

**Steigerung der Verlegequalität
von Kunststoffrohren in offener Bauweise
durch Reduzierung einbaubedingter Rohrverformungen**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Michael Kelleter

aus

Aachen

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Rainard Osebold
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Christoph Motzko
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Heribert Nacken

Tag der mündlichen Prüfung: 08.09.2009

Schriftenreihe des
Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb

Michael Kelleter

**Steigerung der Verlegequalität von Kunststoffrohren
in offener Bauweise durch Reduzierung
einbaubedingter Rohrverformungen**

Shaker Verlag
Aachen 2009

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2009)

Herausgeber:

Univ.-Professor Dr.-Ing. Rainard Osebold

für die Gesellschaft zur Förderung des Baubetriebs Aachen e.V.

Copyright Shaker Verlag 2009

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8749-8

ISSN 1612-2798

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

Kanäle und Rohrleitungen werden zum überwiegenden Teil in offener Bauweise hergestellt. Dabei nimmt der Anteil von Kunststoffrohren seit Jahren stetig zu. Die Ursachen für diese positive Marktentwicklung sind insbesondere die mit dem Einsatz von Kunststoffrohren verbundenen baubetrieblichen Vorteile, wie zum Beispiel deren geringes Gewicht und die leichte Handhabung bei der Verlegung.

Die Arbeitsweise beim Rohreinbau ist seit Jahrzehnten durch ein hohes Maß an Handarbeit geprägt. So erfordert ein normgerechter Einbau der Rohre sowohl ein sorgfältiges Unterstopfen der Rohrzwickel als auch eine lagenweise Verdichtung des Bodens neben dem Rohr.

Unter den veränderten Randbedingungen der heutigen Baupraxis spielen jedoch hohe Lohnkosten und großer Termindruck eine entscheidende Rolle, was häufig dazu führt, dass von normgerechten Einbaumethoden abgewichen wird. Auch wird vielfach von Unternehmen beklagt, dass eine regelkonforme Verdichtung des Bodens neben den Kunststoffrohren zu horizontalen und vertikalen Lageabweichungen führt. Bei unsachgemäßem Einbau der Rohre stellen sich unmittelbar große Rohrverformungen ein. Nehmen diese Verformungen mit der Zeit zu, so dass mit einem Stabilitätsversagen zu rechnen ist, muss der betreffende Leitungsabschnitt ausgetauscht werden.

Die zulässigen Grenzwerte für Querschnittsverformungen wurden mit der neuen Auflage des DWA-Arbeitsblattes A 149 deutlich verschärft. Gegenüber der ursprünglichen Zuordnung eines Kanals in die Zustandsklasse 0 (Sofortmaßnahmen erforderlich) bei einer relativen vertikalen Durchmesseränderung von $\delta_v = -40\%$ liegt der neue Grenzwert bei $\delta_v = -15\%$.

Da die einbaubedingten Kurzzeitverformungen in der Regel den überwiegenden Verformungsanteil ausmachen, untersucht Herr Kelleter die Ursachen einbaubedingter Rohrverformungen. Dazu werden Rohrleitungen in-situ mit einer eigens entwickelten Lasertechnik vermessen, die Statik biegeweicher Rohre detailliert betrachtet und umfangreiche experimentelle Untersuchungen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Im Rahmen umfangreicher Versuchsreihen werden gezielt kritische Einbausituationen und bewusst Einbaufehler nachgestellt.

Herr Kelleter arbeitet durch die Analyse der baubegleitenden Verformungsentwicklung heraus, dass die produktionsbedingten unplanmäßigen Vorverformungen der Rohre bei von der Norm abweichenden Verlegemethoden die Größe der Endverformungen bestimmen. Er entwickelt daher einen Lösungsansatz, mit dem der Einbau von Kunststoffrohren in offener Bauweise fehlerresistenter gestaltet werden kann und zeigt darüber hinaus mögliche künftige Entwicklungen auf, um sowohl Rohrverformungen zu reduzieren als auch Lageabweichungen zu vermeiden.

Mit seiner Arbeit bietet Kelleter einen hohen praktischen Nutzen sowohl für ausführende Unternehmen als auch für Rohrhersteller, Planer und Auftraggeber.

Widmung

Diese Arbeit widme ich meinen Eltern und Rebecca.

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
TABELLENVERZEICHNIS.....	IX
ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND INDIZES	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.3 Methodik.....	2
1.4 Abgrenzung dieser Arbeit zu aktuellen Forschungsarbeiten	3
2 STAND DER TECHNIK	5
2.1 Rohre und Rohrwerkstoffe	5
2.1.1 Nennringsteifigkeit.....	6
2.1.2 Kennwerte für die Dimensionierung	6
2.2 Boden.....	7
2.3 Bauverfahrenstechnik und Vorgehensweisen beim Rohreinbau	9
2.3.1 Herstellen der Leitungszone.....	10
2.3.2 Herstellen der Hauptverfüllung – Überschüttungsbedingungen	12
2.3.3 Bodenverdichtung	13
2.4 Beurteilung der Verlegequalität von Kunststoffrohren	14
2.4.1 Beurteilung beim Neubau.....	14
2.4.2 Zustandserfassung bei bestehenden Rohrleitungen und Kanälen	18
3 ERMITTLUNG VON ROHRVERFORMUNGEN.....	19
3.1 Aufbau und Funktion der Messtechnik	19
3.1.1 Distanz	20
3.1.2 Winkelinkrement $\Delta\varphi$	21
3.2 Steuerungssoftware	21
3.3 Auswertung	22
3.3.1 Annahmen.....	22
3.3.2 Mittlerer Innendurchmesser.....	23
3.3.3 Ermittlung der Rohrachse.....	23
3.3.4 Koordinaten-Transformation.....	25

