



Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen
Heft 42



Ulf Helbig

TRAGVERHALTEN UND BE- RECHNUNG VON MEHR- SCHICHTIGEN VER- BUNDROHREN

LOAD-BEARING BEHAVIOUR AND ANALYSIS
OF MULTILAYER COMPOSITE PIPES

Der Titel und der Inhalt des Heftes entsprechen der zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden am 21.07.2009 eingereichten und genehmigten Dissertation von Dipl.-Ing. Ulf Helbig.

Rigorosum, Demonstration und Disputation: 05.02.2010

Vorsitzender der Promotionskommission:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Zastrau (TU Dresden)

Gutachter:
Univ.-Prof. (em.) habil. Dr.-Ing. Hans-B. Horlacher (TU Dresden)
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Wolfgang Günthert (Universität der
Bundeswehr München)

Dresden, 2010

Bibliothek Wasser und Umwelt
(TU Darmstadt)



61620753

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	vii
Bildverzeichnis	xv
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Wissenschaftliche Aufgabenstellung	2
1.3 Zielsetzung und Abgrenzung der eigenen Arbeit	2
2 Überblick und aktueller Wissensstand	5
2.1 Wesentliche Rohrwerkstoffe und Rohrtypen	5
2.2 Metallische Rohre	5
2.2.1 Duktiles Gusseisen (GGG)	5
2.2.2 Stahl	6
2.3 Thermoplastische Rohre	7
2.3.1 Polyvinylchlorid (PVC)	7
2.3.2 Polyethen (PE-HD, PE-X)	8
2.4 Mineralisch gebundene Rohre	9
2.4.1 Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonrohre	9
2.4.2 Steinzeugrohr (Stz)	10
2.5 Verbundrohrtechniken	10
2.5.1 Glasfaserverstärkter, duroplastischer Kunststoff (GfK)	10
2.5.2 Mehrschichtkonstruktionen	11
2.6 Berechnungsverfahren	12
2.6.1 Allgemeines zur Berechnung	12
2.6.2 Analytische Berechnung auf inneren Über-/Unterdruck und äußeren Überdruck	14
2.6.3 Analytische Berechnung auf Lasten infolge Erdeinbettung	17
2.6.3.1 Erdstatische Berechnung mit dem Ersatzmodell	17
2.6.3.2 Erdstatische Berechnung nach der Kontinuumstheorie	21
2.6.4 Numerische Finite-Elemente-Methode (FEM)	22
2.7 Textilbeton (TRC)	23
2.8 Resümee und Schlussfolgerungen zum aktuellen Stand	24
3 Grundlagen und notwendige Voruntersuchungen	25
3.1 Konstruktiver Aufbau des textilibewehrten Mehrschichtrohrs	25
3.2 Geometrische Kenngrößen	26
3.3 Materialeigenschaften	27
3.3.1 Rezepturgestaltung und Frischbetoneigenschaften der Feinbetonmatrix	27
3.3.2 Grundlegende Festbetoneigenschaften der Matrix	29
3.3.3 Basiswert der Betondruckfestigkeit	29
3.3.4 Basiswert der Betonzugfestigkeit	30
3.3.5 Basiswert der Betonscherfestigkeit	32

