

**ESSAY**  
**Technischer Infrastruktur**  
**Kontaktmechanik im Leitungsbau**

---

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich  
HafenCity Universität

---

# ESSAY

## TECHNISCHER INFRASTRUKTUR

### Kontaktmechanik im Leitungsbau

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich

*Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich  
HafenCity Universität  
Henning-Voscherau-Platz 1  
20457 Hamburg*

## **IMPRESSUM**

HafenCity Universität Hamburg  
Henning-Voscherau-Platz 1  
20457 Hamburg

DOI: 10.34712/142.69

Jahr: 2025

Druck: Oeding Print GmbH

Auflage: 500

Professur: Technisches Infrastrukturmanagement, HafenCity Universität Hamburg

Verlag: HafenCity Universität

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Es darf, auch auszugsweise, ohne vorherige Genehmigung des Autors nicht vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Alle Angaben sind nach bestem Gewissen unter Anwendung aller gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von dem Autor keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

KI-Erklärung: Dieses Dokument ist frei von künstlicher Intelligenz.

## Vorwort

Der Dialog mit den Studierenden über die Phänomene der Reibung und Adhäsion inspirierte mich, einige wesentlichen Punkte komprimiert zusammenzustellen und diese den Studierenden für das Studium verfügbar zu machen. Es geht darum ein Schlaglicht auf die klassischen Zusammenhänge der Kontaktmechanik zu werfen und einen Einstieg zu geben. Darauf aufbauend werden Anwendungsfälle aus dem Leitungsbau erläutert.

Für die kritische Durchsicht des Manuskripts und seine wertvollen Hinweise danke ich Christian Steuck sehr herzlich.

Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich, 2025



## Inhalt

1	Einführung.....	5
2	Reibung in der technischen Mechanik.....	6
2.1	Haftreibung.....	6
2.2	Gleitreibung.....	8
2.3	Seilreibung.....	10
2.4	Rollreibung.....	11
3	Reibung und Adhäsion .....	12
4	Anwendung im Leitungsbau.....	13
4.1	Rohr-Boden Interaktion.....	13
4.2	Erddruck.....	15
4.3	K <sub>0</sub> -Ansatz.....	16
4.4	Erddruck nach EN 13941 .....	18
4.5	Grabenlose Verfahren .....	18
4.6	Rohrvortrieb, Erddruck nach DWA A 161.....	18
4.7	Horizontalspülbohrverfahren .....	20
4.8	Fernwärmeleitungsbau.....	24
5	Experimente .....	26
6	Aufgaben .....	28
6.1	Aufgabe 1.....	28
6.2	Aufgabe 2.....	28
6.3	Aufgabe 3.....	29
6.4	Aufgabe 4.....	29
6.5	Aufgabe 5.....	29
7	Literaturverzeichnis.....	31
8	Normen und Regelwerke .....	34
9	Lösungen zu den Aufgaben .....	36
9.1	Lösung Aufgabe 1 .....	36
9.2	Lösung Aufgabe 2 .....	36
9.3	Lösung Aufgabe 3 .....	37
9.4	Lösung Aufgabe 4 .....	37
9.5	Lösung Aufgabe 5 .....	37

## 1 Einführung

Infrastruktur für die Ver- und Entsorgung urbaner Siedlungsgebiete befindet sich meistens im unterirdischen Raum. Dies ist einerseits durch die bereits umfangreichen Nutzungsansprüche der Oberflächen für Verkehrswege, Gebäude, Parks u.s.w. begründet und andererseits werden Rohren und Kabeln für den Ver- und Entsorgungszweck in der Regel kaum Bedeutung als Gestaltungselement beigemessen. Nur manchmal wird Leitungsinfrastruktur architektonisch verwendet, wie es in einer sehr exponierten Form zum Beispiel am Kunstmuseum „Centre Pompidou“ in Paris geschehen ist (s. Abbildung 1-1) oder wie dies, um ein weiteres Beispiel zu nennen, im Olympischen Dorf in München umgesetzt wurde. Hier werden oberirdische Leitungen, sogenannte Freileitungen, neben ihrer eigentlichen Versorgungsaufgabe zur „Auflockerung des Ensembles“ und zur Orientierung verwendet. So konnten im Olympischen Dorf München die Sportler den Freileitungen einer Farbe folgen, um zu einem bestimmten Gebäude zu gelangen [Schleyer 1987].



Abbildung 1-1, Centre Pompidou, Paris

Abgesehen von derartigen Ausnahmen und von Freileitungen in Industriegebieten, in denen die Ästhetik der Bauwerke eine untergeordnete Rolle spielt, sind Leitungen erdverlegt. Sie haben dann Kontakt mit dem umgebenden Bettungsmaterial und es stellt sich eine Interaktion zwischen dem Bauteil und dem Bettungsmaterial ein. Sowohl für den Bauprozess der Verlegung, als auch im Betrieb sind Fragen zu dieser Interaktion zu beantworten. Insbesondere ist die Kontaktmechanik zwischen der Leitung und dem Bettungsmaterial von Bedeutung aber auch die Auseinandersetzung mit der thermischen Interaktion zwischen Rohrleitung und Boden kann sehr wichtig sein. Bei Fragen zur Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Leitungen steht die Kontaktmechanik zunächst im Fokus und muss für die Einschätzung und Berechnung der Rohrstatik beherrscht werden. Dies gilt für den Rohrvortrieb, das gesteuerte Horizontalspülbohrverfahren und erdverlegte warmgehende Leitungen, wie Fernwärmeleitungen. Aber auch an den Grabenwänden muss die Kontaktmechanik in der offenen Verlegung betrachtet werden.

Im Folgenden wird deshalb ein Schlaglicht auf die wichtigsten Themen zum Verständnis der Kontaktmechanik gegeben. Obgleich die ersten Untersuchungen zur Kontaktmechanik, insbesondere der Reibung, Leonardo da Vinci 1492 und Coulomb 1785 zugesprochen werden, begleiten die damit verbundenen physikalischen Phänomene den Menschen schon immer und das Wissen darum zeigt sich unter anderem in Jahrtausende alten Hieroglyphen [Popov 2015]. Seit 1966 wird heute die Erforschung der kontaktmechanischen Phänomene als „Tribologie“ bezeichnet, welche einerseits dem Verständnis der physikalischen Vorgänge dient und sich andererseits der Auseinandersetzung mit den Fragen zum Verschleiß, Schmierung und der Haltbarkeit von Materialien gewidmet ist [Czichos & Habig 2020].

## 2 Reibung in der technischen Mechanik

Die Reibung in der technischen Mechanik wird unterschieden in:

- Haftreibung,
- Gleitreibung,
- Rollreibung,
- Seilreibung.

Die Reibung von Fluiden wird hier nicht betrachtet.

### 2.1 Haftreibung

Bei Haftreibung befindet sich das System in Ruhe und Gleichgewicht. Wird ein Quader auf der schiefen Ebene mit einem Neigungswinkel  $\alpha$  betrachtet, ist die Gewichtskraft des Quaders  $G$  die treibende Kraft, während in der Kontaktfuge tangential zur Fuge die Haftreibung  $R_H$  haltend wirkt. Die Komponente normal zur schiefen Ebene heißt Normalkraft  $N$ . Dies ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

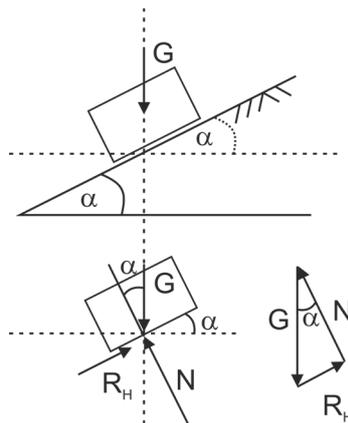


Abbildung 2-1, Kräftegleichgewicht am Quader auf der schiefen Ebene

Aus den Winkelbeziehungen ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:

$$G \cdot \sin \alpha = R_H$$

Gleichung 2-1

$$G \cdot \cos \alpha = N$$

Gleichung 2-2

$$\tan \alpha = \frac{R_H}{N}$$

Gleichung 2-3

Der Neigungswinkel  $\alpha$  kann bis zu einem Grenzwinkel  $\delta_H$  gesteigert werden. Wird der Grenzwinkel  $\delta_H$  überschritten gerät das System aus dem Gleichgewicht und Gleiten setzt ein. Der Grenzwinkel  $\delta_H$  wird Haftreibungswinkel genannt und der Haftreibungskoeffizient  $\mu_H$  wird nach Gleichung 2-4 definiert.

$$\mu_H = \tan \delta_H = \frac{R_{H,max}}{N_{max}}$$

Gleichung 2-4

Die maximale Haftreibungskraft wird bei bekanntem Haftreibungskoeffizienten folglich gemäß Gleichung 2-5 bestimmt. Dies ist das Haftreibungsgesetz nach COULOMB (1736 – 1806) [Coulomb 1821].

$$R_{H,max} = \mu_H \cdot N$$

Gleichung 2-5

Der Haftreibungskoeffizient ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig. Hierzu gehört u.a. die Werkstoffpaarung, die geometrische und physikalische Oberflächenbeschaffenheit und die Temperatur der sich berührenden Körper. Erste umfassende Angaben für Zahlenwerte des Haftreibungskoeffizienten werden u.a. den Ausführungen von Arthur Morin aus Metz aus den Jahren 1831 ff. zugesprochen [Morin 1832]. Hier wird die Haftreibung als *Reibung ebener Flächen, welche einige Zeit in Berührung standen* bezeichnet. Von Carl Holzmann 1838 aus dem Französischen übersetzt, wurden die Ausführungen von Morin auch als „*Hilfsbuch für praktische Mechanik*“ dem deutschsprachigen Raum zugänglich [Holzmann 1838]. Abbildung 2-2 zeigt einen Ausschnitt der ersten Tafel mit Zahlenwerten für verschiedene Haftreibungskoeffizienten.

Erste Tafel. — Reibung ebener Flächen, welche einige Zeit in Berührung standen.

Angabe der reibenden Flächen.	Lage der Fasern.	Zustand der Oberflächen.	Reibungscoefficient.
Eiche auf Eiche . . . . .	parallel	ohne Schmiere	0,62
	"	mit trockener Seife	0,44
	rechtwinklich	ohne Schmiere	0,54
	"	mit Wasser befeuchtet	0,71
Eiche auf Ulme . . . . .	Hirn auf platt liegendem	ohne Schmiere	0,43
	parallel	"	0,38
Ulme auf Eiche . . . . .	"	"	0,69
	"	mit trockener Seife	0,41
Eiche, Tanne, Buche, Vogelbeer auf Eiche . . . . .	rechtwinklich	ohne Schmiere	0,57
	parallel	"	0,53
Gegerbtes Leder auf Eiche . . . . .	das Leder platt liegend	"	0,61
	das Leder auf der Kante	"	0,43
	"	mit Wass. befeuchtet	0,79
Schwarze lederne Riemen } auf ebener Eichenfläche	parallel	ohne Schmiere	0,74
	rechtwinklich	"	0,47
Ungeponnener Hauf auf Eiche	parallel	"	0,50
	"	mit Wasser	0,87
Hanffell auf Eiche . . . . .	"	ohne Schmiere	0,80
	"	"	0,62
Eisen auf Eiche . . . . .	"	mit Wasser	0,65
	"	"	0,62

Abbildung 2-2, Historische Haftreibungskoeffizienten [Holzmann 1838]

Aus Abbildung 2-2 ist ersichtlich, dass sich die Werte für geschmierte und trockene Flächen unterscheiden. Angaben zu verschiedenen Werkstoffkombinationen finden sich in unterschiedlichen älteren Literaturquellen. Eine gestraffte Übersicht von Anhaltswerten ist in Tabelle 2-1 dargestellt.

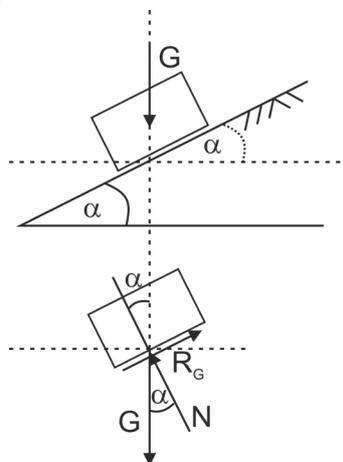
Werkstoffpaarung	Schmierung	Haftreibungskoeffizient
Stahl – Stahl	trocken	0,45 – 0,80
	geschmiert	0,10
Holz – Holz	trocken	0,40 – 0,65
	geschmiert	0,20
Beton – Beton	trocken	0,65
	geschmiert	k.A.

**Tabelle 2-1, Erfahrungswerte für den Haftreibungskoeffizient [Grote et al. 2018]**

Gleichermaßen werden in der zeitgemäßen Literatur solche Koeffiziententabellen als unbrauchbar bezeichnet, da multiple Einflussfaktoren auf die Koeffizienten darin nicht berücksichtigt werden [Bauer 2021].

## 2.2 Gleitreibung

Wird die Haftreibung überschritten, zum Beispiel bei genügend großen Neigungswinkeln  $\alpha > \delta_H$  im Beispiel nach Abbildung 2-1, tritt Gleiten ein. Dies bedeutet, der Quader bleibt nicht mehr in Ruhe und bewegt sich auf der schiefen Ebene. In der Gleitfuge wirkt die Gleitreibungskraft  $R_G$ , welche die Bewegung hemmt, s. Abbildung 2-3.



