
6
Stahlrohre

Machbarkeitsstudie zur grabenlosen Verlegung von Stahl-Leitungsrohren

Weitergehende Untersuchungen zulässiger Biegeradien

Von Susanne Höhler, Hans-Jürgen Kocks, Steffen Zimmermann

1 Einleitung

Mit Blick auf nicht konventionelle Verlegetechniken wie die grabenlose Verlegung unterliegen Rohrwerkstoffe heute immer größeren Anforderungen. Wurden bei der Verlegung mit konventionellen Verfahren unter Betriebsbedingungen von Verteilungsleitungen die Möglichkeiten eines Stahlrohres kleinerer Dimension kaum angetastet, gehen neuere Technologien in die Richtung, aus Wirtschaftlichkeitsgründen die mechanischen Eigenschaften der Rohrwerkstoffe weitgehend auszunutzen. Dazu zählt z.B. das „Reeling“ von Leitungen, bei dem gezielt plastische Verformungen des Rohrstranges in Kauf genommen werden. Das hierfür nötige Verformungsvermögen muss vom Rohr bereitgestellt werden. Damit sind im Sinne der Zulässigkeit die in den Normen beschriebenen Biegeradien von denen zu unterscheiden, die aufgrund der Verformungseigenschaften des Werkstoffes erreichbar sind. Für die zulässigen Biegeradien müssen einerseits die Anforderungen aus den Regelwerken beachtet werden. Der Werkstoff ist so auszuwählen, dass die designierte Verformung die Leitungssicherheit im späteren Betrieb nicht beeinträchtigt. Gleichzeitig sollen die Werkstoff- und Bauteileigenschaften im Sinne der Wirtschaftlichkeit weitestgehend ausgeschöpft werden. Es stellt sich also die Frage nach Grenzwerten zulässiger Verformungen, die mechanisch begründet sind und anspruchsvolle Verlegeverfahren effizienter und wirtschaftlicher machen.

2 Biegeradien im derzeitigen Regelwerk

Bei der Kalkulation von Biegeradien für Stahlleitungsrohre sind in den Regelwerken drei Anwendungsfälle zu unterscheiden, die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt sind:

1. Handling der Rohre: z.B. Biegung beim Absenken des Rohrstrangs in den Graben
2. Richtungsänderung der Leitung: Krümmungen in der Verlegetrasse
3. Grabenloses Verfahren: Kombination von Biegung und axialer Zugkraft beim Rohreinzug

2.1 Handling der Rohre auf der Baustelle

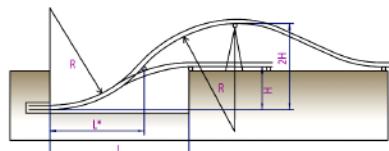
Beim Handling der Rohre auf der Baustelle dürfen, unabhängig vom Anwendungsbereich der Rohre, die Biegeradien im elastischen Bereich, bis zum Erreichen der Streckgrenze, ausgenutzt werden. Die ehemalige DIN 2413-1 [1] liefert generell für Stahlrohre mit Innendruck in Abschn. 5.1.3 die Berechnungsgrundlage für eine reine Biegebeanspruchung, Gleichung (1):

$$\sigma_i = \pm \frac{E \cdot D_a}{2R} \quad \Leftrightarrow \quad R_{\min} = \frac{E \cdot D_a}{2R_p} \quad (1)$$

mit

- σ_t Längsspannung in der Rohrwand infolge Krümmung (N/mm^2)
- R_{min} zulässiger Biegeradius (mm)
- D_a Außendurchmesser (mm)
- E Elastizitätsmodul (210 000 N/mm^2)
- R_p Streckgrenze, z.B. 0,2% - oder 0,5% Dehngrenze des Rohrwerkstoffs (N/mm^2)

In Gleichung (1) sind weder weitere Zugkräfte in Axialrichtung, noch die spätere Innendruckbeanspruchung der Rohre berücksichtigt. Dieser Anwendungsfall ergibt sich zwangsläufig beim Absenken eines Rohrstranges während der konventionellen Bauweise im offenen Graben (Bild 1, links) oder bei der Anwendung eines Oberbogens zur Reduktion der Abmessung einer Startgrube für das Spülbohrverfahren (Bild 1, rechts), siehe z.B. DVGW-Arbeitsblatt GW 321 [2]. Bei der Anwendung des Oberbogens ist zu berücksichtigen, dass Stahlrohre unter Biegung im elastischen Bereich je nach Dimension und Wanddicke Rückstellkräfte aufweisen, die ggf. eine zusätzliche Führung des Rohres erfordern.



