

**UNTERSUCHUNG VON BAUTECHNISCHEN SCHUTZMAßNAHMEN
GEGEN WURZEL-ROHR-INTERAKTIONEN**

DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTOR-INGENIEUR

DER

FAKULTÄT FÜR BAU- UND UMWELTINGENIEURWISSENSCHAFTEN

DER

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

VORGELEGT VON

MIRKO SALOMON, M. SC.

GUTACHTER: PROF. DR.-ING. M. THEWES, RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

LEHRSTUHL FÜR TUNNELBAU, LEITUNGSBAU UND BAUBETRIEB

PROF. DR. T. STÜTZEL, RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

ARBEITSGRUPPE EVOLUTION UND BIODIVERSITÄT DER PFLANZEN

PROF. DR.-ING. HABIL. B. BOSSELER,

IKT - INSTITUT FÜR UNTERIRDISCHE INFRASTRUKTUR

TAG DER EINREICHUNG: 04. APRIL 2022

TAG DER DISPUTATION: 29. JULI 2022

Vorwort und Dank

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen entstanden. Ich bin sehr dankbar dafür, dass ich die Möglichkeit bekommen habe, als externer Promovend am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb (TLB) der Ruhr-Universität Bochum die vorliegende Arbeit zu verfassen.

Großer Dank gilt meinem Erstgutachter Herr Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, dass er mir das Vertrauen geschenkt hat, mit externer Forschungsarbeit an seinem Lehrstuhl zu promovieren. Vielen Dank für den fachlichen und organisatorischen Austausch und Input sowie für die Anregungen in der Gestaltung der vorliegenden Arbeit.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel für den interdisziplinären Austausch zu den Forschungsprojekten und selbstverständlich als Zweitgutachter meiner Dissertation. Ohne den botanischen Input wären die Forschungsvorhaben und somit meine Dissertation in diesem Rahmen nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bert Bosseler als wissenschaftlicher Leiter des IKT und Drittgutachter danke ich vielmals für die Unterstützung zu meinem Promotionsvorhaben am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur. Fachlich und persönlich war immer Zeit für einen Austausch, was mich in den Forschungsvorhaben, meinem Promotionsvorhaben und persönlich weitergebracht hat.

Bei Herrn Dipl.-Ök. Roland W. Waniek, Geschäftsführer des IKT, bedanke ich mich für die Möglichkeit am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur promovieren zu können.

Herrn Franz-Peter Heidenreich von der DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt danke ich für die Ermöglichung des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“.

Auch dem MULNV - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW danke ich für die Förderung des Forschungsvorhabens und Warentests „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau“.

Ein ganz herzlicher Dank gilt den Projektpartnern des AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., insbesondere Herrn Dr. Heiko Huther und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc., für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und die fachliche Unterstützung im Bereich Fernwärmeversorgung im Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“. In diesem Rahmen bedanke ich mich ebenfalls bei den Teilnehmenden des dazugehörigen Projektkreises „Fernwärme+Vegetation“, insbesondere Herrn Thomas Maag vom Osnabrücker ServiceBetrieb und Frau Claudia Hodel vom ZORN Sachverständigenbüro Gartenbau.

Zudem danke ich der Firma Borchert Ingenieure GmbH & Co. KG und insbesondere Frau Dr.-Ing. Jana Simon für die Untersuchungen der Bodenproben und den Austausch zu Wurzel-ZFSV-Interaktionen.

Der Gemeinde Almere (NL) und dort insbesondere den Herren Leo Bloedjes und Wouter Baack bin ich sehr dankbar für die fachliche und finanzielle Möglichkeit, einen spannenden Versuchsaufbau im Maßstab 1:1 umsetzen zu können und auch den fachlichen Austausch über Landesgrenzen hinweg zu ermöglichen.

In diesem Rahmen bedanke ich mich ebenfalls sehr herzlich bei Stichting RIONED insbesondere in Person von Herrn Ton Beenen für die fachliche und finanzielle Unterstützung im Forschungsvorhaben in Almere.

Herrn Dipl.-Ing. Marco Schlüter vom IKT danke ich vielmals und von Herzen für den fachlichen Austausch und die Unterstützung während meines Promotionsvorhabens. Die Diskussion von Ergebnissen und gestalterische Ideen waren für mich immer sehr hilfreich. Zudem war immer ein offenes Ohr für alle Sorgen vorhanden, was auch ein wesentlicher Faktor für den erfolgreichen Verlauf meines Promotionsvorhabens war.

Den Kollegen Dr.-Ing. Mark Klameth und Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sissis Kamarianakis sowie Dr.-Ing. Serdar Ulutaş danke ich für den fachlichen Austausch und die persönlichen Motivationen, die sie mir aus ihren Promotionserfahrungen geben konnten.

Meinen Kollegen Dr. Iain Naismith und Jaap Bresser als internationales IKT-Wurzel-Team danke ich für den spannenden und länderübergreifenden Austausch über Wurzel-Rohr-Interaktionen.

Den Herren Dipl.-Ing. Frank Bersuck und Kilian Möllers, M.Eng. danke ich für die Unterstützung im Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ sowie Herrn Sebastian Busch, M.Sc. für die Unterstützung im Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“. Auf Euch konnte ich mich stets verlassen.

Ein großer Dank geht auch an Tim Hörster, M.Sc., Kevin Weinz, M.Sc. und Laurens Kotas, B.Eng., deren Abschlussarbeiten bzw. Projektarbeiten ich im Rahmen der Forschungsvorhaben betreuen durfte, und die somit eine große Unterstützung für den erfolgreichen Abschluss der Forschungsvorhaben und somit auch meiner Dissertation waren. Zudem ein Dank an die damaligen studentischen Hilfskräfte Elisa Elfroth für die Arbeiten im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ und Manuel Becker, M.Sc. im Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“, Harun Ergün und Piet Best im IKT-Warentest „Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau“ sowie Christian Bone, B.Eng..

Meinen Eltern Sabine Repkewitz-Salomon und Klaus-Dieter Salomon möchte ich dafür danken, dass sie mir mein Studium ermöglicht, immer an mich geglaubt und mich unterstützt haben. Dies ist keine Selbstverständlichkeit, und das werde ich für immer zu schätzen wissen.

Zahlreiche Abende und Wochenenden haben meine Kinder Ella und Marlo und meine Ehefrau Carina Salomon auf mich verzichten müssen. Der größte Dank geht an Euch, dass Ihr mir diese Zeit gegeben habt, um diese Arbeit verfassen zu können. Ich bin sehr froh, wenn wir bald wieder mehr Zeit miteinander verbringen können.

„Die Vorfahren pflanzten Bäume, damit sich die Nachkommen an ihrer Kühle freuen.“
(chinesisches Sprichwort)

Für meine Kinder Ella und Marlo.

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	Eindruckversuche (Fernwärme-Rohrummantelung 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	Eindruckversuche	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 Prüfkonzepthen für bautechnische Schutzmaßnahmen.....	187
8.1	Entwicklung eines dreistufigen Prüfkonzepths.....	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 Prüfkonzepthe	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

