Bergische Universität Wuppertal

Fachbereich D

Abteilung Bauingenieurwesen

Berichte des Lehr- und Forschungsgebietes Geotechnik

Nr. 30 **Dezember 2010**

Alexander Stolz

Untersuchungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren beim Rohrvortrieb mit gekrümmter Linienführung in nicht bindigen Böden

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9890-6
ISSN 1867-3325

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Nach der Emeritierung meines verehrten Vorgängers und Lehrers, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walz konnten wir noch zwei Hefte dieser Veröffentlichungsreihe gemeinsam herausgeben. Bedauerlicherweise ist Herr Kollege Walz im August 2009 mit gerade einmal 70 Jahren verstorben, was für die Bergische Universität, die Abteilung Bauingenieurwesen im Fachbereich D, das Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik und besonders für mich persönlich ein sehr schmerzlicher, großer Verlust war.

Vor dem Hintergrund unserer bereits auf das Jahr 1982 zurückreichenden Berichtsreihe, die von Herrn Prof. Walz ins Leben gerufen worden war, will ich aber die Veröffentlichung von Dissertationen, die an unserem Lehr- und Forschungsgebiet Geotechnik in der Bergischen Universität Wuppertal entstanden sind, gern fortführen. Mit dem vorliegenden Bericht Nr. 30 von Herrn Dr.-Ing. Alexander Stolz wird erstmals in dieser Veröffentlichungsreihe das Thema Rohrvortriebsverfahren behandelt, mit dem ich mich unter praktischen Ausführungsaspekten bereits seit 20 Jahren befasst habe.

Wuppertal, im Dezember 2010

Matthias Pulsfort

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Einführung und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung und Abgrenzung 3

2 Wissensstand zur Beanspruchung von Vortriebsrohren 5
2.1 Statische Bemessungsverfahren 5
2.1.1 Bemessung nach gültiger Empfehlung 5
2.1.1.1 Allgemeines 5
2.1.1.2 Bemessung in Rohrlängsrichtung 5
2.1.1.3 Bemessung in Rohrquerrichtung 5
2.1.2 Bemessungsverfahren nach Scherle 8
2.1.3 Bemessungsverfahren nach Buchhardt 11
2.2 Überblick zum Stand der Forschung 12
2.2.1 Allgemeines 12
2.2.2 Untersuchungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren in Modellversuchen 12
2.2.3 Untersuchungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren in Feldversuchen .. 14
2.2.4 Numerische Berechnungen zur Beanspruchung von Vortriebsrohren 16
2.2.5 Untersuchungen zur Bestimmung der zulässigen Vortriebskraft 17
2.3 Zusammenfassung 19

3 Angewandte Untersuchungsmethoden 21
3.1 Vorbemerkungen 21
3.2 Die Finite Element Methode 21
3.2.1 Allgemeines 21
3.2.2 Grundlagen der Finiten Element Methode 22
3.2.2.1 Lösung der nichtlinearen Stoffgleichungen und der Jacobimatrix 22
3.2.2.2 Einfluss der Rand- und Anfangsbedingungen und der Diskretisierung 23
3.2.3 Materialbeschreibung des Bodens 25
3.2.3.1 Übersicht 25
3.2.3.2 Hypoplastizität 25
3.2.3.3 Hardening-Soil-Modell (HS-Modell) 29
3.2.4 Ermittlung der Materialparameter 33
3.3 Bildbasierte Auswertungen mit der PIV-Methode 37

4 Bodenmechanische Modellversuche 40
4.1 Allgemeines 40
4.2 Versuchskonzeption 40
4.3 Versuchsboden 41
4.4 Einbau des Versuchssandes und Kontrolle der Lagerungsdichte 47
4.5 Allgemeine Versuchsparameter 48
4.6 Messtechnik und mögliche Messfehler 49
4.7 Modellversuche zur Beanspruchung horizontal translatorisch verschobener Rohre 50
4.7.1 Allgemeines 50

4.7.2 Aufbau des Modellversuches und Versuchsparameter 50
4.7.3 Versuchsdurchführung 55
4.7.4 Versuchsergebnisse und Auswertung 55
4.7.5 Auswertung der Bruchkörpergeometrien 66
4.7.6 Zusammenfassung der Erkenntnisse für horizontal verschobene Rohre 69
4.8 Modellversuche zur Beanspruchung vertikal translatorisch verschobener Rohre 73
4.8.1 Allgemeines 73
4.8.2 Aufbau des Modellversuches und Versuchsparameter 73
4.8.3 Versuchsdurchführung 74
4.8.4 Versuchsergebnisse und Auswertung 75
4.8.5 Auswertung der Bruchkörpergeometrie 81
4.8.6 Zusammenfassung der Ergebnisse vertikal verschobener Rohre 85
4.9 Modellversuche zur Beanspruchung vertikal rotatorisch verkippter Rohre 85
4.9.1 Vorbemerkungen 85
4.9.2 Aufbau des Modellversuches und betrachtete Versuchsparameter 86
4.9.3 Versuchsdurchführung 88
4.9.4 Versuchsergebnisse und Auswertung 91
4.9.5 Bildbasierte Auswertung der Bodenverformungen 96

5 Numerische Berechnungen zur Rohr-Boden-Interaktion quer zur Rohrachse 103
5.1 Allgemeines 103
5.2 Numerische Simulation der Modellversuche translatorisch in horizontaler und vertikaler Richtung verschobener Rohre 103
5.2.1 Numerisches System und Berechnungsparameter 103
5.2.2 Modellierungsablauf und Netzsensitivität 106
5.2.3 Ergebnisse für in horizontaler Richtung verschobene Rohre 110
5.2.3.1 Kraft-Verschiebungs-Beziehung 110
5.2.3.2 Verschiebungsfelder und Bruchkörper 113
5.2.4 Ergebnisse für in vertikaler Richtung verschobene Rohre 118
5.2.4.1 Kraft-Verschiebungs-Beziehung 118
5.2.4.2 Verschiebungsfelder und Bruchkörper 120
5.3 Numerische Simulation der Modellversuche rotatorisch verkippter Rohre in vertikaler Richtung 124
5.3.1 Zielrichtung 124
5.3.2 Numerisches System und Berechnungsparameter 124
5.3.3 Modellierungsablauf und Netzsensitivität 125
5.3.4 Ergebnisse für in vertikaler Richtung verkippter Rohre 126
5.3.4.1 Kraft-Verschiebungs-Beziehung 126
5.3.4.2 Verschiebungsfelder 126
5.4 Resümee 130

6 Berechnungsmodell zur Ermittlung der mobilisierten Bettungsspannungen 132
6.1 Allgemeines 132
6.2 Grundsätzliche Funktionsvorschrift 132
6.3 Berechnungsmodell für eine Horizontalverschiebung der Rohre 134
6.3.1 Modellvorstellung und mathematische Definition 134
6.3.1.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Bruchkörpergeometrie 134