**Abbildung 2-3, Gleitreibung auf schiefer Ebene**

Die oben für die Haftreibung eingeführten Gleichgewichtsbedingungen gelten nur für den Fall, dass die Bewegung mit einer konstanten Geschwindigkeit stattfindet. Ansonsten führt der Überschuss an Lageenergie zur Beschleunigung des Quaders. Zudem ist die Gleitreibung von der Gleitgeschwindigkeit und weiteren komplexen Phänomenen in der Gleitfuge abhängig. So können sich zum Beispiel durch Abrasion und einhergehenden Materialverlust die Eigenschaften der Oberflächen im Kontaktbereich mit dem Gleiten kontinuierlich ändern. Entsprechend limitiert ist die Aussagekraft, wenn das Rechenmodell für die Haftreibung auf die Gleitreibung übertragen wird. Dennoch ist die Annahme der proportionalen Abhängigkeit zwischen der Normalkraft in der Gleitfuge und der Reibungskraft praktisch und COULOMB definierte empirisch Gleichung 2-6 für die Bestimmung der Gleitreibung  $R_G$ .

$$R_G = \mu_G \cdot N$$

Gleichung 2-6

$R_G$  ist dabei die Reibungskraft,  $\mu_G$  der Gleitreibungskoeffizient und  $N$  die in der Gleitfuge wirkende Normalkraft.  $R_G$  wirkt dabei entgegen der Bewegungsrichtung. Der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  wird zunächst als konstant angenommen und ist in der Regel kleiner als der Haftreibungskoeffizient. Der Gleitreibungswinkel  $\delta_G$  ist gemäß Gleichung 2-7 definiert.

$$\mu_G = \tan \delta_G$$

Gleichung 2-7

Aus dem Kräftegleichgewicht normal zur Gleitfuge ergibt sich Gleichung 2-8.

$$N = G \cdot \cos \alpha$$

Gleichung 2-8

Und für konstante Gleitgeschwindigkeit gilt Gleichung 2-9.

$$R_G = G \cdot \sin \alpha$$

Gleichung 2-9

Erfahrungswerte für Gleitreibungskoeffizienten sind in Tabelle 2-2 gegeben.

Werkstoffpaarung	Schmierung	Gleitreibungskoeffizient
Stahl – Stahl	trocken	0,40 – 0,7
	geschmiert	0,10
Holz – Holz	trocken	0,20 – 0,40
	geschmiert	0,04 – 0,16

Tabelle 2-2, Erfahrungswerte für den Gleitreibungskoeffizienten [Grote et al. 2018]

Die Gleitreibung ist von der Gleitgeschwindigkeit abhängig und der Übergang zwischen Haften und Gleiten ist fließend. Dies wird durch die sogenannte STRIBECK-Kurve dargestellt [Stribeck 1902]. Ein ständiger Wechsel zwischen Gleit- und Haftreibung wird als Stick-Slip-Problem bezeichnet, was sich in der Praxis zum Beispiel durch ruckelnde Bremsen äußert. Da in fast allen Bereichen der klassischen Mechanik Relativbewegungen auftreten, ist das Aufstellen von STRIBECK-Kurven für Werkstoffpaarungen eine verbreitete Aufgabe des Ingenieurwesens.

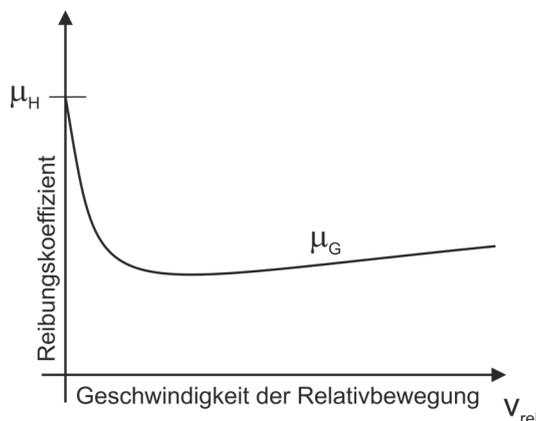
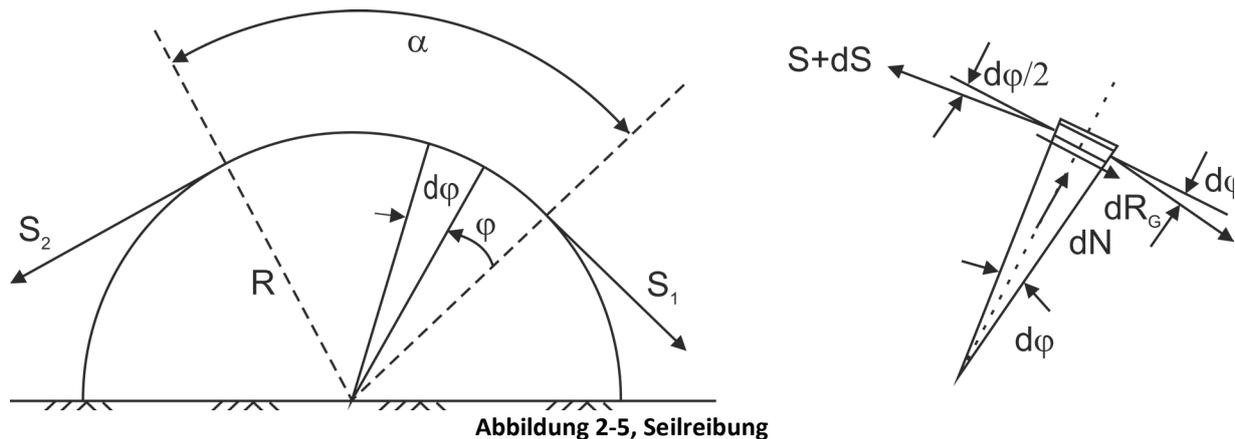


Abbildung 2-4, STRIBECK-Kurve

In besonderen Fällen, zum Beispiel bei Zwangsverformungen und starker Verzahnung, können Werte für den Gleitreibungskoeffizienten  $\mu_G > 1$  zutreffend sein [Miao 2023].

### 2.3 Seilreibung

Die Seilreibung ist für die Berechnung von Seilkräften an Pollern, Dalben, Hebwerkzeugen, Riemenantrieben, u.s.w. von Bedeutung. Wir betrachten eine Kreisscheibe gemäß Abb. 2-5 auf der ein Seil mit konstanter Geschwindigkeit in Richtung der Seilkraft  $S_2$  gezogen wird. Gegeben ist die Seilkraft  $S_1$ , der Radius  $R$ , der Umschlingwinkel  $\alpha$  und der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$  zwischen Seil und Kreisscheibe. Die Berechnung der Seilkraft  $S_2$  erfolgt durch die Betrachtung eines infinitesimalen Seilelements.



Da Seile weder Querkräfte noch Biegemomente aufnehmen können, lässt sich das Problem wie folgt lösen.

Kräftegleichgewichte:

$$\sum \vec{N} = 0 = dN - (S + dS)\sin\frac{d\varphi}{2} - S\sin\frac{d\varphi}{2}$$

$$\Rightarrow dN = Sd\varphi$$

$$\sum \vec{S} = 0 = (S + dS)\cos\frac{d\varphi}{2} - S\cos\frac{d\varphi}{2} - dR_G$$

$$\Rightarrow dS = dR_G$$

Reibungsgesetz:

$$dR_G = \mu_G \cdot dN$$

Hieraus ergibt sich

$$dS = \mu_G \cdot Sd\varphi \quad \text{bzw.} \quad \frac{dS}{S} = \mu_G \cdot d\varphi$$

Durch Integration und die Randbedingung  $\varphi=0$  und  $S=S_1$  ergibt sich:

$$S(\varphi) = S_1 \cdot e^{\mu_G \cdot \varphi}$$

Für die Seilkraft  $S_2=S(\alpha)$  folgt, wenn in Richtung  $S_2$  gezogen wird:

$$S_2 = S_1 \cdot e^{\mu_G \cdot \alpha}$$

Dabei ist  $\alpha$  als Vielfaches von  $\pi$  anzugeben ( $30^\circ=\pi/6$ ,  $45^\circ=\pi/4$ ,  $60^\circ=\pi/3$ ,  $90^\circ=\pi/2$ , u.s.w.). Wird das Seil in Richtung von  $S_1$  gezogen kehrt sich das Vorzeichen der Reibungskraft bzw. von  $\mu_G$  um.

$$S_2 = S_1 \cdot e^{-\mu_G \cdot \alpha}$$

Wenn das Seil nicht gleitet, sondern haftet wird der Gleitreibungskoeffizient durch den Haftreibungskoeffizient ersetzt. Nach EULER (1707 -1783) und EYTELWEIN (1764 – 1848) ergibt sich dann für  $S_2 > S_1$ :

$$S_{2,max} = S_1 \cdot e^{\mu_H \cdot \alpha} \quad \text{und} \quad S_{2,min} = S_1 \cdot e^{-\mu_H \cdot \alpha}$$

und Haften ist somit gewährleistet für:

$$e^{-\mu_H \cdot \alpha} \leq \frac{S_2}{S_1} \leq e^{\mu_H \cdot \alpha}$$

Das auf ein Rad von einem Seil maximal übertragbare Moment ist

$$M_{max} = R \cdot (S_{2,max} - S_1)$$

## 2.4 Rollreibung

Beim Rollen eines Rades verlagert sich die Kontaktfläche i.d.R. durch Deformation in Bewegungsrichtung gemäß Abb. 2-6.

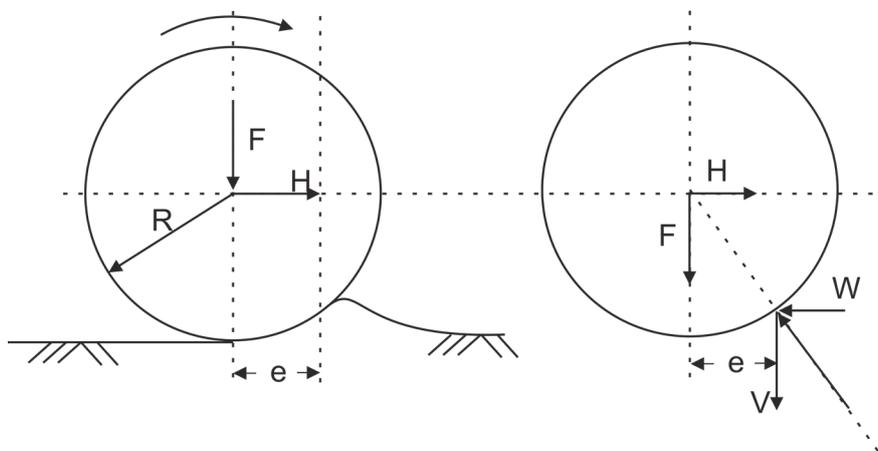


Abbildung 2-6, Rollreibung

Die Breite der Kontaktfläche  $e$  wird als „Hebelarm der rollenden Reibung“ bezeichnet. Im Verhältnis zum Radradius ergibt sich der Rollwiderstandskoeffizient  $c_f$  nach Gleichung 2-10.

$$c_F = \frac{e}{R} \ll 1$$

Gleichung 2-10

Näherungsweise gilt

$$\frac{e}{R} \approx \frac{W}{V} = \frac{H}{F}$$

Gleichung 2-11

Das Moment der rollenden Reibung ist:

$$M = H \cdot R = e \cdot F$$

Gleichung 2-12

Erfahrungswerte für den Hebelarm e der rollenden Reibung sind in Tabelle 2-3 gegeben.

Wälzkörper	Hebelarm der rollenden Reibung e
Kugellager	0,005-0,01 mm
Eisenbahnrad auf Schiene	0,5 mm

Tabelle 2-3, Erfahrungswerte für den Hebelarm der rollenden Reibung [Grote et al. 2018]

Wird dem Rollwiderstand noch der Lagerwiderstand aus einer Radachse hinzugezählt, wird dies *Fahrwiderstand* genannt, der naturgemäß im Fahrzeugbau Anwendung findet.

### 3 Reibung und Adhäsion

Der Zusammenhalt von Stoffen basiert auf verschiedenen Effekten. Der innere Zusammenhalt wird van-der-Waals Kräften zugesprochen, welche sich als Wechselwirkung zwischen Molekülen und Atomen verstehen lassen und allgemein physikalische Adsorptionsvorgänge beschreiben [Gräfen 2013]. Für den Zusammenhalt zweier Stoffe wurde oben die Reibung eingeführt, welche vorrangig den kontaktmechanischen Verbund, wie zum Beispiel die Verzahnung, der sich berührenden Objekte parallel zur Scherfuge beschreibt. Darüber hinaus können noch weitere Grenzflächeneffekte auftreten, die den Zusammenhalt zweier Stoffe verstärken. Diese werden Adhäsion genannt und sind Kräfte bzw. Spannungen, welche nötig ist um zwei adhärierende Stoffe voneinander zu trennen. Die Adhäsion kann sowohl tangential als auch normal zur Kontaktfläche wirken [Thewes 1999]. Weiterhin kann Adhäsion zwischen festen Stoffen, als auch zwischen flüssig- oder gasförmigen Stoffen auftreten. Die Adhäsion wird ebenfalls durch die van-der-Waals Kräfte hervorgerufen und äußert sich durch Haften und Kleben [Gräfen 2013]. Folglich erweiterte COULOMB die Gleichung für die Berechnung von Schubspannungen in einer Scherfuge um einen Adhäsionsanteil a gemäß Gleichung 3-1.

$$\tau = \mu \cdot \sigma + a$$

Gleichung 3-1

Die Theorie hinter den Adhäsionskräften setzt sich aus der Polarisierungstheorie, der elektrostatischen Theorie, der Diffusionstheorie und der Adsorptions- bzw. der Benetzungstheorie zusammen [Habenicht 2008].