$$\text{wobei: } L = \sqrt{H \cdot (4 \cdot R - H)}$$

L = Länge der Startbaugrube (m)
 H = Rohrsohlentiefe (m)
 R = zulässiger Biegeradius (m)

Bild 1: Konventionelle Verlegung (links), Kalkulation des Oberbogens für den Rohreinzug (rechts)

2.2 Richtungsänderung der Leitung

Für die Ausnutzung des elastischen Biegeradius zur Richtungsänderung einer Rohrleitung ist auch der später vorliegende Innendruck einzubeziehen, denn Rohrkrümmung und somit Biegespannungen treten gleichzeitig mit dem Betriebsdruck auf. Für den Gasbereich lässt das Regelwerk des DVGW mit den Arbeitsblättern G 462-1/2 [3,4] und G 463 [5] einen Biegeradius entsprechend folgender Berechnungsgrundlage zu (2):

$$R_{min} = 206 \cdot \frac{S}{R_p} D_a \quad (2)$$

mit

- R_{min} zulässiger Biegeradius (m)
- D_a Außendurchmesser (mm)
- R_p Mindeststreckgrenze (N/mm^2)
- S Sicherheitsbeiwert ($S = 1,5$ für Betriebsdrücke bis 16 bar, für Betriebsdrücke > 16 bar siehe je nach Werkstoff DVGW-Arbeitsblatt G 463)

Bei Anwendung der Biegeradien nach (2) ist eine 100%ige Ausnutzung der Innendrücke erlaubt, die sich bei der Auslegung für das gerade Rohr bei gegebener Wanddicke und Stahlgüte ergeben.

Da Gleichung (2) auch für Rohre im Anwendungsbereich bis 16 bar nach DVGW-Arbeitsblattes G 462-1/2 anzuwenden ist, werden diese speziell im kleineren Nennweitenbereich eher konservativ ausgelegt. Dies liegt an der generellen Überdimensionierung der Wanddicken bei geringen Durchmessern im Fall der Verteilungsleitungen, die auf schweißtechnische Aspekte zurückzuführen sind. Würde auch hier ein mehraxialer Spannungsnachweis bei gleichzeitigem Vorliegen von Biegung und Innendruck (Längs- und Umfangsspannung) bis zum Erreichen der Fließgrenze geführt werden, wären deutlich kleinere Biegeradien zulässig.

Bei Wasserrohren ist mit Blick auf die Biegeradien sowohl für das Handling, als auch für eine Richtungsänderung unter Berücksichtigung eines Sicherheitsbeiwertes von 1,1 in der Leitungstrasse die Gleichung (1) bindend [6]. Im Falle des L 235 (St 37.0) ergibt sich hierbei die Faustformel $500 \cdot D_a$. Unter Anwendung dieser Biegeradien müssen jedoch ggf. die zulässigen Innendrücke angepasst werden.

2.3 Grabenlose Verlegung: Kombination von Biegung und axialer Zugkraft

Die Kombination aus Biegung und Zugbeanspruchung ist in zunehmendem Maße bei der Anwendung grabenloser Bauverfahren zu berücksichtigen (Bild 2).



Bild 2: Einzug eines Stahlrohrs im Spülbohrverfahren

Gleichung (1) fließt prinzipiell auch in die Berechnung der zulässigen Zugkräfte während der grabenlosen Rohrverlegung ein. Für einen gegebenen Biegeradius lässt sich durch Umstellen dieser Gleichung die zur Biegung erforderliche Werkstofffestigkeit R_p (N/mm^2) berechnen:

$$R_p = \frac{E \cdot D_a}{2 R_{min}}, \quad R_{min} \text{ in } [\text{mm}] \Leftrightarrow R_p = \frac{E \cdot D_a}{2000 R_{min}}, \quad R_{min} \text{ in } [\text{m}] \quad (3)$$

Für den geraden Zug, ohne Biegung des Rohrstrangs, ergibt sich die zulässige Zugkraft gemäß Gleichung (4) [2]:

$$F_{BZzul} = \sigma_{BZzul} \frac{A_{quer} \cdot \nu_{NFeld}}{1000}, \quad F_{BZzul} \text{ in [kN]}, \quad \sigma_{BZzul} = \frac{R_p}{S} \quad (4)$$

mit

F_{BZzul}	zulässige Zugkraft während des Bauzustandes (kN)
σ_{BZzul}	zulässige Spannung während des Bauzustandes (N/mm ²)
D_a	Rohraußendurchmesser (mm)
E	Elastizitätsmodul (N/mm ²)
R_{min}	Mindestbiegeradius (m)
A_{quer}	Rohrwandquerschnittsfläche (mm ²)
ν_{NFeld}	zulässiger Ausnutzungsgrad der Feldschweißnaht
R_p	Mindeststreckgrenze des Rohrwerkstoffes (N/mm ²)
S	Sicherheitsbeiwert der Zugkraftberechnung (= 1.1)