6.3.1.2 Horizontale Stützspannung der Grundbruchfigur 136
6.3.1.3 Geometrische Beziehungen und rechnerische Herleitung 138
6.3.1.4 Gleichgewicht am passiven Rankine-Bereich 139
6.3.1.5 Gleichgewichtsbedingungen am Prandtl'schen Übergangsbereich 141
6.3.1.6 Gleichgewichtsbedingungen am aktiven Rankine-Bereich 142
6.3.1.7 Definition der Lage der Gleitflächenresultierenden 142
6.3.1.8 Berücksichtigung von Reibungskräften am Rohr 144
6.3.2 Parameterstudie zum horizontalen Grundbruchwiderstand 145
6.3.2.1 Einfluss der bezogenen Überdeckungshöhe H/D 145
6.3.2.2 Einfluss des Bodenreibungswinkels φ und der Dilatanz 146
6.3.3 Anwendung auf die Modellversuche 147
6.3.4 Mobilisierungsparameter 149
6.3.4.1 Zielsetzung 149
6.3.4.2 Bodensteifigkeit 150
6.3.4.3 Charakteristische Länge l' 152
6.3.5 Mobilisierungsfunktion für die Modellversuche 152
6.4 Berechnungsmodell für eine Vertikalverschiebung der Rohre in Richtung Geländeoberkante 155
6.4.1 Modellvorstellung und mathematische Definition 155
6.4.1.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Bruchkörpergeometrie 155
6.4.1.2 Geometrische Beziehungen und rechnerische Herleitung 156
6.4.2 Parameterstudie zum vertikalen Herausziehwiderstand 158
6.4.3 Anwendung auf die Modellversuche 160
6.4.4 Mobilisierungsparameter 162
6.4.4.1 Zielsetzung 162
6.4.4.2 Bodensteifigkeit 162
6.4.4.3 Charakteristische Breite l' 164
6.4.5 Mobilisierungsfunktion für die Modellversuche 164
6.5 Berechnungsmodell für eine Vertikalverschiebung der Rohre in Richtung der Gravitationskraft 164
6.5.1 Vorbemerkung 164
6.5.2 Modellvorstellung und mathematische Definition 164
6.5.2.1 Vesic- Modell 164
6.5.2.2 Bodensteifigkeit und charakteristische Breite l' 166

7 Numerische Berechnungen zur Rohr-Boden-Interaktion orthogonal zur Rohrachse im Realmaßstab 167
7.1 Allgemeines 167
7.2 Untersuchungsmethodik zur Auswertung der Spannungsverteilung am Rohr 167
7.3 Untersuchung der Belastung auf in horizontaler Richtung translatorisch verschobener Rohre 168
7.3.1 Ebenes System und Stoffparameter 168
7.3.2 Parametervariation 170
7.3.2.1 Überschnitt ü und Wiederbelastungssteifigkeit E_{ur_ref} 170
7.3.2.2 Scherfestigkeitsparameter φ und c 180
7.3.2.3 Steifigkeit 184
7.3.2.4 Bezogene Überdeckungshöhe H/D 188

7.3.2.5 Porenzahl und Dilatanzwinkel 192
7.3.2.6 Wandreibungskoeffizient μ 194
7.3.2.7 Bodenarten 196
7.4 Untersuchung der Belastung in vertikaler Richtung translatorisch verschobener Rohre 199
7.4.1 System und Stoffparameter 199
7.4.2 Parametervariation 199
7.5 Untersuchung der Belastung in horizontaler Richtung verkippter Rohre 206
7.5.1 System und Stoffparameter 206
7.5.2 Parametervariation 209
7.6 Untersuchung der Belastung in vertikaler Richtung verkippter Rohre 215
7.6.1 System und Stoffparameter 215
7.6.2 Parametervariation 216
7.7 Zusammenfassung 220

8 Resultierende Beanspruchung der Vortriebsrohre infolge der Rohr-Boden-Interaktion 221
8.1 Allgemeines 221
8.2 Ermittlung der Schnittgrößen des Vortriebsrohres bei einer gekrümmten Gradiente / Trasse 221
8.2.1 Ermittlung der Schnittgrößen infolge der Translation des Vortriebsrohres bei einer gekrümmten Gradienten 221
8.2.2 Ermittlung der Schnittgrößen infolge der Rotation des Vortriebsrohres bei einer gekrümmten Gradiente / Trasse 228
8.2.2.1 Allgemeines 228
8.2.2.2 Numerisches Modell und Berechnungsergebnisse 228
8.2.3 Zusammenfassung 232
8.3 Spannungsverteilung im Rohrquerschnitt im Bauzustand unter Berücksichtigung einer gekrümmten Linienführung 233
8.3.1 Allgemeines 233
8.3.2 Materialverhalten des Rohrzwischenlagenmaterials aus Holzwerkstoffen 233
8.3.3 Semi-empirisches, zyklisches Stoffmodell zur Beschreibung des Materialverhaltens der Rohrzwischenlage 235
8.3.4 Simulation einer ausgewählten Belastungsgeschichte für ein Vortriebsrohres 237
8.3.4.1 Modellvorstellung 237
8.3.4.2 Simulationsergebnisse 239
8.3.5 Zusammenfassung 246

9 Bemessungskonzept und Beispielrechnung 247
9.1 Allgemeines 247
9.2 Bemessungskonzept dieser Arbeit orthogonal zur Rohrachse 247
9.2.1 Lastfall Verkippung des Rohres im Boden / Exzentrizität der Vorpresskräfte am Einzelrohr 247
9.2.2 Lastfall Verschiebung des Rohres im Boden / Querdruckkräfte infolge einer gekrümmten Gradiente / Trasse 251
9.2.3 Allgemeine Bemessungshinweise und Superposition der Lastfälle 254

9.3 Bemessungsbeispiele 255
9.3.1 Bemessungsbeispiel 1: vertikale Gradiente mit 6 m Scheitelüberdeckung, Bodenart Ton in steifer Konsistenz 255
9.3.2 Bemessungsbeispiel 2: horizontale Gradiente im dicht gelagerten Sand Ton mit 16 m Überdeckung 259
9.4 Bemessungskonzept dieser Arbeit longitudinal zur Rohrachse 262

10 Schlussbetrachtung 263
10.1 Zusammenfassung 263
10.2 Ausblick 264

Literaturverzeichnis 265

Anhang A: Ödometerversuche A-1

Anhang B: Ergebnisse der FEM-Simulationen der Modellversuche B-1

Anhang C: Vergleich der PIV Auswertungen der Modellversuche mit den numerischen Simulationen C-1

Anhang D: MATHCAD Berechnungsalgorithmus D-1

Anhang E: Auswertung der Spannungsverteilung am Rohr in der numerischen Simulation E-1

Anhang F: Übersicht der Bodenparameter F-1

Anhang G: Auswertung der Spannungsverteilung der verkippten Rohre in der numerischen Simulation G-1

Anhang H: Daten und User-Subroutine zur numerischen Beschreibung des Holzwerkstoffes H-1

