

# Innovative Lösung für Wasserinjektionsleitungen in der sekundären Ölförderung

Tim Dally, Ralf Nötzel, Kerstin Weinberg, Hans-Jürgen Kocks, Juri Rosen

*Für den Transport von Öl-Wasser-Gemischen bei der sekundären Ölförderung wird die mechanische Belastbarkeit von zementmörtel ausgekleideten Stahlrohren mit Einsteckschweißmuffen sowohl mithilfe der FEM-Simulation als auch im Labor untersucht. Im Vordergrund stehen dabei ggf. auch kombinierte Lastfälle aus Biegung und Innendruck bei Verlegung und Betrieb.*

Die Effektivität eines Korrosionsschutzes für Ölfeldleitungen ist, bedingt durch die hohe Aggressivität der Transportmedien, weltweit ein zentrales Thema aktueller Forschungsarbeiten. Die Notwendigkeit einer zuverlässigen Lösung steigt beim Übergang von der sogenannten primären zur sekundären Ölförderung. Bei der primären Ölförderung wird das Medium allein durch den vorhandenen Lagerstättendruck gefördert. Dieser – und damit auch die Förderleistung – nimmt jedoch mit der Zeit ab. Bei der sekundären Ölförderung wird der Lagerstättendruck durch das Injizieren von Wasser in die Lagerstätte aufrechterhalten und damit die Ausbeute erheblich gesteigert. Die sekundäre Ölförderung benötigt einerseits Ölsammelleitungen, die bei vergleichsweise niedrigem Druck bis etwa 40 bar betrieben werden, und andererseits Injektionsleitungen, die zum Aufbau des Lagerstättendrucks für Betriebsdrücke bis zu 200 bar ausgelegt sein müssen.

Gegenüber der primären Ölförderung ergeben sich bei der sekundären Ölförderung deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung und den Eigenschaften der geförderten Medien. Die chemische Zusammensetzung der Öl-Wasser-Gemische einer sekundären Ölförderung weist einen hohen Mineralisierungsgrad sowie Gehalte von Feststoffen und ggf. gelösten Gasen wie H<sub>2</sub>S oder CO<sub>2</sub> auf (**Tabelle 1**). Diese Medienzusammensetzung erfordert einerseits eine chemisch beständige Auskleidung, die den Zutritt der korrosiven Bestandteile zur Stahloberfläche unterbindet, andererseits muss der Korrosionsschutz mit Blick auf die Feststoffanteile abrasionsbeständig sein. Diese Anforderungen gelten auch für die Verbindungsbereiche.

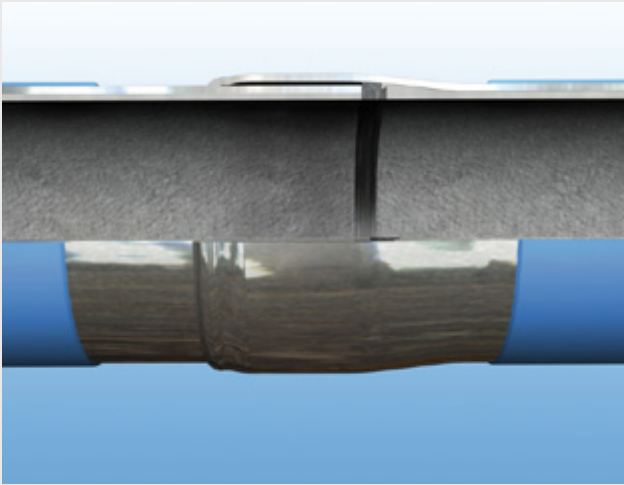
Stahlrohre mit Zementmörtel auskleidung werden seit langem zum Transport von Roh- und Trinkwässern, Brauch- und Salzwässern sowie Salzsolen und zur Fortleitung von Abwässern verwendet. Die hohe Festigkeit und Elastizität der Stahlrohre bei gleichzeitiger Temperaturbelastbarkeit und problemloser Schweißbarkeit erlauben vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Als wesentliche Vorteile sind zu nennen:

- » Der hohe Nutzungsgrad und der breite Anwendungsbereich unterschiedlicher Werkstoffgüten erlauben eine unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierte Wanddickenauslegung und damit Gewichtersparnis bei höchster Druckbelastung.
- » Aufgrund der problemlosen Schweißbarkeit des Werkstoffs Stahl ergibt sich eine kraftschlüssige Rohrverbindung für höchste Druckstufen. Formteile sind durch Segmentschnitte auch auf der Baustelle schnell und kostengünstig herstellbar.
- » Das elastische Verhalten der Stahlrohre ermöglicht auch die Verlegung von Rohrsträngen mit Zementmörtel auskleidung.
- » Das Stahlrohr bietet aufgrund einer Vielzahl von Verbindungstechniken für jeden Einsatzbereich bzw. jede Anwendung ein optimales Produktdesign.
- » Die Längsleitfähigkeit der geschweißten Rohrverbindung erlaubt den Einsatz von kathodischem Korrosionsschutz und damit eine zustandsorientierte Überwachung der Rohrleitung.