Im Falle einer Biegezugbeanspruchung wird σ_{BZzul} entsprechend DVGW-Arbeitsblatt GW 312 [7] um den Faktor 1,36 (f_{BZ} = Faktor für die zul. Spannung des Bauzustandes) angehoben:

$$\sigma_{BZzul} = \frac{R_p}{S} \cdot f_{BZ} \quad (5)$$

Bei dieser kombinierten Beanspruchung aus Biegung und Zug wird die zulässige Spannung im Bauzustand um den erforderlichen Festigkeitsanteil für die Biegung, Gleichung (3), reduziert (s. z.B. die Berechnungsgrundlagen der DVGW-Arbeitsblätter GW 321 [2]):

$$F_{BZzul} = \left(\sigma_{BZzul} - \frac{D_a \cdot E}{2000 \cdot R_{min}} \right) \frac{A_{quer} \cdot \nu_{NFeld}}{1000} \quad (6)$$

Die Spannungsanteile aus Biegung und Zug werden bei dieser Betrachtung unter Berücksichtigung einer um den Faktor 1,36 erhöhten Streckgrenze additiv behandelt, eine Vorgehensweise, die nur im Falle eines Werkstoffes mit linear elastischem Verhalten zulässig ist. Der Designfaktor korrigiert dabei die für Biegung und Zug mehrfach berücksichtigten Sicherheitsbeiwerte, so dass die zulässige Zugkraft für das Bauteil mit einer Sicherheit von 1,1 behaftet ist (s. Bild 3).^{*} Bei der Kombination aus Biegung und Zug, wie sie bei der Verlegung mit den grabenlosen Bauverfahren eine Rolle spielt, entspricht der Verlauf einer Bohrung bzw. einer Einzugsstrecke auch der endgültigen Lage eines Rohres. Während somit für das Handling im Vorfeld des Einzuges (Oberbogen, Führung des Rohrstranges usw.) üblicherweise der in 2.1

* Bei Wasserrohren wäre der Designfaktor aufgrund des geringer angesetzten Sicherheitsbeiwertes für die Biegung wesentlich größer. Das DVGW-Merkblatt GW 312 unterscheidet jedoch in diesem Punkt nicht zwischen Gas- und Wasserleitungen.

beschriebene Fall zu berücksichtigen ist, müssen für den Leitungsverlauf die Biegeradien entsprechend Abschnitt 2.2 beachtet werden.

zul. Zugkraft bei Biegung + Zug	nach Gleichung (6)
F_{BZzul}	$= \left(\sigma_{BZzul} - \frac{D_a \cdot E}{2000 \cdot R_{min}} \right) \frac{A_{quer} \cdot \nu_{NFeld}}{1000}$
$\sigma_{BZzul} \frac{A_{quer} \cdot \nu_{NFeld}}{1000}$	$= \left(\sigma_{BZzul} - \frac{D_a \cdot E}{2000 \cdot R_{min}} \right) \frac{A_{quer} \cdot \nu_{NFeld}}{1000}$
nach Kürzen: σ_{BZzul}	$= \sigma_{BZzul} - \frac{D_a \cdot E}{2000 \cdot R_{min}}$
zul. Spannung aus Zugkraft σ_{BZzul}	= zul. Spannung aus Biegezug, Gl. (5) $= \frac{R_p}{S} \cdot f_{BZ}$
σ_{BZzul}	- zul. Biegespannung, mit R_{min} nach Gl. (2) $= \frac{R_p}{2 \cdot S}$
σ_{BZzul}	$= \frac{R_p}{1,1} \cdot 1,36$ $= \frac{R_p}{2 \cdot 1,5^*}$
σ_{BZzul}	$= R_p \left(\frac{1,36}{1,1} - \frac{1}{2 \cdot 1,5} \right) = \frac{R_p}{1,1}$

*Sicherheitsfaktor für die Biegung (s. z.B. DVGW-Arbeitsblatt G 462)

Bild 3: Herleitung des Designfaktors zur Ermittlung der zulässigen Zugkraft nach Gleichung (6)

Unabhängig von den werkstoffbezogenen Biegeradien sind darüber hinaus verfahrensbedingte Biegeradien zu berücksichtigen. Diese verfahrensbedingten Biegeradien basieren auf Erfahrungswerten und sind wie im Falle des Spülbohrverfahrens werkstoffunabhängig in den Technischen Richtlinien der Drilling Contractors Association (DCA) [8] aufgenommen worden. Beim Vergleich der werkstoff- und verfahrensbezogenen Biegeradien gilt dann jeweils der größere Radius von beiden.