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Oben: Schadensbilder beim Rohrvortrieb: Längsrisse in Scheitel und Sohle (*Schulz (2006)*)
Unten links: Längsrisse auf Höhe der Kämpfer (*Scherle (2003)*);
Unten rechts: Längsrisse und Abplatzungen innen (*IKT 2007*) 2
Abb. 2-1: Abhängigkeit der maximalen Spannungsordinate von der Druck übertragenden Fläche 6
Abb. 2-2: Belastungs- und Auflagerspannungsfiguren zur Ermittlung der Schnittgrößen gemäß ATV 161 7
Abb. 2-3: Herleitung des Kräftegleichgewichtes am Vortriebsrohr nach Scherle für den Lastfall
a) gekrümmte Gradiente und b) ungleiche Aussermitte der Vortriebskräfte 9
Abb. 2-4: Versuchskonfiguration *Husein (1989)* links: in air test, rechts: in soil test 13
Abb. 2-5: Rohrkinematik und gemessene quer zur Rohrachse gerichtete Kräfte *IKT (2006)* 14
Abb. 2-6: Versuchsaufbau nach Trümpi Längs- und Frontalansicht 15
Abb. 2-7: Ergebnisse der Feldmessungen von Norris (1992) im Baufeld 3 16
Abb. 2-8: Rohr-Boden Interaktion bei „S"-Kurven und theoretisches Kräftemodell der Rohr-Boden-Interaktion nach *Milligan und Norris* 18
Abb. 3-1: Flussdiagramm für die Lösung nichtlinearer Randwertprobleme mit dem Newton-Raphson-Verfahren *(Hügel 1995)* 23
Abb. 3-2: Lage und Randbedingungen eines Berechnungsausschnittes im unendlichen Halbraum 24
Abb. 3-3: Einfluss einer Kapillarkohäsion im Hautspannungsraum 27
Abb. 3-4: hyperbolische Beziehung zwischen Spannung und Dehnung im drainierten Triaxialversuch 29
Abb. 3-5: Fließflächen im HS-Modell p-q Ebene, c=0 (links); komplette Fließfläche im Hauptspannungsraum 30
Abb. 3-6: Vergleich der Druck-Setzungsdiagramme aus Ödometer-Laborversuch und numerischer Modellierung für lockere Lagerung (I_D = 0,03, links) und dichter Lagerung (I_D = 0,78, rechts) 34
Abb. 3-7: Vergleich der Spannung-Dehnungs-Kurven bei triaxialer Kompression zwischen Laborversuch und numerischer Modellierung für dichte Lagerung (I_D = 0,78) 35
Abb. 3-8: Spannungs-Dehnungs-Kurven für Triaxialversuche mit σ_3 = 200 kPa; 36
Abb. 3-9: PIV-Auswertung des Verschiebungsfeldes bei 0,1 mm eingeprägter Verschiebung (links), Abweichungen der PIV-Messung vom Sollbetrag (rechts) 39
Abb. 4-1: Körnungsband des verwendeten Versuchsbodens 42
Abb. 4-2: Bodenreibungswinkel im Anhängigkeit von der Auflastspannung im Rahmenscherversuch nach *Pulsfort* (links) und in Abhängigkeit vom Zelldruck im Triaxialversuch nach *Baker* (rechts) 43
Abb. 4-3: Vergleich der Versuchergebnisse mit der hypoplastischen Berechnung nach *Herle* in Abhängigkeit von Spannungsniveau (links) und der Lagerungsdichte (rechts) 43
Abb. 4-4: Ergebnisse der ödometrischen Kompressionsversuche für Erst und Wiederbelastung für locker (I_d = 0,03) und dicht (I_d = 0,783) gelagerten Boden (oben) 44
Abb. 4-5: Kompressionskurven bei variierender Lagerungsdichte und daraus abgeleiteter Steifemodul 45
Abb. 4-6: normierte Spannungskurven der Triaxialversuche (oben) und Auswertung des Reibungswinkels für den Spannungsbereich 0 bis 200 kPa Zelldruck 46
Abb. 4-7: Verwendete Rieselbehälter und Sandstrom beim Rieseln 47
Abb. 4-8: durch Kontrollvolumen ermittelte Porenanteile im Modellversuch und ihre Streuung 47
Abb. 4-9: Begriffsdefinitionen und Geometriebezeichnungen 50
Abb. 4-10: Verlauf der Schubspannungen im Ödometerversuch mit festem Ring 53
Abb. 4-11: Laborversuch zur Erfassung der Kontaktreibung (*Hauser (2005)* 53
Abb. 4-12: Versuchsaufbau zum horizontalen Verschieben des Modellrohres 54
Abb. 4-13: Kraft-Weg-Diagramme H/D = 4,25, I_d = 0,5 (links); H/D =11,75 ,I_d = 0,827(rechts) 56
Abb. 4-14: Kurvencharakteristik des Bodenwiderstandes bei Kompression und Scherung *(Herle/Masin (2005))* 57
Abb. 4-15: Tragfähigkeitsbeiwerte N_d im Modellversuch für mitteldichte (oben); dichte (mitte) und sehr dichte (unten) Lagerung 59
Abb. 4-16: Tragfähigkeitsbeiwerte N_d im Modellversuch für H/D = 4,25 (oben); H/D = 6,75 (Mitte) und H/D = 11,75 (unten) Lagerung 60
Abb. 4-17: Tragfähigkeitsbeiwerte der Modellversuche in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte und der Überdeckung 61
Abb. 4-18: Tragfähigkeitsbeiwerte der Modellversuche im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Autoren : a) locker bis mitteldicht gelagert; b) mitteldicht bis sehr dicht gelagert 62

Abb. 4-19: Tragfähigkeitsbeiwerte der Modellversuche 63
Abb. 4-20: Normierte Kurvenverläufe aller Versuchskurven 65
Abb. 4-21: Schwerelinie der der Kurven der Modellversuche samt Schwankungsbreite 65
Abb. 4-22: Bruchkörpergeometrien nach *Audibert/Nyman* für Rohre mit geringer Überdeckung (links und Mitte) und mit großer Überdeckung (rechts) 66
Abb. 4-23: Ergebnisse der Anschauungsversuche nach *Vogt-Beyer* für lockere Lagerung (links) und dichte Lagerung (rechts) 68
Abb. 4-24: Ergebnisse der Anschauungsversuche nach *Bergschneider* für lockere Lagerung 70
Abb. 4-25: Ergebnisse der Anschauungsversuche nach *Bergschneider* für mitteldichte Lagerung Links: Digitalbilder aus Videoaufnahmen ; rechts: Verformungsbilder mittels PIV; 71
Abb. 4-26: Ergebnisse der Anschauungsversuche nach *Bergschneider* für dichte Lagerung 72
Abb. 4-27: Versuchsaufbau für vertikal nach oben gezogene Modellrohre 74
Abb. 4-28: Normierte Kurvenverläufe aller Versuchskurven 76
Abb. 4-29: Tragfähigkeitswerte der Modellversuche im Vergleich zu Literaturwerten *Trautmann/O'Rourke* 78
Abb. 4-30: Vergleich der Tragfähigkeitswerte für einen Versuch mit H/D = 2,5 und einer bezogenen Lagerungsdichte I_d = 0,957 in beiden Versuchscontainern 79
Abb. 4-31: Versuchsaufbau und Messtechnik der Versuche zum Ziehen des Rohres im großen Modellcontainer 79
Abb. 4-32: Schwerelinie der Kurven der Modellversuche 80
Abb. 4-33: Verschiebungswege bei Erreichen der maximalen Kraft 81
Abb. 4-34: Bruchkörperfiguren nach *Vardoulakis/Graf/Gudehus* (oben links + mitte); 82
Abb. 4-35: Verschiebungsfelder nach 0,5; 1 und 2 mm 84
Abb. 4-36: Abmessungen und Bestandteile des Versuchsaufbaus 87
Abb. 4-37: Versuchscontainer 89
Abb. 4-38: Elemente und Phasen des Versuchsaufbaus und Durchführung 90
Abb. 4-39: Elemente der Wippenkonstruktion zur Lasteinleitung 91
Abb. 4-40: Entwicklung des Tragfähigkeitswertes für die Kippversuche (Bezugslänge t = 1,2m) 93
Abb. 4-41: Versuchsergebnisse für variierende Überschnittmasse 94
Abb. 4-42: Kraft-Verschiebungs-Linie eines Versuches mit zyklischer Verkippung des Rohres 95
Abb. 4-43: PIV-Auswertungen nach 1, 2, 4, und 6 mm für H/D = 1,5 , 2,5 und 3,5 Überschnitt ü = 1,5 mm; Bewegungsrichtung nach unten 97
Abb. 4-44: PIV-Auswertungen nach 1, 2, 4, und 6 mm für Überschnitte von 0, 1,5 und 4 mm bei H/D =3,5 98
Abb. 4-45: trigonometrische Funktionen bezogen auf die Rohrabwicklung von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ für die Verformung 99
Abb. 4-46: Verformungsbilder bei einer Bewegung an der Glasscheibe vertikal nach oben 100
Abb. 4-47: Verformungsbilder in zweiten (links) und vierten Belastungszyklus (rechts) H/D = 3,5; ü=1,5mm; Bewegungsrichtung nach unten 101
Abb. 5-1: Kontaktdefinition in der numerischen Simulation (*ABAQUS 6.5 (2005)*) 105
Abb. 5-2: verwendete Netzgeometrien in ABAQUS (links) und Plaxis (rechts) 106
Abb. 5-3: Verteilung des berechneten k_0 Wertes im numerischen Gesamtsystem (links) und über die Tiefe verteilt (rechts), I_d= 0,738 108
Abb. 5-4: Kraft-Verschiebungs-Verläufe für die untersuchten Netzgeometrien ABAQUS (links) und PLAXIS (rechts); Bifurkationspunkt (roter Punkt) 109
Abb. 5-5: Vergleich der Kraft-Verschiebungs-Linien zwischen Modellversuch und numerischer Nachrechnung für die bezogenen Lagerungsdichten I_d = 0,50 (**md**); 0,738 (**d**); 0,835 (**sd**) und bezogen Überdeckungshöhen H/D = 4,25; 6,75 111
Abb. 5-6: Vergleich der Kraft-Verschiebungs-Linien zwischen Modellversuch und numerischer Nachrechnung für die bezogenen Lagerungsdichten I_d = 0,50 (**md**); 0,738 (**d**); 0,835 (**sd**) und bezogen Überdeckungshöhen H/D = 11,75; 14,25 112
Abb. 5-7: Vergleich der Kraft-Verschiebungs-Linien zwischen Modellversuch und numerischer Nachrechnung mit modifizierter Porenzahlverteilung 113
Abb. 5-8: a.) Verschiebungsfeld für H/D = 4,25 und I_d = 0,50 (links) und I_d = 0,835 b.) Porenzahlverteilung für H/D = 4,25 und I_d = 0,50 und I_d = 0,835 c.) mobilisierter Reibungswinkel für H/D = 4,25 und I_d = 0,50 und I_d = 0,835 im letzten Berechnungsschritt der numerischen Simulation 115
Abb. 5-9: a) Verschiebungsfeld für H/D = 11,75 und I_d = 0,50 (links) und I_d = 0,835, b. Porenzahlverteilung für H/D = 11,75 und I_d = 0,50 und I_d = 0,835 c) mobilisierter Reibungswinkel für 11,75 und I_d = 0,50 und I_d = 0,835 im letzten Berechnungsschritt der numerischen Simulation 116