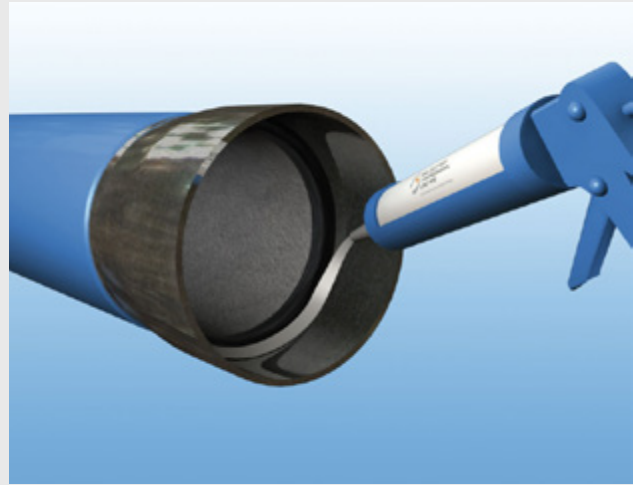
Aus diesen Gründen ist es naheliegend, die Eignung dieser Rohrausführung auch für die sekundäre Ölförderung zu

**Tabelle 1:** Chemische Zusammensetzung von Öl-Wasser-Gemischen in der sekundären Ölförderung (Beispiel)

Anionen mg/l			Kationen mg/l				pH	Feststoffanteil mg/l
Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Σ(Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> )		
37590	37	231,8	3406,8	310,00	413,4	19783,9	6,48	76
41090	3	158,6	3607,2	245,00	790,4	21084,1	6,67	107
36750	30	170,8	3086,2	345,00	632,3	19169,9	6,65	116
34650	0	183,0	3006,0	570,00	620,2	17927,0	6,47	174



**Bild 1:** Einsteckschweißmuffen-Verbindung



**Bild 2:** Versiegelung des Muffenbereichs vor der Montage

testen. Ein wesentlicher Vorteil dabei ist, dass solche Rohre national in DIN 2460 „Stahlrohre für Wasserleitungen“ genormt sind [1]. Die wesentlichen Konstruktionsmerkmale der gängigsten Verbindungstechniken sowie die verschiedenen Möglichkeiten eines wirksamen Korrosionsschutzes sind dort beschrieben. Bezüglich der am Produkt beteiligten Bauteilkomponenten (Stahlrohr, Auskleidung, Umhüllung, Verbindungstechnik usw.) verweist die Norm auf die jeweilige Technische Lieferbedingung. Die DIN 2460 nennt darüber hinaus Mindestanforderungen an die Stahlrohrausführung im Hinblick auf statische Randbedingungen wie Verlegetiefe, Verkehrslasten und Druckschwankungen.

Während mit Polyethylen- oder Polypropylen-Umhüllungen ein wirksamer äußerer Korrosionsschutz in allen denkbaren Bodenaggressivitätsstufen standardmäßig zur Verfügung steht, ggf. im Verbund mit einer Zementmörtelummantelung als mechanische Schutzmaßnahme, ist der Korrosionsschutz im Rohrrinneren mit Blick auf die Korrosionsbelastung durch das geförderte Medium oftmals ein begrenzender Faktor für den Anwendungsbereich. Die Korrosionsbeständigkeit der Mörtelauskleidung und die Wahl der Verbindungstechnik sind dabei maßgebliche Faktoren, denen speziell im Falle des hier angesprochenen Anwendungsbereichs der sekundären Ölförderung besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist. Bereits 1996 wurde in einem Artikel über den erfolgreichen Einsatz von Rohrleitungen mit Zementmörtelauskleidung bei der Petrobras berichtet [2]. Darüber hinaus bieten Normen wie die DIN 2880 oder DIN EN 10298 wertvolle Hilfestellungen bei der Bestimmung von Grenzwerten für die jeweilige Zusammensetzung der Fördermedien [3].

So existiert laut DIN 2880 für den Transport wässriger Medien im Falle der Kombination aus Stahlrohr und Zementmörtelauskleidung prinzipiell kein Hinweis auf eine Temperaturobergrenze. Wesentlich ist, dass eine Gasblasenbildung und damit die Rahmenbedingungen für Kavitation vermieden werden. Dies ist bei entsprechend hohen Betriebsdrü-

cken sichergestellt. Untersuchungen haben gezeigt, dass selbst bei 250 °C (Prüfdruck 43 bar) auch nach 60 Tagen keine Beschädigungen der Auskleidung erkennbar sind. Ein Betrieb der Druckleitungen mit Belastungen der Rohrwand unterhalb von 50 % der Streckgrenze vermeidet Abplatzungen der Zementmörtelauskleidungen bei plötzlicher Entlastung [3]. Durch die Modifizierung des hier eingesetzten Hochfenzementmörtels können darüber hinaus die Typprüfungen einer Auskleidung aus Tonerdeschmelzement nach DIN EN 598 problemlos bestanden werden [4].

Für die Betriebsbedingungen der Ölsammel- und Wasserinjektionsleitungen finden sich mit den Schweißverbindungen und den Zementmörtelauskleidungen in der DIN 2460 geeignete Rohrausführungen. Mit Blick auf einen beim Einbau zu berücksichtigenden Korrosionsschutz im Verbindungsbereich bietet sich die Einsteckschweißmuffe (**Bild 1**) an, die überwiegend im Bereich aggressiver Wässer, Salzwässer und Solen sowie Abwasser eingesetzt wird. Der Verbindungsbereich wird mittels eines Dichtungsmaterials geschützt. Das elastische, unter Wärmeeinwirkung aushärtende Material wird vor dem Einschleiben des Spitzendes in den Muffengrund eingebracht (**Bild 2**).

Nach der Heftschweißung des Spitzendes kann mithilfe eines Molches überstehendes Dichtungsmaterial geglättet werden. Erst dann erfolgt das Verschweißen der Rohrverbindung. Die Berechnungsgrundlagen für die Auslegung der Stahlrohre sind in den Anhängen der Norm beschrieben. Der Einsatz dieses Rohrsystems als Ölsammelleitung bei Betriebsdrücken bis 40 bar stellt keine allzu hohe Herausforderung dar. Die Zuverlässigkeit solcher Rohrausführungen unter diesen gemäßigten Bedingungen wurde in einem fünfjährigen Testbetrieb erfolgreich bestätigt. Die Betriebsbedingungen von Injektionsleitungen gehen mit Betriebsdrücken bis zu 200 bar weit über die in DIN 2460 betrachteten Lastfälle hinaus. Die Einsatzmöglichkeit dieser Rohrausführung sollte insbesondere mit Blick auf die erforderlichen Rohrwand-



Bild 3: Biegeradien bei der Verlegung verschweißter Rohrstränge



Bild 4: Biegeversuche im Testportal der Firma FORM+TEST

dicken unter Berücksichtigung der Verlegebedingungen verifiziert werden.