3.3.5	Berechnung der Rohrverformung	26
3.4	Einflüsse auf die Messung	28
3.5	Kalibrieren der Messtechnik und Beurteilung der Messgenauigkeit	31
3.5.1	Überprüfung des Auflösungsvermögens	31
3.5.2	Kalibrieren der Messtechnik	32
3.5.3	Beurteilung der Messgenauigkeit	33
4	MESSUNG VON ROHRVERFORMUNGEN IN-SITU	35
4.1	Anwendung der entwickelten Messtechnik	35
4.2	Ergebnisse	37
4.3	Resumé	41
5	STATIK BIEGEWEICHER ROHRE UND PARAMETERSTUDIE	42
5.1	Statische Berechnung biegeweicher Rohre	42
5.1.1	Belastung	43
5.1.2	Lastaufteilung auf Rohr und Boden	48
5.1.3	Druckverteilung am Rohrumfang	59
5.1.4	Zustandsgrößen	61
5.1.5	Zwischenfazit	62
5.2	Parameterstudie	66
5.2.1	Vorstellung und Berechnung des Basis-Systems	66
5.2.2	Variation der Eingangsparameter	68
5.2.3	Darstellung der Ergebnisse	71
5.2.4	Einteilung der Parameter in Auswirkungsklassen	80
5.2.5	Fazit	84
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	85
6.1	Versuchsgrundlagen	85
6.1.1	Versuchsprogramm	85
6.1.2	Eingesetzte Materialien	86
6.1.3	Versuchsaufbau	89
6.1.4	Messtechnik und Prüfverfahren	90
6.2	Einbau nach Norm	92
6.2.1	Versuchsablauf	92
6.2.2	Ergebnisse	93
6.2.3	Bewertung	97
6.3	Einkornboden in der Leitungszone	98
6.3.1	Versuchsablauf	99
6.3.2	Ergebnisse	100

6.3.3	Bewertung	102
6.4	Flüssigboden	103
6.4.1	Versuchsablauf	104
6.4.2	Ergebnisse	105
6.4.3	Bewertung	107
6.5	Einbau ohne direkte Verdichtung neben dem Rohr	108
6.5.1	Versuchsablauf	108
6.5.2	Ergebnisse	110
6.6	Einfluss der Vorverformungen	114
6.6.1	Einbau ohne direkte Verdichtung neben dem Rohr	114
6.6.2	Einbau nach Norm	121
6.6.3	Einkornboden in der Leitungszone	122
6.6.4	Flüssigboden	122
6.7	Fazit	123
7	NUMERISCHE SIMULATION	124
7.1	Grundlagen der Methode der Finiten Elemente	124
7.2	Abbildung der durchgeführten Versuche mit einem ideal kreisrunden Rohr	127
7.2.1	Dimensionalität des Modells	127
7.2.2	Verwendeter Elementtyp	128
7.2.3	Größe des Berechnungsausschnittes, Lagerung und Symmetrie	130
7.2.4	Vernetzung	131
7.2.5	Kontaktbedingungen	132
7.2.6	Materialgesetze	135
7.2.7	Geometrische Nichtlinearität	140
7.2.8	Belastung	140
7.2.9	Abbildung des Bauablaufs	143
7.2.10	Sensitivitätsanalyse	145
7.3	Abbildung der durchgeführten Versuche mit vorverformten Rohren	154
7.3.1	Vergleich der Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen und Numerik	156
8	BAUBETRIEBLICHE UMSETZUNG	157
8.1	Probabilistischer Ansatz zur Ermittlung der erforderlichen Überhöhung	157
8.2	Anschlüsse und Verbindungen	160
8.3	Ansatz bei der Statischen Berechnung	161
8.3.1	Auswirkungen der Überhöhung auf den Stabilitätsnachweis	162

9	DARSTELLUNG WIRTSCHAFTLICHER SZENARIEN.....	168
9.1	Aufwand	168
9.2	Nutzen.....	168
9.3	Ermittlung wirtschaftlicher Vorteile	169
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	177
10.1	Zusammenfassung.....	177
10.2	Ausblick.....	180
11	LITERATURVERZEICHNIS	183
ANHANG A (zu Kapitel 2)		195
ANHANG B (zu Kapitel 3)		198
ANHANG C (zu Kapitel 5)		200
C.1	Silotheorie	200
C.2	Weitere Belastungen	201
C.3	Verformungsbeiwerte	203
C.4	Schnittgrößen.....	205
C.5	Spannungen / Dehnungen	206
ANHANG D (zu Kapitel 6)		207
ANHANG E (zu Kapitel 7)		223
ANHANG F (zu Kapitel 8).....		224
F.1	Konfidenzintervalle für Grabenbreiten zwischen 0,80 und 0,90 m	224
F.2	Nachweise zur Bemessung biegeweicher Rohre	225
F.3	Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung von Imperfektionen.....	228