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gliederung der vorliegenden Arbeit	6
Abbildung 2:	Darstellung der Rohrgrabenzonen von Abwasserleitungen und -kanälen bei Bettung Typ 1 in Anlehnung an DIN EN 1610 [33, S. 8]	10
Abbildung 3:	Schematische Darstellung einer Steckmuffenverbindung [19, S. 31]	13
Abbildung 4:	Darstellung der Rohrgrabenzonen von Fernwärmleitungen (unter unbefestigter Oberfläche) und ausgewählte Abstände in Anlehnung an AGFW FW 401-12 [45, S. 9, 14; 46]	16
Abbildung 5:	Aktive und passive kapillare Steighöhe im Jamin-Rohr nach [55, S. 149]	27
Abbildung 6:	Längsschnitt des Versuchsaufbaus der Außendruckprüfung [19, S. 47] ..	61
Abbildung 7:	Längsschnitt des Aufbaus der Outside-In-Versuche. Spitzende und Muffe bündig (links), Spitzende und Muffe nicht bündig (rechts) [19, S. 71]	62
Abbildung 8:	Aufbau (links) und Längsschnitt (rechts) eines Kleinversuchs mit Bentonit (2) und Komposterde (1) als Substrate unterschiedlicher Porengröße [17, S. 161, 163]	69
Abbildung 9:	Versuchsprinzip der Outside-In-Versuche	92
Abbildung 10:	Versuchsprinzip der Eindruckversuche	93
Abbildung 11:	Versuchsprinzip der Outside-Out-Versuche	94
Abbildung 12:	Versuchsprinzip des Feldversuches in Osnabrück (Draufsicht)	95
Abbildung 13:	Versuchsaufbau zur Wurzelfestigkeit von KMR-Muffenverbindungen (Skizze erstellt durch Grimm (AGFW), Bild rechts [96, S. 44])	97
Abbildung 14:	Vorgehensweise zur Öffnung der Probekörper (Links: Vertikales Aufschneiden des Blumentopfes [97, S. 26], Mitte: Vertikales Aufschneiden des durchwurzelt Substrats [97, S. 26], Rechts: Entfernen der Schrumpfmanschette von der Rohroberfläche bei einer unvernetzten Muffe)	98
Abbildung 15:	Wurzelanwuchs in den nicht-stoffschlüssig verbundenen Spalt zwischen Muffe ohne Dichtband und Kunststoffmantelrohroberfläche (links), Wurzeleinwuchs in eine Muffenverbindung, bei der durch bewusst eingebrachte Fremdstoffe keine adhäsive Verbindung zwischen Muffenrohr und Ummantelung des KMR erfolgen konnte (rechts) [97, S. 27]	99
Abbildung 16:	Schematische Darstellung einer fachgerecht applizierten Schrumpfmuffe aus PE-X mit Schmelzklebstoff (rot); nach AGFW FW 401-6 [43, S. 9] (erstellt durch Grimm (AGFW), modifiziert durch den Autor in der hier vorliegenden Arbeit)	99
Abbildung 17:	KMR-Muffenverbindung mit Schmelzklebstoffwulst am Ende (erstellt durch Grimm (AGFW))	100

- Abbildung 18: Wurzeln am nicht mit Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt am Ende des Muffenrohres von Probekörper IV b (links); Wurzeln unter dem Montagepatch von Probekörper II b (rechts) 101
- Abbildung 19: Versuchsaufbau zu Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf Kunststoffmantelrohre: Versuchsbehälter A im Mai 2020 mit ausgeprägtem Wachstum an der Oberfläche (links), Versuchsaufbauschema (rechts) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor) 102
- Abbildung 20: Draufsicht auf die Versuchsbehälter A (links), B (mittig), C (rechts) mit den gemessenen Durchmessern der Weidenstecklinge an der GOK und dem Abstand zwischen den Rohrleitungen..... 103
- Abbildung 21: Wurzelwachstum zwischen den Rohrleitungen, Versuchsbehälter A, Steckling 1 (Querschnitt, links), Versuchsbehälter C, Steckling 2 (Draufsicht, rechts) 104
- Abbildung 22: Versuchsbehälter C, Steckling 2 Vorderansicht auf radiales Wurzelwachstum von 18,5 mm (links), Seitenansicht auf axiales Wurzelwachstum von 64,0 mm (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert (erstellt durch Grimm (AGFW))..... 104
- Abbildung 23: Rohrmanteloberflächen aus Versuchsbehälter A (links) und Versuchsbehälter C (rechts) 105
- Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Auswirkung von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum (erstellt durch Grimm (AGFW))..... 107
- Abbildung 25: Anordnung der Messsensoren in den Versuchsbehältern A (a) oben), B (b) mitte), C (c) unten) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor) 109
- Abbildung 26: Anordnung der Messsensoren in den Versuchsbehältern D (d) oben) und E (e) unten) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor) 110
- Abbildung 27: Wuchsverhalten der Weidenstecklinge (links) und reduziertes Wachstumsverhalten zur Hauswand (rechts) im Juli 2018 111
- Abbildung 28: Versuchsbehälter v.l.n.r. A bis E (links), seitlicher Blick auf Versuchsbehälter E (mittig) und seitlicher Blick auf Versuchsbehälter A (rechts) zum Ende der Versuchslaufzeit im Juli 2019..... 112
- Abbildung 29: Temperaturverlauf vom 27.04.2018 bis zum 13.07.2019, hier beispielhaft an Versuchsbehälter B (Anordnung der Temperatursensoren rechts oben oder vgl. Abbildung 26 (rechts oben))..... 113
- Abbildung 30: Temperaturverläufe der horizontalen und vertikalen Temperatursensoren im jeweiligen Abstand von 120 und 240 mm von der Heizpatrone, hier beispielhaft an Versuchsbehälter B (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 26 (rechts oben))..... 114

- Abbildung 31: Abmessungen der Temperatursensoren zum Ende der Versuche im September 2019 (links) und zu Beginn der Versuche April 2018 (rechts) ...
..... 114
- Abbildung 32: Temperaturmessungen an Zulauf (Versuchsbehälter A (blauer Graph)) und Ablauf der Kaltwasserleitung bzw. „Rücklaufleitung“ (Versuchsbehälter E (roter Graph))..... 115
- Abbildung 33: Feuchtemessungen beispielhaft an Versuchsbehälter A dargestellt (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 26 (links oben))... 117
- Abbildung 34: Vertikales Wachstum bis zur Versuchsbehältersohle auf Seite der Heizpatrone (rote Einkreisung) und auf Seite der Kaltwasserleitung (blaue Einkreisung) (links) und horizontales Wurzelwachstum an der Versuchsbehältersohle (rechts), beispielhaft dargestellt an Versuchsbehälter C - Reihe 2..... 118
- Abbildung 35: Versuchsbehälter D: Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite in Reihe 2 (links) und kalter zur warmen Seite in Reihe 3 (rechts) [97, S. 22] 119
- Abbildung 36: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (rote Pfeile) und von der kalten zur warmen Seite (blauer Pfeil) in Versuchsbehälter C, Reihe 1 [97, S. 23] 119
- Abbildung 37: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (roter Pfeil) [97, S. 23], Versuchsbehälter E Reihe 1 (links) und Reihe 2 (rechts) 120
- Abbildung 38: Wurzelwachstum oberflächennah auf der kalten Seite von Reihe 1 bis zur Reihe 3 in Versuchsbehälter E (blauer Pfeil) 121
- Abbildung 39: Blick von der GOK in den Leitungsraben: Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmerohrleitungen, Vorlauf (links) und Rücklauf (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert 127
- Abbildung 40: Skizze von Trassenverlauf, Baumstandort mit ungefähre Lage der Kopflöcher 1 und 2 (erstellt durch Grimm) 128
- Abbildung 41: Feinwurzeln in der Bettung bei Kopfloch 1 (links) und Feinwurzeln an und zwischen Vor- und Rücklauf bei Kopfloch 2 (rechts)..... 129
- Abbildung 42: Gekappte Starkwurzel nah an der Rohroberfläche während der Neubaumaßnahmen der Fernwärmetrasse 2013 (links; Bildquelle: ZORN Sachverständigen Büro Gartenbau) und an der Rohroberfläche während der anlassbezogenen Aufgrabung 2020 (rechts, gelber Pfeil zeigt die Rohroberfläche)..... 130
- Abbildung 43: Großteil der Wurzelmasse in Baums substrat bis 1,5 Meter unter GOK (links) und seit 2013 vereinzelte neu gewachsene Feinwurzeln in der Bettung (rechts) 131