### Problemstellung

Bei der Verlegung von geschweißten Stahlleitungsrohren wird üblicherweise die Strangverlegung bevorzugt (**Bild 3**). Beim Absenken des Rohrstrangs in den Graben ist darauf zu achten, dass der zulässige Mindestbiegeradius nicht unterschritten wird. Für den im Wasserbereich üblicherweise eingesetzten Rohrwerkstoff L235 ergibt sich dabei ein zulässiger Biegeradius von  $r_{zul} = 500$ -facher Rohraußendurchmesser. Dieser Biegeradius hat sich in der Leitungsbaupraxis im Wasserbereich als Standardgröße auch für Richtungsänderungen etabliert. Ob dieser Mindestbiegeradius auch bei den für Injektionsleitungen erforderlichen Wanddicken von über 10 mm mit einer Einsteckschweißmuffen-Verbindung

realisierbar ist, soll mit entsprechenden Untersuchungen ggf. unter Berücksichtigung des Innendrucks unter Betriebsbedingungen nachgewiesen werden.

Da nicht alle möglichen Betriebsbedingungen in entsprechenden Versuchen abgebildet werden können, wurde hier auch eine rechnerische Simulation des Lastfalles vorgenommen, um später für ähnlich gelagerte Lastfälle und andere Rohrausführungen ggf. Vorhersagen ableiten zu können.

### Methoden

#### Simulation durch FEM

Zur Bestimmung der lokalen Spannungen und Verformungen werden mithilfe des Programms Abaqus entsprechende FEM-Simulationen durchgeführt. Die Modellbildung erfolgt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Fließkurven

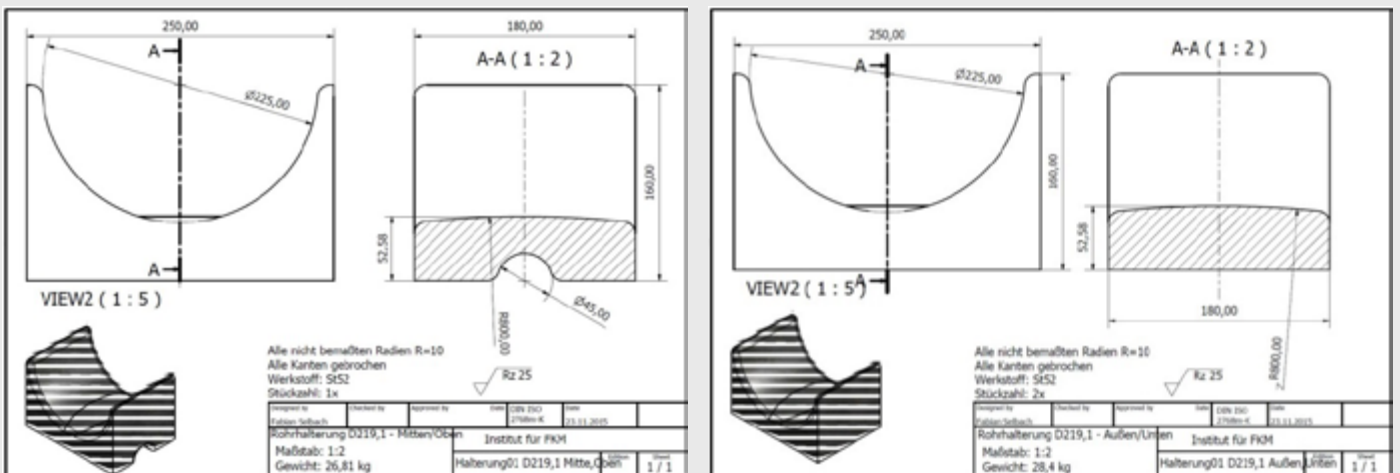
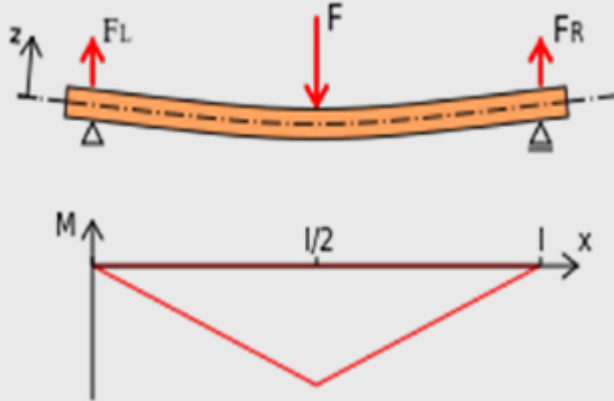