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Einflussbereiche	2
Abbildung 2:	Lastabtragung biegesteifes Rohr, biegeweiches Rohr.....	5
Abbildung 3:	Definition der Leitungszone nach DIN EN 1610	10
Abbildung 4:	Auflagerwinkel und Auflagerung im Muffenbereich.....	11
Abbildung 5:	Typische Vertikalverformungsschwankungen entlang einer Rohrleitung...	16
Abbildung 6:	Typische zeitabhängige Vertikalverformung eines erdverlegten Rohres ...	17
Abbildung 7:	Rohrverformungsmesstechnik	19
Abbildung 8:	Aufbau des Laser-Wegaufnehmers	20
Abbildung 9:	Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware.....	21
Abbildung 10:	Verzerrte Verformungsfigur infolge Einzellast.....	22
Abbildung 11:	Berechnungsbasis der Rohrverformungen	26
Abbildung 12:	Graphische Ausgabe	27
Abbildung 13:	Auswirkung von Restwasser im Kanal.....	28
Abbildung 14:	Verformungsverlauf bei Restwasser im Rohr	29
Abbildung 15:	Messfehler infolge Reflexion, abgewinkelte Darstellung der Durchmesser	30
Abbildung 16:	Prüfanordnung und Auswertung der Tests zum Auflösungsvermögen	31
Abbildung 17:	Hochdruckspülung, Gas-Messung, Leitung absperren.....	35
Abbildung 18:	Steuerstand im Kofferraum des Institutsfahrzeuges	36
Abbildung 19:	Netzbetreiber A: Verformungsschwankungen in Längsrichtung	37
Abbildung 20:	Netzbetreiber B: Längsprofil PVC-U, DN 300	38
Abbildung 21:	Querschnitt bei Station 18,50 m	38
Abbildung 22:	Längsprofil PE-HD, DN 250	39
Abbildung 23:	Querschnitt bei Station 2,00 m	40
Abbildung 24:	Abgewinkelte Darstellung der Durchmesser bei Station 2,00 m	40
Abbildung 25:	Längsprofil PE-HD, DN 300.....	41
Abbildung 26:	Graben mit parallelen Wänden	44
Abbildung 27:	Graben mit geböschten Wänden	44
Abbildung 28:	Regelfahrzeuge	45
Abbildung 29:	Bodenspannung p infolge der Regelfahrzeuge.....	47
Abbildung 30:	Modell des schubsteifen Balkens	48
Abbildung 31:	Umlagerung der Bodenspannungen.....	49
Abbildung 32:	Bezeichnung und Zuordnung der Verformungsmoduln	49
Abbildung 33:	Horizontale Bettungssteifigkeit und Ausbreitung von q_n^*	52
Abbildung 34:	Vertikale Bettungssteifigkeit S_{Bv}	53
Abbildung 35:	Relative Ausladung.....	55
Abbildung 36:	Konzentrationsfaktor λ_{RG}	56
Abbildung 37:	Einfluss der Grabenwände auf die Umlagerung der Bodenspannungen ...	57
Abbildung 38:	Oberer Grenzwert des Konzentrationsfaktors λ_{f0}	57
Abbildung 39:	Lagerungsfall I und Lagerungsfall III.....	59
Abbildung 40:	Darstellung und Berechnung des Seitendrucks	60
Abbildung 41:	Temperaturabhängigkeit des E-Moduls und des Schubmoduls'	65
Abbildung 42:	Basis-System der Parameterstudie	66
Abbildung 43:	Einfluss der Wandstärke und des Außendurchmessers	71

Abbildung 44:	Einfluss des E-Moduls	71
Abbildung 45:	Wiedereinbau des ausgehobenen Bodens	72
Abbildung 46:	Bodenaustausch im gesamten Graben, G4 oder G3 anstehend	73
Abbildung 47:	Bodenaustausch in der Leitungszone, G4 oder G3 anstehend	73
Abbildung 48:	Einfluss der Verformungsmoduln E_1 und E_2	74
Abbildung 49:	Einfluss der Verformungsmoduln E_3 und E_4	74
Abbildung 50:	Einfluss der Wichte des Bodens und des Reibungswinkels.....	75
Abbildung 51:	Einfluss der Wandreibung und des Kriechens	75
Abbildung 52:	Einfluss von K_2	76
Abbildung 53:	Einfluss des Grundwassers	76
Abbildung 54:	Einfluss der Überdeckung.....	77
Abbildung 55:	Einfluss des Böschungswinkels und von α_{Bi}	77
Abbildung 56:	Einfluss des Auflagerwinkels und der relativen Ausladung.....	78
Abbildung 57:	Einfluss der Straßenverkehrslast.....	78
Abbildung 58:	Einfluss der Eisenbahn- und der Flugzeugverkehrslast.....	79
Abbildung 59:	Einteilung der Parameter in Auswirkungsklassen	82
Abbildung 60:	Korngrößenverteilung des eingesetzten Bodens	87
Abbildung 61:	Proctorkurve des Versuchsbodens	88
Abbildung 62:	Grundriss des Versuchsaufbaus.....	89
Abbildung 63:	Schnitt A – A und Schnitt B – B	89
Abbildung 64:	Ballongerät und Stahlringplatte.....	90
Abbildung 65:	Messung horizontaler und vertikaler Lageabweichungen	93
Abbildung 66:	Vertikalverformungen beim Versuch Einbau nach Norm I	93
Abbildung 67:	Einfluss des Verdichtungsgrades	94
Abbildung 68:	Rammsondierung: 2. Versuch Einbau nach Norm.....	95
Abbildung 69:	Horizontale Lageabweichungen	96
Abbildung 70:	Vertikale Lageabweichungen.....	96
Abbildung 71:	Querschnitt Versuchsaufbau Einkornboden	99
Abbildung 72:	Einkornboden in der Leitungszone	99
Abbildung 73:	Versuch „Einkornboden I“	100
Abbildung 74:	Versuch „Einkornboden II“	101
Abbildung 75:	Rammsondierung Einkornboden, 1. Versuch	102
Abbildung 76:	Rammsondierung Einkornboden, 2. Versuch	102
Abbildung 77:	Versuchsaufbau Flüssigboden	103
Abbildung 78:	Anlieferung Flüssigboden, Haltebänke aus steifem Flüssigboden.....	104
Abbildung 79:	Einfüllen des Flüssigbodens in den Graben	104
Abbildung 80:	Ziehen des Verbaus	105
Abbildung 81:	Versuch "Flüssigboden".....	105
Abbildung 82:	Visueller Eindruck des eingebauten und erhärteten Flüssigbodens	106
Abbildung 83:	Versuchsablauf: Einbau ohne direkte Verdichtung neben dem Rohr.....	108
Abbildung 84:	Schematische Darstellung Versuchsaufbau / Versuchsablauf.....	109
Abbildung 85:	Verformungsverlauf in Rohrlängsrichtung.....	110
Abbildung 86:	Verformungsentwicklung beim 3. Versuch, Station 0,50 m.....	111
Abbildung 87:	Zusammenhang zwischen vertikaler Rohrverformung und erzielter Verdichtung	112