Bei der Verwendung von Gleichung 3-1 bleiben viele dieser Effekte unberücksichtigt, denn mathematisch ist der Reibungsanteil linear von dem Reibungskoeffizienten  $\mu$ , respektive der Normalspannung  $\sigma$  abhängig und die Adhäsion a ist konstant, also spannungsunabhängig.

## 4 Anwendung im Leitungsbau

### 4.1 Rohr-Boden Interaktion

Kontaktmechanische Phänomene gibt es im Leitungsbau viele, vorrangige Bedeutung hat für die statische Auslegung von *erdverlegten* Leitungen die Interaktion Rohr-Boden. Die Stoffpaarung ergibt sich dann aus dem Rohrmaterial und dem anstehenden Boden oder dem verwendeten Bettungsmaterial. Gleichung 3-1 wird in der Regel für die Berechnung der Spannungen im Kontaktbereich verwendet. Dabei kommt es darauf an, wie gut der anstehende Erdstoff mit dem Rohrmaterial zusammenhält. Es wird in der Bodenmechanik davon ausgegangen, dass der Zusammenhalt mit der Scherfestigkeit des Bodens korreliert, weshalb die Kennwerte für die Scherspannung in der Kontaktfuge in linearer Abhängigkeit der Scherfestigkeit des Bodens angesetzt werden. Die Scherfestigkeit setzt sich unter Anwendung der COULOMBSchen Reibungstheorie aus einem Anteil inneren Reibung für granulare Bestandteile, repräsentiert durch den inneren Reibungswinkel  $\varphi'$ , und einen Kohäsionsanteil  $c'$  für den Feinkornanteil zusammen. Beide Parameter werden für den Bruchzustand ermittelt. Auch in der Bodenmechanik wird Gleichung 2-7 verwendet, womit der Kontaktreibungswinkel  $\delta_K$  gemäß Gleichung 4-1 definiert wird.

$$\mu_K = \tan \delta_K$$

Gleichung 4-1

Durch die Verzahnung kann ein Teil der inneren Reibung des Bodens aktiviert werden. Bei optimaler Verzahnung kann die innere Reibung des Bodens vollständig wirken. Das Gedankenmodell hierzu ist in Abb. 4-1 in Anlehnung an JENSEN et al. dargestellt, welches zeigt, dass die Kontaktreibung in granularen Böden ein Zusammenspiel zwischen Korndurchmesser und Oberflächenrauheit ist [Jensen et al. 1999].

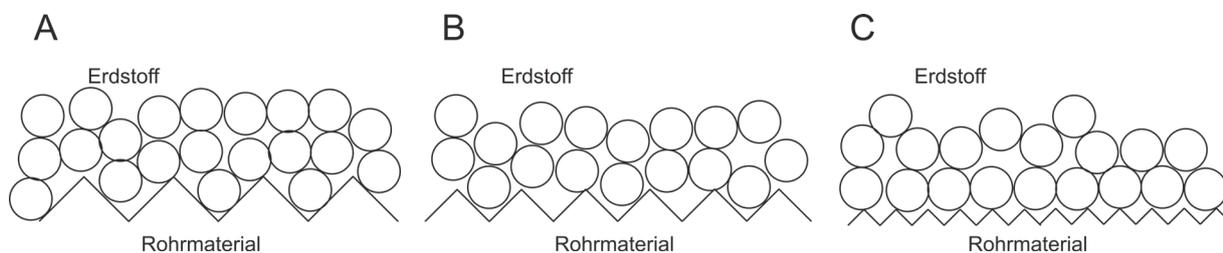


Abbildung 4-1, Modelle für Kontaktreibung

Im Fall A ist die Oberfläche so rau, dass sich eine Scherfuge im Boden ausbilden muss. Die maximale innere Reibung des Bodens wird dann aktiviert. Im Fall C ist die Oberfläche so glatt, dass sich die Scherfuge direkt zwischen der Oberfläche der Körner und der Oberfläche des Rohres ausbildet. Nur ein kleiner Anteil der maximal zur Verfügung stehenden inneren Scherfestigkeit wird dann in Anspruch genommen. Fall B liegt zwischen A und C. Es gilt:

$$\varphi' = \delta_{K,A} > \delta_{K,B} > \delta_{K,C}$$

Gleichung 4-2

1961 veröffentlicht POTYONDY für die klassischen Konstruktionsmaterialien Stahl, Holz und Beton Kennwerte für die Stoffpaarung mit Sand, Schluff und Ton [Potyondy 1961]. Die Kennwerte sind die Quotienten aus den Kontaktscherparametern und den Scherparametern des Erdstoffs. Es gelten die nachfolgenden Gleichungen:

$$f_{\varphi'} = \frac{\delta_K}{\varphi'}$$

Gleichung 4-3

$$f_c = \frac{a'}{c'}$$

Gleichung 4-4

$$f_{c'_{max}} = \frac{a'_{max}}{c'_{max}}$$

Gleichung 4-5

In Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 sind die Parameter von POTYONDY angegeben. Der in Abbildung 4-1 dargestellte Zusammenhang zeigt sich hier in Zahlen der  $f_{\varphi}$ -Quotienten für die Reibung. Sie steigen mit der Rauheit des Kontakts.

In der Kontaktzone findet eine Umordnung der Partikel statt. Die Partikel verändern ihre Position und können sich zudem noch in alle Richtungen verdrehen. Bei dichter Lagerung schieben Sie sich aufeinander (Dilatanz), bei lockerer Lagerung werden Hohlräume gefüllt und eine dichtere Lagerung entsteht (Kontraktanz) [Bolton 1986]. Der Bereich in dem dies passiert wird Scherzone oder Scherband genannt. Die Breite des Scherbands wird oft nach Gleichung 4-6 abgeschätzt, wobei die Dicke des Scherbands von der Rauheit der Einzelkörner, der Lagerungsdichte des Erdstoffs, dem Scherweg und anderen Einflüssen abhängt [Wernick 1978], [Gudehus 1998].

$$d_s = 10 \cdot d_{50}$$

Gleichung 4-6

$d_s$ = Breite des Scherbands

$d_{50}$ = Korndurchmesser bei 50% Siebdurchgang

Aus Abbildung 4-1 erschließt sich, dass die Scherbanddicke für den Fall der Kontaktreibung von der Verzahnung der Stoffpaarung abhängen muss. Untersuchungen mit der DEM (=Diskrete Elemente Methode) ermöglichen die Visualisierung von Partikelrotationen und Verschiebungen und ergaben beispielhaft für die Stoffpaarung Sand – Polyethylen eine Scherbanddicke von rd.  $5 \cdot d_{50}$  [Weidlich et al. 2009].

Material	Oberflächen- beschaffenheit	Sand, trocken dicht gelagert	Sand, wasser- gesättigt, dicht gelagert	Schluff, kohäsionslos trocken, dicht gelagert	Schluff, kohäsionslos, wasser-gesättigt, locker gelagert	Schluff, kohäsionslos, dicht gelagert	Schluff, kohäsiv	Ton
Stahl	Glatt	0,54	0,64	0,79	0,40	0,68	0,40	0,50
Stahl	Rau	0,70	0,80	0,95	0,48	0,75	0,65	0,50
Holz	Parallel zur Faser	0,76	0,85	0,92	0,55	0,87	0,80	0,60
Holz	Orthogonal zur Faser	0,88	0,89	0,98	0,63	0,95	0,90	0,70
Beton	Weich	0,76	0,80	0,92	0,50	0,87	0,84	0,68
Beton	Körnig	0,88	0,88	0,98	0,62	0,96	0,90	0,80
Beton	Rau	0,98	0,90	1,00	0,79	1,00	0,95	0,95

Tabelle 4-1,  $f_{\varphi}$ -Quotienten für Reibung nach POTYONDY [Potyondy 1961]

Material	Oberflächenbeschaffenheit	Schluff kohäsiv	Ton	Ton <sub>max</sub>
Stahl	Glatt	-	0,25	0,50
Stahl	Rau	0,35	0,50	0,80
Holz	Parallel zur Faser	0,20	0,40	0,85
Holz	Orthogonal zur Faser	0,40	0,50	0,85
Beton	Weich	0,42	0,40	1,0
Beton	Körnig	0,58	0,50	1,0
Beton	Rau	0,80	0,60	1,0

**Tabelle 4-2, f<sub>c</sub>-Quotienten für Adhäsion nach POTYONDY [Potyondy 1961]**

Können sich die granularen Bestandteile eines Erdstoffs bei einer Auflast in die Kontaktfläche eindrücken, weil diese weicher ist als die Einzelkörner ändert sich die Reibkraft (siehe auch Werte für f-Quotienten von Holz). O’ROURKE et al. untersuchten deshalb 1990 den Zusammenhang zwischen der Shore-D Härte H<sub>D</sub> des Materials und dem Kontaktreibungswinkel [O’Rourke et al. 1990]. Auf Grundlage von rd. 450 Versuchen mit HDPE, MDPE, PVC, Epoxyd und Plexiglas wurde Gleichung 4-7 entwickelt.

$$f_{\varphi'} = -0,0088 \cdot H_D + 1,15 \qquad \text{Gleichung 4-7}$$

Die Shore-D Härte H<sub>D</sub> kann experimentell nach DIN EN ISO 868:2003-10 ermittelt werden [DIN EN ISO 868]. Ein typischer Wert für Polyethylen hoher Dichte ist zum Beispiel H<sub>D</sub>=63.

#### 4.2 Erddruck

Für erdverlegte Leitungen ist die Bestimmung der axialen Reaktionskraft im Kontaktbereich Rohrleitung-Boden, welche einer axiale Rohrverschiebung im Erdstoff entgegenwirkt, ein wichtiger Anwendungsfall. Wie bereits oben erwähnt ist diese axiale Reaktionskraft von der radial wirkenden Normalspannung im Boden abhängig (s. Gleichung 3-1). Dies gilt für den Rohrvortrieb, das gesteuerte Horizontalspülbohrverfahren und erdverlegte warmgehende Leitungen, wie Fernwärmeleitungen. Wird ein lokales Koordinatensystem am Rohrquerschnitt gemäß Abbildung 4-2 eingeführt, kann unter Anwendung des Coulomb’schen Reibgesetzes die axiale Bettungsreaktionskraft nach Gleichung 4-8 auf der sicheren Seite abgeschätzt werden [Rossbach 2008]. In diesem Fall wird von einer über den Leitungsumfang und die Leitungslänge konstanten Kontaktfläche zwischen Bohrlochwandung und Leitung ausgegangen. Tangentiale Schubspannungen τ<sub>r,ψ</sub> werden vernachlässigt.

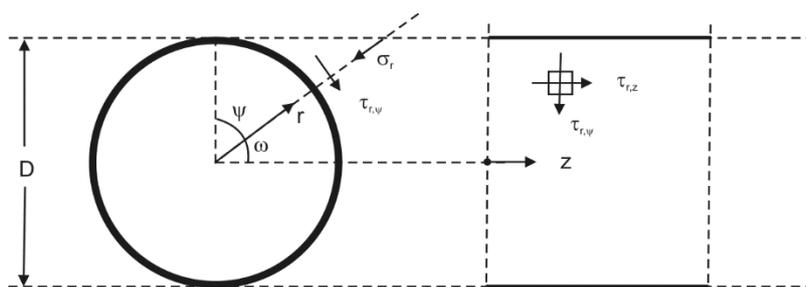


Abbildung 4-2, Polarkoordinaten am Leitungsquerschnitt

$$F_{z,max} = \int_0^{L_{max}} \int_0^{2\pi} (\mu \cdot \sigma_m + a) \cdot r \cdot dz \cdot d\psi \quad \text{Gleichung 4-8}$$

Hierin bezeichnen  $F_{z,max}$  die maximale Zugkraft,  $L_{max}$  die Länge der Kontaktfläche,  $\mu$  der Reibungskoeffizient,  $\sigma_m$  den radial angreifenden Erddruck auf den Leitungsumfang,  $a$  die tangentielle Adhäsion,  $r$  der Rohrradius und  $\psi$  die Winkelkoordinate. Als ein Maß für die angreifende Erddruckkraft am Rohrquerschnitt ergibt sich der resultierende Erddruck  $E_{res}$  gemäß Gleichung 4-9.

$$E_{res} = \sigma_m \cdot \pi \cdot D_a \quad \text{Gleichung 4-9}$$

Mit

$E_{res}$  = resultierender Erddruck [kN/m]

$\sigma_m$  = Mitterlere Kontaktspannung über den Rohrumfang [kN/m<sup>2</sup>]

$D_a$  = Rohraußendurchmesser [m]

Die Bedeutung des Erddrucks und dessen Verteilung über den Rohrumfang ist je nach Leitungstyp unterschiedlich. Rohre mit hohen Innendrücken erfahren primäre Lasten aus Innendruck. Die exakte Verteilung des in der Regel deutlich geringeren Erddrucks auf das Rohr ist von sekundärer Bedeutung. Dies ist insbesondere bei oberflächennaher Verlegung der Fall. Freispiegelleitungen ohne Innendruck sind sensitiv auf Spannungsunterschiede zwischen vertikalem und horizontalen Erddruck. So ist zum Beispiel die Berechnung des Erddrucks auf Abwasserrohre durch ein komplexes Verfahren nach DWA A 127 geregelt [DWA A 127]. Deshalb existieren sowohl vereinfachte als auch verzwickte Berechnungswege für die Berechnung des Erddrucks auf Rohre. Eine Übersicht habe ich 2012 zusammengestellt [s. Weidlich 2012]. Drei verschiedene Ansätze werden nachfolgend kurz vorgestellt.