- Abbildung 44: Feinwurzeln in Bettung der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil zeigt zur Fernwärmeleitung, eingekreist sind die Feinwurzeln, rechts im Bild das Telekommunikationskabel) und Wurzeln, die an dem Telekommunikationskabel axial entlang wuchsen (rechts; ohne Telekommunikationskabel) 133
- Abbildung 45: Starkwurzel (19 Zentimeter) neben der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil Wurzel, gelber Pfeil Fernwärmeleitung) und Wurzelwachstum oberhalb der Fernwärmeleitung (rechts) 134
- Abbildung 46: Fein- und Starkwurzel oberhalb der Bettung (links) und Feinwurzeln in der Bettung (rechts, u.a. gelber Pfeil) 135
- Abbildung 47: Blick in Haubenkanal, kein Wurzeleinwuchs sichtbar (links, Bildquelle AGFW)..... 137
- Abbildung 48: Vereinzelt Feinwurzeln an Grabenwand (links), hochgesetzte Baumscheibe (rechts)..... 138
- Abbildung 49: Baum 1 direkt an Fernwärmetrasse (links), Wurzeln in 0,2 Metern Tiefe unter GOK oberhalb der Fernwärmetrasse in ca. zwei Metern Abstand von Baum 1 und fünf Metern Abstand von Baum 2 (rechts) 139
- Abbildung 50: Wurzelgeflecht in Vegetationstragschicht (links) und keine sichtbaren Wurzeln in Sandbettung (rechts) 140
- Abbildung 51: Wurzelwuchs in Trennfläche zwischen Telekommunikationskabel und Bettung (links) und zwischen Sandbettung und Tragschicht (rechts) bei Aufgrabung Nr. 6 143
- Abbildung 52: Stoffschlüssiger Verbund zwischen Schrumpfmanschette und PE-Außenmantel 148
- Abbildung 53: Rissfelder an Verbau in Material A (links), vereinzelt Risse an Material B (mittig) und Rissfelder an Material E (rechts)..... 156
- Abbildung 54: Vereinzelt Risse in Material C an Verbau (links) und Schacht (rechts) 157
- Abbildung 55: Spalt in Material A zwischen ZFSV und Schachtoberfläche (links) und Material B (rechts) 157
- Abbildung 56: Beispielhafte Dokumentation der ZFSV-Oberflächen vor Befüllung mit Blumenerde (links) und im Boden eingesetzte Pflanzkübel (rechts) 158
- Abbildung 57: Wurzeln bis zur Kübelsohle bei Referenzversuch A 159
- Abbildung 58: Wurzelwuchs in Referenzversuch B mit brauner Wurzel aus Entwässerungsloch – roter Pfeil - (links) und Wurzel mit Seitenwurzeln unterhalb des Pflanzkübels – roter Pfeil -, welche bis zu einer 40 Zentimetern entfernten Pflanze außerhalb des Pflanzkübels zurückverfolgt werden konnte (rechts) 160

- Abbildung 59: Wurzelwachstum in Mutterboden und Trennschicht zwischen ZFSV und Pflanzkübel beispielhaft an Material E (links) und Wurzelwachstum in Trennfläche zwischen Mutterboden und ZFSV beispielhaft an Material D (rechts) 161
- Abbildung 60: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material A (links) und Material B (rechts) 162
- Abbildung 61: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material C (links) und Material E (rechts) 162
- Abbildung 62: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material D (links) und Wurzeleinwuchs im ausgehärteten Material D (rechts)..... 163
- Abbildung 63: Unterseite des ZFSV ohne Wurzeln beispielhaft an Material E (links) und Spinne in aufgeweichter Schicht beispielhaft an Material B (rechts)..... 163
- Abbildung 64: Riefen durch Wurzelwuchs in vertikaler Trennfläche zwischen ZFSV und Pflanzkübel in Material D (links) und Material E (rechts) 164
- Abbildung 65: Blick auf Material D (links) und Material A (rechts) vor Bepflanzung 165
- Abbildung 66: Draufsicht auf das Versuchsfeld "Dodesheide" nach der Umpflanzung im Jahre 2009 mit aktueller Nummerierung in Klammern (links) [161, S. 18], seitlicher Blick auf einen Abschnitt des Versuchsfeldes „Dodesheide“ im Jahr 2019 (rechts)..... 166
- Abbildung 67: Schematische Darstellung der Aufgrabungen 2018 (in Anlehnung an [184, S. 40]) 169
- Abbildung 68: Wurzeln der Esche (Baum Nr. 20) im November 2018: Feinwurzeln im oberflächennahen Bereich, insbesondere stark ausgeprägt in Rehabilitationszone (links), Schwachwurzel im oberflächennahen Bereich im Außenbereich der Rehabilitationszone (rechts) [96, S. 63]..... 169
- Abbildung 69: Wurzeln der Platane (Baum Nr.11) im November 2018. Fein- und Schwachwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Schwachwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts) [96, S. 64f.] 170
- Abbildung 70: Wurzeln der Linde (Baum Nr.10) im November 2018: Fein- und Schwachwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Schwachwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts) [96, S. 65f.] 171
- Abbildung 71: ZFSV kurz nach Einbau um die Versuchsbäume (links) [96, S. 68], Einfüllen des ZFSV in die Baugrube mit Fahrmischern (rechts) 172
- Abbildung 72: Wurzelfilz an Grabenwand (links), umgeworfener ZFSV-Probekörper mit wenigen Erd- und Wurzelanhaftungen (rechts)..... 173
- Abbildung 73: Abgestorbene Wurzelspitze (links, Quelle Prof. Stützel), regenerierte Wurzeln ca. 5-10 Zentimeter entfernt von ZFSV (rechts) 174

Abbildung 74:	Dokumentation der ZFSV-Probestücke (links) und Aufnahme mit 5-facher Vergrößerung der ZFSV-Bruchflächen mittels Mikroskop, in der Mitte eine erkennbare Auffälligkeit in Form eines schwarzen „Flecks“ (rechts).....	176
Abbildung 75:	Aufnahmen mit 25-facher Vergrößerung: Pore bis zu einer Größe von einem Millimeter (links) und Pore mit einer Größe von einem halben Millimeter (rechts, vgl. Abbildung 74, rechts, „schwarzer Fleck“ bei 5-facher Vergrößerung)	177
Abbildung 76:	Durchwurzelung des nicht festen ZFSV an der GOK am Baumstandort Linde.....	178
Abbildung 77:	Versuchsaufbau zum paarweisen Vergleich von ZFSV und Böden.....	195
Abbildung 78:	Mögliche Versuchsaufbauvariante A zur Prüfung des Unterwachsens von Folien und Platten als bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs.....	198
Abbildung 79:	Mögliche Versuchsaufbauvariante B zur Prüfung des Unterwachsens von Folien und Platten als bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs.....	199
Abbildung 80:	Versuchsaufbau in Almere (NL).....	203
Abbildung 81:	Bemaßung des Versuchsfeldes.....	204
Abbildung 82:	Anordnung der Rohrverbindungen (C1-C12) und Werkstoffübergänge (MT1-MT2) in den zwei Rohrleitungen (DN150, DN300) an den Bäumen (T1-T5).....	205
Abbildung 83:	Anordnung der Folien bzw. Platten (FP1-FP8) und porenraumarmen Verfüllstoffe (S) an den Bäumen (T1-T5).....	205
Abbildung 84:	Blick auf das Anschauungsobjekt (links), Informationstafel (rechts)	206