Abbildung 88:	Rammprofile der Versuche 5 und 8	113
Abbildung 89:	Einfluss der Vorverformungen auf die Endverformungen, Gesamt-Punktwolke der Versuche	114
Abbildung 90:	Lineare und kubische Ausgleichsfunktion im Vergleich	115
Abbildung 91:	Filterung der Versuchsdaten KG-300, KG 450 und V300	116
Abbildung 92:	Lineare Regression für Versuche KG-300	116
Abbildung 93:	Ausgleichsfunktion 3. Grades für Versuche KG-300	117
Abbildung 94:	Gegenüberstellung von Versuchen KG-450 und KG-300	118
Abbildung 95:	Gegenüberstellung KG-300 und V-300	118
Abbildung 96:	Zusammenhang zwischen vertikaler Rohrverformung und Grabenbreite	119
Abbildung 97:	Einfluss der Vorverformungen, Grabenbreite 0,80 - 0,90 m	119
Abbildung 98:	Einfluss von Vorverformung und Verdichtungsgrad	120
Abbildung 99:	Einfluss von Vorverformung und Verdichtungsgrad	121
Abbildung 100:	Einordnung Einkornboden	122
Abbildung 101:	Vorverformungen beim Versuchstyp Flüssigboden	123
Abbildung 102:	Allgemeines Strukturschema der Theorie dreidimensionaler Kontinua	125
Abbildung 103:	Formfunktionen für ein Element des Typs CPE8R	129
Abbildung 104:	Geometrieabbildung für ein Element des Typs CPE8R	129
Abbildung 105:	Größe des Berechnungsausschnittes und Lagerung	130
Abbildung 106:	System und Vernetzung, Kontaktmodellierung Rohr-Boden	131
Abbildung 107:	Eckausrundung	132
Abbildung 108:	Harter Kontakt	133
Abbildung 109:	Reibungsgesetz nach Coulomb	133
Abbildung 110:	Vertikale Kontaktflächen zwischen den Bodenschichten	134
Abbildung 111:	Horizontale Kontaktflächen zwischen den Bodenschichten; Eckknoten	134
Abbildung 112:	Visualisierungsmöglichkeiten der Materialmodelle	136
Abbildung 113:	Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb	136
Abbildung 114:	Modell von Mohr-Coulomb im Hauptspannungsraum und in der Deviatorebene	137
Abbildung 115:	Fließfläche im Hauptspannungsraum	138
Abbildung 116:	Fließfläche des "Modified Drucker-Prager Modells" und Verschiebung der Kappe in Richtung der hydrostatischen Achse	138
Abbildung 117:	Verfestigungsgesetz	139
Abbildung 118:	Prinzipieller Aufbau eines Sensors	141
Abbildung 119:	Verwendeter Sensor Modell-Nr.: 5315	142
Abbildung 120:	Foliendrucksensor und Spannungsverteilung nach Vibration	143
Abbildung 121:	Simulation des Bauablaufs	144
Abbildung 122:	Verformungsmoduln im Basis-System	146
Abbildung 123:	Ergebnisausgabepunkte am Rohr	147
Abbildung 124:	Variation von c' , ψ , μ , E_2 und $\sigma_{\text{Vibration}}$	148
Abbildung 125:	Variation von c' , R , α und E_2 beim Materialmodell „Modified Drucker-Prager“	149
Abbildung 126:	Variation des Verformungsmoduls E_2 und der Verdichtungslast	150
Abbildung 127:	Vertikalverformungen	151

Abbildung 128:	Horizontalverformungen	152
Abbildung 129:	Spannungen im Scheitel und in der Sohle des Rohres.....	153
Abbildung 130:	Spannungen im Kämpferbereich des Rohres	153
Abbildung 131:	Gegenüberstellung der Ergebnisse	154
Abbildung 132:	Variation der elliptischen Überhöhung	155
Abbildung 133:	Ergebnisse der numerischen Simulation für verschiedene Überhöhungsgrade	156
Abbildung 134:	Obere und untere 95%-Quantilgrenzen	159
Abbildung 135:	Elliptisch überhöhtes Kunststoffrohr	160
Abbildung 136:	Scheiteldruckprüfung	160
Abbildung 137:	Abminderungsfaktor κ_{v2} der Beullast bei Erd-/Verkehrslasten q_v	164
Abbildung 138:	Durchschlagbeiwert α_D für den kritischen äußeren Wasserdruck	165
Abbildung 139:	Untersuchte Szenarien der Modellrechnung.....	170
Abbildung 140:	Schematische, stark überzeichnete Darstellung der Auswirkungen überhöhter und nicht überhöhter Rohre	179
Abbildung 141:	Extrusionsanlage	195
Abbildung 142:	Struktur der PP-Typen	196
Abbildung 143:	Doppelschneckenextruder	197
Abbildung 144:	Funktionsprinzip Laser-Triangulationsverfahren	198
Abbildung 145:	Auflösung der Geometrie	198
Abbildung 146:	Falltürexperiment, Berechnungsmodell	200
Abbildung 147:	Belastungsbild UIC 71 und vertikale Bodenspannung p	201
Abbildung 148:	Lastbilder der Bemessungsflugzeuge, Bodenspannung p_v	202
Abbildung 149:	Vergleich der Ergebnisse für die Kohäsion	223
Abbildung 150:	Obere und untere 95%-Quantilgrenzen, $b = 0,80$ m bis $b = 0,90$ m ...	224
Abbildung 151:	Abminderungsfaktoren κ_{a1} bei lokalen Imperfektionen.....	229
Abbildung 152:	Abminderungsfaktoren κ_{a2} bei zweiwelligen Imperfektionen	229

