

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	III
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XII
Tabellenverzeichnis.....	XVIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIX
Symbolverzeichnis	XX
Kurzfassung	XXI
Abstract	XXII
1 Einleitung	1
1.1 Veranlassung und Zielstellung.....	1
1.2 Vorgehensweise	2
1.3 Gliederung der Arbeit.....	5
2 Rohrleitungen und Wurzeln.....	7
2.1 Unterirdische Leitungen und Kanäle.....	8
2.1.1 Abwasserleitungen und -kanäle.....	9
2.1.2 Fernwärmeleitungen.....	13
2.1.3 Wesentliche Eigenschaften in Verbindung zum Wurzelwachstum	16
2.2 Wurzelwachstum und dazugehörige Bodeneigenschaften	18
2.2.1 Wurzelwachstum	18
2.2.2 (Wurzel-)Bodenparameter	22
2.2.3 Wesentliche Eigenschaften in Verbindung zu unterirdischen Leitungen ...	29
2.3 Wurzel-Rohr-Interaktionen.....	31
2.3.1 Abwasserleitungen, -kanäle und Wurzeln.....	33
2.3.2 Versorgungsleitungen, -kabel und Wurzeln.....	39
2.3.3 Biologische Interaktionsmodelle	41
2.3.4 Wärme und Vegetation	44
2.4 Zusammenfassung und Diskussion	51
3 Bautechnische Schutzmaßnahmen	55
3.1 Wurzelfeste Rohrverbindungen	56
3.1.1 Prüfung nach DIN 4060	58
3.1.2 Messung der Anpressdrücke bei Prüfung nach DIN 4060	58

3.1.3	Prüfung nach DIN EN 1916 in Ergänzung mit DIN V 1201	59
3.1.4	Prüfung nach DIN EN ISO 13259	59
3.1.5	Prüfung nach EN 14741	59
3.1.6	Prüfung nach AS/NZS 1462.13:2006	60
3.1.7	Prüfung nach DIN 4062	60
3.1.8	Außendruckuntersuchungen.....	61
3.1.9	Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen	62
3.1.10	Einwuchsversuche mit unterschiedlichen Steckverbindungen.....	62
3.1.11	Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, Australien	63
3.1.12	Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, USA.....	64
3.1.13	Wegabhängige Scherlastversuche	64
3.1.14	In-situ-Versuche an Beton- und PVC-Rohren, Schweden	65
3.1.15	Untersuchungen zum Einsatz von Schrumpfschläuchen an Abwasserleitungen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs	65
3.2	Porenraumarme Verfüllstoffe	66
3.2.1	Pflanzversuche mit Bentonit	68
3.2.2	Granulometrische Untersuchungen an ZFSV	70
3.2.3	Pflanzversuche mit angepassten ZFSV.....	71
3.2.4	Untersuchungen zum Wurzelwachstum in Substraten	71
3.2.5	Untersuchungen von chemisch und physikalisch behandelten Böden zur Verhinderung von Wurzeleinwuchs	73
3.3	Folien und Platten.....	74
3.3.1	Prüfung nach FLL-Verfahren	75
3.3.2	Prüfung nach DIN EN 13948	76
3.3.3	Feldversuche an Kunststofffolien.....	76
3.3.4	Untersuchungen an Folien und Platten zum Schutz von Gehwegen und Straßen.....	77
3.3.5	Feldversuche an Folien und Platten um den Baumstandort	78
3.4	Diskussion der aktuellen (Norm-)Prüfverfahren	80
3.4.1	Wurzelfeste Rohrverbindungen	80
3.4.2	Porenraumarme Verfüllstoffe.....	85
3.4.3	Folien und Platten.....	86

4 Entwicklung von Arbeitshypothesen.....	88
4.1 Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen	88
4.2 ZFSV und Wurzeln	89
4.3 Folien und Platten.....	90
5 Versuchskonzepte und -prinzipien	91
5.1 Wurzelfestigkeit von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren	92
5.2 Wurzelfestigkeit von ZFSV	93
6 Untersuchungen zu Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen	96
6.1 Experimentelle Untersuchungen.....	96
6.1.1 Outside-In-Versuche (Fernwärme-Rohrverbindungen und Wurzeln).....	96
6.1.2 Eindrückversuche (Fernwärme-Rohr ummantelung und Wurzeln).....	101
6.1.3 Wärmefeldversuche (Wärmefelder und Wurzeln).....	106
6.2 In-situ-Beobachtungen (Typen von Interaktionen).....	122
6.2.1 Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen	126
6.2.2 Interaktion von Wurzeln und Bettung.....	131
6.2.3 Keine Interaktionen zwischen Wurzeln und FW-Leitung/Bettung	136
6.2.4 Wesentliche Erkenntnisse aus den In-situ-Aufgrabungen	140
6.3 Weitergehende Analyse: Temperaturmessungen und Wärmefelder	144
6.4 Diskussion und Einordnung der Untersuchungsergebnisse	148
6.4.1 Outside-In-Versuche.....	148
6.4.2 Eindrückversuche	149
6.4.3 Einfluss von Wärmefeldern auf Bäume und Wurzeln	150
6.4.4 In-situ-Beobachtungen.....	152
7 Untersuchungen an ZFSV.....	155
7.1 Experimentelle Untersuchungen.....	155
7.1.1 Untersuchungen der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1	155
7.1.2 Bautechnische 1:1-Untersuchungen über die Grabentiefe	156
7.1.3 Outside-Out-Versuche	157
7.2 Feldversuche in Osnabrück	166
7.2.1 Aktive Schutzmaßnahmen – Substrate am Baumstandort	167
7.2.2 Passive Schutzmaßnahmen – ZFSV	171
7.3 Diskussion und Einordnung der Untersuchungsergebnisse	179

7.3.1	Experimentelle Untersuchungen.....	179
7.3.2	Feldversuche	180
7.3.3	Einordnung der Untersuchungsergebnisse.....	184
8	Entwicklung von Prüfkonzepten für bautechnische Schutzmaßnahmen.....	187
8.1	Entwicklung eines dreistufigen Prüfkonzepts.....	187
8.2	Wurzelfeste Rohrverbindungen	188
8.2.1	Stufe 1: Ermittlung von Grenzwerten des Anpressdrucks zur Überwindung des Dichtelements	189
8.2.2	Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten	190
8.2.3	Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung	191
8.3	Porenraumarme Verfüllstoffe (ZFSV)	192
8.3.1	Stufe 1: Ermittlung maßgeblicher Laborparameter	192
8.3.2	Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten (nach Einbau).....	192
8.3.3	Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung	193
8.4	Folien und Platten	196
8.4.1	Stufe 1: Ermittlung der Wurzelfestigkeit von Werkstoff und Verbindung...	196
8.4.2	Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten nach Einbau	196
8.4.3	Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung	197
8.5	Diskussion und Einordnung der Prüfkonzepte	200
8.6	Anwendungsbeispiel Almere	202
8.6.1	Konzeptionierung des Feldversuches.....	202
8.6.2	Monitoringprogramm und Auswertung der Feldversuche	206
8.6.3	Zu erwartende Ergebnisse des Anwendungsbeispiels	207
8.7	Empfehlungen für die Praxis.....	208
8.7.1	Wurzelfeste Rohrverbindungen	208
8.7.2	Porenraumarme Verfüllstoffe.....	208
8.7.3	Folien und Platten.....	209
9	Zusammenfassung und Ausblick	210
10	Literaturverzeichnis	217
Anlagenverzeichnis.....		235
Anlage 1: Outside-In-Verusche.....		236
Anlage 2: Eindrückversuche.....		249

Anlage 3: Wärmefeldversuche.....	254
Anlage 4: Lebenslauf.....	266