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kornfraktionen und -größengruppen in Anlehnung an [55, S. 130]	24
Tabelle 2:	Benennung der Lagerungsdichten eines Bodens nach [55, S. 142].....	25
Tabelle 3:	Übersicht zu bisherigen (Norm-)Prüfungen und Untersuchungen von wurzelfesten Rohrverbindungen	57
Tabelle 4:	Übersicht zu bisherigen Untersuchungen von porenraumarmen Verfüllstoffen zur Wurzelfestigkeit	68
Tabelle 5:	Übersicht zu bisherigen (Norm-)Prüfungen und Untersuchungen von Folien und Platten	75
Tabelle 6:	Versuchskonzept zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Kunststoffmantelrohren.....	92
Tabelle 7:	Versuchskonzept zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von ZFSV.....	94
Tabelle 8:	Ergebnisübersicht der Outside-In-Versuche [97, S. 26].....	100
Tabelle 9:	Vergleich der Messwerte der Eindrückversuche an der Oberfläche zum Mutterboden und zwischen den Rohrleitungen (in Millimeter)	105
Tabelle 10:	Übersicht Wärmeversuche [97, S. 24].....	121
Tabelle 11:	Zusammenfassung der Aufgrabungsergebnisse	124
Tabelle 12:	Ermittelte Bodenparameter in den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen	141
Tabelle 13:	Versuchsprogramm und -ergebnisse des im Versuchsfeld eingebauten ZFSV	175
Tabelle 14:	Ergebnisse der pH-Wert-Messungen im Versuchsfeld Dodesheide.....	178
Tabelle 15:	Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen zu ZFSV.....	180
Tabelle 16:	Versuchsprogramm zum paarweisen Vergleich (Erläuterung der Kürzel: ZA: ZFSV mit Durchlässigkeit A; BA: Boden mit Durchlässigkeit A; ZB: ZFSV mit Durchlässigkeit B; BB: Boden mit Durchlässigkeit B; etc.).....	194
Tabelle 17:	Übersicht der empfohlenen Prüfungen für bautechnische Schutzmaßnahmen aufgeteilt in die Prüfungsstufen 1 bis 3.....	201
Tabelle 18:	Werkstoffe der Rohrleitungen mit Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergängen	204
Tabelle 19:	Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten	205

Abkürzungsverzeichnis

AGFW	AGFW Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK
AS/NZS	Australian/New Zealand Standard TM
BSI	British Standards Institution
C	Celsius
CBR	California Bearing Ratio-Versuch
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DN	Rohr-Nennweite [mm]
et al.	Und andere (lat.)
f.	folgende Seite
ff.	folgende Seiten
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
ggf.	gegebenenfalls
GOK	Geländeoberkante
i.d.R.	in der Regel
IKT	IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kPa	Kilopascal
KMR	Kunststoffmantelrohr
l	Liter
m	Meter
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
mm	Millimeter
MMR	Fernwärmeleitung mit Metall-Mediumrohr
Mpa	Megapascal
NL	Niederlande
PE	Polyethylen
PE-HD	Polyethylen mit hoher Dichte
PE-X	vernetztes Polyethylen
pF-Wert	Maß für die Wasserspannung [-]
PMR	Kunststoffmediumrohr
PP	Polypropylen
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
RUB	Ruhr-Universität Bochum
TM	Trade Mark
v.l.n.r	von links nach rechts
z.B.	zum Beispiel
ZFSV	Zeitweise fließfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff
µm	Mikrometer

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche [m ²]
D	Lagerungsdichte [g/cm ³]
D_P	Packungsdichte [Vol.-%]
E	Porosität [-]
e	Porenzahl [-]
E_{Vd} bzw. E_{V2}	Verformungsmodul [MPa]
h_{ka}	aktive kapillare Steighöhe [mm]
h_{kp}	passive kapillare Steighöhe [mm]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
m	feuchte Bodenmasse [kg]
m_d	Trockenmasse [kg]
m_w	Masse des Porenwassers [kg]
n	Porenanteil [-]
n_a	luftgefüllter Porenanteil [-]
n_w	wassergefüllter Porenanteil [-]
OD_h	horizontaler Außendurchmesser
Q	Wasserdurchfluss [m ³ /s]
S_r	Sättigungszahl [-]
V	Bodenvolumen [cm ³]
V_{Korn}	Kornvolumen [cm ³]
V_P	Porenvolumen [cm ³]
v_f	Filtergeschwindigkeit eines Bodens [m/s]
w	Wassergehalt [-]
z	horizontaler Abstand zwischen Fernwärme Vor- und Rücklaufleitung [m]
α	Benetzungswinkel [°]
ε	Porenziffer [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit des Bodens [W/m K]
ρ	Bodendichte [g/cm ³]
ρ_a	Lagerungsdichte [g/cm ³]
ρ_d	Trockendichte [g/cm ³]
ρ_s	Korndichte [g/cm ³]

Kurzfassung

Unterirdische Leitungen und Kanäle konkurrieren in Städten oftmals mit Bäumen und Baumwurzeln um den unterirdischen Raum, wodurch es für beide Seiten zu schädlichen Wurzel-Rohr-Interaktionen kommen kann. Um Leitungen und Kanäle vor Wurzeleinwuchs zu schützen, können bautechnische Schutzmaßnahmen eingesetzt werden, z.B. wurzelfeste Rohrverbindungen, porenraumarme Verfüllstoffe sowie Folien und Platten. Eine Literaturrecherche zu bisher durchgeführten Untersuchungen zu diesen Schutzmaßnahmen zeigt, dass viele offene Fragestellungen zur Wirksamkeit dieser Schutzmaßnahmen und deren Überprüfung bestehen. Hier setzen die umfangreichen experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit an.

Gesteckte Rohrverbindungen gelten im Sinne von Normen-Prüfungen als wurzelfest, wenn sie bautechnische Laborprüfungen bestehen. Jedoch zeigen Untersuchungen mit Pflanzen, dass Wurzeleinwuchs in einigen Fällen auch in nach Norm geprüften Rohrverbindungen nachgewiesen wurde. Der Analogieschluss, durch eine physikalische Prüfung auf die Wurzelfestigkeit zu schließen, wird in der vorliegenden Arbeit durch ein weitergehendes Prüfkonzept ergänzt. Neben den gesteckten Rohrverbindungen wurden zudem Fernwärmeleitungen in Pflanzversuchen betrachtet, deren Verbindungen u.a. mit Schrumpfmuffen ausgeführt werden. Ergebnis ist, dass Wurzeln in fachgerecht ausgeführte Schrumpfmuffen von Kunststoffmantelrohren nicht eingewachsen sind und der PE-Außenmantel durch einjähriges Wurzeldickenwachstum nicht beschädigt wurde.

Porenraumarme Verfüllstoffe sollen das Wurzelwachstum in den Leitungsgraben verhindern. Durch Labor-Untersuchungen sowie Feld- und Pflanzversuche an zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) konnte ein Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs für bestimmte Randbedingungen bestätigt werden. Wasserdurchlässigkeit und Porosität sind erste Parameter, die zur Darstellung der Wurzelfestigkeit von ZFSV genutzt werden können. Die bisherigen Erkenntnisse lassen sich nur auf ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen anwenden, da die Ergebnisse zu ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen abweichen.

Bei Folien und Platten zeigen Studien, dass diese unter bestimmten Voraussetzungen unterwachsen werden können. Hier wurde ein neues Prüfverfahren entwickelt, um insbesondere das System „vertikal eingebaute Folie, Bodenverfüllung und Wurzel im Leitungsgraben“ zu untersuchen.

Schließlich wurden auch mögliche Einflüsse der Abwärme von Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum durch Wärmeversuche mit Pflanzen untersucht. Bei Temperaturen bis 36°Celsius konnte keine Beeinflussung des Wurzelwachstums festgestellt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Arbeit wurden die Norm-Prüfverfahren der o.g. bautechnischen Schutzmaßnahmen in ein dreistufiges Prüfkonzept mit Ermittlung von Angriffspunkten und Pflanzversuchen weiterentwickelt, um eine hohe und langfristige Sicherheit der bautechnischen Schutzmaßnahmen zu gewährleisten.

Abstract

Buried pipes and sewers often have to compete with trees and tree roots for the underground space in cities, which can lead to root-pipe interactions that are harmful to both. Structural protective measures can be used to protect pipes and sewers from root ingrowth, e.g., root-resistant pipe joints, low-porosity backfill materials, and root resistant barriers (sheets and plates). A literature review of previous studies on these protective measures found that there are many unanswered questions concerning their effectiveness and methods for testing them. These are the reasons for the extensive experimental investigations undertaken for this thesis.