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Erhältliche Nenn-Ringsteifigkeiten von Kunststoffrohren und zugehörige Normen	6
Tabelle 2:	Werkstoffkennwerte	7
Tabelle 3:	Rechenwerte der Bodengruppen	8
Tabelle 4:	Abminderungsfaktoren α_{Bi} zur Berücksichtigung der Einbaubedingungen	12
Tabelle 5:	Wandreibungswinkel δ	12
Tabelle 6:	Geeignete Verdichtungsgeräte, Schütthöhen und Zahl der Übergänge	13
Tabelle 7:	Verformungsgrenzwerte für Kunststoffrohre nach ATV-DVWK-A 127	15
Tabelle 8:	Alte Abgrenzung der Zustandsklassen nach ATV-M 149, 1999	18
Tabelle 9:	Neue Abgrenzung der Zustandsklassen nach DWA-M 149-3, 2007	18
Tabelle 10:	Vermessung eines Einstellrings DN 300	32
Tabelle 11:	Übersicht der untersuchten Haltungen	35
Tabelle 12:	Lasten und Aufstandsflächen der Regelfahrzeuge	45
Tabelle 13:	Hilfslasten und Hilfsradialen	46
Tabelle 14:	Stoßbeiwerte für Straßenverkehrslasten nach DIN 4033	47
Tabelle 15:	Rechenwerte der Verformungsmoduln E_1 und E_{20} unabhängig von der Anfangsverdichtung	50
Tabelle 16:	Erddruckverhältnis K_2	54
Tabelle 17:	Ausgangsdaten des Basis-Systems	67
Tabelle 18:	Rangfolge der Sensitivität	81
Tabelle 19:	Übersicht der durchgeführten Versuche	85
Tabelle 20:	Technische Daten der verwendeten Rohre	86
Tabelle 21:	Hauptgruppen nach den Hauptbestandteilen	87
Tabelle 22:	Unterteilung gemischtkörniger Böden nach dem Massenanteil des Feinkorns.. ..	87
Tabelle 23:	Unterteilung grobkörniger Böden	88
Tabelle 24:	Rammsondierung Flüssigboden	106
Tabelle 25:	Abbruchkriterien Rammsondierung	107
Tabelle 26:	Technische Daten der Vibrationsplatte "Vibromax ATN 1000 D"	143
Tabelle 27:	Ausgangsdaten des Basis-Systems der FE-Analyse	146
Tabelle 28:	Berechnungsbeispiel zum Stabilitätsnachweis	166
Tabelle 29:	Ergebnisse des Stabilitätsnachweises ohne und mit Berücksichtigung der positiven Vorverformung	167
Tabelle 30:	Ermittlung der Kosten für den Austausch der Leitung	171
Tabelle 31:	Übersicht der untersuchten Szenarien	175
Tabelle 32:	Bodenspannungen p infolge Eisenbahnverkehrslasten	201
Tabelle 33:	Verformungsbeiwerte für Biegemomente	204
Tabelle 34:	Verformungsbeiwerte für Normalkräfte	204
Tabelle 35:	Verformungsbeiwerte für Querkräfte	204
Tabelle 36:	Sicherheitsbeiwerte	228

ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND INDIZES

a	[-]	Relative Ausladung
a	[mm]	Länge des großen Halbmessers einer Ellipse (nur Kapitel 7)
a'	[-]	Wirksame relative Ausladung
a _F	[-]	Korrekturfaktor für Straßenverkehrslasten
A	[cm ²]	Kolbenfläche bei der Bestimmung des Verdichtungsgrades mit dem Ballonverfahren
A	[Nm]	Mechanische Arbeit
A _i	[-]	Überschüttungsbedingungen für die Grabenverfüllung (i=1-4)
ATV		Abwassertechnische Vereinigung e. V.
ATV-A		Arbeitsblatt der ATV
ATV-DVWK		Zusammenschluss der Abwassertechnischen Vereinigung e.V. und dem Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
ATV-DVWK-A		Arbeitsblatt der ATV-DVWK
ATV-DVWK-M		Merkblatt der ATV-DVWK
ATV-M		Merkblatt der ATV
α	[-]	Irrtumswahrscheinlichkeit
α	[-]	Konus-Kappen-Übergangsfaktor (Kapitel 7)
α _{II}	[-]	Vergrößerungsfaktor nach Theorie II. Ordnung für Biegemomente bei nicht linearen Nachweisen
α _{II,pa}	[-]	Vergrößerungsfaktor nach Theorie II. Ordnung für Biegemomente bei nicht linearen Nachweisen für äußeren Wasserdruck
α _{II,qv}	[-]	Vergrößerungsfaktor nach Theorie II. Ordnung für Biegemomente bei nicht linearen Nachweisen für die vertikale Gesamtlast
α _B	[-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der relativen Grabenbreite und der Einbaubedingungen
α _{Bi}	[-]	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Einbaubedingungen
α _d	[-]	Durchschlagbeiwert als Funktion der Systemsteifigkeit V _{RB} und des Radius Wanddickenverhältnisses r _m /s
b	[m]	Grabenbreite in Höhe des Rohrscheitels
b	[mm]	Länge des kleinen Halbmessers einer Ellipse (nur Kapitel 7)
b _m	[m]	Mittlere Grabenbreite
B		Verzerrungs-Verschiebungs-Matrix
B^T		Transponierte Verzerrungs-Verschiebungs-Matrix
B _i	[-]	Einbettungsbedingung in der Leitungszone
BFZ	[kN/m ²]	Bemessungsflugzeug
2BP		Messung nach Ballastierung mit 2 Betonplatten
β	[°]	Böschungswinkel
β	[°]	Konuswinkel (nur gültig in Kapitel 7)
β _i	[-]	Modellparameter der Ausgleichsrechnung

c'	[kN/m ²]	Kohäsion
c_h^*	[-]	Verformungsbeiwert der horizontalen Durchmesseränderung
$c_{h,qv}$	[-]	Verformungsbeiwert für Δd_h infolge q_v
c_{h,qh^*}	[-]	Verformungsbeiwert für Δd_h infolge q_h^*
$c_{h,w}$	[-]	Verformungsbeiwert für Δd_v infolge Wasserfüllung
c_v^*	[-]	Verformungsbeiwert der vertikalen Durchmesseränderung
$c_{v,qv}$	[-]	Verformungsbeiwert für Δd_v infolge q_v
c_{v,qh^*}	[-]	Verformungsbeiwert für Δd_v infolge q_h^*
C_1	[N/mm ²]	Bettungszahl beim Modell des schubsteifen Balkens
C_B	[N/mm ²]	Elastische Bettung
d	[kN/m ²]	Konus-Achsenabschnitt
d_{10}, d_{60}	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % bzw. 60 % Massenanteil
d_a, d_i	[mm]	Rohraußendurchmesser / Rohrrinnendurchmesser
$\bar{d}_{a,eq}$	[mm]	Durchmesser des äquivalenten Kreisquerschnittes
$d_{a,max}, d_{i,max}$	[mm]	Maximaler Rohraußendurchmesser / Rohrrinnendurchmesser
$d_{a,min}, d_{i,min}$	[mm]	Minimaler Rohraußendurchmesser / Rohrrinnendurchmesser
$d_{a,mittel}, d_{i,mittel}$	[mm]	Mittlerer Rohraußendurchmesser / Rohrrinnendurchmesser
Δd_h	[mm]	Horizontale Durchmesseränderung
$\bar{d}_i$	[mm]	Mittlerer Innendurchmesser
d_m	[mm]	Mittlerer Rohrdurchmesser (Durchmesser der Schwereachse)
Δd_v	[mm]	Vertikale Durchmesseränderung
D_e		Gleichgewichts -Differentialoperator
DFAKE	[-]	Diskontierungsfaktor
DIN		Deutsches Institut für Normung e.V. / DIN-Norm
DIN EN		DIN-Norm und gleichzeitig auch europäische Norm (EN)
DIN EN ISO		DIN-Norm und gleichzeitig auch europäische Norm (EN) sowie internationale Norm (ISO = International Organization for Standardization)
DIN V ENV		Vornorm einer DIN-Norm und europäischen Norm
D_k		Kinematischer Differentialoperator
D_{Pr}	[%]	Verdichtungsgrad
DN	[mm]	Nenndurchmesser
DWA		Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (vormals ATV-DVWK)
DWA-A		Arbeitsblatt der DWA
DWA-M		Merkblatt der DWA
δ	[°]	Wandreibungswinkel
δ	[%]	Verformung / Deformation
δ_h	[%]	Relative horizontale Durchmesseränderung / Verformung
δ_{max}	[%]	Maximale Durchmesseränderung / Verformung
δ_{min}	[%]	Minimale Durchmesseränderung / Verformung
δ_v	[%]	Relative vertikale Durchmesseränderung / Verformung