### 4.3 $K_0$ -Ansatz

Der  $K_0$ -Ansatz geht von einer Reduktion der horizontalen Spannungen infolge der inneren Reibung des Bodens aus, während die vertikalen Spannungen mit der Tiefe proportional zunehmen. Abbildung 4-3 zeigt die Spannungsverteilung. Adhäsion und Kohäsion und der Einfluss aus dem Graben werden nicht berücksichtigt.

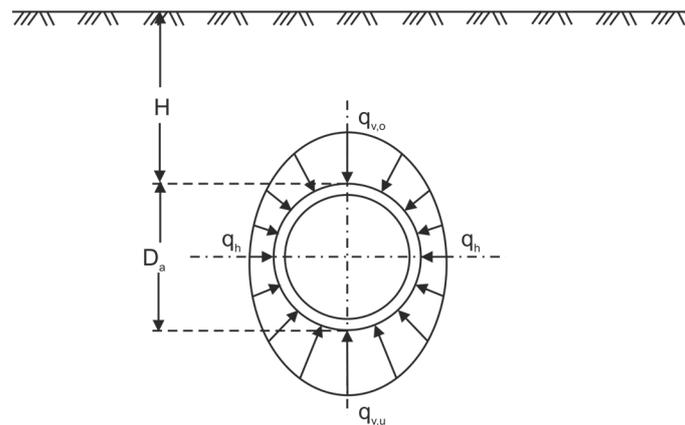


Abbildung 4-3

Die Reduktion der Horizontalspannungen im Vergleich zu den Vertikalspannungen wird durch den Erdruchdruckbeiwert  $K_0$  beschrieben. Der Erdruchdruckbeiwert  $K_0$  wird in der Regel mit der empirischen Formel von Jaky  $K_0=1-\sin\varphi'$  abgeschätzt [Jaky 1944].

Der  $K_0$ -Ansatz ist weit verbreitet und wird aufgrund seiner Einfachheit gerne verwendet. Es gilt:

Scheitel:  $q_{v,o} = \gamma \cdot H$  Gleichung 4-10

Mit

$\gamma$ =Wichte der Verfüllung,  $H$ =Überdeckung über Rohrscheitel

Sohle:  $q_{v,u} = \gamma \cdot (H + D_a)$  Gleichung 4-11

Mit

$\gamma$ =Wichte der Verfüllung,  $H$ =Überdeckung über Rohrscheitel,  $D_a$ =Rohraußendurchmesser

Kämpfer:  $q_h = K_0 \cdot \gamma \cdot \left(H + \frac{D_a}{2}\right)$  Gleichung 4-12

Mit

$\gamma$ =Wichte der Verfüllung,  $H$ =Überdeckung über Rohrscheitel,  $D_a$ =Rohraußendurchmesser  
 $K_0$ =Erdruchdruckbeiwert

Die mittlere Kontaktspannung  $\sigma_m$  ergibt sich dann durch das arithmetische Mittel gemäß Gleichung 4-14.

$$\sigma_m = \frac{1}{4} \cdot \gamma \cdot H + \frac{2}{4} \cdot \gamma \cdot \left(H + \frac{D_a}{2}\right) \cdot K_0 + \frac{1}{4} \cdot \gamma \cdot (H + D_a)$$
 Gleichung 4-13

Umformen ergibt:

$$\sigma_m = \gamma \cdot \left(\frac{2H+2HK_0+D_a+D_aK_0}{4}\right) = \gamma \cdot \left(\frac{1+K_0}{2}\right) \cdot \left(H + \frac{D_a}{2}\right)$$
 Gleichung 4-14

Die Schwäche des Berechnungsansatzes liegt darin, dass die Gleichgewichtsbedingung  $\Sigma V=0$  nicht gegeben ist. Es muss dann angenommen werden, dass die Differenz aus den Vertikalspannungen über Schubspannungen am Rohrumfang abgetragen werden oder mit dem Eigengewicht des Rohres im Gleichgewicht stehen. Gleichung 4-14 ist deshalb eine Näherungsgleichung.

#### 4.4 Erddruck nach EN 13941

Wird der Gleichgewichtsbedingung  $\Sigma V=0$  entsprochen, bedeutet dies, dass die Vertikalspannungen im Scheitel und in der Sohle im Betrag gleich sind, d.h.  $|q_{v,o}|=|q_{v,u}|$ . Die vertikale Spannungszunahme im Erdreich zwischen Scheitel und Sohle der Rohrleitung wird so vernachlässigt, was nur für kleine Durchmesser akzeptabel ist. Es ergibt sich die gemittelte Spannung  $\sigma_m$  gemäß Gleichung 4-15.

$$\sigma_m = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot H + \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot \left( H + \frac{D_a}{2} \right) \cdot K_0 \quad \text{Gleichung 4-15}$$

Durch Umformen ergibt sich:

$$\sigma_m = \gamma \cdot \left( \frac{1+K_0}{2} \cdot \left( H + \frac{D_a}{2} \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{D_a}{2} \right) \quad \text{Gleichung 4-16}$$

$$\sigma_m = \gamma \cdot \left( \frac{1+K_0}{2} \cdot \left( H + \frac{D_a}{2} \right) \right) - \frac{\gamma \cdot D_a}{4} \quad \text{Gleichung 4-17}$$

Dieser Erddruckansatz wird für Fernwärmeleitungen nach EN 13941 verwendet, wobei der Erdlast noch das Rohrgewicht hinzugerechnet wird [EN 13941]. Der resultierende Erddruck ist in Gleichung 4-18 dargestellt.

$$E_{res,EN13941} = \gamma \cdot \pi \cdot D_a \cdot \left( \frac{1+K_0}{2} \cdot \left( H + \frac{D_a}{2} \right) \right) + G - \gamma \cdot \pi \cdot \frac{D_a^2}{4} \quad \text{Gleichung 4-18}$$

Für diese Leitungen ist es wichtig den resultierenden Erddruck quantitativ akkurat zu erfassen, wobei die exakte Spannungsverteilung um das Rohr sekundär ist.

#### 4.5 Grabenlose Verfahren

Die grabenlose Installation kann durch Einpressen oder Einziehen einer Leitung erfolgen. Es wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die zusammenfassend von z.B. STEIN [Stein 2005] und in dem DWA Arbeitsblatt 125 [DWA A 125] gelistet und beschrieben werden. Verfahren der grabenlosen Verlegung für Erdkabel sind zum Beispiel in [Peters & Engel 2018] und [Bijok 2018] beschrieben. Auf die vielen Details und Einzelheiten der jeweiligen Verfahren kann an dieser Stelle nicht in der Tiefe eingegangen werden, die genannten Literaturhinweise helfen hier weiter.

#### 4.6 Rohrvortrieb, Erddruck nach DWA A 161

Das Pressen von Leitungen wird auch Rohrvortrieb genannt. Die beim Vortrieb auf Rohre wirkenden Erdlasten waren bereits Gegenstand einiger Untersuchungen [Schößer 2004], [Stolz 2010], [Bohle 2011]. Es ist eine Startgrube oder ein Startschacht und eine Zielbaugrube oder Zielschacht in der jeweiligen Verlegetiefe erforderlich. Beim Vortrieb zwischen Start und Ziel wirken auf das Rohr die Pressenkräfte, welche die auftretenden Bodenreaktionen überwinden müssen. Die Kenntnis für die Auslegung des tragenden Rohrquerschnitts sowie die Dimensionierung der Presse hängt daher von den zu erwartenden Erdlasten ab. Der Berechnungsweg für die Erddruckverteilung nach DWA A 161 dient der Abschätzung des Erddrucks auf grabenlos verlegte Vortriebsrohre [DWA A 161].

Für die Bestimmung der Spannungsverteilung im Boden nach DWA A 161 wird ein gedachter Graben mit der Grabenbreite nach Gleichung 4-19 eingeführt.

$$b = \sqrt{3} \cdot D_a$$

Gleichung 4-19

Mit

b=fiktive Grabenbreite

D<sub>a</sub>=Rohraußendurchmesser

In diesem gedachten Graben wirken an den Grabenwänden Reibungskräfte, die ein Teil des Eigengewichts des über dem Rohr liegenden monolithischen Blocks abmindern. Durch dieses Gedankenmodell lässt sich die Berechnungsmethode für den Erddruck auf Abwasserrohre nach DWA A 127 auf Vortriebsrohre übertragen. Daher wird hier, wie auch nach DWA A 127, angenommen, dass zwischen den gedachten Grabenwänden im Boden eine Gewölbewirkung stattfindet [DWA A 127]. Dies wird auch Siloeffekt genannt, der bei Schüttgütern in Silos auftritt. Die sich einstellende Abminderung am Scheitel des Rohres wird für den zweidimensionalen Fall durch den Silobeiwert  $\kappa$  berechnet (vgl. [JANSSEN 1895], [TERZAGHI & JELINEK 1954], [HUDER 1972] und andere). Der Silobeiwert wird nach DWA A 161 gemäß Gleichung 4-20 berechnet.

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2 \frac{H}{b} k \tan \delta}}{2 \frac{H}{b} k \tan \delta}$$

Gleichung 4-20

Mit

H=Tiefe unter Gelände

b=fiktive Grabenbreite

k=Erddruckbeiwert im Graben

 $\delta$ =Reibungswinkel an der Grabenwand.

Der Reibungswinkel  $\delta$  wird nach DWA A 161 tabellarisch in Abhängigkeit der inneren Reibung für verschiedene Bodenarten angegeben. Im Falle eines mitteldicht gelagerten nicht bindigen Bodens ist zum Beispiel  $\delta = \varphi' / 2$  bzw.  $f_\varphi = 0,5$ .

Der Auflagerwinkel der Sohle ist von dem anstehenden Boden unter der Sohle und dem Vortriebsverfahren abhängig. Der Auflagerwinkel  $2\alpha$  variiert zwischen  $30^\circ$  und  $120^\circ$ . Abbildung 4-4 zeigt die Spannungsverteilung, welche für die rohrstatischen Nachweise angesetzt wird. Für den Vortrieb ist der resultierende Erddruck aus dieser Spannungsverteilung mindestens anzusetzen. Hinzu kommen Kräfte aus Abwinkelung der Rohre im Falle einer kurvigen Trassenführung.

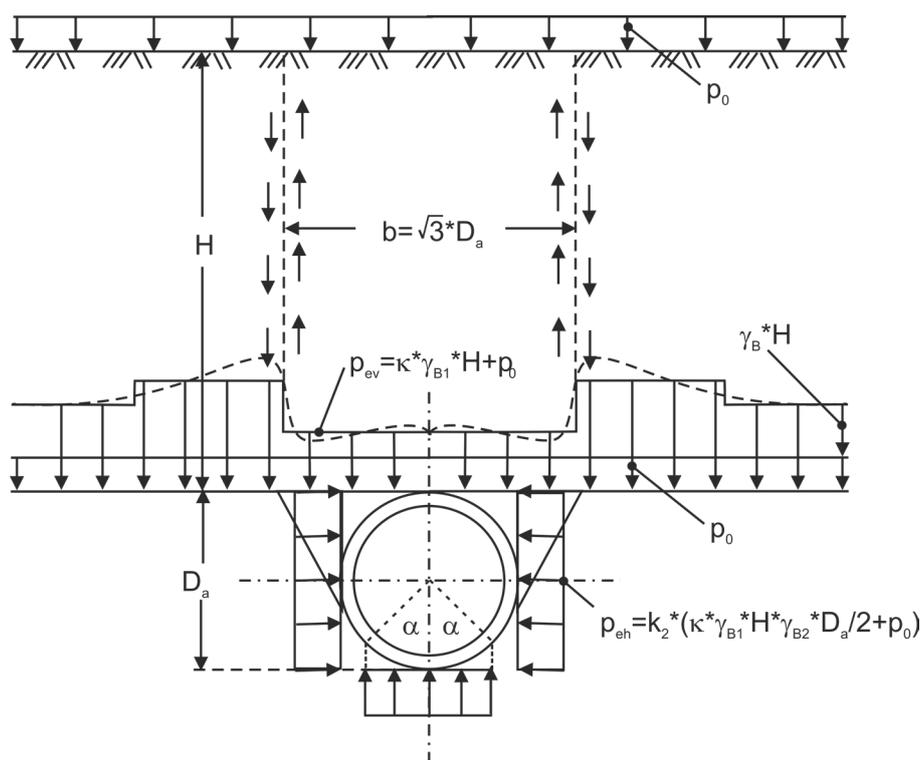
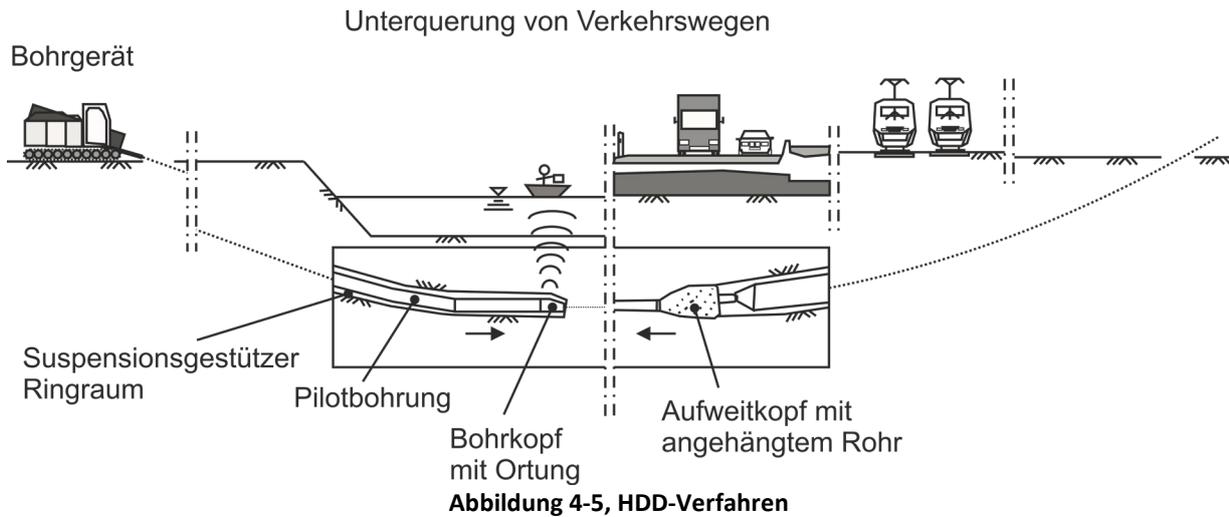