Pipe joints can be evaluated for their root resistance using testing against physical or structural test standards. However, experiments involving growing plants found that root ingrowth can occur in some cases, even in pipe joints that passed these standards. The present study supplements the determination of their root resistant by physical testing using a more far-reaching testing concept. In addition to standard pipe connections, district heating pipes, which have connections made with shrink joints, were also examined in planting tests. The result found that roots do not grow into professionally executed shrink joints of these pre-insulated, bonded pipes and that their PE outer casing is not damaged by one-year of root growth.

The use of low-porosity backfill materials should prevent root growth into pipeline trenches. Laboratory investigations together with field and planting tests on temporarily flowable, self-compacting backfill materials (TFSBs) have confirmed they can make a contribution to protection against root ingrowth, under certain boundary conditions. Water permeability and porosity are the main parameters that can be used to determine the root resistance of TFSBs. Existing test methodologies can only be used for TFSB made of sand-gravel mixtures, and not for TFSB containing cohesive and organic components.

In the case of root resistant barriers, existing studies show that they can be undergrown under certain conditions. A new test method has been developed in this study particularly to investigate the performance of the "vertically installed sheets and plates, soil backfill and tree root system" in pipe trenches.

Possible influences of heat from district heating pipes on root growth were also investigated through heat experiments with plants. At temperatures up to 36°Celsius, no influence on root growth was found.

Based on the findings of this thesis, the standard test procedures for the abovementioned structural protective measures have been developed into a three-stage test concept using the determination of points of root attack on them and planting tests to ensure the performance and long-term effectiveness of these structural protective measures.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Zielstellung

Baumwurzeln sowie Leitungen und Kanäle nutzen den unterirdischen Raum. Insbesondere in Städten sind sowohl die unterirdische Infrastruktur als auch Baumstandorte ein wesentlicher Faktor für die Lebensqualität der Bürgerinnen und Bürger [1, S. 3]. Die unterirdische Infrastruktur versorgt die Anwohner mit Strom, Wasser, Gas und Telekommunikation, entsorgt darüber hinaus auch das Abwasser. Bäume sind ein wesentlicher Faktor zur innerstädtischen Klimaregulierung. Durch u.a. Verdunstung von Wasser und das Spenden von Schatten kann bei Hitze die Temperatur reduziert, durch das Binden von Stäuben die Luftqualität verbessert werden [2, S. 5f.; 3, S. 101]. Zudem entziehen Bäume der Atmosphäre CO₂, binden dabei Kohlenstoff und setzen Sauerstoff frei, wodurch sie ebenfalls zum Klimaschutz beitragen [4, S. 1]. Einzelne (städtische) Park- oder Gartenbäume können oftmals mehr CO₂ speichern als einzelne Waldbäume, da deren Baumkronen und Wurzeln meist vergleichsweise besser ausgeprägt sind [4, S. 2]. Dadurch sind bestehende Bäume und das Neupflanzen von Bäumen im urbanen Raum, insbesondere in Zeiten spürbarer Klimaveränderungen, wesentliche Faktoren zur Klimaanpassung, welche auch im Paris Agreement der Vereinten Nationen [5, S. 3] Berücksichtigung finden.

Teilen sich jedoch Bäume und unterirdische Leitungen und Kanäle den unterirdischen Raum, kann es zu Wurzel-Rohr-Interaktionen kommen. Wurzeln können u.a. die unterirdischen Rohrleitungen umwachsen und/oder in Rohrverbindungen oder Rohrleckagen einwachsen. Die Folgen sind Undichtheiten, Querschnittsverringernungen, Lageabweichungen sowie Verformungen, Risse und Brüche, was u.a. die Dichtheit sowie die Betriebssicherheit von Rohrleitungen beeinträchtigen kann [1, S. 10].

Um Bäume und unterirdische Leitungen und Kanäle bestmöglich in Einklang zu bringen, können Schutzmaßnahmen im Leitungsgaben eingesetzt werden. Jedoch sind die (Langzeit-)Wirksamkeiten dieser Schutzmaßnahmen oftmals ungewiss. Betreiber von unterirdischer Infrastruktur benötigen zuverlässige Aussagen zur Wirkung dieser Schutzmaßnahmen, um die hohen notwendigen Investitionen bei Neubau und Instandhaltung der Ver- und Entsorgungsnetze angemessen absichern zu können.

Nach [1, S. 17f.] wird zwischen aktiven (vegetationstechnischen) und passiven (bautechnischen) Schutzmaßnahmen unterschieden. Zu den bautechnischen Schutzmaßnahmen gehören u.a. der Einsatz porenraumarmer Verfüllstoffe im Rohr- oder Leitungsgaben, Einbau von Mantelrohren (Schutzrohren) um die Leitung, Einbau von Platten oder Folien im Leitungsgaben und die Auswahl wurzelfester Rohrverbindungen [1, S. 17f.].

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, bisherige theoretische und praktische Erkenntnisse einzuordnen und zu bewerten, offene Fragen beim Thema Wurzel-Rohr-Interaktion zu

beantworten und Unsicherheiten bei Einsatz und Bewertung von bautechnischen Schutzmaßnahmen zu erkennen und ggf. entgegenzuwirken.

Übergeordnetes Ziel in Zeiten von Klimaveränderungen ist es, Bäume und unterirdische Infrastruktur bautechnisch bestmöglich in Einklang zu bringen, um zukünftige Schäden an unterirdischen Leitungen und Kanälen zu vermeiden, und darüber hinaus einen Beitrag zur Klimafolgeanpassung zu leisten.

1.2 Vorgehensweise

Die Wirksamkeit von bautechnischen Schutzmaßnahmen sowie die damit verbundenen offenen Fragestellungen zur Wurzel-Rohr-Interaktion sollen im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit untersucht und analysiert werden. Grundlage sind u.a. die Untersuchungen und Ergebnisse aus drei Forschungsvorhaben, die unter Leitung des Autors am IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen durchgeführt bzw. erzielt wurden:

- Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen (Gefördert durch DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, bearbeitet in Kooperation mit AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK und Ruhr Universität Bochum - Evolution und Biodiversität der Pflanzen) [6]
- IKT-Warentest „Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau“, Teilprojekt Schutz vor Wurzeleinwuchs (Gefördert durch MULNV - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW sowie zehn Abwassernetzbetreiber) [7, 8]
- Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen (Gefördert durch die Gemeinde Almere und Stichting RIONED, Niederlande) [9]

Der Autor war als verantwortlicher wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Beantragung der Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ und „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“ maßgeblich beteiligt und hat die genannten Projekte koordiniert sowie maßgeblich inhaltlich bearbeitet. Zudem wurden durch den Autor, unter Mitwirkung des Autors oder nach Absprache mit dem Autor vor, während und nach den Forschungsvorhaben Fachartikel zu den Forschungsthemen, -vorhaben bzw. deren Ergebnissen verfasst [10; 11; 12; 13; 14; 15; 16]. Mögliche Ausführungen der Fachartikel sind ggf. in die Forschungsberichte mit eingeflossen, werden aber nicht explizit in den Forschungsberichten und somit der vorliegenden Arbeit gekennzeichnet, da sie inhaltlich von den Autoren der Forschungsberichte ausgearbeitet wurden.

Die Forschungsergebnisse und zitierten Textstellen aus den Forschungsberichten wurden mit Zustimmung der folgenden Auftraggeber und Projektpartner in die vorliegende Dissertation übernommen:

- DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt [6]
- AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK [6]
- Ruhr-Universität Bochum - Evolution und Biodiversität der Pflanzen [6]
- MULNV - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW [7; 8]
- Gemeinde Almere [9]
- Stichting RIONED [9]

Die Forschungsergebnisse werden in der vorliegenden Arbeit aus den Forschungsberichten genutzt bzw. zitiert und mit Blick auf die Auswirkung auf bautechnische Schutzmaßnahmen erstmalig vergleichend zusammengefasst und eingeordnet. Die Ergebnisse sind somit wesentlich für die weitere Untersuchung von bautechnischen Schutzmaßnahmen. Aus der vergleichenden Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse sind weitergehende Empfehlungen für die Prüfung der bautechnischen Schutzmaßnahmen, für wurzelfeste Rohrverbindungen, für ZFSV als porenraumarmer Verfüllstoff sowie für Folien und Platten möglich.

