



Bild 1: Rohrvortrieb mit der Horizontalramme

Fig. 1: Trenchless pipe installation using the horizontal ram

Bemessungskonzept für Stahlrohre zum dynamischen Rohrvortrieb

Dimensioning concept for steel pipes for dynamic trenchless pipe installation

Für die Bemessung von Vortriebsrohren für den dynamischen Rohrvortrieb liefert das deutsche Regelwerk nur wenige Bemessungskriterien. Die Bemessung von Vortriebsrohren kann grundsätzlich nach dem DVGW-Regelwerk GW 312 erfolgen, jedoch gelten die Bemessungsformeln für den statischen Rohrvortrieb. Um den Einsatz von dynamischen Vortriebsverfahren zu optimieren und eine Schädigung des Rohres zu vermeiden wurden theoretische und praktische Untersuchungen zur Entwicklung eines Bemessungskonzeptes für Stahlrohre bei dynamischem Rohrvortrieb durchgeführt. Mit den so entwickelten Bemessungskriterien kann bereits in der Planungsphase eine Optimierung der zu verwendenden Rohre unter Berücksichtigung des gewählten Vortriebsverfahrens vorgenommen werden.

The German reference material supplies only a few criteria for the dimensioning of trenchless installation pipes for dynamic trenchless pipe installation. The dimensioning of trenchless installation pipes can, in principle, be performed on the basis of DVGW Code GW 312, but the dimensioning formulae provided apply only to static trenchless pipe installation. Theoretical and practical investigations have been performed for the development of a dimensioning concept for steel pipes for dynamic trenchless pipe installation, in order to optimize the use of dynamic installation methods and prevent damage to the pipe. The dimensioning criteria thus developed make it possible to perform optimization of the pipes to be used as early as the planning phase, and taking account of the selected installation method.



**Dipl.-Ing. (FH)
Martin Scheipers**

Erdgas-Verkaufs-Gesellschaft mbH, Münster
Tel. 0251/2800-246, E-Mail: martin.scheipers@erdgas.de



Dipl.-Ing. Helmut Lührsen

Dr.-Ing. Veenker Ingenieurgesellschaft mbH, Leipzig
Tel. 0341/21737-60
E-Mail: helmut.luehrsen@veenkermbh.de

Rohrvortriebsverfahren

Im Rohrleitungsbau hat sich für die Kreuzung von Straßen, Gewässern oder anderen besonders sensiblen Bereichen die Rohrverlegung in geschlossener Bauweise durchgesetzt. Trotz der gegenüber der offenen Bauweise oft höheren Kosten bietet dieses Verfahren die Vorteile, dass die Störung des fließenden Verkehrs nahezu ausgeschaltet werden kann und die Erdoberfläche bei sachgemäßer Durchführung nicht beeinflusst wird.

Für diese Art der Rohrverlegung gibt es verschiedene Verfahren mit den unterschiedlichsten Geräten. Neben den steuerbaren Verfahren, zu denen u.a. das Spühlbohr- oder auch HDD-Verfahren gehört, werden vor allem die weit aus weniger aufwendigen nicht steuerbaren Verfahren eingesetzt. Die Anwendungsbereiche bzw. Verfahrensbeschreibungen sind u.a. im DVGW-Merkblatt GW 304 [1] näher beschrieben.

Von den nicht steuerbaren Verfahren wird bei günstigen Bodenverhältnissen am häufigsten die Horizontalramme mit offenem Rohr, die sogenannte „Erdrakete“ verwendet. Dabei wird von einer Startgrube aus ohne Widerlager das offene Stahlrohr mit Hilfe dynamischer Rammenergie durch den Baugrund bis in die Zielbaugrube geschlagen (**Bild 1**). Anschließend wird der in das Rohr eingetretene Erdkern mit Druckluft herausgedrückt bzw. mit Wasser herausgespült, wobei entsprechende sicherheitstechnische Auflagen zu beachten sind.

Auf die Verwendung von sogenannten „Mantelrohren“, in die anschließend der Produktrohrstrang geschoben wird, wird nicht nur aus Kostengründen, sondern auch wegen der großen Probleme mit dem kathodischen Korrosionsschutz und der durchzuführenden Ringraumabdichtung möglichst verzichtet, so dass in den meisten Fällen direkt die Produktröhre vorgetrieben werden.