Bild 5: Lagerschalen für die Biegeversuche der Rohrabmessung 219 x 12 mm



**Bild 6:** Biegemomentenverlauf der untersuchten Dreipunktbiegung



**Bild 7:** Zur Versuchsdurchführung benutzter Druckübersetzer der Fa. Haskel

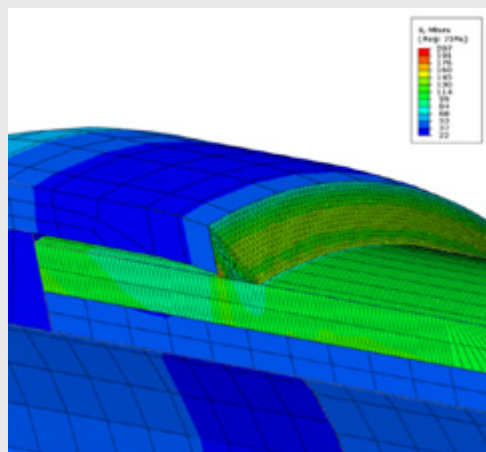
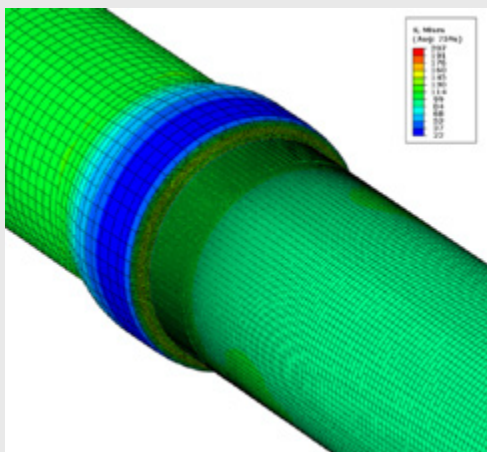
der verwendeten Werkstoffe: Die Fließspannung des Stahls beträgt real 510 MPa. Die Fließspannung des Schweißmaterials wird angesichts des im Datenblatt angegebenen Mindestfestigkeitswertes mit 380 MPa angesetzt. In Übereinstimmung mit den durchgeführten Laboruntersuchungen sind im Modell die Lagerungen der Rohrenden berücksichtigt und als entsprechende Randbedingungen implementiert. In den Simulationen werden jeweils die Vergleichsspannung nach von Mises [5] sowie die hierzu äquivalente plastische Vergleichsdehnung berechnet und ausgegeben.

**Laboruntersuchungen – Versuchsaufbau**

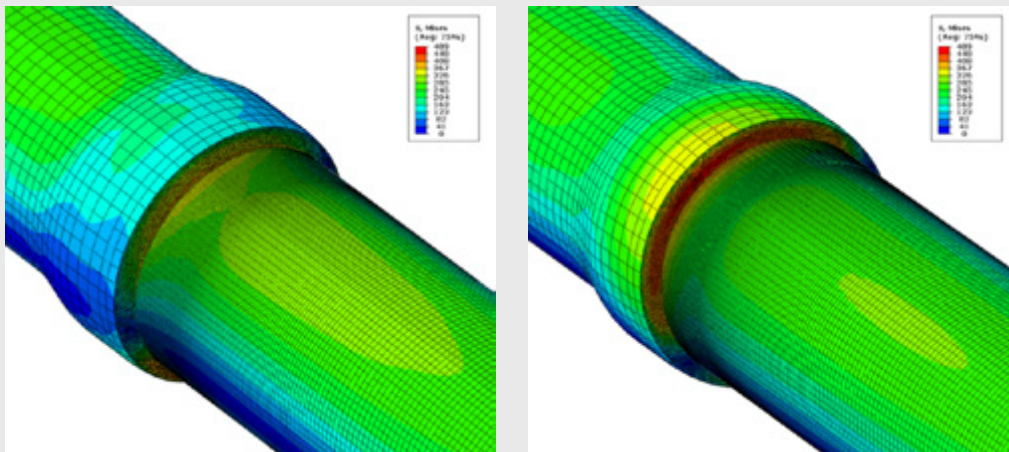
Unter Einsatz eines Prüfportals werden zur vergleichenden Absicherung der Ergebnisse der FEM-Berechnungen Biegeversuche durchgeführt (**Bild 4**). Die Biegemaschine erlaubt freie Stützweiten von bis zu 8 m und zeitabhängige

Kraftverläufe bis zu 400 kN.

Die Lagerung der Rohre erfolgt dabei auf drei Punkten. Die äußeren sind als Loslager ausgeführt, während die innere Lagerung als Festlager gegen Lateralverschiebungen gesichert ist und nur eine Pendelbewegung zulässt (**Bild 5**). Bei diesem Versuchsaufbau ist zu berücksichtigen, dass sich aufgrund des Kraftverlaufs bei der Dreipunktbiegung die größten Kräfte auf den Verbindungsbereich konzentrieren. Im Vergleich zur tatsächlichen Belastung bei einer Pipelineverlegung ist der hier untersuchte Lastfall der kritischere, so dass die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen (**Bild 6**). Bei einigen der durchgeführten Versuche werden die Rohre während des Biegevorganges zusätzlich mit unterschiedlich hohen Innendrücken belastet. Zu diesem Zweck werden die Rohre vorab mit Wasser befüllt. Der geforderte Innendruck wird mittels einer Druckprüfeinrichtung der Firma



**Bild 8:** Spannungsverteilung [MPa] an der Außenseite der Rohrverbindung (links) und im Rohrlängsschnitt (rechts) bei einem Innendruck von 200 bar



**Bild 9:** Spannungsverteilung [MPa] an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts) bei Durchbiegung des Rohres (Biegeradius  $r = 500 D_o$ )

Haskel erzeugt. Dieser pneumatisch betriebene Druckübersetzer erlaubt die Erzeugung von Drücken bis maximal 500 bar (**Bild 7**).

### Ergebnisse der FEM-Simulation

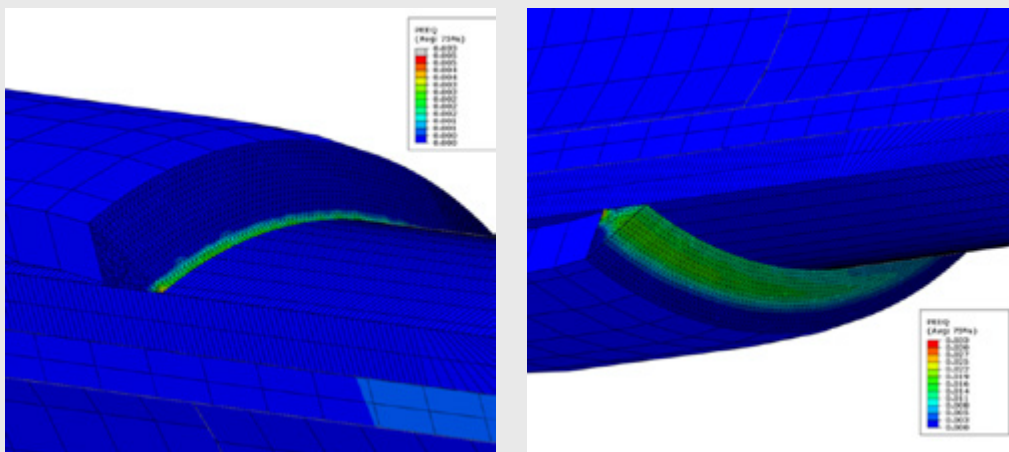
Für Rohre der Abmessungen 168 x 10 mm werden die Belastungsfälle reiner Innendruck (z. B.  $p = 200$  bar), reine Durchbiegung (z. B. Biegeradius  $r = 500 D_o$ ) sowie eine kombinierte Beanspruchung (erst Innendruck, dann Biegung) untersucht.