Abb. 5-10: a.) Auswertung der Spannungspunkte für H/D = 4,25 und I_d = 0,50 b.) Auswertung der Spannungspunkte für H/D = 11,75 und I_d = 0,835 c.)oben: Lage der signifikanten Gleitflächen unten :potentielle vierte Gleitfläche....117
Abb. 5-11: Auswertung der Verformungen, der Spannungspunkte und der inkrementellen Scherverformungen für H/D = 25,5 und I_d = 0,835....118
Abb. 5-12: Diagramme der Kraft-Hebungs-Linien der Modellversuche und der numerischen Simulation 119
Abb. 5-13: Diagram der Kraft-Hebungs-Linie des Versuches im großen Container mit H/D = 2,5 und I_d= 0,957 (FEM I ABAQUS Hypoplastizität) 119
Abb. 5-14: a.) Verschiebungsfelder für H/D = 2,5 und I_d = 0,738 und Porenzahlverteilung b.) Verschiebungsfelder für H/D = 2,5 und I_d = 0,835 und Porenzahlverteilung c.) Spannungspunkte für H/D = 2,5 und I_d = 0,738 (links) und I_d = 0,835 120
Abb. 5-15: a.) Verschiebungsfeld, Porenzahlverteilung, Spannungspunkte für H/D = 5 und I_d = 0,738 b.) Verschiebungsfeld, Porenzahlverteilung, H/D = 2,5 und I_d = 0,957 in der numerischen Simulation des drei dimensionalen großen Versuchscontainers 121
Abb. 5-16: Verschiebungsfelder, Porenzahlverteilung, Spannungspunkte für H/D = 7,5 und I_d = 0,835....122
Abb. 5-17: Verschiebungsfelder, Porenzahlverteilung, Spannungspunkte für H/D = 11,75 und I_d = 0,835....122
Abb. 5-18: Verteilung des Seitendruckbeiwertes k_o' bezogen auf die normierte Gleitflächenlänge s/s'....123
Abb. 5-19: Diskretisierung des 3-dimensionalen Berechnungssystems 125
Abb. 5-20: (a) H/D 1,5; (b) H/D 2,5; (c) H/D 3,5 mit Hüllrohr und ; (d) H/D 3,5 ohne Hüllrohr;....127
Abb. 5-21: Verschiebungsfeld eines des verkippten Rohres H/D = 3,5 nach 1cm eingeprägter Verschiebung am hinteren Rohrende 128
Abb. 5-22: Verschiebungsfelder am vorderen Rohrende im Modellversuch und der Simulation nach einer am hinteren Rohrende eingeprägten Verschiebung von 1 mm (oben) und 6 mm (unten) für H/D = 1,5 und ü = 1,5 mm 128
Abb. 5-23: Verschiebungsfelder am vorderen Rohrende im Modellversuch und der Simulation nach einer am hinteren Rohrende eingeprägten Verschiebung von 1mm (oben) und 6 mm (unten) für H/D = 2,5 und ü = 1,5 mm 129
Abb. 5-24: Verschiebungsfelder am vorderen Rohrende im Modellversuch und der Simulation nach einer am hinteren Rohrende eingeprägten Verschiebung von 1mm (oben) und 6 mm (unten) für H/D = 3,5 und ü= 1,5 mm 130
Abb. 6-1: Last-Setzungs-Kurven tief liegender vertikal belasteter Bauwerke nach a) *Yasufuku et. al (2001) ; b) Kisse(2008)*....133
Abb. 6-2: Bruchkörpergeometrie in Abhängigkeit von der Überdeckungshöhe 135
Abb. 6-3: Teilkörper der Grundbruchfigur und die an ihnen angreifenden Kräfte 137
Abb. 6-4: Spannungsverteilung der Gleitflächen nach Mayer-Vorfelder (oben) und Ohde (unten)....142
Abb. 6-5: Verlauf der Erdwiderstandswerte k_{pgh} bei gewähltem Hebelarm der Gleitflächenresultierenden im Vergleich zu den klassischen Erdwidertandsbeiwerten 143
Abb. 6-6: Schubspannungen am Rohr....144
Abb. 6-7: Entwicklung des mit der Modellvorstellung berechneten Tragfähigkeitsbeiwertes N_d in Abhängigkeit vom Bodenreibungswinkel φ....146
Abb. 6-8: Vergleich der analytischen ermittelten Tragfähigkeitsbeiwerte mit den Modellversuchen....148
Abb. 6-9: Spannungszustände an einem Bodenelement vor Verschiebung des Rohres....151
Abb. 6-10: Definition Bezugslänge l'....152
Abb. 6-11: Anwendung der analytischen Kraft-Weg-Beziehung auf die Modellversuche für die bezogenen Lagerungsdichten I_d = 0,50 (**md**); 0,738 (**d**); 0,835 (**sd**) und bezogen Überdeckungshöhen H/D = 4,25; 6,75 153
Abb. 6-12: Vergleich der Kraft-Verschiebungs-Linien zwischen Modellversuch und numerischer Nachrechnung für die bezogenen Lagerungsdichten I_d = 0,50 (**md**); 0,738 (**d**); 0,835 (**sd**) und bezogen Überdeckungshöhen H/D = 11,75; 14,25....154
Abb. 6-13: a) Bruchkörpergeometrie und b) Spannungsbeziehungen am Mohr'schen Spannungskreis für die vertikal nach oben gerichtete Bewegung (*White et. al. (2002)*)....156
Abb. 6-14: Sensitivitätsanalyse der Funktion zur Berechung des maximalen Widertandes gegen eine nach oben gerichtete Bewegung 159
Abb. 6-15: Vergleich der analytischen Tragfähigkeitsbeiwerte N_{d_a0} mit den Versuchergebnissen für die vertikal nach oben gerichtete Bewegung für die a) Modellversuche *Trautmann/O'Rourke (1985);* b) Modellversuche von *Rowe (1982)* c) Modellversuche nach Abschnitt 4.8 161
Abb. 6-16: Vergleich der mobilisierten Bettungskräfte für Versuch , numerische Simulation und

analytische Prognose bei vertikal nach oben gerichteter Bewegung des Rohres....163
Abb. 6-17: Anwendungsbereich Versagensarten bei einem tiefliegenden Grundbruch nach *Vesic (1963)*....165
Abb. 6-18: Scherflächen des lokalen Scherversagens nach *Vesic (1963)*....166
Abb. 7-1: Vorzeichendefinition der Rohrabwicklung....168
Abb. 7-2: Numerisches Grundmodell zur Untersuchung der Beanspruchung im Realmaßstab....169
Abb. 7-3: Berechnete Volumenreduzierung im numerischen System entlang der Kontaktelement....171
Abb. 7-4: Kraft-Verschiebungs-Diagramme für variierende Überschnitte und Wiederbelastungssteifigkeiten bei horizontaler Verschiebung des Realrohres....172
Abb. 7-5: Kraft-Verschiebungs-Diagramme und ihre Prognose für a) variierende Überschnitte (oben 0-16 mm; unten 16- 48 mm) b) und Wiederbelastungssteifigkeiten....174
Abb. 7-6: a) Spannungsverteilung am Rohrumfang bei 0 (links) und 4 cm (rechts) Überschnitt....176
Abb. 7-7: Differenzspannungsordinaten auf Höhe des Kämpfers in Abhängigkeit von der tatsächlichen Verschiebung des Bodenrandes neben dem Interface-Element....177
Abb. 7-8: Vergleich der normierten Spannungsverteilungen für verschiedene Verschiebungsinkremente für 0 oben und 4 cm (unten) Überschnitt....178
Abb. 7-9: normierte Differenzspannungsverteilungen für E_{ur} = 65.000 (li.o.); 90.000 (re. o.); 120.000 (li. m.) und 150.000 kPa (re. m.); unten: Vergleich der Funktion f(x) = cos1/2 (θ) mit den normierten Spannungsverteilungen der belasteten Rohrseite für Eur = 65.000 (li.) und Eur = 150.000 (re.)....179
Abb. 7-10: Kraft-Verschiebungs-Linien und analytische Näherung bei Variation des Bodenreibungswinkels φ (unten Detailausschnitte 0 - 8 mm)....181
Abb. 7-11: Kraft-Verschiebungs-Linien und ihre Prognose bei Variation der Kohäsion c....182
Abb. 7-12: Differenzspannungsordinaten auf Höhe des Kämpfers für die Variation des Bodenreibungswinkels φ (links) und der Kohäsion c (rechts)....183
Abb. 7-13: normierte Differenzspannungsverteilungen für φ =10 (a); 20 (b); 35 (c) und42,5 (d)°....183
Abb. 7-14: normierte Differenzspannungsverteilungen für c =5 (a); 10 (b) und 50 (c) kPa....184
Abb. 7-15: Kraft-Verschiebungs-Linien für die Variation a) der Gesamtsteifigkeit; b) des Steifigkeitsverhältnisses; c) des Exponenten m....185
Abb. 7-16: norm. Differenzspannungsverteilungen für E = 1000, 5000, 45.000 und 80.000 kPa....187
Abb. 7-17: Spannungsordinate auf Höhe des Rohrkämpfers bei Variation der Gesamtsteifigkeit....187
Abb. 7-18: Kraft-Verschiebungs-Linien für die Variation der bezogenen Überdeckung H/D....189
Abb. 7-19: Radialspannungsordinate auf Höhe des Rohrkämpfers bei Variation der bezogenen Überdeckung H/D....190
Abb. 7-20: Vergleich der Mobilisierung der Tragfähigkeitswerte für versch. Durchmesser D....191
Abb. 7-21: normierte Differenzspannungsverteilungen für H/D = 1,75; 4,5; 8 und 11D....191
Abb. 7-22: Kraft Verschiebungs-Linien für die Variation des Porenzahl e (oben) und der Dilatanz des Bodens (unten)....193
Abb. 7-23: normierte Differenzspannungsverteilungen für e = 0,54 (li. o.) und 1,0 (5re. o) bzw. ψ = 0 (li. u.) und 30° (re. u.)....194
Abb. 7-24: Kraft Verschiebungs-Linien für die Variation des Reibungsbeiwertes zwischen Rohrmantel und Boden 195
Abb. 7-25: normierte Differenzspannungsverteilungen der Schubspannungen am Rohrmantel für die Reibungsbeiwerte R_{inter} = 0,1; 0,3; 0,6 und 0,9....196
Abb. 7-26: mobilisierte Bettungskräfte für die verschiedenen Bodenarten bei seitlicher Verschiebung....198
Abb. 7-27: normierte Differenzspannungsverteilungen für die verschiedenen Bodenarten: weicher Lehm (oben links); Lehm, steif (oben rechts); Rüpelton (unten links); Hostun Sand dicht (unten rechts)....198
Abb. 7-28: Vorzeichendefinition der Rohrabwicklung....199
Abb. 7-29: Kraft-Verschiebungs-Diagramme für nach oben Richtung GOK verschobene Rohre....200
Abb. 7-30: Vergleich der numerischen Kraft-Verschiebungs-Diagramme für 5 (links) und 10 m (rechts) Überdeckung bei unterschiedlicher Verschiebungsrichtung....201
Abb. 7-31: Definition der Rohrabwicklung für vertikal nach unten verschobene Rohre (links);....202
Abb. 7-32: Kraft-Verschiebungs-Diagramme für nach unten verschobene Rohre....203
Abb. 7-33: normierte Differenzspannungsverteilung für eine Verschiebung nach oben....205
Abb. 7-34: normierte Differenzspannungsverteilung für eine Verschiebung nach unten....206
Abb. 7-35: Kinematik, Begrenzungsebenen und hypothetisches Momentengleichgewicht des verkippten Vortriebsrohres im Grundriss....207

Abb. 7-36: numerischer Modellierungsausschnitt und Knotennummer und –markierung der Elemente die in der Berechnung für ein horizontal verkipptes Rohr 208
Abb. 7-37: Vergleich der Spannungs-Verschiebungsbeziehung für eine Translation und für eine Rotation (am Rohrspiegel); links: Spannungspfade (ü = 10 mm) und rechts: Differenzspannungen 210
Abb. 7-38: Vergleich der norm. Differenzspannungsverteilung für eine Translation und für eine Rotation in beiden Achsrichtungen 211
Abb. 7-39: Spannungs-Verschiebungs-Diagramm für verschiedene Bodenarten für horizontal verkippte Rohre HD/ = 3,5 212
Abb. 7-40: Spannungs-Verschiebungs-Diagramme für horizontal verkippte Rohre in Hostun Sand mit: a) Variation von H/D; b) Variation tan δ; c) Variation I_d; d) Variation Überschnitt ü 213
Abb. 7-41: 3D normierte Spannungsverteilung am Vortriebsrohr infolge hor. Verkippung 214
Abb. 7-42: numerischer Modellierungsausschnitt und Knotennummer und –markierung der Elemente in der Berechnung für ein vertikal verkipptes Rohr ausgewertet werden 215
Abb. 7-43: Spannungs-Verschiebungs-Diagramm für Translation und Rotation eines Rohres im Hostun-Sand 216
Abb. 7-44: Längsspannungsverteilung für Rohrscheitel und Sohle bei vertikaler Verkippung 217
Abb. 7-45: normierte Spannungsverteilungen für ein vertikal verkipptes Rohr 217
Abb. 7-46: dreidimensionale Spannungsverteilung am Vortriebsrohr infolge vertikaler Verkippung 218
Abb. 7-47: Spannungs-Verschiebungs-Diagramme für vertikal verkippte Rohre in a) Hostun Sand mit Variation von I_d; b) Variation tan δ; c) Variation I_d; d) Variation Überschnitt ü für vertikal verkippte Rohre 219
Abb. 8-1: Einleitung der quer zur Rohrachse gerichteten Kräfte über Schubspannungen an den Rohrspiegeln 221
Abb. 8-2: Definition des Rohrabwicklungswinkels ω (links) und freigeschnittenes Schalenelement mit Belastung und radialen Schnittmomeneten m_r 222
Abb. 8-3: Definition der Berechnungssysteme a) In der FE-Methode durch Schubkrafteinleitung an der Rohrspiegeln; b) Im ebenen Kreisring mit cos-förmiger Auflagerspannung (Hornung (1989) 223
Abb. 8-4: Vergleich der Biegemomente„-Vorwerte“ in Ringrichtung am Einheitsrohr mit den vereinfachten analytischen Verfahren (dunkle Linie) und mit der FE-Methode unter Ansatz der linearen Elastizitätstheorie (helle Linie) 224
Abb. 8-5: analytische Lastbilder zur Ermittlung der Schnittgrößen infolge Eigengewicht/ konstanten Schubspannungen am Vortriebsrohr (links „Eigengewicht auf Schneidenlagerung“; rechts „Einzellast am Scheitelpunkt des Auflagergegendruckes“ (*Hornung (1989)*) 225
Abb. 8-6: Komponenten der Schnittkraftvorwerte (oben) und Überlagerung der Komponenten (unten) für den zentrischen Lastangriff 226
Abb. 8-7: Schnittkraftvorwerte für den exzentrischen Lastanteil an den Schnittgrößen 227
Abb. 8-8: Schnittgrößen bei gerade nicht klaffender Fuge, entsprechend der resultierenden Vorpresskraft am Querschnittskern $x_v = 0{,}46 \cdot r_m$ 227
Abb. 8-9: Belastung des Vortriebsrohres bei ungleicher Außermitte der Vortriebskräfte 228
Abb. 8-10: numerisches Simulationsmodell mit Lastflächen und Randbedingungen (links) 229
Abb. 8-11:berechnete Schnittgrößen Normalkraft (links) und Biegemomente (rechts) für die verschiedenen belastenden Spannungsverteilungen in Quer- und Längsrichtung am Einheitsrohr r_m = 1m; L/D = 1 (Bezeichnung z gibt die Verteilung in Rohrlängsrichtung an z = linear ;z^0,5 = quadratisch unterlinear ;z^2 = quadratisch überlinear 230
Abb. 8-12: Berücksichtigung der effektiven Rohrlänge bei der Ermittlung der Schnittgrößen; links: berechnete Werte des FE-Systems; rechts: Gedankenmodell des Einfeldbalkens 232
Abb. 8-13: Spannungs-Stauchungs-Diagramm und verbleibende Holzdicke für ein Fugenmaterial aus Holzwerkstoff bei zyklischer einaxialer Beanspruchung. links kraftgesteuerter Versuch (*Buchhardt 2003)*) und rechts weggesteuert (*Averesch (1998)*) 234
Abb. 8-14: Vergleich der Ergebnisse aus dem Laborversuch und seiner numerischen Simulation bei Anwendung des entwickelten Konstitutivgesetzes (Probengröße 200 x 200 mm) 236
Abb. 8-15: Phasen des simulierten Vortriebes 239
Abb. 8-16: axiale und Vergleichsspannungszustände in den Vortriebsphasen 241
Abb. 8-17: überhöhte Darstellung der effektiven Verformung in Phase 5 242
Abb. 8-18: Spannungsverteilungen an den Rohrspiegeln und Lage der resultierenden Vorpresskraft für das mittlere Rohr in den einzelnen Vortriebsphasen 2 bis 5 243
Abb. 8-19: Geometrische Abhängigkeiten zur Bestimmung der Exzentrizität der Vorpresskraft bei

Klaffung der Fugen (*Buchhardt 2003*).....244
Abb. 8-20: Geometrische Abhängigkeiten bei klaffender Fuge und gekrümmter Rohrtour (*Scherle (1986)*).....246
Abb. 9-1: Berechnung der resultierenden Kraft aus der Form der Spannungsverteilung (links) und Lage der Rohrabwicklungspunkte (rechts).....250
Abb. 9-2: geometrische Länge einer Rohrkette bei maximaler Verwinkelung der Rohre.....252

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Hypoplastische Parametersätze für Wuppertaler Sand im Spannungsbereich 0 – 250 kPa (FEM I) und 0- 500 kPa (FEM Ia)....33
Tabelle 3-2: Parametersatz Hardening-Soil-Stoffgesetz Wuppertaler Sand....34
Tabelle 4-1: Steifemodul des Versuchsandes ermittelt durch die FE-Simulation....45
Tabelle 4-2: deviatorische Steifigkeit im Triaxialversuch, Reibungs- und Dilatanzwinkel ermittelt durch die FE-Simulation....46
Tabelle 4-3: Porenanteile, Lagerungsdichten und bezogene Lagerungsdichten im den Versuchsbehältern....48
Tabelle 4-4: Ergebnisse der Modellversuche....58
Tabelle 4-5: Ergebnisse der Modellversuche....77
Tabelle 4-6: Gemessene Breite des Hebungshügels im Modellversuch und daraus errechneter Neigungswinkel....83
Tabelle 5-1: Elastische Materialparameter des numerischen Modellrohres....106
Tabelle 5-2: Errechneter Erdruhedruckbeiwert k_0 aus der hypoplastischen Berechnung....107
Tabelle 5-3: Gemessene Erdruhedruckwerte k_0 nach den Modellversuchen von *Herten (1999)*....107
Tabelle 5-4: Breite des gemessenen und berechneten Hebungsbereiches an der Bodenoberkante....122
Tabelle 6-1: analytisch mit dem Model ermittelte Tragfähigkeitsbeiwerte N_{d_a} für den horizontalen Grundbruch und ihre Eingangsparameter....147
Tabelle 6-2: analytische Tragfähigkeitsbeiwerte N_{d_a0} für den vertikalen Versagensfall und ihre Eingangsparameter....160
Tabelle 7-1: Materialparameter für mitteldicht gelagerten Sand *(PLAXIS)*....169
Tabelle 7-2: Geometrie- und Materialparameter des Vortriebsrohres....170
Tabelle 7-3: Untersuchte Böden und Geometrieparameter für das *Vortriebsrohr*....197
Tabelle 7-4: Vergleich der Versagenslasten nach der FEM mit dem vertikalen Grundbruchmodell....202
Tabelle 8-1: Biegemomente für zentrische und exzentrische Lasteinleitung am Einheitsrohr....227
Tabelle 8-2: Normalkräfte für zentrische und exzentrische Lasteinleitung am Einheitsrohr....227
Tabelle 8-3: Übersicht der untersuchten Spannungsverteilungen....231
Tabelle 8-4: Biegemomente und Normalkräfte für den Lastfall Verkippung des Rohres....231
Tabelle 8-5: Verwinkelungen und Spannungsordinaten sowie Verteilungen im simulierten Vortrieb....239
Tabelle 8-6: berechnete und prognostizierte Exzentrizitäten der Vorpresskräfte....244
Tabelle 9-1: Abhängigkeit der Spannungsverteilung von der Bodenart unterteilt nach Konsistenz bzw. Lagerungsdichte....249
Tabelle 9-2: Schnittkraftvorwerte für den Lastfall Rotation (s. auch Abb. 9-1)....251
Tabelle 9-3: Schnittkraftvorwerte für den Lastfall Translation....253
Tabelle 9-4: Vergleich der Schnittkräfte nach den unterschiedlichen Bemessungskonzepten....258
Tabelle 9-5: Vergleich der Schnittkräfte nach den unterschiedlichen Bemessungskonzepten....262

Verwendete Symbole

α	[-]	Exponent für den Peakreibungswinkel φ_p
α_{HS}	[-]	Parameter zur Definition der Kappengröße und Kappenform im HS-Modell
β	[-]	Pyknotropiefaktor
β_{HS}	[-]	Parameter zur Definition der Kappengröße und Kappenform im HS-Modell
χ	[°]	Kippwinkel des Rohres
δ	[°]	Winkel der Kontaktreibung
ε	[%]	Stauchung
γ	[kN/m³]	Wichte des Bodens
γ^p	[-]	Verfestigungsparameter des HS-Modells
γ_w	[N/mm³]	Wichte des Wassers
η	[-]	ganzzahliges Vielfaches der Rohrlänge
φ	[°]	Innerer Reibungswinkel des Bodens im drainierten Zustand
φ_c	[°]	kritischer Reibungswinkel
φ_m	[°]	mobilisierter Reibungswinkel des Bodens
φ_p	[°]	Peak-Reibungswinkel des Bodens
κ	[-]	Faktor für den Hebelarm der Spannungsverteilung in Rohrlängsrichtung
λ	[-]	Faktor für den Flächeninhalt der Spannungsfigur in Ringrichtung
λ, μ	[-]	Faktor zur Definition der Lage der Gleitflächenresultierenden
μ	[-]	Reibungsbeiwert
μ	[-]	Faktor zur Berücksichtigung des Hebelarmes der resultierenden Bettungsspannung
ν	[-]	Querkontraktionszahl
ν	[-]	Faktor für den Flächeninhalt der Spannungsverteilung in Rohrlängsrichtung
$\nu_{x_v=r_a}$	[-]	Schnittkraftvorwert für de maximale Exzentrizität $x_v=r_m$
$\nu_{x_v=\text{varibel}}$	[-]	Schnittkraftvorwert für die variable Exzentrizität
ρ	[g/cm³]	Dichte
σ	[N/mm²]	Normalspannung
σ_1	[N/mm²]	Größere Hauptspannung / Axialdruck im triaxialen Kompressionsversuch
σ_3	[N/mm²]	kleinere Hauptspannung / Zelldruck im triaxialen Kompressionsversuch
σ_D	[kPa]	einaxiale Druckspannung der Holzzwischenlage
σ_m	[kPa]	mittlere Stützspannung am im horizontalen Grundbruchmodell
σ_M	[kPa]	Biegezugspannungsanteil aus Biegemoment
σ_{max}	[kPa]	Bruchspannung bei Verschiebung oder Rotation des Rohrest
σ_{rot}	[kPa]	Spannung infolge Rotation des Rohres
σ_N	[kPa]	Spannungsanteil aus Normalkraft

$\sigma_{Scherle}$	[kPa]	Spannung infolge ungleicher Außermitte der Vorpresskraft
σ_{trans}	[kPa]	Spannung infolge Translation des Rohres
σ_{vr}	[kPa]	Rohr- Vergleichsspannung
τ	[kPa	Schubspannung
ω, ω_{mob}	[°]	Öffnungswinkel der der logarithmischen Spirale
ψ,ν_p	[°]	Dilatanzwinkel des Bodens
ξ	[-]	Prozentsatz des Rohrdurchmessers
ξ	[°]	Neigungswinkel
ξ	[-]	Faktor des hebelarmes in der Rohrkette
ϑ_a	[°]	Winkel im aktiven Rankine Bereich
ϑ_p, $\vartheta_{p\ mob}$	[°]	Winkel im passiven Rankine Bereich
ϑ_p Θ_r	[-]	zu Ω um 180° verdrehter Punkt
Λ	[]	allgemeiner Vorwert zur Berechung der Biegemomente getrennt nach Lastfällen
Ω	[-]	Schwerpunkt der Auflagerspannungsfigur
Ω	[°]	Neigung der Gleitflächenresultierenden zur Gleitflächennormalen
Ξ	[-]	zu Ω um 90° verdrehter Punkt
Δa	[mm/m]	maximale Verwinkelung der Rohre
a	[m]	Breite der Dreiecksseite im horizontalen Grundbruchmodell
a	[m]	Dreiecksordinate der ersten Teilkörpers im horizontalen Grundbruchmodell
a		Faktor des hypoplastischen Stoffgesetzes
a	[m]	Maß des druckkraftübertragenden Anteils über die Höhe des Querschnittes vom Ursprung des Koordinatensystems
A_{sp}	[m²]	Flächeninhalt der logarithmischen Spirale
a_{zw}	[m]	Hebelarm der Vorpresskraft am Vortriebsrohr
$a_{zw,\ r=1}$	[-]	am Einheitsrohr normierter Hebelarm der Vorpresskraft am Vortriebsrohr
a_{zz}	[m]	Aussermitte der Vorpresskraft an der Rohrkette
b	[m]	Dreiecksordinate der ersten Teilkörpers im horizontalen Grundbruchmodell
b’	[m]	charakteristische Breite auf der die Spannung wirkt
$b_{Hügel}$	[mm²]	Breite des Bodenbereiches der sich angehoben hat
c_s	[kPa]	Kapillarkohäsion im hypoplastischen Stoffgesetz
c	[kPa]	Kohäsion des Bodens
D		Dehnungstensor
D, D_r	[-]	Lagerungsdichte des Bodens
d_{10}	[mm]	Durchmesser bei 10% Siebdurchgang
d_{50}	[mm]	Durchmesser bei 50% Siebdurchgang
d_{60}	[mm]	Durchmesser bei 60% Siebdurchgang
d_a, d_i, d_m	[m]	Durchmesser des Druckübertragungsringes im Fugenbereich
e	[-]	Porenzahl

e	[m]	Hebelarm der exzentrisch angreifenden Vortriebskraft
E'	[kPa]	charakteristische Steifigkeit für die Mobilisierungsfunktion der Rohrverschiebung
E'	[kPa]	charakteristische Geamtsteifigkeit in der Mobilisierungsfunktion
E_{50}	[kPa]	deviatorischer Sekantensteifigkeitsmodul
E_{50}^{ref}	[kPa]	deviatorischer Sekantensteifigkeitsmodul bei 50% Versagenslast im Triaxialversuch
e_{c0}	[-]	Porenzahl im kritischen Zustand
e_{d0}	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung
e_{i0}	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung
E_k	[kPa]	Teilkörperkontaktnormalkraft
E_p	[kPa]	Preß-Elastizitätsmodul des Holzwerkstoffes
E_{ref}	[kPa]	mittlerer Steifigkeit aus deviatorischer und ödometrischer Steifgikeit
Es	[kPa]	ödometrische Steifigkeit
Es^{ref}	[kPa]	Referenzödometersteifigkeit
Eur^{ref}	[kPa]	deviatorischer Wiederbelastungs-Sekantensteifigkeitsmodul
F		Faktor zur Beschreibung der poteniellen Fliessfläche des hypoplastischen Stoffgesetzes
f_a		skalarer Faktor des hypoplastischen Stoffgesetzes
f_b		skalarer Faktor des hypoplastischen Stoffgesetzes
f_e		skalarer Faktor des hypoplastischen Stoffgesetzes
f_i	[m]	Stich des Kreisbogenstückes
F_{max}	[mm]	Probendurchmesser
f_r	[-]	Beiwert nach DIN 4035
f_r	[-]	Vergleichmässigungsfaktor nach Scherle
$G_{1,...,4}$	[kN]	Gewichtskräfte der Teilkörper im horizontalen Grundbruchmodell
H/D	[-]	bezogene Überdeckungshöhe
$h_{1,2}$	[m]	Höhe der Teilkörper der horizontalen Grundbruchfigur
h_k	[m]	approximierter Hebelarm der Kohäsionkraft an der der logarithmischen Spirale
h_{ref}	[m]	Referenzhöhe für die logarithmische Spirale
h_s	[kPa]	Granulathärte
I_D	[-]	bezogene Lagerungsdichte des Bodens
k_0	[-]	Erdruhedruckbeiwert
$K_{1,...,5}$	[kN]	Kohäsionskräfte der Teilkörper im horizontalen Grundbruchmodell
k_{ah}	[-]	aktiver Erdruckbeiwert
k_{pm}	[-]	mobilisierter Erdwiderstandsbeiwert
l	[m]	Länge des Vortriebsrohres /Rohrlänge
l'	[m]	charakteristische Länge auf der die Spannung wirkt
l'_{unten}	[m]	charakteristische Länge für die Verschiebungsrichtung anch unten auf der die Spannung wirkt
l_{Kette}	[m]	Länge der Rohrkette
$ll(\varphi)$	[m]	effektive Höhe der horizontalen Grundbruchfigur

l_{max}	[m]	maximale Rohrlänge
l_v	[mm]	Länge des horizontalen Auflagers
m	[-]	Exponent der Steifigkeitsfunktion
m_{am}	[-]	Schnittkraftvorwert für den Lastfall ungleiche Aussermitte der Vorpresskraft nach M. Scherle
M_E	[Nm]	Biegemoment für den Lastfall Bodeneigengewicht
m_{ex}	[-]	Momentenvorwert für exzentrischen Lastangriff
M_g	[Nm]	Biegemoment für den Lastfall Eigengewicht
m_{Kr}	[-]	Schnittkraftvorwert für den den Lastfall gekrümmte Gradiente nach M. Scherle
M_{rot}	[kNm]	Rotationsmoment am Rohrstück
m_{Rot}	[-]	Momentenvorwert für Rotationsbeanspruchung
M_{Tr}	[kNm]	Biegemoment infolge translativer Kraft
M_V	[Nm]	Biegemoment für den Lastfall Zwängung nach M. Scherle
m_{zent}	[-]	Momentenvorwert für zentrischen Lastangriff
$M_{zul,ges}$	[Nm]	maximal aufnehmbares Bemessungsbiegemoment der Rohre
M_{ZW}	[kNm]	Zwängungsmoment nach M. Scherle
n	[-]	Exponent des hypoplastischen Stoffgesetzes
n	[-]	Porenanteil
N_d	[-]	bezogener Tragfähigkeitswert
n_{ex}	[-]	Normalkraftvorwert für exzentrischen Lastangriff
n_{Rot}	[-]	Normalkraftvorwert für Rotationsbeanspruchung
n_{zent}	[-]	Normalkraftvorwert für zentrischen Lastangriff
N_{ZW}	[kNm]	Zwängungsnormalkraft nach M. Scherle
P	[kN]	aufwärtsgerichtete Kraft am Bodenkeil
p	[-]	Exponent der Form der Spannungsverteilung auf der Zwischenlage 1 = linear; 2 = quadratisch und 3 = kubisch
P_l	[N]	wirksame Vortriebskraft am Rohr
p_0	[kPa]	Auflastspannung
P_q	[N]	orthogonal zur Vortriebsrichtung wirksame Kraft am Rohr
p_q	[kPa]	Grundbruchspannung nach Vesic
p_{ref}	[kPa]	Referenzspannung des HS-Stoffmodells
p_{rot}	[kPa]	Bettungsspannung infolge Rotation
P_{Tr}	[kN]	quergerichtete translative Kraft
p_{trans}	[kPa]	Bettungsspannung infolge Translation
q	[kPa]	Deviatorspannung
$Q_{1,...,5}$	[kN]	Gleitflächenresultierende der Teilkörper in horizontalen Grundbruchmodell
q_a	[kPa]	asymptotische Deviatorspannung
q_f	[kPa]	maximale Deviatorspannung
R	[m]	Radius der geplanten Kurvenfahrt des Vortriebes
$r_{1,2}$	[m]	Radien der logarithmischen Spirale
r_a	[m]	Aussenradius des Druckübertragungsringes im Fugenbereich

r_i,	[m]	Innenradius des Druckübertragungsringes im Fugenbereich
R_{auf}	[kN	Grenzlast für die vertikal aufwärtsgerichtete Kraft
R_H	[kN]	horizontale Gesamtgrundbruchkraft
R_{inter}	[-]	Reibungsbeiwert als prozentualer Anteil des Bodenreibungswinkels
r_m	[m]	mittlerer Rohrradius
$R_{m(i)}$	[kN]	Resultierende der horizontalen Stützspannung im horizontalen Grundbruchmodell
R_{min}	[m]	minimaler Kurvenradius
R_{ofH}	[kN]	horizontale Grundbruchkraft
s	[mm]	Verschiebung
S	[kN]	Schubkraft am Bodenkeil
s/H	[-]	auf die Überdeckungshöhe bezogene Verschiebung
s_{max}	[m]	maximale Bewegung des Rohrstückes
s_p	[mm²]	maximaler Verschiebungsweg zum erreichen der Grenzlast
$\mathbf{T}$		Spannungstensor
$\overset{\circ}{\mathbf{T}}$		objektive Jaumann Spannungsrate
$\hat{\mathbf{T}}^*$		Deviator des Spannungstensors
t	[m]	Dicke der Holzzwischenlage
$t_{aktuelle}$	[m]	aktuelle Dicke der Holzzwischenlage
t’	[m]	charakteristische Tiefe auf der die Spannung wirkt
T_{auf}	[kN]	aufwärts gerichtete Schubkraft
T_h	[kN]	horizontale Schubkraft am Rohr
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl Sieblinie des Bodens
v_{max}	[mm]	Verschiebung bis zum Erreichen der Grenzlast im Modellversuch mit vertikal nach oben gerichteter Bewegung
V_{red}	[%]	Volumenreduktion infolge Überschnitt
$V_{zul,ZW}$	[N]	zulässige Vortriebskraft nach M. Scherle
W	[kN]	Gewichtskraft des Bodenkeiles
x_a	[m]	Hebelarm der Teilkörperkontaktkraft
$x_{q(i)}$	[m]	Hebelarm der Gleitflächenresultierenden im horizontalen Grundbruchmodell
$x_{s(i)}$	[m]	Hebelarm der Gewichtskräfte im horizontalen Grundbruchmodell
x_v	[m]	Maß der Exzentrizität zwischen 0 und r_m

Verwendete Abkürzungen

PIV	Particle Image Velocimetry
FEM	Finite-Element-Methode
d	dicht gelagert
md	mitteldicht gelagert
sd	sehr dicht gelagert