Abbildung 4-4, Spannungsverteilung im Boden nach DWA A 161

#### 4.7 Horizontalspülbohrverfahren

Beim Horizontalspülbohrverfahren (=engl. Horizontal Directional Drilling, HDD) wird die Leitung in ein zuvor erstelltes und je nach Durchmesser der Leitung nachfolgend aufgeweitetes Bohrloch eingezogen. Der Bohrkanal wird mit einem steuerbaren Bohrkopf aufgeföhren. Der Bohrkopf ist mit Meißeln besetzt, welche in Kombination mit mehreren Spülstrahlen, die am Bohrkopf unter einem Spüldruck austreten, den Boden lösen. Die austretende Spülflüssigkeit dient zudem dem Abtragen des Bohrkleins über den Ringspalt, der Stützung des Bohrlochs und der Kühlung des Bohrkopfs und reduziert letztlich signifikant die Einzugskräfte bei der Installation der Rohrleitung [Willoughby 2005], [Weidlich et al. 2013]. Das HDD-Verfahren eignet sich für alle Leitungstypen, fast alle Bodenarten und auch für große Distanzen von 1000 Meter und mehr. Im Vergleich zu Vortrieben kommt das HDD-Verfahren mit kleinen Baugruben aus, da in der Regel von der Oberfläche aus gebohrt wird. Die Baugruben dienen dem Auffangen der anfallenden und verdrängten Spülflüssigkeit.

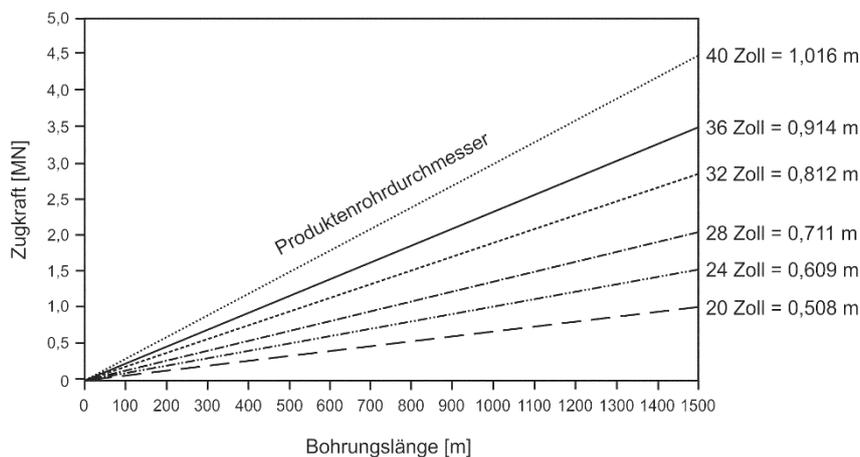
Bei der Installation einer Leitung mit dem Horizontalspülbohrverfahren muss ein Bohrgerät mit der erforderlichen Zugkraft ausgewählt werden und die einzuziehende Leitung muss den auftretenden Belastungen sicher widerstehen. Die beim Bohrprozess auftretenden Kräfte sind dabei für die Auswahl der Maschine üblicherweise nicht relevant, die gewählte Zugkraftkapazität wird durch den Einziehvorgang der Leitung und den dabei auftretenden Reibungskräften bestimmt [Kögler 1996]. Die Tiefenlage der horizontalen Strecke wird über eine bogenförmige Bohrlinie erreicht, die den Eintrittspunkt und den Austrittspunkt mit dem horizontal verlaufenden Bereich verbindet (siehe Abbildung 4-5).



Der Radius des Bogens ist so zu begrenzen, dass sowohl das Bohrgestänge als auch die installierte Leitung keinen Schaden nehmen. Gleiches gilt auch für alle Bögen die in anderer Richtung gebohrt werden.

Die Zugkräfte werden vorrangig durch die Reibung und Adhäsion in den Kontaktflächen zwischen der Leitung und der Bohrlochwandung bestimmt. Für einen widerstandsarmen Einzug wird das Bohrloch mit einem Überschnitt erstellt, wodurch ein Ringraum entsteht, indem je nach Krümmung, Auftrieb oder elastischer Rückstellkraft nur limitierte Kontaktstellen mit der Leitung auftreten. Der Überschnittfaktor ist das Verhältnis von Bohrlochdurchmesser zum ungünstigsten Rohraußendurchmesser. Als Richtwerte haben sich Faktoren zwischen 1,2 für reibungsarmen standfesten Boden und 1,5 für instabile, zum Nachfall neigende Böden etabliert [DCA 2015]. Hierdurch kann die Zugkraft deutlich reduziert werden, aber die Kenntnis um die genaue Lage der Leitung im Bohrloch geht verloren. Auch eine nachträgliche Vermessung kann nur die geodätische Lage der Leitung aber nicht deren Lage im Bohrloch liefern.

Für die Abschätzung der Einzugskräfte im HDD-Verfahren wurden weitere Verfahren entwickelt. Ein einfaches Verfahren wurde 1995 von der Drilling Contractors Association vorgeschlagen [DCA 1995]. Hierin kann die erforderliche Zugkraft über die Verlegelänge in Abhängigkeit des Rohraußendurchmessers aus einem Diagramm (vgl. Abbildung 4-6) entnommen werden, welches unter vereinfachten Annahmen einer normalen Stahlrohrleitung mit normaler Wandstärke bei einem Reibungsbeiwert  $\mu=0,2$  zwischen Boden und Rohr erstellt wurde.



**Abbildung 4-6, Zugkräfte im HDD-Verfahren nach DCA 1995**

Je nach Baustellensituation kann dieses Verfahren sehr ungenau sein. Detaillierte Berechnungsansätze liegen in Form der PRCI- und ASTM-Methode vor. Die PRCI-Methode geht auf Untersuchungen von Huey et al. zurück [Huey 1996] und wurde von WILLOUGHBY weiterverfolgt [Willoughby 2005]. Es werden hierin gerade Bereiche des Leitungsstrangs von gekrümmten Bereichen unterschieden. Dies illustriert Abbildung 4-7. Im geraden Bereich gilt:

$$T_2 = T_1 + |fric| + DRAG \pm W_s \cdot L \cdot \sin\theta \quad \text{Gleichung 4-21}$$

Hierin ist  $T_2$  die erforderliche Zugkraft der Maschine,  $T_1$  ist der Zugwiderstand der noch freiliegenden Rohrleitung,  $|fric|$  ist die Reibung zwischen dem Rohr und dem Boden, DRAG ist die Schleppkraft zwischen dem Rohr und der Bohrspülung. Der Plusminus-Term gilt für den abwärts- (+) oder aufwärtsgerichteten (-) Bohrkanal. Für den horizontalen Bereich ist dieser Term Null. Für die Reibung  $|fric|$  gilt

$$|fric| = W_s \cdot L_i \cdot \cos\theta_{si} \cdot \mu_{soil} \quad \text{Gleichung 4-22}$$

Es ist dabei  $W_s$  das Gewicht des Rohres unter Auftrieb,  $L_i$  die Länge des Rohrabschnitts,  $\theta_{si}$  die Neigung des Rohres zur Horizontalen und  $\mu_{soil}$  der Reibungsbeiwert zwischen Rohr und Boden. Für die Schleppkraft DRAG gilt

$$DRAG = \pi \cdot D \cdot L_i \cdot \tau_{mud} \quad \text{Gleichung 4-23}$$

Dabei ist  $D$  der Außendurchmesser des Rohres,  $L_i$  die Länge des betrachteten Rohrabschnitts und  $\tau_{mud}$  die Schleppspannung an der Rohrwandung in der Bohrspülung.

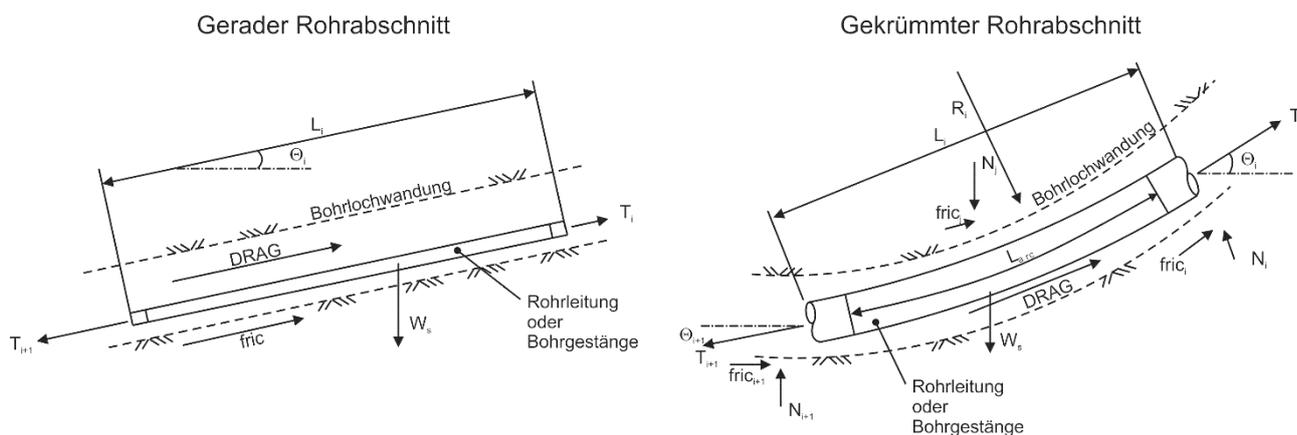
Die gekrümmten Bereiche werden vereinfacht als ein dreifach gelagerter Stab behandelt. Gesucht sind die Auflagerkräfte die eine entsprechende Krümmung hervorrufen. Mit diesen werden zusätzliche Reibungskräfte bestimmt, die der Rückstellarbeit des gekrümmten Rohres entsprechen sollen. Dies wird als ausreichend genau angenommen, wenn auch plastische Verformungen dabei vernachlässigt werden. Eine exakte Verteilung der Kontaktspannungen kann dabei nicht abgeleitet werden. Unter Annahme einer kreisförmigen Krümmung und elastischer Stabverformung ergibt sich für die Reibung im gekrümmten Bereich

$$|fric| = N \cdot \mu_{soil} = \mu_{soil} \cdot \frac{T \cdot \left( R_i \left[ 1 - \cos\left(\frac{\theta_{c,i}}{2}\right) \right] - W_s \cdot \cos(\theta_{c,i}) \cdot 18 \cdot \left(\frac{L_{arc}}{12}\right)^2 - j^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{U}{2}\right)}\right) \right)}{3 \cdot \frac{L_{arc}}{12} - \left(\frac{I}{2}\right) \cdot \tanh\left(\frac{U}{2}\right)} \quad \text{Gleichung 4-24}$$

mit

$$j = \left( E \cdot \frac{I}{T} \right)^{0,5} \quad U = \frac{L_{arc}}{j} \quad I = \pi \cdot (D - t)^3 \cdot \frac{t}{8}$$

Hierin sind  $T$  die mittlere Zugspannung an den Rohrenden,  $R_i$  der Krümmungsradius,  $\theta_{c,i}$  der Neigungswinkel der Rohrachse,  $L_{arc}$  die Länge des Kreissegments,  $E$  der Elastizitätsmodul der Rohrleitung und  $I$  das Trägheitsmoment der Rohrleitung. Die Gleichung lässt sich iterativ lösen. WILLOUGHBY empfiehlt eine Genauigkeit von 10% als Abbruchkriterium.