Bei der reinen Innendruckbelastung ergibt sich eine rotationssymmetrische Spannungsverteilung, wobei im Schweißnahtbereich maximale Spannungswerte von etwa 210 MPa auftreten und außerhalb der Schweißnaht die Spannungen einen Wert von 150 MPa nicht überschreiten. Es wird keine plastische Verformung beobachtet (**Bild 8**).

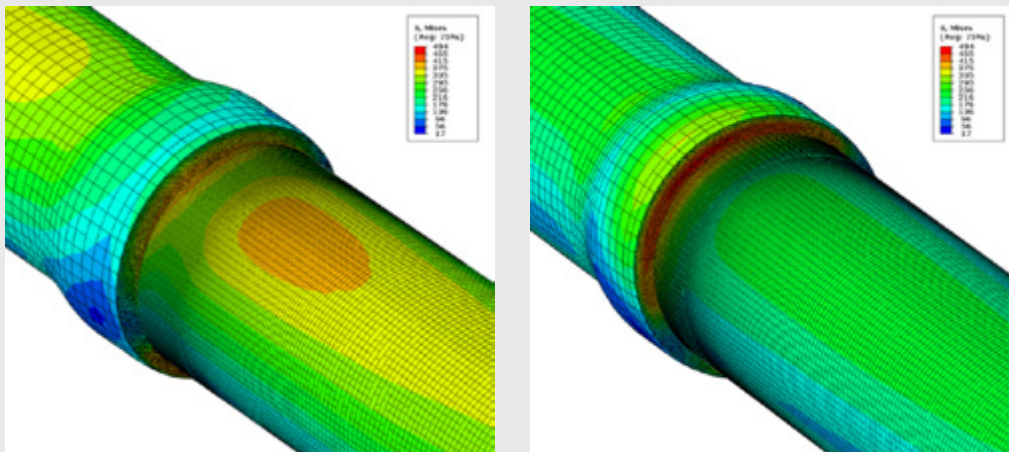
Bei der reinen Biegebeanspruchung treten die größten

Spannungen im Bereich der Schweißnaht an der Unterseite des Rohres auf, wohingegen die Spannungen an der Schweißnahtoberseite und außerhalb des Schweißnahtbereiches deutlich geringer sind (**Bild 9**). Dabei werden an der Unterseite des Rohres im Bereich der Schweißnaht Maximalspannungen von etwa 490 MPa festgestellt. Im Schweißnahtbereich werden die Fließgrenzen örtlich überschritten, so dass plastische Verformungen an der Rohrunterseite auftreten, während sie an der Oberseite vernachlässigbar gering ausfallen (**Bild 10**). Die maximalen Dehnungen an der Schweißnahtunterseite betragen etwa 3 %.

Bei der kombinierten Beanspruchung liefert die Simulation eine sehr ähnliche Spannungsverteilung wie bei reiner Biegebelastung mit nur geringfügig erhöhten Spannungswerten im Muffenbereich (**Bild 11**). Auch hinsichtlich der plastischen Verformungen im Schweißnahtbereich wird kein signifikanter Unterschied zur reinen Biegebeanspruchung



**Bild 10:** Plastische Dehnung im Rohrlängsschnitt an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts) bei Durchbiegung des Rohres (Biegeradius  $r = 500 D_o$ )



**Bild 11:** Spannungsverteilung [MPa] an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts) der Rohrverbindung bei kombinierter Belastung (Innendruck 200 bar, Durchbiegung  $500 D_w$ )

festgestellt (vgl. **Bild 10** und **Bild 12**).

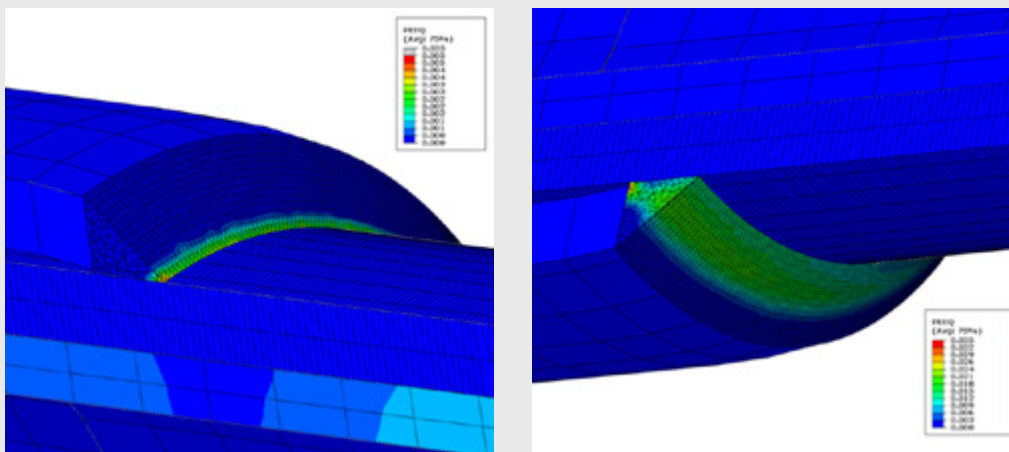
Die Ergebnisse zeigen, dass unter kombinierter Beanspruchung der Rohrverbindung die größten Spannungen im Bereich der Schweißnaht zu erwarten sind. Die Biegebeanspruchung liefert dabei mit Blick auf die berechnete Spannungsverteilung und plastische Dehnung einen wesentlich größeren Beitrag als die Druckbeanspruchung.

