

Ermittlung der Mantelreibung zwischen Rohr und Boden unter Einsatz verschiedener Ummantelungen

Full-scale-test determining friction between pipe and soil considering different coatings

An der 28" Mineralölferrleitung Wilhelmshaven–Wesseling der Nord-West Oelleitung GmbH (NWO) werden durch den Abbau von Kohleflözen ab 2004 signifikante bergbauliche Einwirkungen erwartet. Durch die Unterfahrung in axialer Richtung wird die Leitung durch eine fortschreitende Zerrungs-/Pressungswelle belastet.

Zur rechnerischen Erfassung dieser Zusatzbeanspruchungen ist die Kenntnis der zwischen Rohr und Boden wirkenden Reibungskräfte von elementarer Bedeutung, da diese maßgeblich die Höhe der durch Bodensenkungen auf die Leitungen übertragenen Dehnungen beeinflussen. Ebenso stellt sich die Frage, inwieweit diese durch besondere Rohrumhüllungen minimiert werden können. Hierzu wurden im Rahmen eines Großversuchs insgesamt fünf Versuche mit unterschiedlichen Rohrumhüllungen (Bitumenummhüllung; Bitumenummhüllung und Kebulen Band B80-C; Bitumenummhüllung und Kebulen Band B80-C und Rohrschutzmatte) durchgeführt.

Die Versuche haben für das mit der Rohrschutzmatte umwickelte Rohr um ca. 50 % geringere Werte für die mittleren Schubspannungen ergeben, als für das Rohr ohne Matte. Bei den Versuchen mit Rohrschutzmatten zeigte sich, dass der Einfluss der Bodenverdichtung von untergeordneter Bedeutung ist.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass eine signifikante Reduzierung des Reibwiderstandes zwischen Rohr und Boden erreicht werden kann, wenn das Rohr mit einer Rohrschutzmatte umwickelt wird.

Im Rahmen von Trennschnittmaßnahmen der NWO und anderer Leitungsbetreiber bei denen die Reibungsbeiwerte durch Messung der Rohrdehnung und -verschiebung vom RWTÜV ermittelt wurden, konnte die reibungsmindernde Wirkung der Rohrschutzmatten bestätigt werden.

Nord-West Oelleitung GmbH (NWO) owns the 28"-pipeline "Wilhelmshaven–Wesseling", which will be subject to additional stresses due to coal mining in the area. Caused by mining activity in the pipe's direction, there will be a wave of tension/compression.

To calculate these additional stresses, quantitative knowledge of the friction forces between pipe and surrounding soil are essential because these forces have main influence on transferring soil movement onto the pipe. The possibility to minimize these forces by the use of different coatings has to be derived as well. To acquire this knowledge, 5 full-scale-tests using different coatings (bitumen binder; bitumen binder plus "Kebulen Band B80-C"; bitumen binder plus "Kebulen Band B80-C" plus pipe protection mat) were performed.

The tests displayed a reduction of friction forces by 50 % for the use of a pipe protection mat compared to the pipe without the mat. Furthermore it was shown that the influence of soil compaction is minor when using a protection mat.

Above all, the tests demonstrated that a significant reduction of friction forces can be achieved by using a pipe protection mat.

The friction-reducing influence of a pipe protection mat could be confirmed by carrying out tension release cuts on pipelines owned by NWO and other companies.



Dipl.-Ing. Henning Brüggemann
Ing.-Büro Veenker, Hannover
Tel. +49(0)511/2849912
E-Mail: henning.brueggemann@veenkerghmbh.de



Dipl.-Ing. Harald Asche
Nord-West Oelleitung GmbH,
Wilhelmshaven
Tel. +49(0)4421/62331
E-Mail: h.asche@nwowhv.de



Dipl.-Ing. Christian Engel
RWTÜV Systems GmbH, Essen
Tel. +49(0)201/8252677
E-Mail: christian.engel@rwtuev.de



Dipl.-Ing. Joachim Lücking
RWTÜV Systems GmbH, Essen
Tel. +49(0)201/8252775
E-Mail: joachim.luecking@rwtuev.de

Problemstellung

In Bergsenkungsgebieten werden Rohrferrleitungen aufgrund der zusätzlichen Beanspruchung besonders überwacht. Dies geschieht im Allgemeinen durch Dehnungs- und Verschiebungsmessungen an der Rohrleitung. Bei Annäherung der Rohrdehnungsmesswerte bzw. der Verschiebungsmesswerte an die zulässigen Grenzwerte werden Entspannungsmaßnahmen in Form von Trennschnitten oder durch Freilegung der Leitung eingeleitet. Zur Durchführung von Trennschnitten ist eine abschnittsweise Entleerung der Ferrleitung erforderlich.