**Abbildung 4-7, Lastkollektiv beim Einzug einer Rohrleitung oder Vortrieb des Bohrgestänges [Willoughby 2005]**

Die American Society of Testing and Materials (ASTM) bietet in einem Regelwerk aus 2005 ebenfalls eine Berechnungsmethode an [ASTM 2005]. Diese enthält vier Zugkraftkomponenten  $T_1, T_2, T_3, T_4$ . Die einzelnen Komponenten sind dem Ein- ( $T_1$ ) und Austrittspunkt ( $T_4$ ) und den Übertragungspunkten ( $T_2, T_3$ ) zwischen den vertikal geneigten oder gekrümmten Bohrabschnitten und dem horizontalen Bohrabschnitt zugeordnet. Der größte Wert wird in der Regel am Punkt  $T_4$ , dem Austrittspunkt, ermittelt, da hier der gesamte Bohrkanal mit dem Produktrohr interagiert.  $T_4$  ist von den übrigen Zugkraftkomponenten abhängig und für  $T_4$  gilt

$$T_4 = e^{(v_b\beta)} \cdot (T_3 + v_b|w_b|L_4 - w_bH - e^{(v_a\alpha)} \cdot (v_a w_a L_4 e^{(v_a\alpha)})) \quad \text{Gleichung 4-25}$$

$$T_3 = T_2 + v_b|w_b|L_3 - e^{(v_b\alpha)} \cdot (v_a w_a L_4 e^{(v_a\alpha)}) \quad \text{Gleichung 4-26}$$

$$T_2 = e^{(v_b\alpha)} \cdot (T_1 + v_b|w_b|L_2 + w_bH - (v_a w_a L_2 e^{(v_a\alpha)})) \quad \text{Gleichung 4-27}$$

$$T_1 = e^{(v_a\alpha)} v_a w_a (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \quad \text{Gleichung 4-28}$$

Hierin ist  $T_i$  die Zugkraft am jeweiligen Punkt,  $L_1$  eine Zusatzlänge für thermische Kontraktion sofern vorhanden,  $L_2$  die horizontale Länge um die erwünschte Tiefe zu erreichen,  $L_3$  horizontale Länge,  $L_4$  Länge um wieder an die Oberfläche zu kommen,  $H$  die Tiefe des Bohrlochs unter der Oberfläche,  $v_a$  der Reibungskoeffizient zwischen Oberfläche und Rohr,  $v_b$  der Reibungskoeffizient für das geschmierte Bohrloch,  $w_a$  das Gewicht des leeren Rohres,  $w_b$  die netto Auftriebskraft des Rohres im Bohrloch,  $\alpha$  der Eintrittswinkel und  $\beta$  der Austrittswinkel, jeweils als Radianten.

Darüber hinaus wurden weitere Berechnungsmethoden zum Beispiel von POLAK et al. [Polak et al. 2005] und RABIEI et al. [Rabiei et al. 2016] entwickelt, um besondere Randbedingungen der Bohrlochführung oder der Rohrmaterialien berücksichtigen zu können.

Vergleiche zwischen in Feldtests gemessenen Kräften und den mit verschiedenen Berechnungsmodellen prognostizierten Zugkräfte zeigen nur teilweise eine befriedigende Übereinstimmung. Oft sind auch signifikante Unterschiede festzustellen, die auf Unzulänglichkeiten der Methoden und zusätzliche Einflussfaktoren hinweisen [Rabiei 2016], [Baumert et al. 2004], [Weidlich & Huther. 2014]. Optische Untersuchungen der Bohrlochwandung von haben 2015 gezeigt, dass auch verfahrenstechnisch Unsicherheiten bestehen, welche zu unkontrollierten heterogenen Bettungsverhältnissen der Rohrleitung führen, was die zuverlässige Bestimmung der Einzugskräfte erschwert [Weidlich & Eichhorst 2015]. Abbildung 4-8 zeigt einen Vergleich der Berechnungsmethoden

DCA 1995, PRCI 1996, ASTM 2005 und Rabiei 2016 für eine Rohrleitung der Länge 323 Meter mit einem Außendurchmesser von D=20 Zoll=0,51m in einer maximalen Verlegetiefe von 31 Meter [Rabiei 2016].

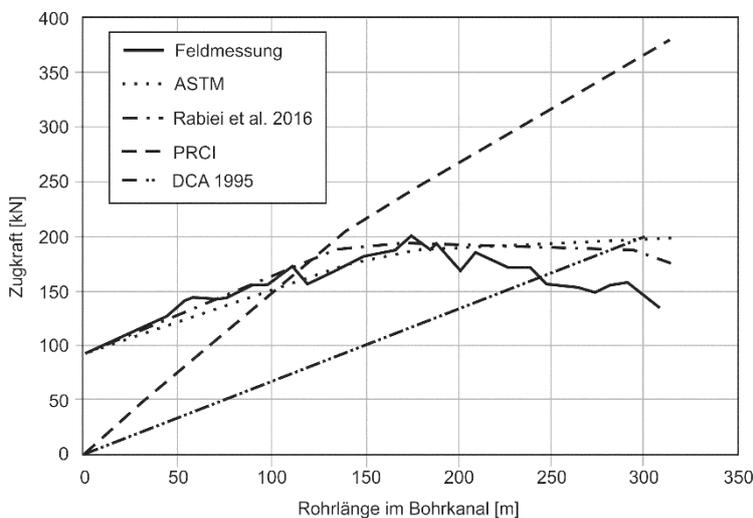


Abbildung 4-8, Vergleich zwischen Berechnungsmethoden und Messungen (in Anlehnung an Rabiei et al. 2016, modifiziert)

Es ist ersichtlich, dass für dieselbe Situation die ermittelten Einzugskräfte mit den verschiedenen Bestimmungsmethoden sehr unterschiedlich ausfallen können. Die technischen Richtlinien der DCA stellen daher fest, dass es noch keine allgemein verbindlichen Rechenmodelle für die Bestimmung der Zugkräfte gibt. In den DCA Richtlinien aus 2015 ist Abbildung 4-6 daher nicht mehr enthalten [DCA 2015].

#### 4.8 Fernwärmeleitungsbau

Im Gegensatz zu vielen anderen Leitungstypen der Ver- und Entsorgung dehnen sich Fernwärmeleitungen durch die Temperaturlasten im Betrieb aus. Temperaturänderungen ergeben sich durch die saisonalen Wärmebedarfsschwankungen, Revisionsfälle, Wärmeabnahme im System und seit einigen Jahren auch durch die volatile Einspeisung von erneuerbaren Wärmequellen wie z.B. aus Solarthermie. Erdverlegt haben die Temperatúrausdehnung eine Interaktion zwischen Rohrleitung und Bettungsmaterial zur Folge. Der Wahl des Bettungsmaterials und der Art des Einbaus kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Bei der leitungsgebundenen Wärmeverteilung erfolgt die Versorgung meistens durch eine Vorlauf- und einer Rücklaufleitung. Das am meisten verbaute Rohrsystem ist das Kunststoffmantelrohr, bestehend aus einem stabilen Mediumrohr aus Stahl für den Transport des Wärmeträgers, einer Wärmedämmung aus Polyurethan-Schaum und einem Schutzmantelrohr aus Polyethylen hoher Dichte (PEHD) nach EN 253 [EN 253]. Das wärmetransportierende Medium ist normalerweise Wasser, das mit einem Druck von bis zu 25 bar und einer Temperatur von bis zu 140°C zum Verbraucher gepumpt wird. Eine Rohrstatik nach EN 13941 ist für den sicheren Betrieb erforderlich [EN 13941].

Eine typische Baustellensituation für erdverlegte Fernwärmeleitungen in Hamburg ist in Abbildung 4-9 dargestellt. Es werden vorrangig die Bodenreaktionskräfte in axialer Richtung und in lateraler Richtung unterschieden. Während laterale Bodenreaktionskräfte in Bogenbereichen und bei Abzweigen auftreten, wirken die Reaktionskräfte in Achsrichtung am geraden Rohr. Es muss berücksichtigt werden, dass sich eine zeitabhängige Veränderung der Spannungszustände und der Materialparameter bei der Kontaktbedingung einstellt.



**Abbildung 4-9, Baustellensituation Hamburg, 2024**

Die zeitabhängige Veränderung der Spannungszustände insbesondere infolge thermisch induzierter Wechsellasten in axialer Richtung habe ich umfassend untersucht und festgestellt, dass die axialen Widerstände infolge zyklischer Verschiebung mit steigender Zyklenzahl abnehmen und in einer Abhängigkeit zur anstehenden Lagerungsdichte des Sandes und dem Primärspannungszustand stehen [Weidlich 2008]. In den geltenden Normen werden diese Langzeiteffekte vereinfacht durch eine Abminderung des Reibungskoeffizienten gemäß Tabelle 4-3 berücksichtigt [EN 13941]. Physikalisch wird aber nicht die Oberfläche des Rohres glatter, sondern es finden Spannungsumlagerungen im Bettungsmaterial statt.

<b>Randbedingungen</b>	<b>Reibungskoeffizient Rohr – Boden <math>\mu</math>, Werkstoffpaarung: Polyethylen HD – Sand</b>
Schneller Bewegungsablauf mit Kurzeinwirkungen	0,6
Normaler Bewegungsablauf für die Ermüdungsanalyse mit niedrigen Lastwechseln	0,4
Langsamer Bewegungsablauf oder Bewegungen im Sinne von Kriechen oder Hysteresebildung (Langzeiteffekte)	0 – 0,2

**Tabelle 4-3**

Umgangssprachlich wird auch vom „Tunneleffekt“ oder auch „Hamburger Effekt“ gesprochen. Der Begriff „Tunneleffekt“ basiert auf der Vorstellung, dass das Rohr wie in einem Tunnel, infolge Eigentragswirkung des umgebenden Bettungsmaterials, darin hin und her gleitet. Der Ausdruck

„Hamburger Effekt“ steht im Zusammenhang mit der über 20 km langen Versorgungsleitung Wedel-Haferweg-Karoline welche als eine der bundesweit ersten erdverlegten Kunststoffmantelrohrleitungen dieser Länge mit Nennweiten von DN 700 und DN 800 im Jahre 1985 ff. gebaut wurde und bei der die Reibkraftabnahme indirekt durch Verschiebungszunahmen an Kompensationselementen angeblich erstmals beobachtet wurde [Schröder 2006].

Die axiale Bettungsreaktionsspannung wird bei der rohrstatischen Berechnung als axiale Streckenlast im statischen System, in der Regel ein Stabtragwerk, berücksichtigt. Die Größenordnung der axialen Bettungsreaktionsspannung dominiert die Auslegung des Gesamtsystems. Alle Verschiebungen und Schnittgrößen und damit auch alle Nachweise hängen sehr stark von dem Ansatz der Interaktion „Rohr-Boden“ ab.

## 5 Experimente

Durch Experimente können Erkenntnisse gewonnen werden, die ein erweitertes Verständnis der kontaktmechanischen Phänomene ermöglichen und für bestimmte Aufgabenstellungen präzisere Werte liefern als Erfahrungswerte. Die Erfahrungswerte können dann zur Validierung der Ergebnisse herangezogen werden. Die für ebene Scherflächen zum Einsatz kommende Versuchsaufbauten sind standardisiert oder lehnen sich an Standards an (vgl. DIN EN ISO 17892-10 und DIN EN ISO 12957-1).

Für zylinderförmige Bauteile sind verschiedene spezielle Versuchseinrichtungen dokumentiert. Beispielhaft sei die Entwicklung des „Rod-Shear-Test“ (=Stabscherversuch) von TAWFIQ und CALIENDO 1993 genannt, der in Abbildung 5-1 dargestellt ist [Tawfiq 1993]. Darin wird ein Stab in einem zylinderförmigen Behälter gegen ein Füllmaterial abgeschert. Problematisch erscheint das Aufbringen der Vertikallast über einen Stempel bei gleichzeitiger radialer Dehnungsbehinderung durch den Behälter. Reibungskräfte an der Innenseite des Behälters beeinflussen die Ergebnisse.

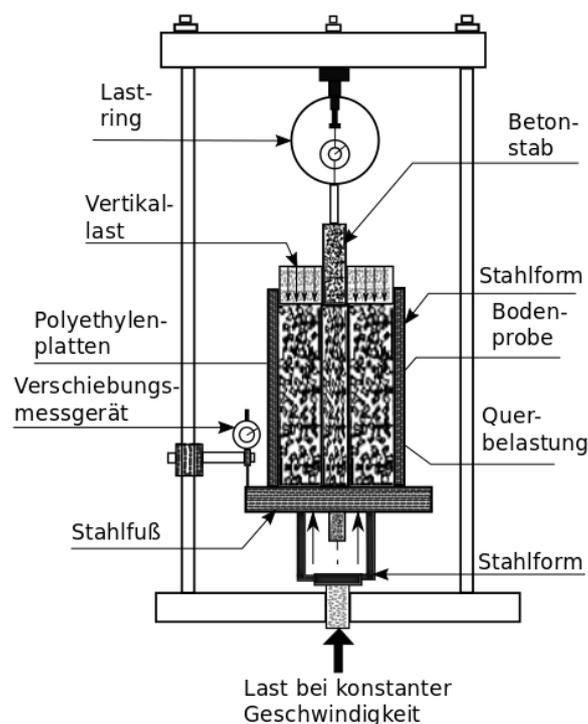


Abbildung 5-1, Stabscherversuch nach TAWFIQ und CALIENDO

WAGNER stellt 2017 eine Weiterentwicklung des Stabscherversuchs vor, indem ein kontrollierter Seitendruck pneumatisch über die gesamte Behälterlänge aufgebracht werden kann [Wagner 2017]. Durch den Seitendruck kann das Spannungsniveau in der gewünschten Verlegetiefe nachgestellt werden. Die Versuchseinrichtung wurde für die Untersuchung der Scherkräfte in ZFSV (=Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe) mit sehr adhäsiven Eigenschaften entwickelt.