$\delta_{v,0}$	[%]	Vertikale Vorverformung
$\delta_{v,e}$	[%]	Vertikale Endverformung am Ende eines Versuches
$\delta_{v,\text{Basis-System}}$	[%]	Vertikalverformung des Basis-Systems der Parameterstudie
$\max \Delta \delta_v $	[%]	Maximale betragsmäßige Änderung der vertikalen Rohrverformung gegenüber dem Basis-System der Parameterstudie
$\min (\delta_{v,\text{untersuchter Parameter}})$		Minimale vertikale Rohrverformung, die bei der Variation des betreffenden Parameters aufgetreten ist in Prozent
$\hat{\mathbf{e}}$		Residuenvektor
E	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul
$\mathbf{E}$		Algebraischer Operator des Elastizitätsgesetzes (nur Kapitel 7)
E_i	[N/mm ²]	Verformungsmodul in den Bodenzonen i (i=1-4)
E_{20}	[N/mm ²]	Tabellenwert zur Berechnung von E_2
E_B	[N/mm ²]	Verformungsmodul des Bodens
$E_{B,\sigma}$	[N/mm ²]	Spannungsabhängiger Verformungsmodul des Bodens
E_R	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes
$E_{R,K}$	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes, Kurzzeit
$E_{R,L}$	[N/mm ²]	Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes, Langzeit
ε	[%]	Dehnung
$\boldsymbol{\varepsilon}$		Vektor der inneren Weggrößen
$\varepsilon_{pa}, \varepsilon_{qv}$	[%]	Dehnung infolge äußeren Wasserdrucks / vertikaler Gesamtlast
ε_{so}	[%]	Maximale Dehnung in der Sohle
f	[-]	Anzahl der Freiheitsgrade
f_1	[-]	Reduktionsfaktor für Kriechen des Bodens
f_2	[-]	Abminderungsfaktor für E_{20} bei Grundwasser
F_A, F_E	[kN]	Hilfslasten
F_{Damm}	[N/mm ²]	Äquivalente Flächenlast für den Damm in der numerischen Simulation (Kapitel7)
F_W	[kN]	Kraft infolge Wasserfüllung
FEM		Finite Elemente Methode
FGSV		Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V.
φ	[-]	Stoßbeiwert
φ'	[°]	Winkel der inneren Reibung
$\varphi_{\delta_{\max}}$	[°]	Winkel, bei dem die maximale Durchmesseränderung auftritt
$\varphi_{\delta_{\min}}$	[°]	Winkel, bei dem die minimale Durchmesseränderung auftritt
$\Delta \varphi$	[°]	Winkelinkrement
$\Delta \varphi'$	[°]	Streubreite der Reibungswinkel
G		Kurzzeichen für Boden mit Hauptbestandteil Kieskorn
G_i	[-]	Bodengruppe i (i=1-4)
GE		Kies, eng gestuft

GFK		Glasfaserverstärkter Kunststoff
GI		Kies-Sand-Gemisch, intermittierend gestuft
GT		Kies-Ton-Gemisch mit 5 % - 15 % Feinkornanteil
GU		Kies-Schluff-Gemisch mit 5 % - 15 % Feinkornanteil
GW		Kies-Sand-Gemisch, weit gestuft
$G_{\text{vibr.}}$	[kg]	Dienstgewicht des Verdichtungsgerätes
γ	[%]	Verzerrung bzw. Gleitung
γ	[-]	Sicherheitsbeiwert
γ_B	[kN/m ³]	Wichte des Bodens
γ_B'	[kN/m ³]	Wichte des Bodens unter Auftrieb
γ_{pa}	[-]	Einzelsicherheit beim Lastfall äußerer Wasserdruck
γ_{qv}	[-]	Einzelsicherheit beim Lastfall vertikale Gesamtlast
γ_{qv+pa}	[-]	Sicherheit bei der Lastfallkombination aus vertikaler Gesamtlast und äußerem Wasserdruck
γ_R	[kN/m ³]	Wichte des Rohrwerkstoffes
γ_w	[kN/m ³]	Wichte des Wassers
h	[m]	Überdeckungshöhe über Rohrscheitel
h_{Damm}	[m]	Höhe des Damms
h_w	[m]	Höhe des Wasserspiegels über der Rohrsohle
i	[%]	Inflationsrate
I	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment
j	[%]	Zinssatz
K		Lokale Element-Steifigkeitsmatrix
K^*	[-]	Reaktionsdruckbeiwert
K_1	[-]	Erddruckverhältnis
K_2	[-]	Erddruckverhältnis
$K_{\text{Austausch}}$	[€]	Kosten für den Austausch der Leitung unmittelbar nach Abnahmeprüfung
$K_{\text{Aval; p}}$	[€]	jährliche Avalgebühren in Abhängigkeit des Zinssatzes p
$K_{\text{Inspektion}}$	[€]	Kosten der Kanalinspektion
$K_{\text{Szenario, i}}$	[€]	Kosten für Szenario „i“
$K_{\text{Vermessung}}$	[€]	Kosten der Innenvermessung
Kämpferhöhe nV		Messung nach Verdichtung des eingebauten Bodens bis zur Kämpferhöhe des Rohres
κ, κ_0	[-]	Abminderungsbeiwerte für die Grabenlast nach der Silotheorie
$\kappa_{a1}, \kappa_{a2}, \kappa_{v2}$	[-]	Abminderungsfaktor der kritischen Beullast
κ_β	[-]	Abminderungsbeiwert für die Grabenlast nach der Silotheorie bei beliebigem Böschungswinkel β
L_0	[cm]	Nullmessung beim Ballonverfahren