In diesen Forschungsvorhaben wurden experimentelle Untersuchungen im Labormaßstab und im Maßstab 1:1, z.T. unter Einsatz von Pflanzen, eingesetzt. Ergänzt wurden diese Experimente durch In-situ-Beobachtungen.

Das besondere an den durchgeführten Untersuchungen ist der Einsatz von Pflanzen an bautechnischen Maßnahmen. Mit dieser Prüfmethode können die bisherigen mechanischen Prüfmethode hinsichtlich der tatsächlichen Aussagekraft zum Wurzelwachstum validiert werden. Die Durchführung von Pflanzversuchen und die daraus resultierenden Ergebnisse werden für die Bewertung der bautechnischen Parameter genutzt und sind Kern der vorliegenden Arbeit.

Die drei Untersuchungsschwerpunkte der vorliegenden Arbeit werden folgend dargestellt:

Untersuchungsschwerpunkt 1:

Untersuchungen und Analysen von Wurzel-Rohr-Interaktionen

Wurzel-Rohr-Interaktionen an Abwasserleitungen wurden in den letzten 20 Jahren durch das IKT und die Ruhr-Universität Bochum [u.a. 17, 18, 19] detailliert untersucht. Eine bisher nicht beantwortete Fragestellung ergibt sich aus der möglichen Wärmebelastung von Wurzeln durch unterirdische Fernwärmerohrleitungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll mittels Laborversuchen mit Pflanzen und In-situ-Aufgrabungen an Baumstandorten untersucht werden, ob eine Abwärme von Fernwärmeleitungen das Wurzelwachstum hemmt, beschleunigt oder keinen Einfluss hat. Hier fließen auch Ergebnisse aus FEM-Berechnungen zu Wärmefeldern von unterirdischen Fernwärmeleitungen ein, um den

tatsächlichen Einfluss der Abwärme auf das umgebende Erdreich und Wurzeln nachbilden zu können [6].

An Fernwärmeleitungen wurde bisher nicht wissenschaftlich untersucht, inwieweit Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen können. Dazu werden experimentelle Untersuchungen mit Pflanzen an Fernwärmeleitungsprobestücken durchgeführt sowie bei In-situ-Aufgrabungen mögliche Interaktionen von Wurzeln an Fernwärmeleitungen analysiert [6].

Untersuchungsschwerpunkt 2:

Untersuchungen und Analysen von bautechnischen Schutzmaßnahmen gegen Wurzel-Rohr-Interaktionen

Wurzelfeste Rohrverbindungen, porenraumarme Verfüllstoffe sowie Folien und Platten werden zurzeit als bautechnische Schutzmaßnahmen gegen Wurzeleinwuchs an Leitungen bzw. im Leitungsgraben eingesetzt. Prüfungen der Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen sowie Folien und Platten werden in deutschen und/oder europäischen Normen beschrieben. Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit diese (Labor-)Normprüfungen die tatsächlichen Wurzel-Rohr-Interaktionen im Untergrund umfassend nachbilden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dieser Stand der Technik kritisch hinterfragt und bewertet werden [9].

Die Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen wird bisher nicht in Normen beschrieben. Als porenraumarmer Verfüllstoff kann ZFSV eingesetzt werden. Es sollen mittels Labor-, Pflanz- und Feldversuchen neue und bestehende Prüfkriterien zur Wurzelfestigkeit von ZFSV untersucht werden, um einschätzen zu können, inwieweit dieser dauerhaft wurzelfest ist [7; 8].

Untersuchungsschwerpunkt 3:

Entwicklung von Prüfkonzepthen für bautechnische Schutzmaßnahmen sowie Bau und Entwicklung eines Versuchsfelds im Maßstab 1:1

Die aktuellen (Norm-)Prüfverfahren haben in der Praxis eine hohe Anerkennung in der Prüfmethodik. Jedoch werden durch diese Prüfungen nicht alle Randbedingungen für den Schutz vor Wurzeleinwuchs abgebildet. Daher werden weitergehende Prüfkonzepthe für die bautechnischen Schutzmaßnahmen entwickelt.

Zudem gibt es bisher wenige unabhängige Langzeituntersuchungen von bautechnischen Schutzmaßnahmen in der Praxis. Weitergehende, praxisnahe Erkenntnisse sind nur durch langfristige In-situ-Untersuchungen möglich. Daher wird ein Versuchsfeld konzipiert und konstruiert, in dem unterschiedliche Schutzsysteme im Maßstab 1:1 einen langen Zeitraum beobachtet werden können. Dabei werden an Bäumen unterschiedliche Schutzsysteme eingebaut, die nach einer Laufzeit von mehreren Jahren aufgedigaben werden sollen, wodurch die (Langzeit-)Wurzelfestigkeit von bautechnischen Schutzmaßnahmen analysiert und bewertet werden kann [9].

Zusammenfassung: Bewertung der Ergebnisse und Diskussion weiterer Thesen

Abschließend werden die Ergebnisse wissenschaftlich bewertet. Dies beinhaltet die Bewertung hinsichtlich der wissenschaftlichen Aussagekraft der Ergebnisse, die Beschreibung weiter vorhandener Unsicherheiten der Ergebnisse sowie Empfehlungen für die Praxis.

1.3 Gliederung der Arbeit

Der Kern der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse aus den o.g. Forschungsvorhaben und Untersuchungsschwerpunkten [6; 7; 8; 9]. Der wesentliche Fokus der vorliegenden Arbeit liegt darauf, die unterschiedlichen Fragestellungen der Forschungsvorhaben sowie deren interdisziplinäre Ergebnisse in die wesentlichen bautechnischen Fragestellungen bzgl. des Schutzes von unterirdischen Leitungen und Kanälen vor Wurzeleinwuchs einzuordnen.

Durch die Analyse der durchgeführten Untersuchungen in den Forschungsvorhaben [6; 7; 8; 9] sowie unter Berücksichtigung weiterer bereits durchgeführter Forschungsprojekte und Dissertationen sowie des aktuellen Stands der Technik wird ein dreistufiges Prüfprogramm für die bautechnischen Schutzmaßnahmen „Wurzelfeste Rohrverbindungen“, „ZFSV“ sowie „Folien und Platten“ entworfen. Anschließend wird ein Versuchskonzept zur Prüfung von bautechnischen Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1 vorgestellt, welches bereits in der Praxis umgesetzt wurde. Ergänzt werden diese Ausführungen mit Empfehlungen für die Praxis und einer Zusammenfassung der Ergebnisse mit Ausblick auf weitere Forschungsfragen. Die Dissertation gliedert sich wie in Abbildung 1 dargestellt.