3.3.6	Basiswert des Betonelastizitätsmoduls	32
3.3.7	Schwinden der Betonmatrix	34
3.3.8	Mitwirkung des Betons zwischen Rissen (Tension Stiffening)	34
3.3.9	Eigenschaften der eingesetzten textilen Bewehrungsstruktur	36
3.3.10	Abgeleitete Grundkennwerte des textilbewehrten Betonelementes	40
3.3.11	Grundkennwerte des Kunststoffinnenrohrs	43
3.4	Mechanische Kenngrößen und Querschnittswerte der mehrschichtigen Rohrwandung	48
4	Experimentelle und rechnerische Analysen	51
4.1	Grundlagen	51
4.1.1	Prüfkörperherstellung	51
4.1.1.1	Prüfkörper zur Eigenspannungsbestimmung im Kunststoffrohr	51
4.1.1.2	Prüfkörper zur Bestimmung des Schwindverhaltens	51
4.1.1.3	Prüfkörper für Innendruckbeanspruchung	51
4.1.1.4	Prüfkörper für die Biegebeanspruchung (Scheiteldruckversuch)	53
4.1.2	Messdaten	53
4.1.2.1	Messwelterfassung	53
4.1.2.2	Mittelwertbildung und Regressionsanalyse der Messdaten	55
4.1.3	Temperatureinflüsse	56
4.1.4	Rotationssymmetrische und nicht-rotationssymmetrische Beanspruchungszustände	56
4.1.5	Grenzzustände	58
4.2	Eigenspannungen in der Mehrschichtwandung	59
4.2.1	Eigenspannungsproblematik in Rohrleitungen	59
4.2.2	Eigenspannungen im textilbewehrten Mehrschichtrohr	61
4.2.3	Eigenspannungen infolge Kunststoffextrusion (PI)	62
4.2.3.1	Nachweisverfahren	62
4.2.3.2	Versuchsdurchführung zu Eigenspannungen im Kunststoffrohr (PI)	65
4.2.3.3	Innere Spannungs- und Dehnungszustand infolge Extrusion	66
4.2.4	Eigenspannungen infolge Betonhärtung (PII)	71
4.2.4.1	Nachweismethodik	71
4.2.4.2	Versuchsdurchführung zum Schwindverhalten der Betonmatrix	72
4.2.4.3	Zeitfunktionsansatz des mittleren Schwindwertes $E_{cs,m}$	74
4.2.4.4	Schwind- und Schrumpfdehnungszustand infolge Hydratation	75
4.2.4.5	Innere Eigenspannungszustand infolge Hydratation	79
4.2.4.6	Eigenschaften des textilbewehrten Betonelements	88
4.2.4.7	Eigenschaften des inneren Kunststoffelements	89
4.2.4.8	Auswertung des schwindinduzierten Eigenspannungszustand (PII)	90
4.2.5	Resultierender Eigenspannungszustand in einem Rohrwandknoten (PI + PII)	94
4.2.6	Anwendungsbeispiele zum Eigenspannungszustand	95
4.2.6.1	Schwindinduzierter Eigenspannungszustand (PII)	95
4.2.6.2	Überlagerter Eigenspannungszustand (PI + PII)	97
4.3	Beanspruchung durch inneren Überdruck	98
4.3.1	Statik des Druckrohrs – Ableitung Versuchsverfahren	98
4.3.2	Kurzzeit-Innendruck-Versuche – Verfahren und Durchführung	99
4.3.3	Innere Beanspruchung eines geschichteten Rohrwandknotens bei innerem Überdruck (p_i)	104
4.3.3.1	Innere Spannungs- und Dehnungsgrößen infolge inneren Überdrucks (p_i)	104
4.3.3.2	Steifigkeitsverteilung in der Rohrwandung	107
4.3.3.3	Eigenschaften des textilbewehrten Betonelements	111
4.3.3.4	Eigenschaften des Kunststoffelements	117
4.3.4	Verallgemeinertes Berechnungsverfahren für Innendruck	118
4.3.5	Rissbildung	122
4.3.6	Dauerlastabhängiges Kriechverhalten unter Innendruck	124
4.3.6.1	Innendruck-Versuche – Verfahren und Durchführung	124