Dieser Abgleich ist beispielhaft für Gasleitungsrohre verschiedener Dimensionen in Tabelle 1 dargestellt. Je nach eingesetztem Werkstoff liegen die werkstoffbezogenen Biegeradien nach DVGW Arbeitsblättern G 462 und G 463 oberhalb oder unterhalb der empfohlenen Biegeradien der technischen Richtlinie der DCA [2,3,4,5]. Für Gasrohre der Werkstoffgüte L235 GA (ehem. St 37.0) gelten in den hier dargestellten Dimensionen die produktbezogenen Biegeradien, während im Falle der Rohre aus L360 GA (ehem. St 52.0) die Biegeradien nach Technischer Richtlinie der DCA anzuwenden sind. Diese verfahrensbedingten Biegeradien fließen dann in die Berechnung der zulässigen Zugkräfte ein.

Tab. 1: Vergleich der produktbezogenen Biegeradien für Gasleitungen bis 16 bar (Rohre nach DIN EN 10208-1, Biegeradien nach DVGW-Arbeitsblatt G 462-1/2 [3,4])

Dimension			Empfehlung der DCA*	Gasleitungsrohr L235 GA	Gasleitungsrohr L360 GA
Nominal	Da (mm)	Wanddicke (mm)	Biegeradius (m)	Biegeradius (m) nach Gl. (2)	Biegeradius (m) nach Gl. (2)
DN 80	88,9	3,6	89	117	76
DN 100	114,3	3,6	114	150	98
DN 150	168,3	4,0	168	221	144
DN 200	219,1	4,5	219	288	188
DN 250	273,0	5,0	273	359	234
DN 300	323,9	5,6	323	426	278
DN 350	355,6	5,6	356	468	305
DN 400	406,4	6,3	363	534	349
DN 500	508,0	6,3	507	668	436
DN 600	610,0	7,1	667	802	424

*Drilling Contractors Association

3 Bewertung der Anforderungen an Biegeradien

Dieser Beitrag soll, über die sehr allgemein gehaltenen Formeln in den Regelwerken hinaus, die eigentliche Berechnungsbasis für das Biegen von Rohren erläutern und damit ggf. auch Spielräume in Planung und Ausführung eröffnen, ohne die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte anzutasten. Hierzu muss zunächst die Berechnungsgrundlage erfasst werden.

Generell kann der Spannungszustand in einem Rohr, der aus Innendruck, Biegung, Axialkraft, oder aus einer Kombination dieser Einwirkungen, resultiert, mit Hilfe einer Fließ- bzw. Versagenshypothese bewertet werden. Fließhypthesen reduzieren den im Allgemeinen vorliegenden dreidimensionalen Spannungszustand auf einen einaxialen „Vergleichsspannungszustand“. Die Vergleichsspannung wird einem Werkstoffkennwert gegenüber gestellt, der in der Regel durch die Streckgrenze, beaufschlagt mit einem Sicherheitsfaktor, gegeben ist. Erreicht oder überschreitet die Vergleichsspannung den Werkstoffkennwert, tritt ein Zustand ein, aus dem die kritischen Einwirkungsgrößen abgeleitet werden können, z.B. der maximal zulässige Innendruck, die maximal zulässige Axialkraft oder der minimal zulässige Biegeradius.

Für Stähle hat sich die von Mises Fließhypothese bewährt. Liegt in einer Rohrwand ein dreidimensionaler Hauptspannungszustand vor, berechnet sich die Vergleichsspannung in Abhängigkeit der Spannungskomponenten gemäß Gleichung (7):

$$\sigma_{V,vonMises} = \sqrt{\sigma_q^2 + \sigma_r^2 + \sigma_x^2 - \sigma_q\sigma_r - \sigma_q\sigma_x - \sigma_x\sigma_r} \quad (7)$$

mit

σ_q , σ_r , σ_x Umfangsspannung, Radialspannung, Axialspannung

Wenn die Radialspannung σ_r vernachlässigt werden kann, was bei dünnwandigen Stahl-Leitungsrohren der Fall ist, lässt sich der Fließzustand nach von Mises anschaulich im zweidimensionalen Spannungsraum graphisch darstellen. Die kritische Umfangsspannung auf der Ordinate ist abhängig von der Axialspannung auf der Abszisse, und man erhält einen elliptischen Verlauf, wie in Bild 4 dargestellt. Werkstoffverfestigung ist in diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