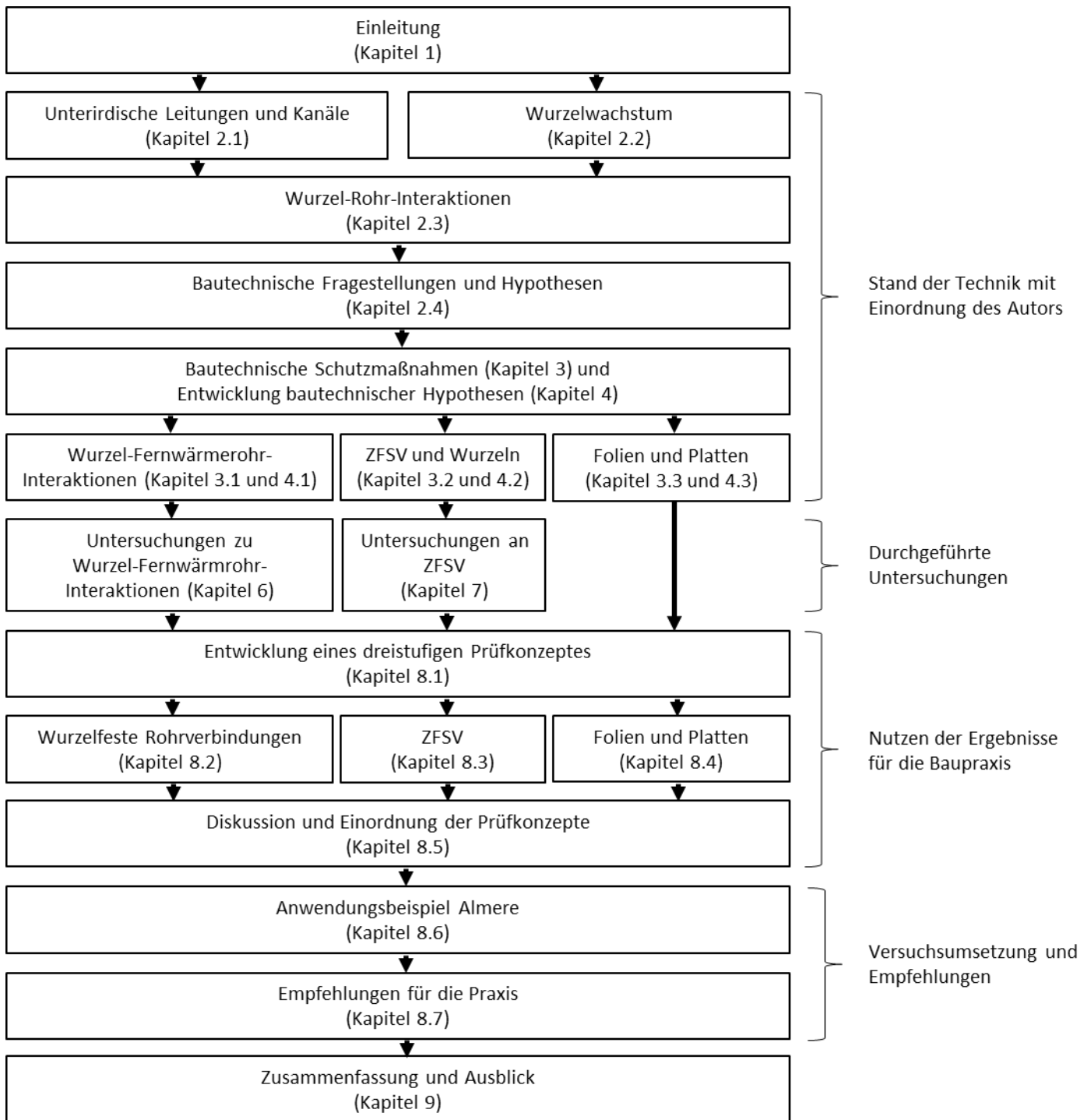


Abbildung 1: Gliederung der vorliegenden Arbeit

Ergänzt werden die in Abbildung 1 dargestellten Kapitel durch Kurzfassung, Abstract und diverser Verzeichnisse.

2 Rohrleitungen und Wurzeln

Durch Rohrleitungen werden Einwohner von Städten sowohl mit Gas, Wasser und Fernwärme versorgt, als auch das anfallende Schmutz- und Regenwasser abgeleitet. Somit sind sie ein wesentlicher Bestandteil des heutigen Lebens. Ein Großteil dieser Leitungen wird im unterirdischen Raum verlegt. Rohrleitungen bestehen aus unterschiedlichen Werkstoffen und werden durch unterschiedliche Verbindungen zusammengeführt. Im urbanen Raum teilen sich Rohrleitungen oftmals den Untergrund mit Baumwurzeln.

In Städten sind Bäume wichtig für die Beeinflussung des Kleinklimas, die Kühlung durch Schattenwurf, Wind- und Erosionsschutz, lufthygienischer Auswirkungen und Staubfilterung sowie optischen Lärmschutz [2, S. 5f.]. Zudem können Bäume das Regenwasser zurückhalten und verdunsten, wodurch sie ebenfalls zu einem besseren Stadtklima beitragen [3, S. 101]. Aus diesem Grund sollten mit Blick auf mögliche Klimaveränderungen (u.a. beschrieben in [20, S. 9]) nicht nur neue Bäume in urbanen Räumen gepflanzt, sondern auch der Altbestand erhalten werden. Die Erhaltung von älteren bzw. bestehenden Bäumen ist nicht nur aus klimatischen Gründen sinnvoll, sondern auch aufgrund der Wirkung als Gestaltungselement, der Einbindung von neuen Bauwerken in die Umgebung, der Minderung des Eingriffs in Natur und Landschaft, aber auch zur Erhaltung des materiellen Wertes von Bäumen. Zudem benötigen neugepflanzte Bäume oftmals eine lange Entwicklungszeit, bis sie wie ältere, bestehende Bäume eine annähernd gleichwertige Wirkungen erzielen [2, S. 5f.].

Bäume haben Wurzeln, die i.d.R. im Boden wachsen. Da auch ein Großteil der Ver- und Entsorgungsleitungen im Boden verlegt werden, kann es dort zu Konflikten zwischen Leitungen und Wurzeln kommen. Mit Blick auf mögliche Klimaveränderungen scheint es als sehr wahrscheinlich, dass nicht nur der Bestand der Bäume erhalten bleiben soll, sondern auch weitere Bäume gepflanzt werden. Dies zeigen u.a. die Initiativen zur Baumpflanzung in urbanen Räumen z.B. in Paris [21], München [22] und Norfolk, UK [23]. Da auch weiterhin die Entsorgung von Abwasser der Stadtbewohner sichergestellt werden muss, werden die teilweise in die Jahre gekommenen unterirdischen Leitungen und Kanäle erneuert bzw. saniert werden müssen [24, S. 11]. Des Weiteren wird der Ausbau von Fernwärmeversorgungsnetzen in Städten gefordert [25, S. 1f.]. Eine Verminderung der Konkurrenzsituation zwischen Wurzeln und Leitungen ist also nicht zu erwarten. Vermutlich kann es in Zukunft sogar verstärkt zu Problemen zwischen Ver- und Entsorgungsleitungen sowie Bäumen und Wurzeln kommen.

Der derzeitige Kenntnisstand zu den Konflikten zwischen unterirdischen Leitungen und Kanälen mit Wurzeln werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Zunächst werden die wesentlichen Aspekte von unterirdischen Leitungen und Kanälen, insbesondere von Abwasser- und Fernwärmenetzen, beschrieben. Anschließend erfolgt eine Darstellung des Wurzelwachstums und der dazugehörigen Bodenparameter. Zum Abschluss des Kapitels

werden die bisherigen Erfahrungen und Forschungsergebnisse zu Wurzel-Rohr-Interaktionen dargestellt und diskutiert.

2.1 Unterirdische Leitungen und Kanäle

Im urbanen Raum wird ein Großteil der Ver- und Entsorgungsleitungen im unterirdischen Raum verbaut und betrieben. In DIN 1998 [26, S. 6] werden als unterirdische Ver- und Entsorgungsanlagen Telekommunikation, Strom, Gas, Wasser, Fernwärme und Fernkälte, Abwasserkanäle, Signalkabel sowie Haupt- und Fernleitungen genannt. Telekommunikations-, Strom- und Signalkabel sowie Gas- und Wasserleitungen sind nach DIN 1998 [26, S. 6] innerhalb von Ortschaften außerhalb der Fahrbahn anzuordnen, Abwasserkanäle, Fernwärme- und Fernkälteleitungen sowie Haupt- und Fernleitungen innerhalb der Fahrbahn. I.d.R. werden Ver- und Entsorgungsleitungen unterhalb versiegelter Straßen- und Gehwege verlegt [17, S. 17]. Ver- und Entsorgungsleitungen werden in offener oder geschlossener Bauweise erstellt [1, S. 12f.].