Rohrleitungsschäden

Bei der Anwendung der Horizontalramme zum Rohrvortrieb ist es bereits zu Rohrleitungsschäden gekommen. Dabei sind Rundschweißnähte gänzlich gerissen oder angegriffen. Die an den schadhafte Rundschweißnähte durchgeführten metallografischen Untersuchungen zeigten, dass die Schäden als Dauerbruch aufgrund der Beanspruchungen beim Rohrvortrieb zu bewerten sind. Ausgangspunkt der Schädigungen waren dabei kleine Randkerben bzw. die Übergänge zwischen Grundwerkstoff und Schweißgut aufgrund der inhomogenen und keineswegs isotropen Werkstoffeigenschaften im Bereich der Schweißnaht. Durch die schnelle Erstarrung des aufgeschmolzenen Schweißgutes und der unmittelbar benachbarten Bereiche des Grundwerkstoffes, der

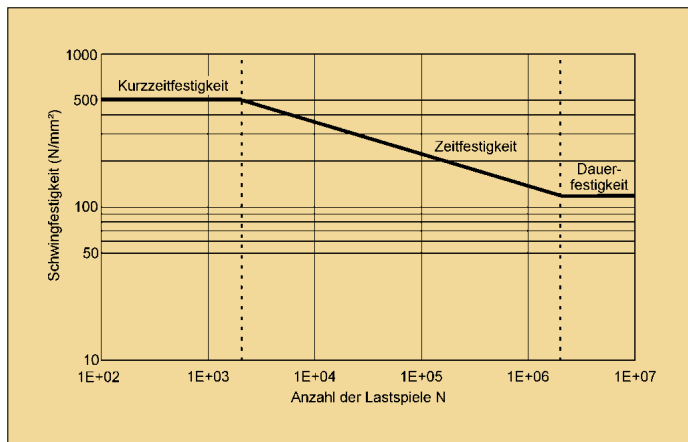


Bild 2:
Darstellung einer
Wöhlerkurve

Fig. 2:
View of a Wöhler curve

sogenannten Wärmeinflusszone (WEZ), entsteht ein relativ ungeordneter Gefügezustand mit erheblichen Schweißbeanspannungen sowie einer Vielzahl unterschiedlicher Schichten und Lagen von Kristallinen. Durch die anschließend durchgeführte Wärmebehandlung der Schweißnaht werden die Werkstoffeigenschaften der Schweißnaht sowie der Wärmeinflusszone denen des Grundwerkstoffes zwar weitestgehend angeglichen, aber trotzdem ist die Schweißnaht und die Wärmeinflusszone als inhomogener Bereich zu betrachten.

Diese Schäden im Bereich von Rundschweißnähten haben ERDGAS MÜNSTER dazu veranlasst, das Verfahren „Rohrvortrieb mit der Horizontalramme“ näher zu untersuchen mit dem Ziel, die Beanspruchungen des Stahlrohres aus dem dynamischen Energieeintrag zu analysieren und als Konsequenz daraus die Bemessungskriterien zur Dimensionierung von Stahlrohren für den Einsatz im Rohrvortrieb zu erarbeiten. Als Ergebnis sollten Arbeitsblätter zur einfachen Auswahl geeigneter Vortriebsrohre bzw. zeitliche Begrenzungen für die Belastung von verschweißten Vortriebsrohren entstehen.

Untersuchungen

Bei statischen Vortriebsverfahren zeigen die weiten Grenzen, in denen sich sowohl der spezifische Brustwiderstand, als auch der spezifische Reibungswiderstand bewegen können, dass es nur schwer möglich ist, die Vorpressewiderstände und damit die Vorpressekräfte exakt zu berechnen. Jede Berechnung basiert auf der Annahme von Schätz- und Erfahrungswerten. Die Übereinstimmung mit der Wirklichkeit kann erst während des Vortriebes festgestellt werden. Da es sich bei der Horizontalramme aber nicht um ein statisches, sondern um ein dynamisches Verfahren handelt, sind die Berechnungen aufwendiger.

Generell erfolgt die Dimensionierung von Vortriebsrohren nach dem DVGW-Arbeitsblatt GW 312 (Statische Berechnung von Vor-

triebsrohren, [2]). Die Bemessung in Rohrquerrichtung erfolgt gegen Verkehrslasten, Erdaufasten und sonstige Lasten (Zwängungen im Bauzustand) sowie in Rohrlängsrichtung gegen den Lastfall Vortriebskraft. In der Formel zur Ermittlung der Längsdruckspannung wird die Vorpressekraft zugrundegelegt. Beim statischen Vortrieb von Rohren erfolgt im Allgemeinen eine exakte Messung der Vortriebskräfte, so dass die Beanspruchungen während des Vortriebes überwacht werden können. Für die Ermittlung von Beanspruchungen der Rohre beim Einsatz von dynamischen Vortriebsverfahren – wie bei der Horizontalramme – liefert die Vorschrift jedoch kein Formelwerk zur Abschätzung der Längsbeanspruchungen.

Auch von den Herstellern der Horizontalrammen werden weder Angaben über die Größe der Belastung der Vortriebsrohre durch die dynamische Energie noch über die maximale Beanspruchungszeit gemacht.

Literaturrecherche

Für die Erarbeitung eines Bemessungskonzeptes für dynamisch beanspruchte Vortriebsrohre ist als Grundlage die Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten von Werkstoffen bei dauernder oder häufig wiederholter schwellender oder wechselnder Beanspruchung erforderlich. Zur Ermittlung dieser Werkstoffkennwerte werden Dauerschwingversuche durchgeführt. Da die Schäden beim dynamischen Rohrvortrieb stets im Bereich der Montageschweißnähte (Rundnähte) aufgetreten sind, ist es erforderlich, Dauerschwingversuche an Schweißverbindungen durchzuführen bzw. die Ergebnisse vorhandener Untersuchungen auszuwerten. Die Dauerfestigkeit eines Werkstoffes wird nach dem Wöhlerverfahren ermittelt. Beim Wöhlerversuch werden nacheinander mehrere, hinsichtlich Werkstoffgestaltung und Bearbeitung völlig gleichwertige Proben gestaffelten Schwingbeanspruchungen unterzogen und es werden die zugehörigen Bruch-Schwingspielzahlen festgestellt.

Als Ergebnis der durchgeführten Wöhlerversuche lässt sich dann die Schwingfestigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Lastspiele darstellen. In **Bild 2** ist exemplarisch eine Wöhlerkurve dargestellt. Von besonderem Interesse bei der Auswertung der Wöhlerkurven ist die Dauerschwingfestigkeit, d.h. der Spannungswert, den eine Probe „unendlich oft“ erträgt ohne zu versagen. Wird die Dauerschwingfestigkeit überschritten, so kommt es je nach Beanspruchungshöhe nach einer bestimmten Anzahl von Lastwechseln zum Dauerbruch. Aus dem Verlauf der Wöhlerkurven lässt sich erkennen, dass die aufnehmbare Beanspruchung des Werkstoffes mit der Anzahl der Lastspiele abnimmt.

In **Bild 2** werden ebenfalls die drei Schwingspielzahlbereiche dargestellt, diese Bereiche umfassen den Bereich der statischen Festigkeit bzw. der Kurzzeitfestigkeit, der von einer Lastspielzahl N von 0 bis 10^3 geht, den Zeitfestigkeitsbereich (Zeitschwingfestigkeitsbereich) mit einer Lastspielzahl N von 10^3 bis 10^6 und den Bereich der Dauerfestigkeit (Dauerschwingfestigkeitsbereich) mit einer Lastspielzahl N größer 10^6 . Erfolgt die Darstellung der Wöhlerlinien in doppeltlogarithmischer Skalierung, so ist zu erkennen, dass aufgrund der Vielzahl der vorliegenden Versuchsergebnisse sich die einzelnen Bereiche der Wöhlerkurve gut durch Ausgleichsgeraden beschreiben lassen.

Somit wurde für die Erarbeitung des Bemessungskonzeptes eine Auswertung von Wöhlerkurven für Schweißnähte durchgeführt. Aus den entsprechenden Literaturstellen [3 bis 5] sind die Kenngrößen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Stählen zu entnehmen. In den vorliegenden Unterlagen wurde die formelmäßige Beschreibung der Wöhlerlinien mittels Datenbanken auf der Grundlage einer großen Anzahl von Versuchsergebnissen ausgewertet, normiert und statistisch untersucht. Als Ergebnis dieser Auswertung wurden Wöhlerlinien für schwellende Druckbeanspruchungen an Schweißnähten aufgestellt. Mit den so entwickelten Wöhlerlinien wird ein Bemessungskonzept für dynamisch beanspruchte Vortriebsrohre erarbeitet, das im Folgenden beschrieben wird.

Bemessungskonzept

Für die einfache Anwendbarkeit des Bemessungskonzeptes wurden in Anlehnung an das DVGW-Arbeitsblatt GW 312 Bemessungstabellen erarbeitet, bei denen in Abhängigkeit der Vortriebslänge, des Rohrdurchmessers, des Nenndrucks und der Rammenergie die erforderliche Wanddicke für das zu verwendende Produktenrohr ausgewählt werden kann. Um den dynamischen Energieeintrag zu berücksichtigen, wurden

gängige Horizontalrammen verschiedener Hersteller über die technischen Daten des jeweiligen Gerätes klassifiziert und den aufgestellten Bemessungstabellen zugeordnet.

Bei der Zuordnung der verschiedenen Horizontalrammen zu den Energiegruppen wurden die Herstellervorgaben für die Einsatzbandbreite bezüglich der Rohrdurchmesser berücksichtigt. Diese Einteilung der Horizontalrammen in Energiegruppen hat den Vorteil, dass entweder das erforderliche Vortriebsrohr nach der einzusetzenden Ramme ausgewählt werden kann oder dass für einen bestimmten Nenndurchmesser und eine Nenndruckstufe eines Rohres die minimal erforderliche Nennwanddicke ausgewählt werden kann, wobei die zulässige Schlagenergie der Ramme über die Rammenergiegruppe zu berücksichtigen ist.

Zusätzlich wurde das Bemessungskonzept dahingehend optimiert, dass die Bemessung des Vortriebsrohres in Abhängigkeit des einzusetzenden Vortriebsgerätes für den Dauerfestigkeitsbereich oder für den Zeitfestigkeitsbereich durchgeführt werden kann. Aus grundsätzlichen Erwägungen sollte jedoch die Bemessung immer für den Dauerfestigkeitsbereich durchgeführt werden. D.h. es gibt für die angegebenen Stahlrohre keine Begrenzung der Lastwechsel und somit keine Begrenzung der Beanspruchungszeit durch die Ramme. Dabei ist neben dem Vortrieb in allen Bodenarten auch der Extremfall abgedeckt, dass das Rohr im Boden vor einem Hindernis stehen bleibt. Bei einer Bemessung im Zeitfestigkeitsbereich sind die zulässigen Lastspielzahlen zu begrenzen. Mit den spezifischen Daten des einzusetzenden Vortriebsgerätes ergibt sich dann ebenfalls eine zulässige Schlagzeit für den jeweiligen Rohrvortrieb. Die Bemessung im Zeitfestigkeitsbereich kann zwar im Einzelfall zu geringeren erforderlichen Wanddicken führen, hat jedoch den Nachteil, dass bei dem Auftreten des Rohrvortriebes auf Hindernisse und dem Überschreiten der zulässigen Lastspiele bzw. der zulässigen Schlagzeit nach der Überwindung des Hindernisses es erforderlich sein kann, das bis zum Erreichen der Zielbaugrube eingesetzte Material durchzuschleppen und zu ersetzen.

Die auf der Grundlage des beschriebenen Bemessungsverfahrens erstellten Bemessungstabellen unter Berücksichtigung des einzusetzenden Vortriebsgerätes sind so aufgebaut, dass die angegebenen Wanddicken für die jeweilige Schlagenergie, den jeweiligen Durchmesser und die jeweilige Nenndruckstufe den Tabellen 1 bis 16 des DVGW-Arbeitsblattes GW 312 entsprechen. In **Bild 3** wird exemplarisch eine der entwickelten Bemessungstabellen dargestellt, wobei die grau hinterlegten Zahlenwerte bei den Nennwanddicken Abweichungen zu der entsprechenden Bemessungstabelle der GW

Stahlrohre für Gasleitungen									
Mindestwanddicken für den Einbau im Rohrvortrieb unter Eisenbahngleisen berechnet gegen Innendruck, Erddruck, Eisenbahnverkehrslast und Vortriebskraft									
Bemessungstabelle 12 Vortriebslänge bis einschl. 50 m Rammenergie < 1.001 Nm									
St 52-3		nur für Schutzrohre (entspr. St 52.0 nach DIN 1626 bzw. St 52.4 nach DIN 1628)							
L 360 NB, L 360 MB		nach DIN EN 10208-2							
DN	Da	Mindestwanddicke in mm bei einem Nenndruck in bar bis einschließlich							
		0	1	16	40	70	80	84	100
100	114,3	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8	9,8
125	139,7	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
150	168,3	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
200	219,1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
250	273,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
300	323,9	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,8
350	355,6	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,2	8,6	9,7
400	406,4	8,1	8,1	8,1	8,1	8,4	9,4	9,8	11,1
500	508,0	Bemessung erfolgt für die Energiegruppen 2 bis 8							
600	610,0								
700	711,0								
800	813,0								
900	914,0								
1000	1016,0								
1100	1120,0								
1200	1220,0								
1400	1420,0								
1600	1620,0								