### Ergebnisse der Laboruntersuchungen

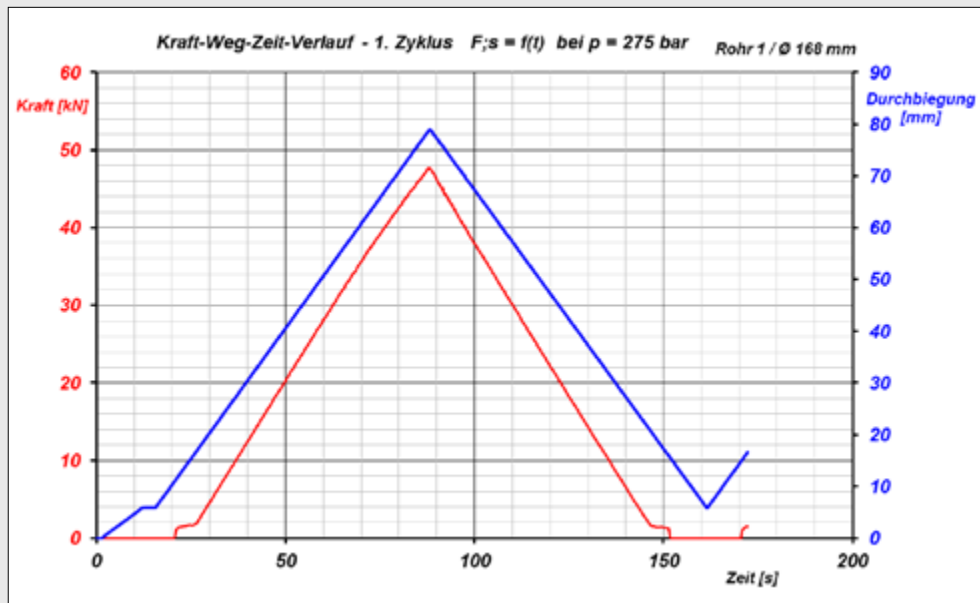
Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der FEM-Simulation wird die Untersuchung im Testportal an der gleichen Rohrabmessung durchgeführt. Die eingesetzte Rohrlänge beträgt 5,6 m. Die zu prüfende Schweißverbindung wird mittig ausgerichtet. Die Biegekraft wird über eine dem Rohr angepasste Halbschale neben der Muffenschweißung in den Rohrkörper eingeleitet (vergl. Bild 5). Während sich die FEM-Simulation auf die später zu erwartenden Betriebsbedingungen beschränkt, werden bei den Laboruntersuchungen teilweise auch schärfere Prüfbedingungen gewählt, um ggf. auch die Grenzen der Rohrausführung zu erfassen. Auf Basis der FEM-Simulation sind dabei das Verhalten der Schweißverbindung und vor allem die Schweißnaht selbst von besonderem Interesse. Da die Festigkeit des Schweißmaterials mit 380 MPa angegeben ist, wurde dieser Wert angesichts der wesentlich höheren Festigkeiten des Rohres auch bei der Berechnung der untersuchten Lastfälle zugrundegelegt. Nach DIN 2880 ist bei dieser Festigkeit ein Biegeradius von 51 m ( $300 D_w$ ) entsprechend einer Durchbiegung von 77 mm (Prüflänge 5,6 m) zulässig. Dieser Biegeradius wird im ersten Schritt mit einem Innendruck von 275 bar kombiniert. Es werden keine Undichtigkeiten festgestellt. In **Bild 13** ist der Prüfzyklus für diesen kombinierten Lastfall dargestellt.

tenden Betriebsbedingungen beschränkt, werden bei den Laboruntersuchungen teilweise auch schärfere Prüfbedingungen gewählt, um ggf. auch die Grenzen der Rohrausführung zu erfassen. Auf Basis der FEM-Simulation sind dabei das Verhalten der Schweißverbindung und vor allem die Schweißnaht selbst von besonderem Interesse. Da die Festigkeit des Schweißmaterials mit 380 MPa angegeben ist, wurde dieser Wert angesichts der wesentlich höheren Festigkeiten des Rohres auch bei der Berechnung der untersuchten Lastfälle zugrundegelegt. Nach DIN 2880 ist bei dieser Festigkeit ein Biegeradius von 51 m ( $300 D_w$ ) entsprechend einer Durchbiegung von 77 mm (Prüflänge 5,6 m) zulässig. Dieser Biegeradius wird im ersten Schritt mit einem Innendruck von 275 bar kombiniert. Es werden keine Undichtigkeiten festgestellt.