Abbildung 5-2, Stabscherversuch nach WAGNER [Foto: Bernd Wagner]

Neben Versuchen im kleinen Maßstab werden auch Großversuche im Maßstab 1:1 durchgeführt, um die Kontaktmechanik zwischen Leitungen und Boden besser zu verstehen [s. z.B., Hay et al. 2018, Weidlich & Huther 2014 und andere]. Grundsätzlich kann die Schubspannung am Rohr auf diese Weise direkt unter realen Bedingungen gemessen werden. Dies hilft auch Maßstabseffekte zu identifizieren und dann, sofern erforderlich, Umrechnungsfaktoren für die Übertragung von Ergebnissen aus dem kleinen Maßstab auf die reale Situation zu bestimmen. Abbildung 5-3 zeigt einen Versuchsaufbau, welcher für die Untersuchung von Einzugskräften bei der grabenlosen Verlegung von Fernwärmeleitungen umgesetzt wurde [Weidlich & Huther 2014]. Hier wurde davon ausgegangen, dass die Pressenkräfte den Einzugskräften entsprechen müssen.

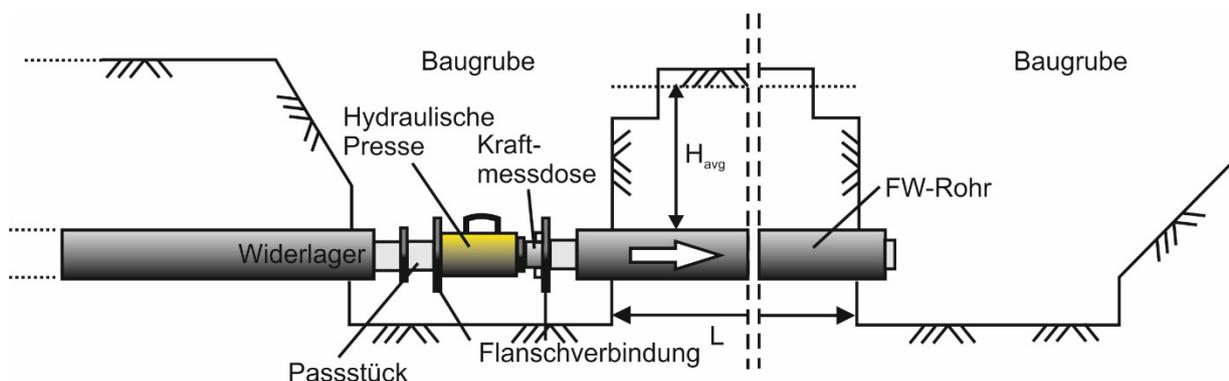


Abbildung 5-3, Versuchsaufbau Maßstab 1:1 nach WEIDLICH und HUTHER

## 6 Aufgaben

### 6.1 Aufgabe 1

Eine Rohrstange ist mit dem Winkel  $\alpha$  an der Wand angelehnt. Welcher Winkel  $\alpha$  kann minimal erreicht werden bevor die Rohrstange abrutscht?

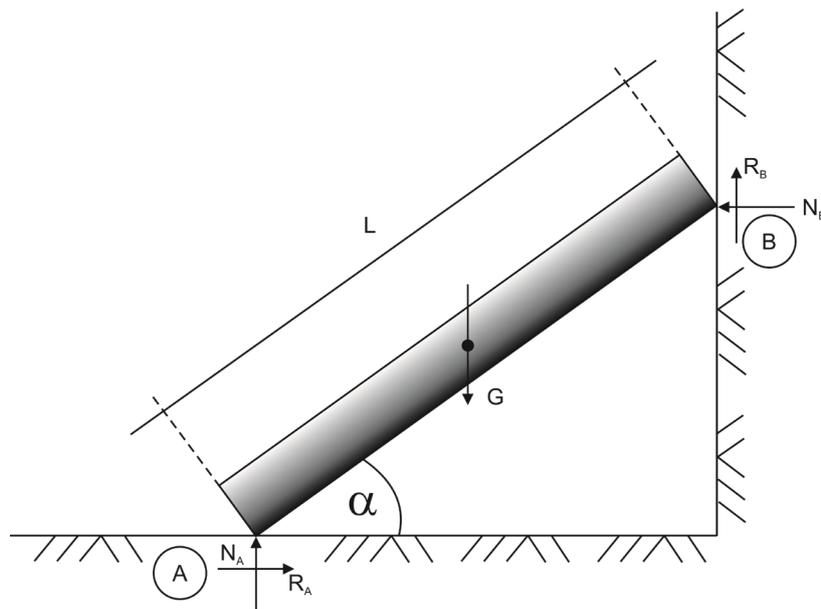


Abbildung 6-1

Es soll gelten  $\mu_{H,A} = \mu_{H,B}$ .

### 6.2 Aufgabe 2

Ein Seil wird gemäß Abbildung 6-2 über ein Rohr geführt. Ein Bremsklotz mit dem Gewicht  $G=1,5$  kN und eine Kraft  $F=0,5$  kN stehen im Gleichgewicht mit der Seilkraft  $S$ . Das Seil sei masselos und  $\mu_1=0,3$  sowie  $\mu_2=0,25$ . Zwischen welchen Grenzkraften muss die Seilkraft  $S$  liegen, damit der Bremsklotz in Ruhe bleibt?

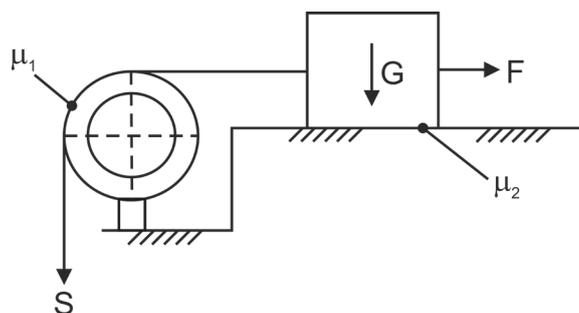


Abbildung 6-2

### 6.3 Aufgabe 3

Eine Kante mit dem Winkel  $90^\circ$  ist um den Winkel  $\alpha=30^\circ$  geneigt und mit einer reibungsfreien Umlenkrolle ausgestattet. Über die Umlenkrolle wird ein masseloses Seil geführt, über das die beiden Gewichte  $G_1$  und  $G_2$  verbunden sind. Wie groß muss  $G_2$  sein, damit sich ein Gewicht von  $G_1 = 12 \text{ kN}$  bei  $\mu_1=\mu_2=0,2$  nach oben bewegt?

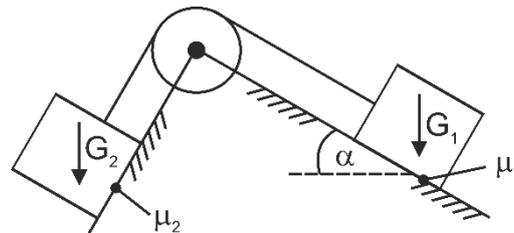


Abbildung 6-3

### 6.4 Aufgabe 4

Schätzen Sie die erforderliche Pressenkraft für die in Abbildung 5-3 dargestellte Situation für ein Fernwärmerohr DN200 mit dem Außendurchmesser  $D_a=315 \text{ mm}$ , mit einem Reibungskoeffizienten zwischen Rohr und Boden von  $\mu=0,46$  und dem  $k_0$ -Erddruckansatz ab. Die Wichte des Bodens sei  $19,5 \text{ kN/m}^3$ , und der innere Reibungswinkel ist  $\varphi'=37^\circ$ .

$$H_{AVG}=1,80 \text{ m}$$

$$L = 3,72 \text{ m}$$

Wie ändert sich die Pressenkraft, wenn im Ringspalt zwischen Rohr und Boden eine Bentonit-Suspension zum Einsatz kommt?

### 6.5 Aufgabe 5

Das Mediumrohr in einem Stahlmantelrohr (SMR) ist am Anfang fixiert und alle 20 Meter auf vier Gleitlagern gestützt. Die Situation ist in Abbildung 6-4 skizziert. Ermitteln Sie die Verschiebung am Rohrende unter den Randbedingungen nach Tabelle 6-1.

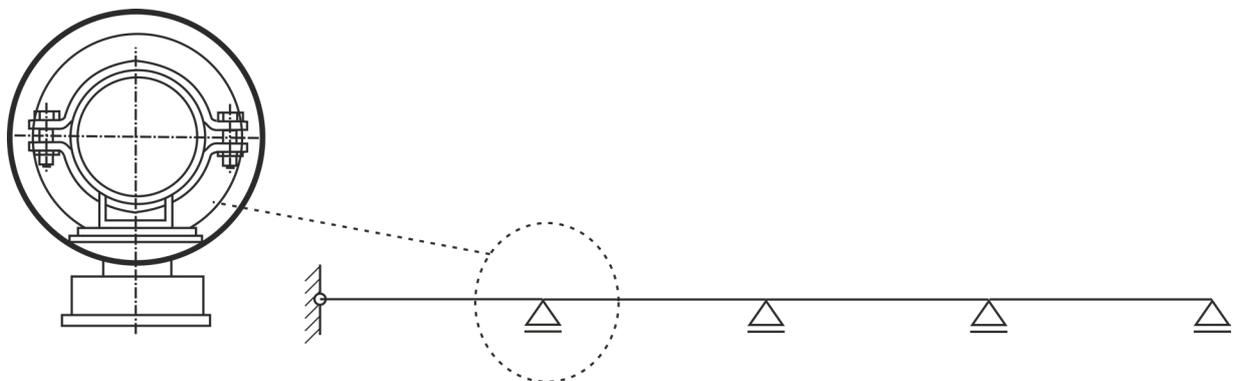


Abbildung 6-4

Parameter	Wert	Einheit	Beschreibung
$E_{st}$	210.000	N/mm <sup>2</sup>	E-Modul Stahl
$A_{st}$	2060	mm <sup>2</sup>	Stahlquerschnittsfläche
$\Delta T$	90	K	Temperaturerhöhung
$\alpha_T$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	1/K	Ausdehnungskoeffizient
$g$	0,4	kN/m	Rohreigengewicht inkl. Wasserfüll.
$\mu$	0,5	-	Reibungskoeffizient des Gleitlagers

**Tabelle 6-1, Berechnungsparameter Aufgabe 5**

## 7 Literaturverzeichnis

[Bauer 2021] Bauer, F. (2021). Tribologie: Prägnant und praxisrelevant. Springer Vieweg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-32920-4>

[Baumert et al. 2004] Baumert M.E., Allouche E.N., Moore I.D., (2004), "Experimental investigation of pull loads and borehole pressures during horizontal directional drilling installations", Canadian Geotechnical Journal 41: 672–685 (2004)

[Bijok 2018] Bijok, M. (2018) Erfahrungen mit dem Einsatz der Spüllanzenanlage "Easy2Jet" im FTTH-Breitbandausbau. Tagungsband zum 32. Oldenburger Rohrleitungsforum

[Bohle 2011] Bohle U., (2011), Bestimmung der Beanspruchung keramischer Vortriebsrohre im Bauzustand unter Verwendung von Druckübertragungsringen aus Kunststoff, Technische Hochschule Aachen, ISBN 978-3-8322-9743-5, 214 Seiten, Dissertation 2010

[Bolton 1986] Bolton M.D., (1986), The strength and dilatancy of sands, Géotechnique, 36, 1, pages 65-78

[Brandl 2000] Brandl, M. (2000). Messung von Trockenreibung (Als Ms. gedr.). VDI-Verl.

[Coulomb 1821] Coulomb C.A. (1821), Théorie des machines simples, an ayant ou frottement da leurs parties et à le roideur des cordages. Mem. Des mathém. et de physique présentées à l'Académie Royale des Sciences par divers Savants. Bd.10, 1785, Abgedruckt in : Théorie des machines simples, nouvelle édition, Bachelier Paris, 1821

[Czichos & Habig 2020] Czichos, H., & Habig, K. (2020). Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik (5., überarbeitete und erweiterte Auflage.). Springer Vieweg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29484-7>

[Gräfen 2013] Gräfen, H. (2013) Werkstofftechnik, VDI-Gesellschaft: Lexikon Werkstofftechnik: Berichtigter Nachdruck. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013.

[Grote et al. 2018] Grote, K., Bender, B., & Göhlich, D. (2018). Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau (25., aktualisierte Aufl. 2018.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54805-9>

[Gudehus 1998] Gudehus G. (1998) „Shear localization in simple grain skeletons with polar effects“, Proceedings 4<sup>th</sup> International Workshop on Localization and Bifurcation Theory for soils and rocks, Gifu Japan

[Habenicht 2008] Habenicht, G. (2008) Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2008.

[Hay et al. 2018] Hay S., Villalobos F.A., Weidlich I., Wolf I. (2018) "Analyses of Axial Displacement Measurements from a Monitored District Heating Pipeline System", Energy Procedia, Volume 149, 2018, Pages 84-93, ISSN 1876-6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.172>.