DN = Nennweite des Rohres [mm]
Da = Außendurchmesser des Rohres [mm]
[grau hinterlegt] = Wanddicke weicht von der DVGW GW 312 ab

Bild 3: Bemessungstabelle für Gasleitungen aus Stahlrohren für den Einbau im dynamischen Rohrvortrieb
Fig. 3: Dimensioning table for gas pipelines made up of steel pipes for installation using dynamic trenchless pipe installation

312 darstellen. Bei der Erstellung dieser Tabellen wurden jedoch nur Abweichungen zu größeren Wanddicken berücksichtigt, so dass die für die Mindestbemessung erforderlichen Wanddicken in keinem Fall unterschritten werden. Da es sich bei den im Rahmen der Wöhlerversuche ermittelten Festigkeitswerte um Bruchfestigkeiten handelt, sind diese Werte mit einer Sicherheitszahl abzumindern, um unzulässige Beanspruchungen auszuschließen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen wurde in Anlehnung an vergleichbare Vorschriften [7] der Sicherheitsbeiwert mit $S = 1,65$ festgelegt.

Versuche zur Verifizierung

Da von den Herstellern der Horizontalrammen nicht die für die Bemessung erforderlichen Schlagkräfte sondern die Schlagenergie

angegeben wird, war es erforderlich, mit den technischen Daten des jeweiligen Gerätes eine Ermittlung der Schlagkraft durchzuführen. Zur Überprüfung der durchgeführten Berechnungen sowie zur Verifizierung des Bemessungskonzeptes wurden im Rahmen von zwei Leitungsneubauten DN 600 und DN 200 Beanspruchungsmessungen während der Durchführung von dynamischen Rohrvortriebsarbeiten vorgenommen. Bei dem Rohrvortrieb mit Horizontalrammen wird in der Regel zwischen dem Produktrrohr und der Ramme ein sogenanntes Schlagstück eingebaut, um das Produktrrohr vor Beschädigungen wie z.B. einer Aufweitung des Produktrrohres im Bereich des Ansatzpunktes des Rammkegels zu schützen. Zur Durchführung der Beanspruchungsmessungen wurden am Schlagstück Dehnungsmessstreifen appliziert. Mit den Deh-

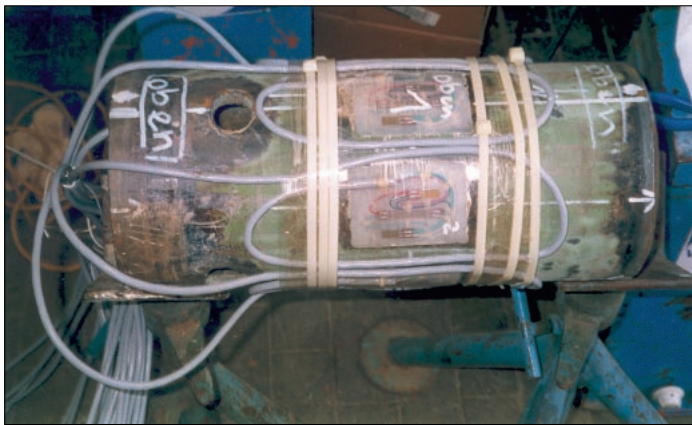


Bild 4: Schlagstück mit applizierten Dehnungsmessstreifen

Fig. 4: Impact element with attached strain gauges

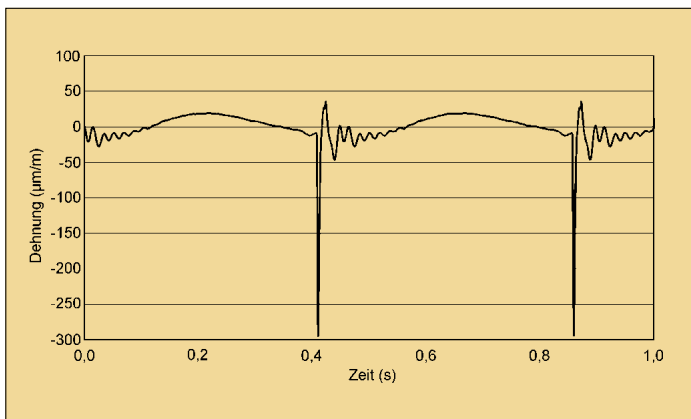


Bild 5: Ergebnisse der Dehnungsmessungen bei dynamischem Rohrvortrieb

Fig. 5: Results of strain measurements for dynamic trenchless pipe installation

nungsmessstreifen werden die während des Rohrvortriebes tatsächlich auftretenden Beanspruchungen am Schlagstück gemessen. Mit den gemessenen Dehnungen kann die Schlagkraft der Ramme ermittelt werden und ein Abgleich mit den zuvor aufgestellten Berechnungsansätzen erfolgen. In **Bild 4** wird ein mit Dehnungsmessstreifen versehenes Schlagstück dargestellt. Insgesamt wurden bei drei Rohrvortrieben die Beanspruchungsmessungen durchgeführt. Nach der Applikation der Dehnungsmessstreifen auf den Schlagstücken wurden diese zu den jeweiligen Vortriebsbaustellen transportiert und mit dem vorzutreibenden Produktenrohrstrang verschweißt. Danach erfolgte das

Ausrichten des Rohrstranges in der Startbaugrube und das Einbringen der Ramme mit dem Rammkegel. Während des Rohrvortriebes erfolgte die Messung der Dehnungen, wobei der Rohrvortriebsfortschritt protokolliert wurde. In **Bild 5** wird der charakteristische Verlauf der Dehnungen am Schlagstück während des Rohrvortriebes dargestellt.

Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass unter der Verwendung von Wöhlerkennlinien für Schweißverbindungen eine Bemessung von dynamisch beanspruchten

Vortriebsrohren möglich ist. In Einzelfällen sind für eine Bemessung von dynamisch beanspruchten Vortriebsrohren die in dem DVGW-Arbeitsblatt GW 312 [2] angegebenen Tabellen für die Mindestbemessung bei statischen Vortriebsverfahren nicht ausreichend. Die Überprüfung der dynamischen Beanspruchung ist insbesondere erforderlich, wenn bei der Durchführung des Rohrvortriebes gleichzeitig Kabelschutzrohre zusammen mit dem Produktenrohrstrang vortrieben werden sollen, da durch den größeren Bodenwiderstand stärkere Rammen eingesetzt werden müssen, die zu einer höheren Beanspruchung des Produktenrohres führen. Mit den erstellten Bemessungstabellen lässt sich bereits bei der Planung von dynamischen Rohrvortriebsarbeiten eine Schädigung der Rohrverbindungen durch eine Überbeanspruchung vermeiden und somit können die Kosten für den Leitungsbau optimiert und Risiken vermieden werden.

Die Bemessungstabellen sind auch als Hilfsmittel für den örtlichen Bauleiter zu verstehen, der letztendlich zu entscheiden hat, ob eine Produktenrohrpressung im Boden verbleiben kann oder zu verwerfen ist.

Schrifttum

- [1] DVGW-Merkblatt GW 304 „Rohrvortrieb“ (1998-05)
- [2] DVGW-Arbeitsblatt GW 312 „Statische Berechnung von Vortriebsrohren“ (1990-01)
- [3] Olivier, R. und Ritter, W.: Wöhlerlinienkatalog für Schweißverbindungen aus Baustählen, Teil 1: Stumpfstoß, Einheitliche statistische Auswertung von Ergebnissen aus Schwingfestigkeitsversuchen, Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. 56/1
- [4] Ritter, W.: Kenngrößen der Wöhlerlinien für Schweißverbindungen aus Stählen, Veröffentlichung des Instituts für Stahlbau und Werkstoffmechanik der Technischen Hochschule Darmstadt, 1994
- [5] Kulka, C.: Verlauf der Wöhlerlinie von Schweißverbindungen bei hohen Schwingenspielzahlen, Abschlußbericht, Frauenhofer Institut für Betriebsfestigkeit, Darmstadt, 1987
- [6] Issler, Ruoß, Häfele: Festigkeitslehre, Grundlagen, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1995
- [7] DS 804 „Vorschrift für geschweißte Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI)“ (2000-09)