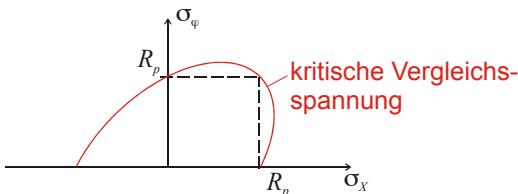


Bild 4: von Mises Fließhypothese für den ebenen Hauptspannungszustand

Anhand des Diagramms in Bild 4 können die verschiedenen Spannungszustände, die bei den betrachteten Verlegezuständen eintreten, veranschaulicht werden. Wesentlich ist, dass externe Axialkräfte und Biegemomente nur Axialspannungen (σ_x) verursachen. Der Lastfall ist einaxial. Innendruck hingegen bewirkt Spannungskomponenten in Umfangs- und in Axialrichtung, dies ist somit ein mehraxialer Lastfall. Häufig wird angenommen, dass gemäß der Kesselformeln die Axialspannung genau die Hälfte der Umfangsspannung ist, s. Gleichung (8). Dies gilt für die Annahme eines beidseitig mit Böden abgeschlossenen Rohrs, es entspricht einer verlegten Leitung näherungsweise.

$$\sigma_\varphi = p \frac{D}{2t}, \quad \sigma_x = \frac{1}{2} p \frac{D}{2t} \quad (8)$$

mit

p Innendruck

D, t Durchmesser, Wanddicke

Die eingearbeitete Leitung erfährt bei Innendruck Axialspannungen, die aus der Dehnungsbehinderung herrühren. Die Spannungskomponenten werden wie in (9) angesetzt. Für die Querdehnzahl von 0.3 weichen die Ergebnisse nach (8) und (9) nur gering voneinander ab.

$$\sigma_\varphi = p \frac{D}{2t}, \quad \sigma_x = \nu \cdot \sigma_\varphi \quad (9)$$

mit

ν : Querdehnzahl, für Stahl bei elastischem Materialverhalten $\nu = 0.3$

In Bild 5 sind die hier relevanten Spannungszustände in das von Mises Hauptspannungsdia gramm eingetragen. Bild 5, links, zeigt die beiden einaxialen Zustände, die Gleichung (1) und

Gleichung (6) zugrunde liegen. Beide Zustände beinhalten keinen Innendruck und somit keine Umfangsspannung; die Punkte liegen auf der Abszisse. Bild 5, rechts, verdeutlicht die mehraxialen Spannungszustände, die Gleichung (2) entsprechen. In Bild 5 sind keine Sicherheitsfaktoren berücksichtigt, somit liegen die Punkte exakt auf dem Niveau der Streckgrenze R_p .

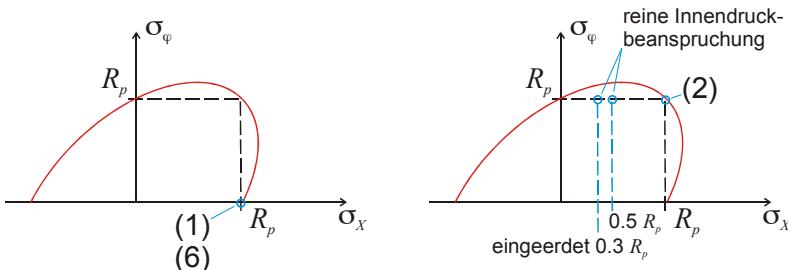


Bild 5. Betrachtete Spannungszustände (links: einaxial, rechts: mehraxial)

Die eingezeichneten Spannungszustände bedeuten folgendes:

- (1) Spannungszustand, der Gl. (1) zugrunde liegt: Reine Biegung beim Handling auf der Baustelle:
Die Biegespannung in Axialrichtung entspricht der Streckgrenze, 100%ige Ausnutzung des Werkstoffs
- (6) Spannungszustand, der Gl. (6) zugrunde liegt: Biegung + Axialkraft beim Rohreinzug:
Aus dem Biegeradius resultiert bereits eine Axialspannungskomponente, die für die Axialzugkraft nicht mehr zur Verfügung steht. Die Differenz zwischen Streckgrenze und Biegespannung kann für die Zugkraft aufgewendet werden. 100%ige Ausnutzung des Werkstoffs.
- (2) Spannungszustand, der Gl. (2) zugrunde liegt, Biegung + Innendruck:
Die Umfangs- und Axialspannungen sind 100%ig ausgenutzt. Aufgrund der Annahme in Gl. (8) entstehen durch 100%ige Innendruckausnutzung bereits Axialspannungen, die 50% der Streckgrenze in Anspruch nehmen. Die übrige Kapazität von 50% steht der Biegespannung zur Verfügung. Gegenüber Fall (1), der reinen Biegung, kann bei gleichzeitiger Einwirkung von Druck und Biegung nur noch 50% der Biegung ertragen werden. Der minimal zulässige Biegeradius ist folglich doppelt so groß wie in (1).
Für den Nachweis der eingearbeiteten Leitung nach Gl. (9) werden durch Innendruck nur 30% der Streckgrenze in Axialrichtung aktiviert. 70% der Streckgrenze verbleiben als Reserve für die Aufnahme der Biegespannung. Hierfür wäre Gleichung (2), die 50% der Streckgrenze vorsieht, konservativ, denn eigentlich stünden 70% zur Verfügung.