L_1	[cm]	Ablesung nach der Entnahme des Bodens aus der Prüfgrube beim Ballonverfahren
λ	[-]	Konzentrationsfaktor
λ_B	[-]	Konzentrationsfaktor für die Spannung im Boden neben dem Rohr
λ_{Io}	[-]	Oberer Grenzwert des Konzentrationsfaktors über dem Rohr
λ_{Iu}	[-]	Unterer Grenzwert des Konzentrationsfaktors über dem Rohr
λ_R	[-]	Konzentrationsfaktor für die Spannung über dem Rohr
λ_{RG}	[-]	Konzentrationsfaktor für die Spannung über dem Rohr unter Berücksichtigung der relativen Grabenbreite
m	[m]	Momentenbeiwert
m_d	[g]	Masse der trockenen Probe beim Ballonverfahren
m_f	[g]	Masse der feuchten Probe beim Ballonverfahren
m_w	[g]	Masse des Wassers beim Ballonverfahren
n	[-]	Anzahl der Elementknoten (nur Kapitel 7)
M	[kNm]	Moment
M_{PA}	[kNm/m]	Biegemoment infolge äußeren Wasserdrucks
μ	[-]	Reibungsbeiwert
$\mu_{Y(x_i)}$		Erwartungswert für die abhängige Variable Y an der Stelle x_i
n	[-]	Anzahl der Messungen
n	[a]	Anzahl der Jahre (nur Kapitel 9)
N	[kN]	Normalkraft
$\mathbf{N}$		Normalgleichungsmatrix
v	[-]	Querkontraktionszahl
OH		Grob- bis gemischtkörnige Böden mit Beimengungen humoser Art
OT		Tone mit organischen Beimengungen und organogene Tone
OU		Schluffe mit organischen Beimengungen und organogene Schluffe
Ω		Matrix der Formfunktionen
Ω_i		Formfunktion für den Elementknoten „i“ ($i=1-8$)
p	[kN/m ²]	Bodenspannung infolge Straßenverkehrslast
p	[%]	Avalzins
$\mathbf{p}$		Vektor der äußeren Kraftgrößen
p_0	[kN/m ²]	Flächenlast
p_a	[kN/m ²]	Äußerer Wasserdruck
krit p_a	[kN/m ²]	Kritischer äußerer Wasserdruck
p_F	[kN/m ²]	Maximale Spannung unter Radlasten und Radaufstandsflächen
p_v	[kN/m ²]	Vertikalspannungen im Boden infolge Verkehrslast
P	[-]	Wahrscheinlichkeit
P	[kN]	Kraft, Belastung
p_f	[-]	Versagenswahrscheinlichkeit

P_E	[kN/m ²]	Erdlast
PE-HD		Polyethylen hoher Dichte
PP		Polypropylen
PP-B		Polypropylen-Block-Copolymer
PP-H		Polypropylen-Homopolymer
PP-R		Polypropylen-Random-Copolymer
PVC		Polyvinylchlorid
PVC-U		Polyvinylchlorid unplasticized (weichmacherfrei)
ψ	[°]	Dilatanzwinkel
q_h	[kN/m ²]	Horizontale Bodenspannungen am Rohr
q_h^*	[kN/m ²]	Horizontaler Bettungsreaktionsdruck
q_{hw}	[kN/m ²]	Horizontaler Bettungsreaktionsdruck für den Lastfall Wasser
q_v	[kN/m ²]	Vertikale Gesamtlast
krit q_v	[kN/m ²]	Kritische Beullast
Q	[kN]	Querkraft, Schubkraft
r	[mm]	Radius
r	[-]	Korrelationskoeffizient
$\mathbf{r}$		Geometrische Randbedingung zur Erfassung der Lagerung (nur gültig in Kapitel 7)
r	[-]	Koordinate des Einheitselements (nur gültig in 7.2.2)
r_A, r_E	[m]	Hilfsradien
Δr	[mm]	Additionskonstante zur Berücksichtigung der Abrückung des Sensors aus der Rotationsachse und einer systematischen Messabweichung
$\bar{r}_i$	[mm]	Mittlerer Innenradius
Δr_K	[mm]	Additionskonstante zur Korrektur systematischer Messabweichungen
Δr_v	[mm]	Maß der radialen Verschiebung des Lasersensors aus der Rotationsachse
r_L	[mm]	Distanzwert bei der Lasertriangulation
r'_L	[mm]	Distanzwert bei der Lasertriangulation
$r_{L,o}$	[mm]	Distanzwert bei der Lasertriangulation
$r'_{L,o}$	[mm]	Distanzwert bei der Lasertriangulation
r_m	[mm]	Radius der Schwereachse der Rohrwand
R	[-]	Kappenformfaktor
$R_i^{(0)}$	[mm]	Schätzwerte für den Radius
$\mathbf{R}_r$		Differentialoperator für geometrische Randbedingungen
$\mathbf{R}_t$		Differentialoperator für Kräfte- und Randbedingungen
ρ	[g/cm ³]	Dichte
ρ_{Pr}	[g/cm ³]	Proctordichte
s	[%]	Standardabweichung
s	[-]	Koordinate des Einheitselements