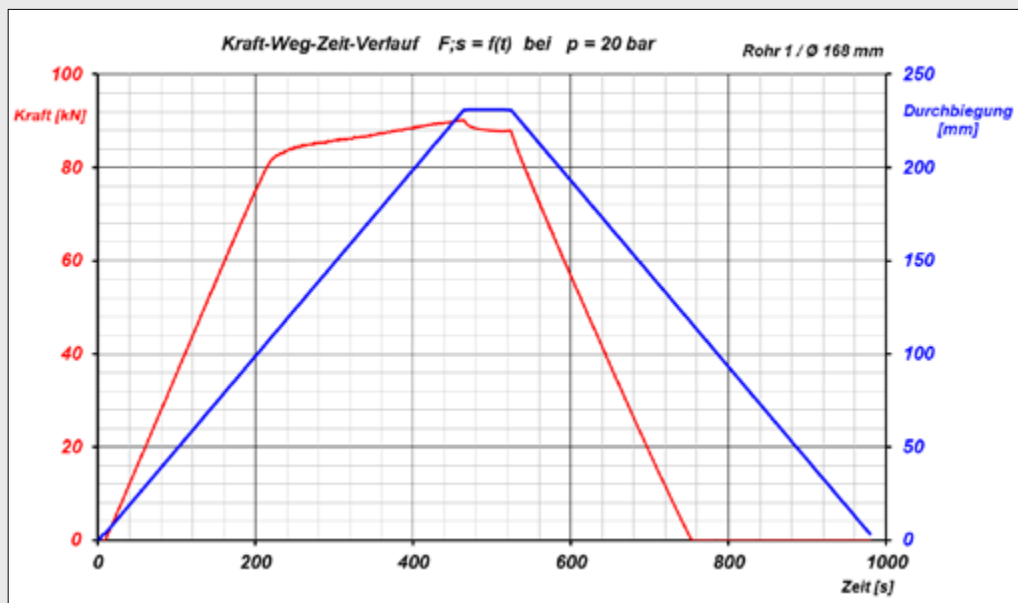
In **Bild 13** ist der Prüfzyklus für diesen kombinierten Lastfall dargestellt.



**Bild 12:** Plastische Dehnung im Rohrlängsschnitt an der Oberseite (links) und der Unterseite (rechts) der Rohrverbindung bei kombinierter Belastung (Innendruck 200 bar, Durchbiegung  $500 D_w$ )



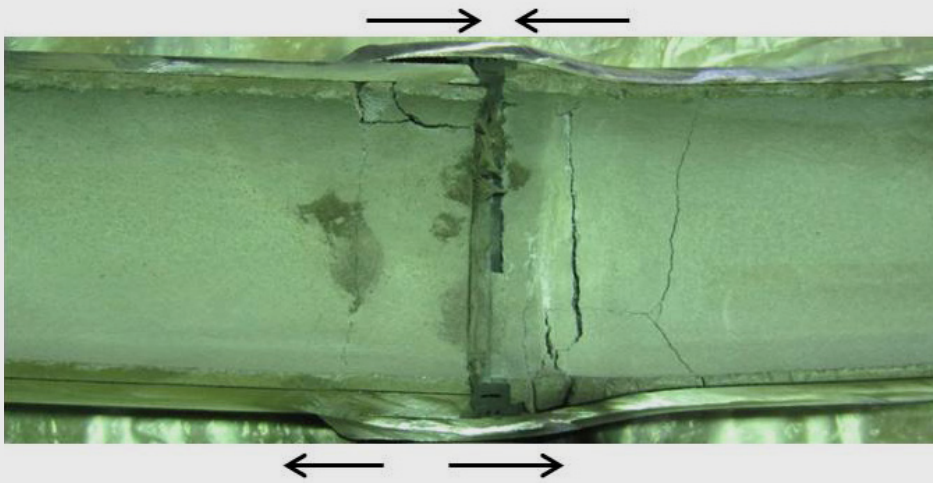
**Bild 13:** Kraft-Weg-Zeit-Verlauf bis zu einer Durchbiegung des Rohres von  $300 D_a$  und bei einem Innendruck von 275 bar



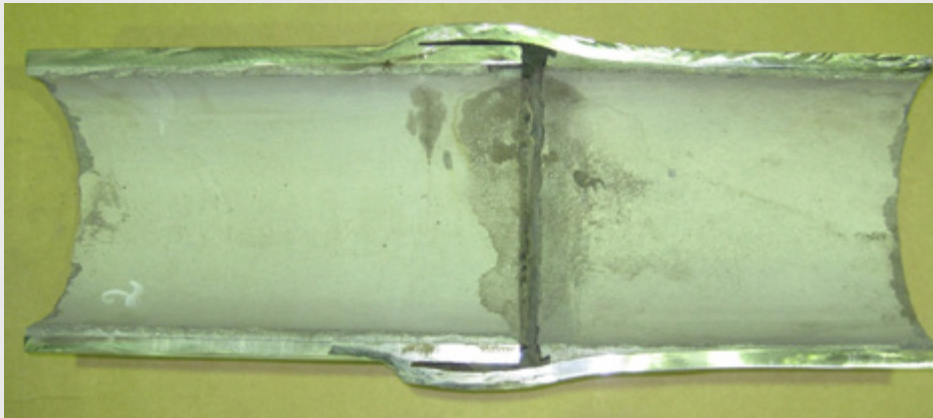
**Bild 14:** Kraft-Weg-Zeit-Verlauf bis zu einer Durchbiegung des Rohres von  $100 D_a$

**Tabelle 2:** Ergebnis der Zugprüfungen nach DIN EN ISO 6892-1 (Muffe, Rohr)

Probe	Abmessung(mm)	$L_0$ (mm)	$R_e$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)	Z (%)	Probentyp	T (°C)	Bemerkung
Rohr	$\varnothing$ 6,01	30	518/514	591	30	71,7	PML	RT	Y/T = 0,88
Rohr	$\varnothing$ 6,01	30	520/515	587	28,5	68,0	PML	RT	Y/T = 0,89
Rohr	$\varnothing$ 6,02	30	540/539	612	26,5	75,2	PML	RT	Y/T = 0,88
Muffe	$\varnothing$ 6,01	30	460/456	574	26,5	68,0	PML	RT	Y/T = 0,80
Muffe	$\varnothing$ 6,02	30	469/457	574	28,5	70,0	PML	RT	Y/T = 0,82
Muffe	$\varnothing$ 6,02	30	465/465	576	28,5	70,0	PML	RT	Y/T = 0,81



**Bild 15:** Verformung der Muffe nach einer Durchbiegung von  $100 D_a$



**Bild 16:** Die Zementmörtelauskleidung im Verbindungsbereich nach zehnmaliger Durchbiegung ( $500 D_a$ )

Die FEM-Simulation zeigt, dass die Biegung einen wesentlich größeren Beitrag zu den auf die Muffenverbindung wirkenden Kräften leistet als der Innendruck. Es ist naheliegend, Rohr und Rohrverbindung einer wesentlich stärkeren Biegung zu unterwerfen, um die tatsächlichen Veränderungen im Verbindungsbereich erfassen zu können. In diesem Fall wird eine Durchbiegung von 225 mm gewählt. Dies entspricht einem Biegeradius von fast 17 m ( $100 D_a$ ).