Die vom Boden auf das Rohr übertragene Dehnung hängt wesentlich von der Reibung ab. Bei einer Verringerung der Reibung zwischen Boden und Rohr kommt es durch eine Rohrlängsverschiebung zu einem Dehnungsausgleich, so dass Trennschnittmaßnahmen reduziert werden können.

An der 28" Mineralölferrleitung Wilhelmshaven–Wesseling der Nord-West Oelleitung GmbH (NWO) werden durch den Abbau von Kohleflözen ab 2004 signifikante bergbauliche

che Einwirkungen erwartet. Durch die Unterfahrung in axialer Richtung wird die Leitung durch eine fortschreitende Zerrungs-/Pressswelle belastet.

Es war zunächst daran gedacht, wie an anderer Stelle der Leitung bereits praktiziert, die Leitung frei zu legen, um den Dehnungsausgleich der Leitung zu verbessern. Dieses ließ sich aufgrund der Örtlichkeit und einer parallel liegenden Leitung nicht durchführen, so dass nach anderen Lösungen gesucht werden musste.

Aus jahrzehntelanger Erfahrung des RWTÜV mit Fernleitungen in bergbaubeeinflussten Gebieten ist bekannt, dass durch die Umwicklung der Leitung mit Rohrschutzmatten die Reibung verringert wird. Vor Anwendung dieser Rohrschutzmatten in der Praxis sollte die Wirksamkeit in einem Versuch ermittelt werden.

Versuchsplanung und Versuchsaufbau

Allgemeines

Die Versuche wurden in einem eigens hierfür hergestellten Rohrgraben durchgeführt. Dabei wurde das Rohr mit unterschiedlichen Umhüllungen in den Rohrgraben eingebaut. Zur Feststellung der Reibungskräfte zwischen Rohr und Boden war es notwendig, das Rohr im Sandkörper vorzupressen und die dabei auftretenden Kräfte messtechnisch zu erfassen. Hierzu wurde der Rohrgraben an den Stirnseiten mit Spundwänden verschlossen, die einen Durchlass für den Prüfkörper aufwiesen. Das Rohr wurde mithilfe einer hydraulischen Presseinrichtung durch den Sandkörper hindurch gepresst.

Versuchskörper

Bei dem Versuchskörper handelt es sich um ein 28“ Rohr aus X52 mit den folgenden Parametern:

- Da = 711,2 mm
- t = 8,74 mm
- Re = 360 N/mm²

Der Versuchskörper hat eine Länge von LR = 12,0 m und ist über eine Länge von Lg = 10,80 m mit 1 m Scheitelüberdeckung eingesandet.

Versuchsstrecke

Für die Versuchsstrecke wurde ein etwa 2 m tiefer und 20 m langer Rohrgraben hergestellt (Bild 1). Um den Versuchsraum frei von Grundwasser zu halten, wurde eine Wasserhaltung installiert. Der Bereich, in dem der Versuchskörper eingebaut ist, ist mit Spundwänden zur Start- und Zielgrube abgegrenzt. Die Spundwände wurden im Hinblick auf eine möglichst geringe Verformung während der Versuchsdurchführung bemessen.

Bild 1: Versuchsstrecke - Pressgrube

Fig. 1: Test area – press pit



Dies war notwendig, damit die in den Prüfkörper eingeleiteten Vorpressekräfte voll in den die Leitung umgebenden Boden eingetragen werden konnten und nicht zu einer Verschiebung des gesamten Versuchsaufbaus inklusive Sandkörper führten. Hierzu kamen Spundwände Larsen 602 zum Einsatz, die mit einer Einbindetiefe von 4 m gerammt wurden. Zusätzlich wurden sie über Zugstangen zwischen Start- und Zielgrube sowie dem Presswiderlager verbunden. Die Auskleidung der Pressgrube erfolgte ebenfalls mit diesen Spundwänden, die kraftschlüssig an die Startspundwand angeschlossen waren, um die volle Übertragung der Vorpressekräfte in den Rohrkörper zu gewährleisten.