4.3.6.2	Zeitfunktionsansatz	128
4.3.6.3	Prognose des dauerlastabhängigen Kriechverhaltens unter Innendruck	137
4.3.7	Anwendungsbeispiele für Innendruckbeanspruchung	140
4.3.7.1	Spannungs- und Dehnungszustand	141
4.3.7.2	Rissbildung und Rissentwicklung	141
4.3.7.3	Dauerlastabhängiges Kriechverhalten	142
4.4	Beanspruchung durch äußeren Überdruck	143
4.4.1	Äußerer Überdruck infolge hydrostatischen Wasserdrucks	143
4.4.2	Innere Spannungs- und Dehnungsgrößen infolge äußeren Überdrucks (p_a)	144
4.4.3	Diskussion der Stabilitätsgefahr gegenüber äußerem Überdruck (p_a)	149
4.4.3.1	Stabilitätsverhalten der Gesamt-Rohrwandung bei äußerem Überdruck	150
4.4.3.2	Stabilitätsverhalten der Kunststoffauskleidung gegenüber äußerem Überdruck	152
4.5	Beanspruchung durch inneren Unterdruck (Vakuum)	157
4.5.1	Innere Spannungs- und Dehnungsgrößen infolge Vakuumbelastung	157
4.5.2	Diskussion der Stabilitätsgefahr gegenüber Vakuumbelastung	160
4.6	Biegung des Verbundrohrquerschnitts infolge Einerdung	163
4.6.1	Belastung des erdbebeteten Rohrs	163
4.6.2	Verformungs-, Steifigkeits- und Bruchverhalten des geschichteten Rohrquerschnitts	166
4.6.2.1	Kurzzeit-Scheiteldruck-Versuch – Verfahren und Durchführung	166
4.6.2.2	Rohrsteifigkeit	170
4.6.2.3	Maßgebliche Rohrwandknoten	176
4.6.2.4	Bruchmodellierung des biegebeanspruchten Rohrquerschnitts	177
4.6.3	Lösungsansatz zur erdstatischen Berechnung	181
4.6.3.1	Berechnungsverfahren und erdstatisches Modell	181
4.6.3.2	Boden – Rohrsteifigkeit – Kriterium	183
4.6.3.3	Grundlagen und Bestimmung der vorhandenen Verlege- und Bettungsbedingungen sowie der Verkehrs- und Oberflächenlasten	187
4.6.3.4	Iterative Bestimmung der Lasten aus Hauptverfüllung und Überschüttung (Bauzustand)	193
4.6.3.5	Iterative Bestimmung der Lasten aus Oberflächenlasten p_0 (Betriebszustand)	202
4.6.3.6	Iterative Bestimmung der Lasten aus Verkehrslasten p_V (Betriebszustand)	204
4.6.3.7	Rechnerische Ersatz-Überschüttungshöhe $h_{0,E}$	208
4.6.3.8	Resultierende j -te Knotenrandspannungen im k -ten Belastungsschritt	210
4.6.3.9	Resultierende innere Kraftgrößen (M_φ , N_φ , Q_φ) des j -ten Rohrwandknotens im k -ten Belastungsschritt	214
4.6.3.10	Resultierender Tangentialspannungszustand (σ_φ) des i -ten Elements im j -ten Knoten im k -ten Belastungsschritt	223
4.6.3.11	Resultierender Schubspannungszustand (τ) des i -ten Elements im j -ten Knoten im k -ten Belastungsschritt	229
4.6.3.12	Resultierender Radialspannungszustand (σ_r) des i -ten Elements im j -ten Knoten im k -ten Belastungsschritt	236
4.6.3.13	Eigenschaften des textilbewehrten Betonelements	246
4.6.3.14	Eigenschaften des Kunststoffelements	250
4.6.4	Auswertung und Diskussion der erdstatischen Berechnung	251
4.6.4.1	Berechnungsablauf und Berechnungsmodul	251
4.6.4.2	Exemplarische Auswertung und Diskussion	260
4.6.4.3	Anwendungsbeispiele zur erdstatischen Berechnung	267
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	274
5.1	Eigenspannungen	274
5.2	Beanspruchung durch inneren Überdruck	275
5.3	Beanspruchung durch äußeren Überdruck	277

5.4	Beanspruchung durch inneren Unterdruck	278
5.5	Biegebeanspruchung des Rohrquerschnitts (Erdverlegung)	279
5.6	Abschließende Beurteilung des Verbundrohrwerkstoffs (TRC, PE)	282
5.7	Ausblick	283
Schrifttum		285
Verzeichnis der zitierten Normen und Regelwerke		294
Anhang		
A-Anhang Tabellen (nur digital: CD bzw. ftp://verbund:05022010@www.iwd.tu-dresden.de)		A-I
B-Anhang Teillösungen (nur digital: CD bzw. ftp://verbund:05022010@www.iwd.tu-dresden.de)		B-I
C-Anhang Programmmodule (nur digital: CD bzw. ftp://verbund:05022010@www.iwd.tu-dresden.de)		C-I
D-Anhang Bilder (nur digital: CD bzw. ftp://verbund:05022010@www.iwd.tu-dresden.de)		D-I