In **Bild 14** ist der Kraft-Weg-Zeit-Verlauf bis zu einer Durchbiegung des Rohres von  $100 D_a$  dokumentiert. Deutlich ist der Übergang vom elastischen zum plastischen Werkstoffverhalten bei einer Durchbiegung von etwa 110 mm zu erkennen. Dieses Ergebnis ist deshalb so interessant, weil dieser Wert mit dem daraus resultierenden Biegeradius von 35 m deutlich unterhalb des bei der angenommenen Schweißnahtfestigkeit zulässigen Wertes von 51 m liegt. Der bei einer Berechnung nach DIN 2880 berücksichtigte Sicherheitsbeiwert von  $S = 1,1$  ist keine Erklärung, da ohne diesen Sicherheitsbeiwert die Belastungsgrenze bei einem

Biegeradius von 46 m erreicht wird. Bei der Untersuchung des Muffenbereiches nach der Prüfung ist zu erkennen, dass nicht die Schweißnaht, sondern die Muffe selbst der größten Verformung unterlegen ist (**Bild 15**). Die Zementmörtelauskleidung im Verbindungsbereich wird erheblich geschädigt.

Eine anschließende materialtechnische Untersuchung des Rohrwerkstoffes im Grundkörper und im Muffenbereich zeigt, dass die zur Muffenherstellung erforderliche Erwärmung des Rohrendes einen deutlichen Einfluss auf die Festigkeit des Werkstoffes hat (**Tabelle 2**). Die Festigkeit nimmt von den am Rohrschaft gemessenen 520 MPa im Muffenbereich auf etwa 460 MPa ab. Die Festigkeit des Schweißwerkstoffes liegt auf einem deutlich höheren Niveau, so dass unter Laborbedingungen kein Versagen der Schweißnaht beobachtet wird.

Für den Anwendungsfall zeigt ein weiterer Laborversuch, dass die im Standardfall zulässige Biegung von  $500 D_a$  keinen Einfluss auf die Zementmörtelauskleidung hat. Unter



Berücksichtigung dieser Faustformel ergibt sich ein zulässiger Biegeradius von etwa 84 m mit einer hier relevanten Durchbiegung von 47 mm. Durch eine zehnmahlige Wiederholung des Biegevorgangs wird die dynamische Belastung bei der Verlegung simuliert (**Bild 16**). Verformungen des Verbindungsbereiches werden nicht beobachtet.

### Fazit

FEM-Simulation und Laborergebnisse bestätigen die uneingeschränkte Eignung der hier vorliegenden dickwandigen Rohrausführung für den vorgesehenen Anwendungsbereich im Rahmen der für Wasserrohre vorgesehenen Standardverlegebedingungen. Probleme mit der Schweißnaht sind nicht zu erwarten, da für den Schweißwerkstoff mindestens dem Rohrwerkstoff entsprechende Festigkeiten gefordert sind. In der FEM-Simulation war die in der Laboruntersuchung beobachtete Verformung der Muffe nicht vorhersehbar, da einerseits für Rohr und Muffe homogene Festigkeitsverhältnisse angenommen wurden und andererseits die tatsächliche Festigkeit des Schweißwerkstoffs nicht bekannt war. Durch eine Anpassung der Fließkurven im Simulationsmodell lassen sich die beobachteten Veränderungen abbilden. Auf diese Weise können dann auch für ähnlich gelagerte Lastfälle mit anderen Werkstoffen und Wanddicken Vorhersagen getroffen werden.

### Literatur

- [1] DIN 2460 „Stahlrohre und Formstücke für Wasserleitungen“, 06-2006
- [2] Arney, M.S.; Ribeiro, G. S.; Guevara, E.; Bai, R.; Joseph, D. D.: „Cement-lined pipes for water lubricated transport of heavy oil“; International Journal of Multiphase Flow 22 (1996), H. 2, S. 207-221
- [3] DIN 2880 „Anwendung von Zementmörtel-Auskleidung für Gussrohre, Stahlrohre und Formstücke“, 01-1999
- [4] DIN EN 598 „Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren“, 10-2009
- [5] Mang, H; Hofstetter, G: „Festigkeitslehre“; 3. Auflage, Springer; 2008

**SCHLAGWÖRTER:** Öl- und Gasförderung, Wasserinjektionsleitungen, Rohrbiegung, Rohrverbindung, FEM, numerischer Festigkeitsnachweis

## AUTOREN



M.Sc. **TIM DALLY**  
Universität Siegen  
Tel. +49 271 740 4643  
tim.dally@uni-siegen.de



Dr. **RALF NÖTZEL**  
Universität Siegen  
Tel. +49 271 740 2158  
ralf.noetzel@uni-siegen.de



Prof. Dr. **KERSTIN WEINBERG**  
Universität Siegen  
Tel. +49 271 740 4641  
kerstin.weinberg@uni-siegen.de



Dr. **HANS-JÜRGEN KOCKS**  
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,  
Siegen  
Tel.: +49 271 691 170  
hans-juergen.kocks@smlp.de



Dr. **JURI ROSEN**  
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,  
Siegen  
Tel. +49 271 691 356  
juri.rosen@smlp.de

# 1. Praxistag Hauseinführung

27. April 2017, Gelsenkirchen

[www.praxistag-hauseinfuehrung.de](http://www.praxistag-hauseinfuehrung.de)

**JETZT  
ANMELDEN!**