Krafteintrag und Messtechnik

Es kam eine im Rohrbau übliche hydraulische Presse mit einer Maximalleistung von 200 t zum Einsatz. An dieser Presse wurde ein Druckaufnehmer zur Online-Erfassung des aktuellen Vorpressedruckes angeschlossen. Der Prüfkörper wurde innenseitig mit

Dehnungsmessstreifen versehen, die im Abstand von 2,20 m in Axialrichtung messend auf der 3- und 9-Uhr-Position montiert waren. Die gesamte Messtechnik wurde über entsprechende Messverstärker mittels EDV mit einer Taktung von 2 Hz abgefragt.

Die Kombination der gewählten Messaufnehmer ermöglicht die Protokollierung des Druck- und somit Kräfteverlaufes über den gesamten Versuch sowie parallel dazu die Kontrolle der Axialdehnungen im Prüfkörper über die gesamte Länge. Hieraus können Rückschlüsse auf die zur Überwindung der Haftreibung notwendigen Presskräfte sowie die dabei im Rohr auftretenden Dehnungen und hieraus abgeleitet resultierenden Spannungen gezogen werden.

Versuchsdurchführung

Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm ist in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Tab. 1: Versuchsprogramm

Table 1: Test programme

Versuch	Umhüllung	Bodenverdichtung
1	Bitumen	Wacker Stampfer, Wacker Vibrationsplatte
2	Bitumen	Wacker Stampfer, Wacker Vibrationsplatte
3	Bitumen + Kebulen-Band B80-C	Wacker Stampfer, Wacker Vibrationsplatte
4	Bitumen + Kebulen-Band B80-C + Rohrschutzmatte	Wacker Stampfer, Wacker Vibrationsplatte
5	Bitumen + Kebulen-Band B80-C + Rohrschutzmatte	Festdrücken des Aushubs mit Baggerschaufel

Tab. 2: Versuchsergebnisse

Table 2: Test results

Versuch	Umhüllung	max. Presskraft		mittlere Schubspannung τ [N/mm ²]
		P [bar]	F [kN]	
1	Bitumen	124,09	779,68	0,0324
2	Bitumen	129,39	812,98	0,0338
3	Bitumen+ B80-C	138,51	870,28	0,0361
4	Bitumen + B80-C + Felsschutzmatte	67,38	423,36	0,0176
5	Bitumen + B80-C + Felsschutzmatte	71,70	450,50	0,0187