s^2	[% ²]	Empirische Varianz
$s_{\max}$	[mm]	Maximale Wandstärke
$s_{\min}$	[mm]	Minimale Wandstärke
s_{mittel}	[mm]	Mittlere Wandstärke
$s_{\bar{x}}$	[%]	Standardabweichung des Mittelwertes $s_{\bar{x}}$
S	[-]	Sicherheitswahrscheinlichkeit
S		Kurzzeichen für Boden mit Hauptbestandteil Sand
S_0	[N/mm ²]	Langzeitrohrsteifigkeit von Kunststoffrohren
S_{Bh}, S_{Bv}	[N/mm ²]	Bettungssteifigkeiten
S_R	[N/mm ²]	Rohrsteifigkeit
SE		Sand, eng gestuft
SI		Sand-Kies-Gemische, intermittierend gestuft
$SLW\ 30$		Regelfahrzeug
$SLW\ 60$		Regelfahrzeug
SN	[N/mm ²]	Nennringsteifigkeit
ST		Sand-Ton-Gemisch
SU		Sand-Schluff-Gemisch
SW		Sand-Kies-Gemisch, weit gestuft
Scheitelhöhe nV		Messung nach Verdichtung des eingebauten Bodens bis zum Rohrscheitel
σ	[N/mm ²]	Spannung
σ		Vektor der inneren Kraftgrößen
$\hat{\sigma}^2$	[% ²]	Residuenvarianz
σ_{so}	[N/mm ²]	Spannung in der Sohle des Rohres
σ_R	[N/mm ²]	Rechenwert der Biegezugfestigkeit
$\sigma_{R,K}$	[N/mm ²]	Rechenwert der Biegezugfestigkeit, Kurzzeit
$\sigma_{R,L}$	[N/mm ²]	Rechenwert der Biegezugfestigkeit, Langzeit
$\sigma_{\text{Vibration}}$	[N/mm ²]	Verdichtungslast
$\hat{\sigma}_{\hat{y}(x_i)}$	[%]	Standardabweichung
$\hat{\sigma}_{\hat{y}(x_i)}^2$	[% ²]	Varianz der Schätzwerte
$\hat{\Sigma}_{\hat{\beta}}$		Empirische Kovarianzmatrix der Parameterschätzwerte
$\hat{\Sigma}_{\hat{y}}$		Empirische Kovarianzmatrix der Schätzwerte
$t_{f,1-\frac{\alpha}{2}}$	[-]	Quantilwert der t-Verteilung
t		Kräfterandbedingung zur Abbildung vorgegebener Randlasten
T		Ton mit 5 % - 15 % Massenanteil des Feinkorns
T^*		Ton mit 15 % - 40 % Massenanteil des Feinkorns
TA		Ton, ausgeprägt plastisch
TL		Ton, leicht plastisch
TM		Ton, mittelpastisch
TPBF-StB		Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau

τ_{crit}	[N/mm ²]	Kritische Scherspannung
u		Vektor der äußeren Weggrößen (nur gültig in Kapitel 7)
u		Verschiebung des Punktes p innerhalb oder auf dem Rand des wirklichen Elements (nur gültig in 7.2.2)
u	[mm, %]	Messunsicherheit
u _{2, Knoten i}	[mm]	Verschiebung des Knotens „i“ in vertikaler Richtung
u _i	[mm]	Verschiebung der Elementknoten i des wirklichen Elements
u _s	[mm, %]	Systematische Komponente der Messunsicherheit
u _z	[mm, %]	Zufallskomponente der Messunsicherheit
U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
U		Schluff mit 5 % - 15 % Massenanteil des Feinkorns
U*		Schluff mit 15 % - 40 % Massenanteil des Feinkorns
UA		Schluff, ausgeprägt plastisch
UIC	[kN/m ²]	Eisenbahnverkehrslast
UL		Schluff, leicht plastisch
UM		Schluff, mittelpastisch
UP-GF		Ungesättigtes Polyesterharz – glasfaserverstärkt
v	[mm]	Verschiebung des Punktes p innerhalb oder auf dem Rand des wirklichen Elements
v _i	[mm]	Verschiebung der Elementknoten „i“ des wirklichen Elements
V	[cm ³]	Volumen beim Ballonverfahren
v		Vektor der Knotenverschiebungen
V _i		Verdichtbarkeitsklasse (i=1-3)
V _{RB}	[-]	Systemsteifigkeit
V _S	[-]	Steifigkeitsverhältnis
VCM		Vinylchlorid
VOB		Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
w _{opt}	[%]	Optimaler Wassergehalt zur Proctordichte
x	[mm]	Koordinate des Punktes p innerhalb oder auf dem Rand des wirklichen Elements
x _i	[mm]	Aus den gemessenen Polarkoordinaten gewonnene kartesische Koordinaten
x _i	[%]	Messwerte für δ_v (nur gültig in 3.5.2)
x _i	[mm]	Koordinate des Elementknoten i (nur gültig in Kapitel 7)
x _i [*]	[mm]	Globale kartesische Koordinate
x _M	[mm]	x-Koordinate des Kreismittelpunktes
x _M ⁽⁰⁾	[mm]	Parameterschätzwerte (Koordinaten des gesuchten Kreismittelpunktes)
X		Koeffizientenmatrix
X^T		Transponierte Koeffizientenmatrix

$\mathbf{y}$		Zufallsvektor (nur gültig in Kapitel 8)
y	[mm]	Koordinate des Punktes p innerhalb oder auf dem Rand des wirklichen Elements
y_i	[mm]	Aus den gemessenen Polarkoordinaten gewonnene kartesische Koordinaten
y_i	[mm]	Koordinate des Elementknoten i (nur gültig in Kapitel 7)
y'_i	[mm]	Globale kartesische Koordinate
y_M	[mm]	y-Koordinate des Kreismittelpunktes
$y_M^{(0)}$	[mm]	Parameterschätzwerte (Koordinaten des gesuchten Kreismittelpunktes)
$\hat{y}(x_i)$		Schätzwert an der Stelle x_i
z	[-]	Exponent zur Berechnung von E_B
ZTVA-STB 97/06		Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen, Ausgabe 1997/Fassung 2006
ZTVE-StB 94/97		Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 1994/Fassung 1997
ζ	[-]	Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit