzwert nach DIN 2614 max. 7 mg/l

Tab. 5: Korrosion der Ringproben (Spaltproben) nach [9, 10]**Tab. 5:** Corrosion of the ring samples [8, 9]

Wasser	DO 1	DO 2	H	HI 1	HI 2	REG
m_a in g/cm ³	0,18	0,20	1,83	0,24	0,23	0.23 – 0.42
I_{max} in mm	0,60	0,65	D*	0,67	0,57	0.40 – 0.60

*) D = Durchbrüche

Tab. 6: Untersuchte Proben und Einsatzparameter**Tab. 6:** Pipe samples and service conditions

Versorgungsgebiet	Wasser	Art der Verbindung / DN	Spalt/Freiliegender Grundwerkstoffbereich	Betriebszeit
Hagen Herdecke	weich, hautsächlich Karbonathärte (pH 8,0)	Stumpfschweißnaht DN 500 Rohrendenausführung A (siehe Abb.15 A)	Spalt 2-3 mm 8 bis 10 mm freiliegender Grundwerkstoffbereich	1982 bis 1999
Kassel	weich, hautsächlich Karbonathärte (pH 8,0)	Stumpfschweißnaht DN 150 Rohrendenausführung B (siehe Abb.15 B)	Spalt und freiliegender Grundwerkstoffbereich 8 - 10 mm	1989 bis 1999

schweißungen, die unter Einsatz zelluloseumhüllter Elektroden ausgeführt werden [11]. Die Schweißnaht besteht aus der Wurzellage, je nach Wanddicke des Rohres einer oder mehreren Zwischenlagen und der Decklage. Für eine einwandfreie Wurzelschweißung ist die Zementmörtelauskleidung an den Rohrenden zurückgeschnitten. Dieser Rückschnitt beträgt bei Großrohren in der Regel etwa 20 mm. Die Verbindungsbereiche dieser begehbaren Rohrdimensionen werden nach dem Verschweißen innen mit Zementmörtel nachgearbeitet.

Im nicht begehbaren Bereich der Rohrdimensionen sind für den Transport von Trinkwasser oder trinkwasserähnlicher Medien in der DIN 2614 zwei Endenausführungen (Ausführung A und B) vorgesehen (**Bild 7**). Nach dem Verschweißen der Rohre verbleibt ein etwa 10 mm breiter ungeschützter Bereich, der jedoch im Falle der bereits seit

Jahrzehnten verlegten Rohrleitungen zu keinem Korrosionsschaden geführt hat.

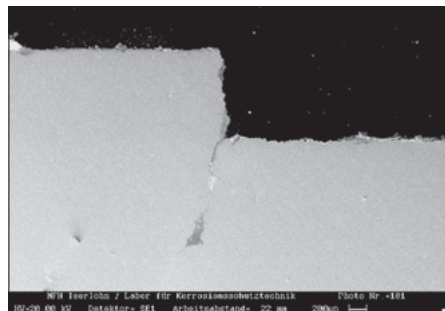
Zur Untersuchung dieser scheinbar ungeschützten Bereiche wurden in den Feldversuchen des vom BMFT finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprogramms neben den verschiedenen Ausführungen der Zementmörtelauskleidung auch blanke Ringproben in den ausgekleideten Rohrabschnitten eingesetzt, um den Verbindungsbereich stumpfgeschweißter Rohre zu simulieren. So konnten in Abhängigkeit von der Wasserzusammensetzung unterschiedlicher Versorgungsgebiete die Abtragsraten des Grundwerkstoffes in den ungeschützten Spalten einer Auskleidung ermittelt werden. **Tabelle 4** gibt einen Überblick der an diesen Feldversuchen beteiligten Wasserversorgungsunternehmen. Das Korrosionsverhalten der Ringproben ergab, dass in den sauerstoffhaltigen Wässern unterschiedlicher Härte in jedem Fall Schutzschichten gebildet werden, die die Korrosionsgeschwindigkeit des Rohrwerkstoffes auf vertretbare Werte begrenzen (siehe **Tabelle 5**). Die chemische Analyse der festen Schutzschichten ergab eine Mischung aus Fe_2O_3 , H_2O , SiO_2 , PO_4^{3-} , Cl^- , Al_2O_3 , SO_4^{2-} , MnO_2 und CaO . Demnach handelt es sich bei diesen Deckschichten im Wesentlichen um gealterten Rost mit Spuren von Deckschichtbildnern wie Silikaten, Aluminaten und Phosphaten. Nach den Befunden dieser achtjährigen Feldversuche sind durchgehende Spalte in der Auskleidung bis zu einigen mm Breite zulässig. Lediglich in einem sauren, sauerstofffreien Rohwasser wurden Durchbrüche festgestellt. In solchen Problemwässern muss die Auskleidung im Schweißnahtbereich vervollständigt werden. Die Ergebnisse des BMFT-Vorhabens bilde-

ten die Basis der heute in DIN 2614 beschriebenen Endenausführungen der Zementmörtelauskleidung.

Eigene Untersuchungen an Rohrverbindungen aus langjährig betriebenen Rohrleitungen bestätigen diese Ergebnisse. **Tabelle 6** gibt einen Überblick über das hier untersuchte Rohrmaterial und die jeweils vorliegenden Betriebsbedingungen. Die untersuchten Rohrverbindungen wurden in weichen Wässern mit einem pH-Wert um 8 betrieben.

Bei der 17 Jahre alten Rohrverbindung aus Hagen handelt es sich mit der Ausführung A um die ältere der beiden in DIN 2614 beschriebenen Rohrendenausführungen (siehe Bild 7). Der etwa 2 bis 3 mm breite Spalt in der Zementmörtelauskleidung hat sich im Laufe der Betriebszeit mit Abrieb und fest haftenden Ablagerungen aus Calciumcarbonat zum Teil geschlossen. An der darunter liegenden Stahloberfläche zeigt sich eine rotbraune Deckschicht, die von weißen Kristallen durchsetzt ist. Die Geschwindigkeit des Korrosionsangriffs auf den Grundwerkstoff wurde durch die Bildung dieser Deckschicht auf ein Minimum herabgesetzt. Die in den Querschliffen gefundenen Mulden waren ca. 50 µm tief. Da die Rohrverbindung bei der Verlegung weder durchgeschweißt noch einwandfrei zentriert worden war, ist ein leichter Rohrversatz erkennbar (**Bild 8**). Obwohl solche Kanten üblicherweise bevorzugte Angriffspunkte für Korrosionen bilden, waren auch nach 17 jähriger Betriebszeit kaum Materialverluste an diesem Rohrversatz erkennbar. Aufgrund der fehlenden Wurzelschweißung ist ein Spalt im Verbindungsbereich zurückgeblieben (Bild 8). Auch in diesem Spalt wurden Schutzschichten nachgewiesen. EDX-Analysen und Röntgenfeinstrukturuntersuchungen zeigen, dass die Deckschichten aus einer Mischung von Eisenoxid/-hydroxid mit lokal unterschiedlich hohen Anteilen von Calciumverbindungen (Calciumkarbonat, Calciumoxid/-hydroxid, Calciumsulfat) sowie Aluminium- und Siliciumverbindungen (Al_2O_3 , SiO_2) bestehen.

Die Rohrverbindung aus Kassel mit der Endenausführung B und damit einem Spalt von 8 bis 10 mm Breite hatte sich in den zehn Jahren nicht geschlossen. Am Spaltgrund wurde eine Deckschicht beobachtet, deren Zusammensetzung mit der Deckschicht aus der 17 Jahre alten Rohrverbindung vergleichbar ist. Entlang der Schweißnahtkante wurde ein muldenförmiger Angriff gefunden, deren Ausläufer bis unter die Mörtelauskleidung reichen. Im Querschliff (**Bild 9**) sieht man am Rand dieser Mulde Reste einer dünnen schwarzen Schicht, die teilweise die Mulde abdeckt. EDX-Analysen zeigen, dass diese Schicht primär aus Eisenoxid (Zunder) besteht. Im Laufe der Jahre wurde

**Bild 8:** Rohrversatz mit Spalt in der Schweißnaht, REM-Bild (Vergrößerung 50x)**Fig. 8:** Misplacement of the two butt welded pipes, REM (50x)

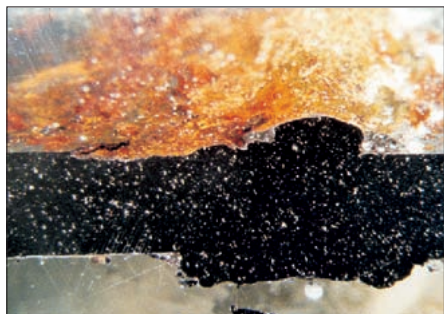


Bild 9: Muldenkorrosion entlang der Schweißnahtkante (Vergrößerung 8x)

Fig. 9: Corrosion beside the welding (8x)

diese Zunderschicht, die vermutlich beim Schweißen entstanden ist, langsam unterhöhlt. Die entstandenen Korrosionsprodukte bilden eine feste, dichte Schutzschicht, so dass auch nach zehn Jahren die Muldentiefe nur etwa 1/10 der Rohrwand » 0,4 mm beträgt.

Die hier untersuchten Deckschichten entsprechen im Wesentlichen den Analysen nach [9]. Auch die gefundene Angriffstiefe bis max. 0,4 mm nach zehnjähriger Betriebszeit zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen des Forschungs- und Entwicklungsprogramms „Korrosion und Korrosionsschutz“ des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (siehe Tabelle 5). Die Untersuchungen bestätigen, dass im Nahbereich einer Zementmörtelauskleidung Bedingungen vorliegen, die Bildung festhaftender Schutzschichten begünstigen. Diese Deckschichten sind wenig durchlässig für Sauerstoff und Salze und begrenzen damit die Korrosionsgeschwindigkeit des Rohrwerkstoffes auf technisch vertretbare Werte.

Schlussbetrachtung

Zementmörtelauskleidungen haben sich als Korrosionsschutz von Rohrleitungen für den Transport von Trinkwasser seit Jahrzehnten bewährt. Im vorliegenden Beitrag wurde über die physikalischen und korrosionschemischen Aspekte einer Zementmörtelauskleidung von Rohren aus Eisenwerkstoffen berichtet. Ein zweiter Teil, der die für Trinkwasserleitungen so wesentlichen hygienischen Aspekte einer Zementmörtelauskleidung behandelt, ist in Vorbereitung.

Die hier beschriebenen Aspekte wie die Möglichkeiten und Grenzen der Biegebarkeit einer zementmörtelausgekleideten Rohrleitung und der Einfluss der Porosität des Mörtels auf die Vorgehensweise bei der Druckprüfung sind in der Praxis zu berücksichtigen und haben in den Regelwerken Eingang gefunden. Es wurde gezeigt, dass die, immer wieder im Vergleich zum hydraulisch glatten System diskutierte Rauheit einer Zementmörteloberfläche mit Blick auf die Systemgegebenheiten nur von untergeordneter Bedeutung ist. Im Regelwerk wird aus diesem Grunde nicht zwischen den einzelnen Rohrmaterialien differenziert.

Unter korrosionschemischen Gesichtspunkten sind in der DIN 2614 bzw. DIN 2880 Grenzwerte für die geförderten Wässer festgelegt. Aufgrund der Fähigkeit zur Selbstheilung, aber auch der Begünstigung einer Deck- bzw. Passivschichtbildung freiliegender Grundwerkstoffbereiche ist die Zementmörtelauskleidung als ein aktives Korrosionsschutzsystem einzustufen. Diese Eigenschaften werden beim Bau von Wassertransportleitungen speziell im nicht begehbaren Bereich der Dimensionen seit Jahrzehnten genutzt. Zementmörtelauskleidungen sind damit organischen Beschichtungen, die in jedem Fall einer Bearbeitung des Schweiß-

nahtbereiches im Rohrrinnen bedürfen, unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten weit überlegen.

Literatur

- [1] Hildebrand, H.; Schulze, M.: 3R internat. 25 (1986) Nr. S. 242 - 245
- [2] Schwenk, W.: 3R internat. 28 (1989) Nr. , S. 666 - 668
- [3] Schwenk, W.: 3R internat. 17 (1978) Nr. , S. 448 - 459
- [4] Schwenk, W.: 3R internat. 23 (1984) Nr. , S. 320 - 324
- [5] Fertner, F.; Der Bauingenieur 39 (1964) Nr. , S. 138 - 148
- [6] Wood, L.P.; J. Am. Water Works Assoc. 25 (1933) pp. 1728 - 1780
- [7] Schwenk, W.: 3R internat. 38 (1999) Nr. , S. 802 - 805
- [8] Holtschulte, H.; Heinrich, B.; Schwenk, W.; gwf-wasser/abwasser 131 (1990) S. 317 - 325
- [9] Schwenk, W.; gwf-wasser/abwasser 132 (1991) 504 - 509
- [10] Gierig, M.; Schretzenmayr, G.; Schwenk, W.; gwf-wasser/abwasser 135 (1994) S. 573 - 580
- [11] Igelbrink, E.A.; DVGW-Schriftenreihe Nr. 64, S. 257 - 275
- [12] Wasserfachliche Aussprachetagung Berlin 1989

Normative Verweise

- DIN EN 545
- DIN 1045
- DIN 2460
- AWWA C 205
- DVGW Arbeitsblatt W 342 (zurückgezogen)
- DVGW Arbeitsblatt W 344 (zurückgezogen)
- DIN 2614
- DIN EN 10298 (Entwurf)
- DIN 2880
- DIN 4279 Teil 1 (ersetzt)
- DIN 4279 Teil 3 (teilweise ersetzt)
- DIN EN 805
- DVGW Arbeitsblatt W 400-2 (Entwurf)