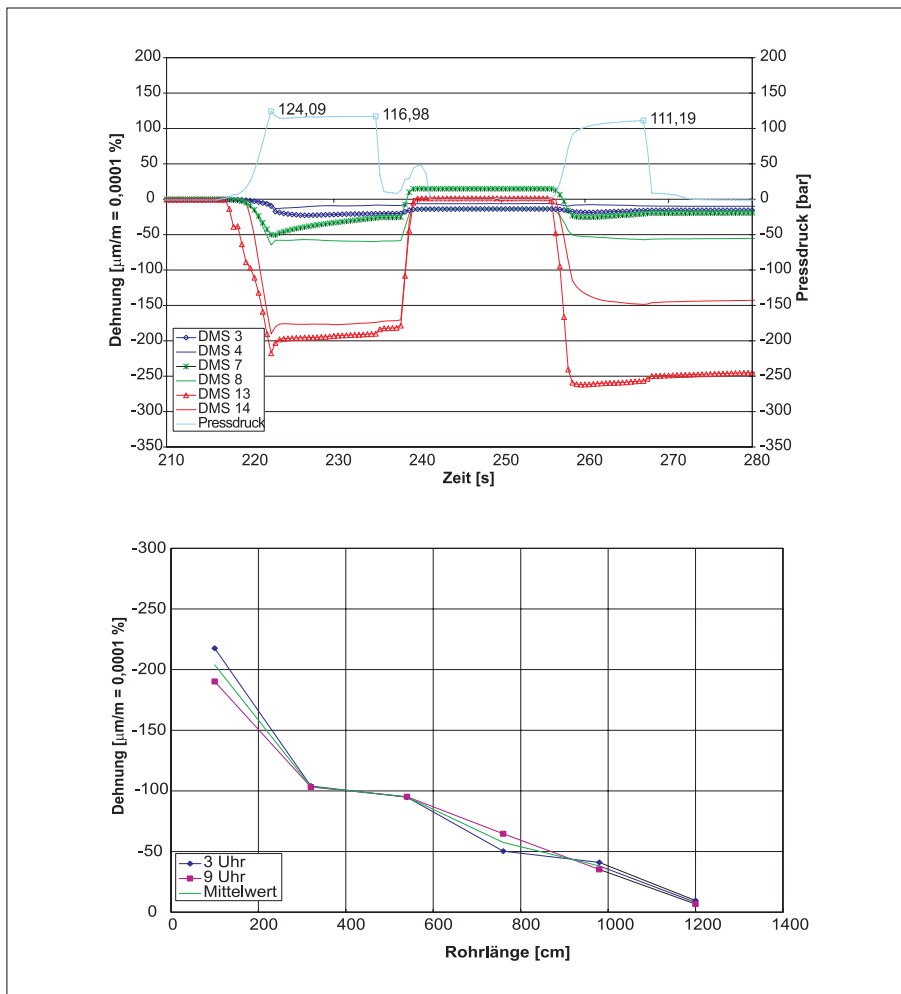
Durchführung

Nach dem Einbau des Rohres wurde zunächst eine Verdichtungsprüfung des Bodens vorgenommen. Hierbei wurden mindestens acht Schläge je 10 cm Eindringtiefe der leichten Rammsonde DPL-5 verlangt. Nach Anschluss und Aktivierung der Messtechnik wurde der Versuch gestartet. Dabei wurde die Druckplatte der Presse langsam gegen das Rohrende geführt und der Druck

dann solange langsam gesteigert, bis sich das Rohr in Bewegung setzte. Nach etwa 20 cm Vorschub wurde der Versuch unterbrochen und die Presse ein Stück zurückgeführt. Danach wurde die Presse erneut langsam gegen das Rohrende geführt und das Rohr um weitere ca. 20 cm vorgepresst. Abschließend wurde die Presse zurückgeführt und die Aufzeichnung der Messergebnisse beendet.

Bild 2: Versuch 1 – Messergebnisse: a) Dehnung über Zeit, b) Dehnung über die Rohrlänge

Fig 2: a) Test No. 1 – results: a) Strain along time, b) Strain along pipe’s axial direction



Vor jedem neuen Versuch wurde das Rohr aus- und wiedereingebaut sowie die Verdichtung geprüft.

Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse sind in **Tabelle 2** zusammengestellt.

Am Beispiel von Versuch 1 (**Bild 2**) kann das grundsätzliche Systemverhalten beschrieben werden:

Der Pressdruck steigt an bis zum Erreichen eines Maximalwertes, bei dem sich der Probekörper in Bewegung setzt. Im Falle von Versuch 1 tritt dies bei einem Druck von 124,09 bar ein. Nach dem Losbrechen des Probekörpers fällt der Druck leicht ab und bleibt dann praktisch konstant bei einem Wert von P = 116,98 bar. Die Stauchungen im Rohr verhalten sich hierzu affin. Die Stauchungen steigen an bis zu einem Spitzenwert, fallen dann leicht ab und bleiben über die komplette Vortriebszeit praktisch konstant. In Bild 2 sind jeweils die Stauchungen an drei Ebenen am Rohr dargestellt. DMS 13 und 14 zeigen den Dehnungszustand im Abstand von 1 m zum Ansatzpunkt der Presse. Dieser Bereich befindet sich noch nicht innerhalb des Sandkörpers. Hier wirkt die komplette Presskraft als Axialspannung im Rohr. Die Dehnungsmessstreifen DMS 3 und 4 befinden sich in einer Entfernung von 12 m zur Presse. Dieser Punkt liegt je nach Versuchsfortschritt kurz vor bzw. kurz hinter der Zielpundwand und verlässt während der Durchführung des Versuches den Sandkörper. Die Dehnungsmessstreifen DMS 7 und 8 befinden sich in einer Entfernung von 7,60 m zur Presse und somit etwa in der Mitte des Sandkörpers. Es ist klar erkennbar, dass die maximalen Stauchungen sich an der Ebene DMS 13 und 14 aufbauen, die der Presse am nächsten ist. Die Darstellung der Stauchung über die Rohrlänge in Bild 2 (unten) lässt erkennen, dass sich die Stauchungen im Rohr kontinuierlich abbauen und bei 12 m Entfernung von der Presse einen Wert von ca. 0 erreichen.

Die DMS 11 und 12 befinden sich 3,20 m von der Presse entfernt. Hierbei handelt es sich um die erste Messebene im Sandkörper. Deutlich zu erkennen ist, dass die Dehnungsdifferenz zwischen der Ebene an Station 100 (DMS 13 und 14) und Station 320 (DMS 11 und 12) deutlich größer ist, als die Differenzen der folgenden Messebenen. Dies deutet darauf hin, dass im ersten Abschnitt ein überproportionaler Dehnungsabbau stattfindet. Ab Station 320 (DMS 11 und 12) bis zur Station 1200 (DMS 3 und 4) ist ein nahezu linearer Spannungs- und Dehnungsabbau zu verzeichnen. Dies zeigt, dass die Schubspannung über die Rohrlänge ebenfalls nahezu konstant ist.