Nach dieser Betrachtung wird deutlich, dass der elastische Bereich des Werkstoffverhaltens mit den Gleichungen (1) und (6) für die Biegeradien weitgehend zu 100% ausgenutzt wird. Wenn die Streckgrenze als Materialgrenzwert angesetzt wird, ist kein Spielraum zur Verringerung der Biegeradien vorhanden.

Für die Kombination von Innendruck und Biegung ist im Anwendungsbereich der Rohre für Gasleitungen < 16 bar bzw. bei Wasserleitungen im üblichen Innendruckbereich der Wasser-Verteilung die geforderte Nennwanddicke insbesondere bei den kleineren Durchmessern mit Blick auf den zulässigen Innendruck überdimensioniert. Unter schweißtechnischen Aspekten werden hier deutlich größere Wanddicken gewählt, als für die Innendruckbeanspruchung eigentlich erforderlich sind. Die Umfangsspannungen aus der Innendruckbeanspruchung erreichen nur einen geringen Prozentwert der Streckgrenze. In Bild 6 ist der Spannungszustand im von Mises Diagramm gezeigt.

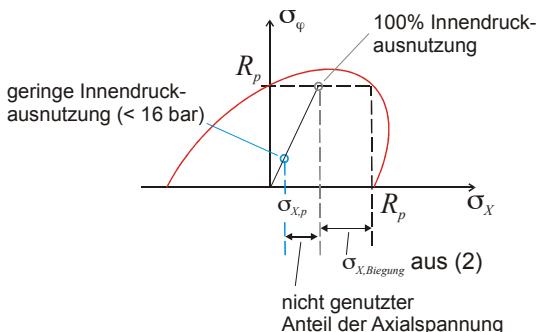


Bild 6 Spannungszustand für überdimensionierte Niedrigdruckleitung (< 16 bar) mit Reserven

Es ist deutlich sichtbar, dass große Reserven hinsichtlich Umfangs- und Axialspannungen vorliegen. Für diese Fälle ist Gleichung (2) sehr konservativ, denn weit mehr als 50% der Streckgrenze könnte rechnerisch für Biegespannungen angesetzt werden. Würde hierfür ein genauerer Nachweis in die Regelwerke aufgenommen, könnten die zulässigen Biegeradien sehr viel wirtschaftlicher ausfallen.

Über die elastische Fließgrenze hinaus besitzen Rohrstähle gerade in niedrigfesteren Güten beachtliches plastisches Verfestigungsvermögen. Wenn plastische Dehnungen in definierten Grenzen toleriert werden, wie es beim „Reeling“ von Rohrsträngen bereits angewendet wird, können die zulässigen Biegespannungen deutlich erhöht werden. Die folglich viel engeren zulässigen Biegeradien sorgen für vereinfachte und wirtschaftlichere Verlegetechniken. Im nächsten Abschnitt wird darauf eingegangen.

4 Reeling von Rohrleitungen

Das so genannte „Reeling“ ist ein Sonderfall für die Verlegung von Rohrleitungen wobei bewusst eine Verformung der Rohre in Kauf genommen wird. In Bild 3 ist die Verlegung einer Off-Shore-Leitung durch den Einsatz eines Verlegeschiffes dargestellt. Die Leitungen werden an der Küste vormontiert und auf Trommeln gewickelt, „gereelt“. Dabei tritt eine zweimalige gegensinnige Verformung des Rohrkörpers auf, die für den späteren Anwendungsbereich mit

Blick auf äußere Lasten und Innendruckbeanspruchung entsprechend zu berücksichtigen ist. Im Gegensatz zu den vorab beschriebenen Fällen werden die Rohre durch das Reeling plastischen Verformungen unterzogen. Es ist nachzuweisen, dass die plastischen Dehnungen einen Grenzwert (z.B. 2% Dehnung) nicht überschreiten.



Bild 7: „Reeling“ von Leitungen in der Off-Shore-verlegung

5 Zulässige Biegeradien bei Berücksichtigung der Werkstoffplastizität

5.1 Biegeradien

Der bei der Leitungsverlegung häufigere Fall der reinen Biegung, ohne gleichzeitige Wirkung des Innendrucks, wird zunächst betrachtet. Die Spannungs-Dehnungs-Zustände sind damit einaxial. Die Untersuchungen können analog für die ergänzende Beanspruchung durch eine Zugkraft, wie es bei der grabenlosen Verlegung mit Rohreinzug der Fall ist, durchgeführt werden.

Den Zusammenhang zwischen Biegeradius und Dehnung in Axialrichtung liefert Gleichung (10).

$$\varepsilon_x = \frac{1}{R} \cdot z \Leftrightarrow R = \frac{1}{\varepsilon_x} \cdot z \quad (10)$$

mit

R Biegeradius

z Abstand der äußeren Querschnittsfaser von der Schwerelinie

ε_x Dehnung in Axialrichtung an der äußeren Querschnittsfaser der Rohrwand

Gl. (10) gilt unter der Voraussetzung eines unveränderten Querschnittes. Die Dehnungen ε_x sind unter diesen Bedingungen linear über den Querschnitt verteilt, und ε_x sind totale Dehnungen, d.h. im Falle plastischer Verformung setzen sie sich zusammen aus den elastischen und den plastischen Dehnungsanteilen. Aus Gl. (10) wird deutlich, dass der Biegeradius eine Funktion allein von der Axialdehnung und dem Geometrieparameter z ist. z ist der Abstand der äußeren Faser (Randfaser) des Bauteils von der Schwerelinie. Bei Rohren gilt:

$$z = \frac{D_a}{2} \quad (11)$$

mit D_a Außendurchmesser

Das heißt, der Biegeradius ist neben der Randfaserdehnung abhängig vom Rohrdurchmesser, jedoch unabhängig von der Wanddicke und der Stahlsorte. Die Berücksichtigung der Wanddicke und die Festigkeitseigenschaften sind nötig, um die erforderlichen Spannungen und Kräfte zu berechnen, um das Rohr um einen bestimmten Radius zu biegen und um größere Verformungen (einschließlich z.B. Ovalisieren des Querschnitts) zu berechnen.

Die kleinstmöglichen Biegeradien, die sich aus Gleichung (10) und Gleichung (11) ableiten, können für verschiedene Rohrdurchmesser in Abhängigkeit von der Längsdehnung dargestellt werden. Das Ergebnis ist in Bild 8 graphisch dargestellt. Die Längsdehnungen (ε) sind totale Dehnungen, d.h. sie enthalten auch den plastischen Anteil. Für totale Dehnungen von 2 % resultieren minimal zulässige Biegeradien zwischen 2,80 m für DN 100 und 5,58 m für DN 200.

Berücksichtigt man das gutmütige Verfestigungsverhalten von niedrigfesten Stählen, z.B. L 360 (ehem. St 52.0), die in der Regel hohe Gleichmaßdehnungen zwischen 10 und 15 % aufweisen, dann ist es nahe liegend, sogar größere plastische Dehnungen als 2 % in Längsrichtung zuzulassen. Besonders vor dem Hintergrund, dass die Reserven der Rohre für Leitungen im Versorgungsbereich bezüglich Wanddicke und Streckgrenze kaum ausgeschöpft werden, könnte eine Dehnungsbeschränkung von 2 % wie sie im Off-Shore-Reeling üblich ist gelockert werden. Wenn für Stahl L 360 beispielsweise eine totale Dehnung von 4 % zugelassen wird, liegen die möglichen Biegeradien zwischen 1,40 m (DN 100) und 2,70 m (DN 200). Der Verleugaufwand wäre gegenüber den herkömmlichen Anforderungen drastisch reduziert. Es ist jedoch anzumerken, dass plastische Instabilität, d.h. lokales Beulen und Ovalität des Rohrquerschnitts, in der Berechnung nicht berücksichtigt ist.

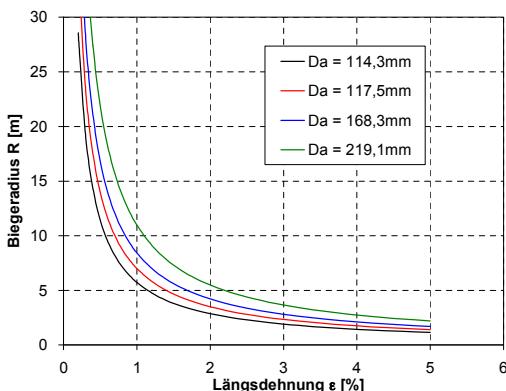


Bild 8: Zulässige Biegeradien in Abhängigkeit von der Axialdehnung (Randfaserdehnung)

5.2 Biegespannungen: Berücksichtigung der Verfestigungsfunktion

Um die aus den Biegeradien entstehenden Biegespannungen zu ermitteln und die Kräfte für die Rohrbiegung abzuschätzen, ist es erforderlich, den Zusammenhang zwischen plastischen Dehnungen und Spannungen berechnen zu können. Dies ist für die Auswahl und Auslegung der Verlegewerkzeuge von Bedeutung.

Während für linearelastisches Verformungsverhalten mit dem Hooke'schen Gesetz ein linearer Zusammenhang besteht, muss der plastische Bereich des Materialverhaltens, der Verfestigungsbereich, mit bestimmten Annahmen abgebildet werden. Es bieten sich Verfestigungsgesetze an, z.B. nach Hollomon [9] oder nach Ramberg & Osgood [10]. Die damit formulierte Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermöglicht es, die Randfaserspannung und die Spannungs-Dehnungs-Verläufe entlang des ganzen Rohrquerschnitts für eine definierte Dehnung von z.B. 2 % zu ermitteln. Daraus können das entsprechende Biegemoment und letztendlich die Biegekräfte abgeleitet werden.

6 Schlussfolgerung

Für die Kalkulation von Biegeradien im derzeitigen Regelwerk stehen einfach handhabbare Gleichungen zur Verfügung. Die Gleichungen basieren bei üblichen Verlegetechniken sowie bei den grabenlosen Verfahren auf linearelastischem Materialverhalten. Die Materialeigenschaften werden bis zum Erreichen der Streckgrenze unter Berücksichtigung der geforderten Sicherheitsbeiwerte weitgehend ausgenutzt. Eine Ausnahme bilden hier beispielsweise Versorgungsleitungen im kleineren Nennweitenbereich, die, bezogen auf den material- und wanddickenbezogenen Auslegungsdruck, bei deutlich niedrigeren tatsächlichen Betriebsdrücken eingesetzt werden und damit noch deutliche Reserven bieten.

Die Erweiterung der Biegeradien unter Berücksichtigung der Werkstoffplastizität eröffnet weiteren Spielraum hinsichtlich Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Das dafür notwendige Verfestigungsverhalten und Verformungsvermögen wird von den Rohrstählen, die besonders im Verteiler- und Versorgungsbereich eingesetzt werden, bereitgestellt. Am Beispiel des im Off-Shore-Bereich angewendeten Reelings ist diese Vorgehensweise selbst im Pipelinebau heute schon als „Stand der Technik“ anzusehen.

7 Literatur

- [1] DIN 2413-1; Stahlrohre - Berechnung der Wanddicke von Stahlrohren gegen Innendruck, Oktober 1993 (zurückgezogen)
- [2] DVGW-Arbeitsblatt GW 321; Steuerbare horizontale Spülbohrverfahren für Gas- und Wasserrohrleitungen; Oktober 2003
- [3] DVGW Arbeitsblatt G 462/1; Errichtung von Gasleitungen bis 4 bar Betriebsüberdruck; September 1976
- [4] DVGW Arbeitsblatt G 462/2; Gasleitungen aus Stahlrohren von mehr als 4 bar bis 16 bar Betriebsdruck – Errichtung; Januar 1985

- [5] DVGW Arbeitsblatt G 463; Gasleitungen aus Stahlrohren für einen Betriebsdruck >16 bar – Errichtung; Dezember 2001
- [6] DIN 2880; Anwendung von Zementmörtelauskleidungen für Gussrohre Stahlrohre und Formstücke; Januar 1999
- [7] DVGW Merkblatt GW 312; Statische Berechnung von Vortriebsrohren; Januar 1990
- [8] Brink, H.J.; Kruse, H.M.G.; Lübbbers, H.; Hergarden, H.J.A.M.; Spiekhou, J.; „Entwurf-richtlinien für den Biegeradius von Stahlrohren mit großem Durchmesser für die Horizontalbohrtechnik“; 3R international 46 (2007) H. 11 S. 740 - 743
- [9] Hollomon J. H.: Tensile deformation. Transactions of the Metallurgical Society of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME) 16 (1949), pp. 268-290.
- [10] Ramberg W., Osgood W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), Technical Note No. 902, 1943

Autoren:**Dr.-Ing Susanne Höhler**

Salzgitter Mannesmann
Forschung GmbH, Duisburg

Tel.: 0203 999 - 3192

E-Mail:

s.hoehler@du.szmf.de

Internet: www.szmf.de

**Dr.rer. nat. Hans-Jürgen Kocks**

Salzgitter Mannesmann Linepipe
GmbH, Siegen

Tel.: 0271 691 - 170

E-Mail:

Hans-Juergen.Kocks@smlp.eu

Internet: www.smlp.eu

**Dr.-Ing Steffen Zimmermann**

Salzgitter Mannesmann
Forschung GmbH, Duisburg

Tel.: 0203 999 - 3112

E-Mail:

s.zimmermann@du.szmf.de

Internet: www.szmf.de