[Huder 1972] Huder J., (1972) "Stability of Bentonite slurry trenches with some experiences in swiss practice", 5th European Conf. SMFE, S.517-522, Madrid

[Holzmann 1838] Holzmann C. (1838), Hilfsbuch für praktische Mechanik zum Gebrauche für Artillerieoffiziere, Zivil- und Militäringenieur von Arthur Morin, aus dem Französischen übersetzt, Karlsruhe 1838, Druck und Verlag von Christian Theodor Groos

[Huey 1996] Huey, D. P., Hair, J. D., and McLeod, K. B. (1996) Installation loading and stress analysis involved with pipelines installed in horizontal directional drilling Proc., No Dig Conf., North American Society for Trenchless Technology (NASTT), Cleveland.

[Jáky 1944] Jáky, I. (1944) "A Nyagualmi nyomás tényergyje" (Der Ruhedruckbeiwert), A Magyar Mérnök és Építész-Eölet Kozlönye, Budapest 78, 22, S. 355-558

[Jensen et al. 1999] R.P. Jensen, P.J. Bosscher, M.E. Plesha, T.B. Edil, (1999) DEM Simulation of granular media – structure interface: effects of surface roughness and particle shape, International Journal For Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 23, pages 531-547.

[Janssen 1895] Janssen, H. A. (1895) „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Seiten 1045–1049

[Kögler 1996] Kögler R. (1996) "Optimierung von Bohrprogrammen für steuerbare Horizontalbohrungen in sandigen Böden zum Zwecke der Rohrverlegung unter Hindernissen", Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Dissertation

[Miao 2023] Miao, Z. (2023). Steuerbares Reibverhalten trockenlaufender Tribosysteme (1st ed. 2023.). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66628-9>

[Morin 1832] Morin A. (1832), Nouvelles Expériences sur le frottement, Metz 1831, Paris, Bachelier, Imprimeur-Libraire pour les Sciences, Quai des Augustins, No 55, 1832

[O'Rourke et al. 1990] O'Rourke T.D., Druschel S.J., Netravali A.N. (1990), "Shear Strength Characteristics of Sand-Polymer Interfaces". Journal of Geotechnical Engineering, 116 (3), Seiten 451-469

[Peters & Engel 2018] Peters, M. und Engel, T. (2018) Innovative Verfahrenstechnik zur Verlegung von Erdkabeln und Pipelines mit kleinen Durchmesser. Tagungsband zum 32. Oldenburger Rohrleitungsforum.

[Popov 2015] Popov, V. L. (2015). Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik (3., aktualisierte Aufl. 2015.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45975-1>

[Potyondy 1961] Potyondy, J.G., (1961) "Skin friction between Various Soils and construction materials", Geotechnique, 11, 4, S. 339-353

[Polak et al. 2005] Polak M.A., Chu D., (2005) Pulling Loads for Polyethylene Pipes in Horizontal Directional Drilling: Theoretical Modeling and Parametric Study, Journal of Infrastructure Systems, ASCE

[Rabiei et al. 2016] Rabiei M., Yi Y., Bayat A., Cheng R., (2016) General Method for Pullback Force Estimation for Polyethylene Pipes in Horizontal Directional Drilling, ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000230, J. Pipeline Syst. Eng. Pract.

[Rossbach 2008] Rossbach S., (2008) Untersuchung zur Reduzierung der Zugkräfte beim Einziehen von Rohrleitungen mittels Schwingungstechnologie - ein innovativer Beitrag zur Reduzierung des Baurisikos bei HDD-Vorhaben, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal, S. 197, Dissertation

[Schleyer 1987] Schleyer A. (1987), Freileitungen im Gelände und im Gebäude – Eine Sammlung von Beispielen für Planung und Realisierung, Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V., Stresemannallee 23, 6000 Frankfurt 70, 1987

[Schößer 2004] Schößer B. (2004) Untersuchungen zur Entwicklung und Übertragung von Tangentialspannungen am Umfang von Vortriebsrohren im nichtbindigen Lockergestein, Ruhr Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Dissertation

[Schröder 2006] Schröder R. (2006), Die mechanischen Systemeigenschaften der erdverlegten Kunststoffmantelrohrleitung, Projekt RCS, 9356 Index 1, Vattenfall Europe

[Stein 2005] Stein D. (2005), Trenchless Technology for Installation of Cables and Pipelines, Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Stein und Partner GmbH, ISBN 3-00-014955-4

[Stolz 2010] Stolz A., (2010), Untersuchungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren beim Rohrvortrieb mit gekrümmter Linienführung in nicht bindigen Böden, Bergische Universität Wuppertal, ISBN: 978-3-8322-9890-6, 332 Seiten, Dissertation 2010

[Stribeck 1902] Stribeck R. (1902), Die wesentlichen Eigenschaften der Gleit- und Rollenlager, Zeitschrift VDI Bd. 46, Nr. 36-39, Berlin 1902

[Terzaghi et al. 1954] Terzaghi, K. und Jelinek R. (1954) Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag Berlin

[Tawfiq 1993] Tawfiq K.S., Caliendo J.A. (1993), Laboratory Investigation of Polyethylene Sheeting as a Friction Reducer in Deep Foundation, Geotextiles and Geomembranes, 12, 739-762

[Thewes 1999] Thewes M. (1999), Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal, Fachbereich Bauingenieurwesen, Bodenmechanik und Grundbau, Bericht Nr. 21, Dissertation, Hrsg. B. Walz und M. Pulsford

[Wagner 2017] Wagner, Bernd (2017), „Ein Beitrag zur axialen Bettung von Kunststoffmantelrohren der Fernwärme in zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV)“, Hrsg. Wolfram Kudla, Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Techn. Universität Bergakademie Freiberg

[Weidlich 2008] Weidlich I., (2008) Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen erdverlegten Rohren. Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau; Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Heft 64.

[Weidlich et al. 2009] Weidlich I., Achmus M., Shimonishi M., (2009), Simulation and Analysis of cyclic constant normal stiffness tests by the discrete element method, International. Conference on Particle-Based Methods, Particles 2009, E. Oñate and D. R. J. Owen (Eds.), © CIMNE, Barcelona, 2009

[Weidlich 2012] Weidlich I., (2012) Erddruck auf Rohre, 1. Auflage, AGFW | Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, Postfach 70 01 08, D-60551 Frankfurt am Main, ISBN 3-89999-027-7, 227 Seiten, 2012

[Weidlich et al. 2013] Weidlich I., Wilmsmeier D., Achmus M., (2013) Grabenlos verlegte Kunststoffmantelrohre, Reibung zwischen bentonitsuspensionsgesättigten Erdstoffen und Polyethylen, Euroheat&Power, 42 Jg., Heft 12

[Weidlich & Huther 2014] Weidlich I., Huther H. (2014), Field Measurement of Skin-Friction of Trenchless Installed District Heating Pipes, The 14th International Symposium on District Heating and Cooling, September 7th to September 9th, 2014, Stockholm, Sweden

[Weidlich I. & Eichhorst 2015] Weidlich I. & Eichhorst O., (2015) Field measurements for the application of trenchless technology on district heating, No Dig Berlin 2015, Symposium and Exhibition, 24 – 27 March, Paper 1-1

[Wernick 1978] Wernick E. (1978) Tragfähigkeit zylindrischer Anker in Sand unter besonderer Berücksichtigung des Dilatanzverhaltens, Forschungsbericht 75, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fredericiana Karlsruhe

[Willoughby 2005] Willoughby D.A., (2005) Horizontal Directional Drilling, Utility and Pipeline Applications, McGraw Hill Civil Engineering Sciences, Seiten: 267, ISBN: 0-07-145473-X

## 8 Normen und Regelwerke

[ASTM 2005] ASTM (2005) Standard Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossings, F 1962-05, American Society of Testing and Materials International, United States

[DCA 1995] DCA 1995 (1995), Drilling Contractors Association, Gesteuerte Horizontalbohrtechnik - Technische Richtlinien

[DCA 2015] DCA 2015 (2015), Technische Richtlinien des DCA, Informationen und Empfehlungen für Planung, Bau und Dokumentationen von HDD Projekten. 4. Auflage 2015

[DIN EN ISO 17892] DIN EN ISO 17892-10:2019-04 (2018), Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 10: Direkte Scherversuche (ISO 17892-10:2018); Deutsche Fassung EN ISO 17892-10:2018

[DIN EN ISO 12957] DIN EN ISO 12957-1:2019-04, Geokunststoffe - Bestimmung der Reibungseigenschaften - Teil 1: Direkter Scherversuch (ISO 12957-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 12957-1:2018

[DIN EN ISO 868] DIN EN ISO 868:2003-10, Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte) (ISO 868:2003); Deutsche Fassung EN ISO 868:2003

[DWA A 161] DWA A 161 (2021), Arbeitsblatt DWA A 161 Statische Berechnung von Vortriebsrohren, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., März 2014, korrigierte Fassung 2021

[DWA A 125] DWA A 125 (2020), Arbeitsblatt DWA-A 125, Rohrvortrieb und verwandte Verfahren Mai 2009, korrigierte Fassung September 2020 – Gemeinschaftsveröffentlichung DIN EN 12889.

[DWA A 127] DWA A 127 (2022), Arbeitsblatt DWA A 127, Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 1: Grundlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA)

[EN 253] EN253 (2023) Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen, Beuth Verlag

[EN 13941] EN 13941 (2022) Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung; Deutsche Fassung, Beuth Verlag

## 9 Lösungen zu den Aufgaben

### 9.1 Lösung Aufgabe 1

Es stehen die Gleichgewichtsbedingungen und die Reibgesetze zur Verfügung.

Kräftegleichgewichte:

$$\sum \vec{V} = 0 = -G + N_A + R_B \quad (1)$$

$$\sum \vec{H} = 0 = R_A - N_B \quad (2)$$

Momente um den Punkt A, gegen den Uhrzeigersinn positiv:

$$\sum \vec{M}_A = 0 = -G \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos\alpha + N_B \cdot L \cdot \sin\alpha + R_B \cdot L \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

Reibungsgesetze:

$$R_A = \mu_H \cdot N_A \quad (4)$$

$$R_B = \mu_H \cdot N_B \quad (5)$$

Hieraus ergibt sich

$$N_A = \frac{G}{(1 + \mu_H^2)}$$

$$N_B = \frac{G \cdot \mu_H}{(1 + \mu_H^2)}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1 + \mu_H^2}{2\mu_H} - \mu_H \right)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{1 - \mu_H^2}{2\mu_H} \right)$$

### 9.2 Lösung Aufgabe 2

$$S_{\max} = 1,401 \text{ kN}$$

$$S_{\min} = 78,03 \text{ N}$$

### **9.3 Lösung Aufgabe 3**

$G_2=10,545 \text{ kN}$

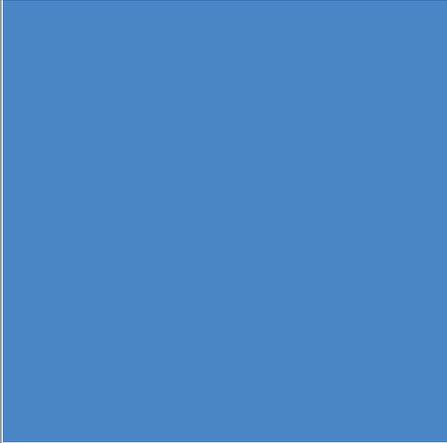
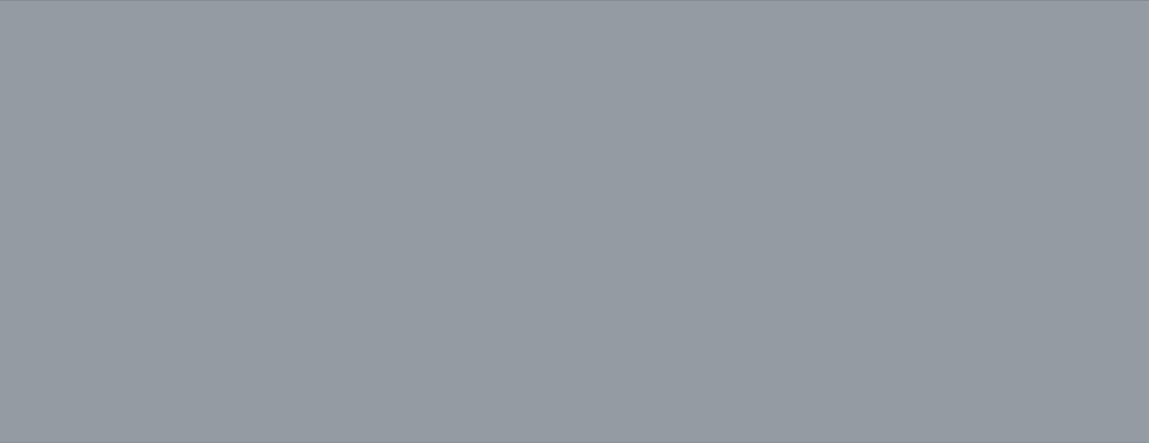
### **9.4 Lösung Aufgabe 4**

$P=45,183 \text{ kN}$

Bei der Verwendung einer Bentonit-Suspension reduziert sich die Pressenkraft deutlich.

### **9.5 Lösung Aufgabe 5**

$u= 83,73 \text{ mm}$



DOI: 10.34712/142.69



XQ4

[www.blauer-engel.de/uz195](http://www.blauer-engel.de/uz195)

Dieses Druckerzeugnis wurde mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.