Bild 3: Probekörper mit Rohrschutzmatte

Fig. 3: Test specimen with protection sheathing

Nach dem Unterbrechen des Rohrvorschubes und dem Zurückziehen der Presse ergibt sich eine geringfügige verbleibende Restdehnung im Rohr. Bei erneutem Rohrvorschub steigt der Druck erneut an und erreicht annähernd denselben Wert wie beim ersten Vorschub. Der Spannungs- und Dehnungszustand im Rohr ist nicht mehr so symmetrisch wie beim ersten Vorschub. Die gemittelten Dehnungen liegen jedoch in der gleichen Größenordnung.

Bei Versuch 2 wurde die Presskraft langsamer gesteigert und die markante Spitze bei Überwindung des Haftreibungswertes ist hier nicht zu erkennen. Diese Art der langsamen Beanspruchung entspricht eher der Realität, da Bodenbewegungen infolge von Bergsenkungen in der Regel langsam auftreten. Langsam bedeutet im Falle von Versuch 2, dass die Steigerung des Pressdruckes von Null bis zum Maximalwert in einem

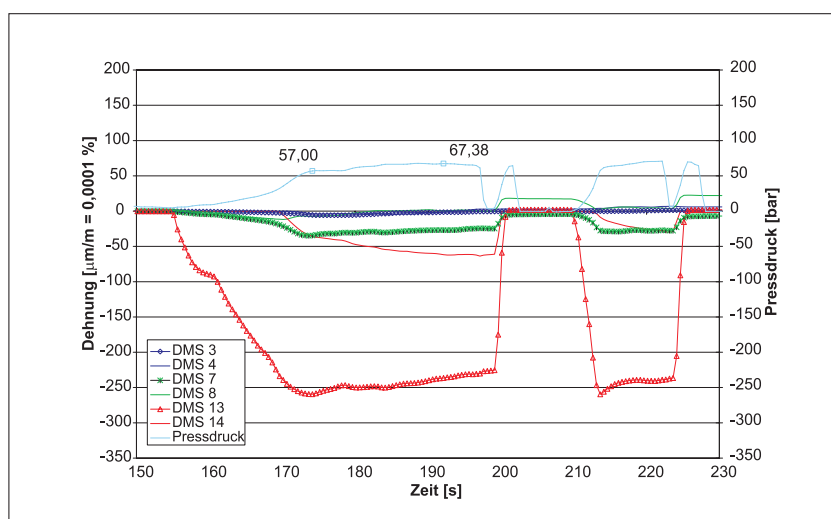
Zeitraum von 10 s aufgebracht wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass Bergsenkungen langsamer auftreten. Grundsätzlich zeigt Versuch 2 dasselbe Verhalten wie Versuch 1.

Bei Versuch 3 wurde das Rohr zusätzlich mit Kebulen-Band B80-C umwickelt. Hierbei handelt es sich um ein Dreischichten-Korrosionsschutzband. Der Verlauf des Pressdruckes und der Dehnungen im Rohr ist auch hier praktisch identisch mit dem der Versuche 1 und 2. Leichte Abweichungen liegen im Bereich der Messtoleranzen sowie der Varianz der Versuchsrandbedingungen.

Für die Versuche 4 und 5 wurde das Rohr zusätzlich mit einer DENSOLEN Rohrschutzmatte DRM-PP 100Plus umwickelt (**Bild 3**). Hierbei handelt es sich um eine rund 1 cm dicke Fließmatte. Aufgrund ihrer guten Durchlässigkeit für Bodenelektrolyte ist ein unbeeinflusster kathodischer Korrosionsschutz sicherge-

Bild 4: Versuch 4 - Messergebnisse

Bild 4: Test No. 4 - results



Anzeige



Bild 5: Rohrschutzmatte nach Versuch 4 - Aufkrempelungen

Fig. 5: Protection sheathing after test 4 - upsetting

stellt. Diese Matte wird auf das Rohr gewickelt und an den Stoßstellen heiß verklebt. Die Matte ist nicht fest mit dem Rohr verbunden. Die Darstellung des Hydraulikdruckes zeigt, dass sich das Rohr bereits bei einem Pressdruck in Bewegung setzt, der ca. halb so groß ist, wie der bei den Versuchen 1 bis 3. Entsprechend geringer sind die im Probekörper auftretenden Dehnungen (**Bild 4**). Zur Untersuchung des Einflusses der Bodenverdichtung wurde im Versuch 5 der Versuch 4 wiederholt, wobei der Boden hier nur mit der Baggerschaufel angedrückt und nicht durch Vibrationsverdichter verdichtet wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass der resultierende Pressdruck praktisch unverändert ist. Er beträgt auch hier etwa 50 % des Druckes, der bei den Versuchen 1 bis 3 ermittelt wurde.

Bei der Durchführung der Versuche 4 und 5 konnte beobachtet werden, dass eine Re-

lativverschiebung zwischen Matte und Rohr stattfindet, die in der Größenordnung von 50 % der Gesamtverschiebung liegt. Ein Freilegen nach Durchführung der Versuche zeigte, dass praktisch keine Aufkrempelung der Rohrschutzmatte stattfindet. Lediglich im Nachumhüllbereich einer Rundnaht tritt eine leichte Krempelung auf, wie sie in **Bild 5** dargestellt ist.

Praxisumsetzung

Aufgrund des erfolgreichen Abschlusses des Versuchs wurde im Jahr 2003 ein etwa 1000 m langer Abschnitt der NWO-Abzweigung zuerst mit einem Kebulen Band B80-C und dann mit Rohrschutzmatten umwickelt. Dabei wurden Wegkreuzungen, Bereiche mit Rohrbögen und Abschnitte, an de-

nen die parallel liegende Propylenfernleitung U-Bogen-Dehner aufweist, nicht umwickelt. Nach Umwicklung der Rohrleitung wurde der Rohrgraben verfüllt und der eingefüllte Boden verdichtet.

Nach Durchführung dieser Maßnahme wurden 2004 in dem oben genannten Bereich drei Trennschnitte durchgeführt. Aufgrund der langjährigen Betreuung der Entspannungsmaßnahmen liegen dem RWTÜV für die NWO-Fernleitung eine Vielzahl von Daten über durchgeführte Entspannungsmaßnahmen sowohl für Leitungsabschnitte mit als auch ohne Rohrschutzmatten vor. Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Trennschnittmaßnahmen und zur Überprüfung der Dehnungs- und Verschiebungsmessstellen werden bei den Trennschnitten die Rohrlängsdehnung und die Längsverschiebung des Rohres messtechnisch erfasst und mit den berechneten Werten verglichen. Ein Vergleich der Reibungsverhältnisse erfolgt im Allgemeinen über die bei den Trennschnitten ermittelte Schubspannung, die ein Maß für die Reibung zwischen Rohr und Boden ist. Aufgrund unterschiedlicher Bodenverhältnisse (Bodenart, Bodendichte, Bodenfeuchtigkeit, Überdeckungshöhe) weisen die Reibungswerte eine große Schwankungsbreite auf. Infolgedessen ist eine eindeutige Interpretation der Messergebnisse nicht an allen Stellen möglich.

Der Zusammenhang zwischen der Reibungskraft t und der Verschiebung u in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul E und der Wanddicke s wird durch folgende Differentialgleichung beschrieben:

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{\tau}{E \cdot s}$$

Die Auswertung der Dehnungen und Verschiebungen für eine im Juni 2004 durchgeführte Trennschnittmaßnahme ist in **Bild 6** dargestellt. In diesem Fall wurden Schubspannungen von 3 und 6,5 kN/m² ermittelt. Der höhere Wert wird durch eine nicht vollständig mit Rohrschutzmatten umwickelte Vertikaletage verursacht.

In der Vergangenheit (ohne Rohrschutzmatte) wurden an derselben Stelle bei verschiedenen Trennschnittmaßnahmen vergleichsweise hohe Schubspannungen von 10 bis 14 kN/m² ermittelt. Dies bedeutet eine Verringerung der Reibung zwischen Rohr und Boden um mehr als 50 %. An anderen Stellen, an denen auch in der Vergangenheit bereits geringe Schubspannungen von 5 bis 7 kN/m² – vermutlich wegen des hohen Grundwasserstands – ermittelt wurden, konnte durch die Verwendung von Rohrschutzmatten keine weitere signifikante Verringerung der Reibung festgestellt werden.

Bild 6: Trennschnittmaßnahme - Dehnungen und Verschiebungen

Fig. 6: Tension release cut - axial strain and displacement