Bei der offenen Bauweise werden Leitungen durch das Ausheben eines Grabens in den Boden verlegt. Der Bauablauf unterteilt sich in Ausheben des Grabens, Einbau der Leitung mit Böschungen oder Verbau und der lagenweisen Verfüllung des Grabens inklusive Verdichtung [1, S. 12]. Baustoffe zur Bettung und Verfüllung sowie die Einteilung und der Aufbau des Leitungsgrabens sind in Abwasser- und Fernwärmenetzen unterschiedlich und werden daher in den Kapiteln 2.1.1 und 2.1.2 gesondert beschrieben.

In der geschlossenen Bauweise, oder auch grabenlose Bauweise genannt, wird durch Verdrängen, Rammen, Bohren, Pressen oder sonstigen Abbau ein Hohlraum im Boden geschaffen. In diesen Hohlraum werden Rohrleitungen mit unterschiedlicher Querschnittsgeometrie und Kabel eingezogen, eingeschoben oder eingepresst [27, S. 11; 1, S. 13]. Die grabenlose Bauweise wird i.d.R. eingesetzt, wenn sie aus verkehrstechnischen, baulichen oder wirtschaftlichen Gründen sowie aufgrund geringerer Umweltbeeinflussungen zielführend ist [27, S. 18]. Die geschlossene Bauweise kann u.a. bei Neubau so eingesetzt werden, dass u.a. bei ausreichender Tiefe der Leitungen bestehende Wurzeln, im Vergleich zur offenen Bauweise, nicht bzw. weniger geschädigt werden. Jedoch sollte auch bei der geschlossenen Bauweise auf entsprechende Schutzmaßnahmen gegen Wurzeleinwuchs in Leitungen geachtet werden (z.B. wurzelfeste Verbindungen oder Mantelrohre) [1, S. 15]. Jedoch werden bautechnische Schutzmaßnahmen i.d.R. in offener Bauweise ausgeführt und werden entweder direkt am Rohr bzw. Kanal (vgl. wurzelfeste Verbindungen oder Mantelrohre in Kapitel 3.1) oder im bzw. am Leitungsgraben (vgl. porenraumarme Verfüllstoffe sowie Folien und Platten in den Kapiteln 3.3 und 3.2) eingesetzt [1, S. 17f.] und sind somit Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Die Untersuchungen in der hier vorliegenden Arbeit wurden im Abwasser- und Fernwärmebereich durchgeführt (vgl. Kapitel 5 bis 7). Der Schwerpunkt der folgenden Beschreibungen liegt somit bei Abwasser- und Fernwärmenetzen in offener Bauweise mit detailliertem Blick auf die Rohrverbindungen und Bettungen.

2.1.1 Abwasserleitungen und -kanäle

Abwassersysteme dienen zur Beseitigung von Abwasser, Vermeidung von Überflutungen in Siedlungsgebieten und zum Schutz der Umwelt. Das Abwassersystem sammelt das Abwasser, leitet das Abwasser ab, behandelt das Abwasser und leitet das gereinigte Abwasser in Gewässer ein. Das Sammeln und Ableiten erfolgt durch das Entwässerungssystem. Entwässerungssysteme wurden und werden errichtet, damit verschmutztes Wasser abgeleitet werden kann, um Krankheiten zu vermeiden. Abwasser wird entweder in Misch- oder Trennsystemen gesammelt und abgeleitet. In Mischsystemen wird Schmutz- und Regenwasser in einer Rohrleitung zusammen abgeleitet. In Trennsystemen erfolgt das Sammeln und Ableiten von Schmutz- und Regenwasser getrennt in zwei Rohrleitungen [28, S. 8]. Abwasserleitungen leiten das Abwasser von der anfallenden Stelle zum Abwasserkanal, welche das Abwasser aus mehreren Quellen ableiten [29, S. 30, 32]. I.d.R. sind Abwasserleitungen die Anschlüsse bzw. Anschlussleitungen vom Gebäude zum Abwasserkanal in der Straße.

Zur Ableitung von Abwasser wird oftmals die Gravitation genutzt und das Abwasser über sog. Freispiegelkanäle abgeleitet [29, S. 30]. Dabei ist von wesentlicher Bedeutung, dass das Sohlgefälle, also die Neigung der Sohllinie des Abwasserkanals oder -leitung (angegeben in mm/m oder ‰) [30, S. 13], eingehalten wird. Nach [31, S. 446] werden i.d.R. Gefälle von 1 bis 10 ‰ eingesetzt.

Um den Abfluss im Sohlgefälle zu gewährleisten, bestehen hohe Anforderungen an die Gradienten und damit auch an die Bettung der Abwasserleitungen und -kanäle. Durch die Bettung wird eine gleichmäßige Druckverteilung unter dem Rohr gewährleistet, wodurch das Entstehen von Rissen, Verformungen, Punktlagerungen und Undichtheiten verhindert werden soll [32, S. 40]. Die Bettung ist neben der Seitenverfüllung und Abdeckung ein Teil der Leitungszone [33, S. 7]. Der Bereich zwischen Rohrleitungssohle und Kämpfer wird Zwickel genannt [17, S. 11]. Oberhalb der Leitungszone befindet sich die Hauptverfüllung, die bis zur Geländeoberkante reicht. Die Abdeckung befindet sich zwischen Rohroberkante und Hauptverfüllung. Zwischen Abdeckung und Bettung befindet sich die Seitenverfüllung (vgl. Abbildung 2) [33, S. 6f.].

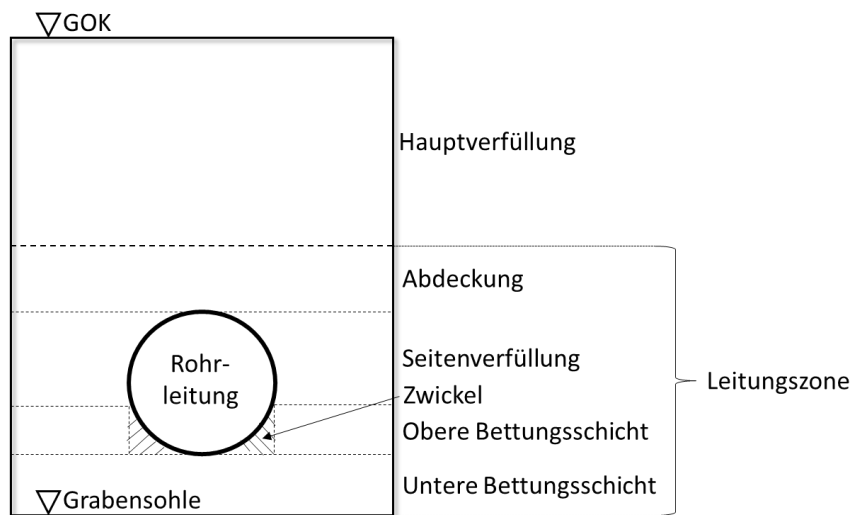


Abbildung 2: Darstellung der Rohrgrabenzone von Abwasserleitungen und -kanälen bei Bettung Typ 1 in Anlehnung an DIN EN 1610 [33, S. 8]

Die Bettung wird in obere und untere Bettungsschicht unterschieden und liegt i.d.R. zwischen Grabensohle und Seitenverfüllung (vgl. Abbildung 2). Ausnahmen bestehen, wenn die Rohrleitungen direkt auf den gewachsenen Boden in der Grabensohle gelagert werden können, dann bildet der gewachsene Boden die untere Bettungsschicht. Die Bettung trägt das Rohr [33, S. 6f.], sodass im Kanalbau in drei unterschiedliche Bettungstypen 1, 2 und 3 unterschieden wird. Bettung Typ 1 kann für jede Leitungszone verwendet werden. Dabei ist die untere Bettungsschicht, zwischen Grabensohle und Rohrsohle, bei üblichen Bodenbedingungen mindestens 100 Millimeter dick, bei Fels oder festgelagerten Böden 150 Millimeter. Bettung Typ 2 und Bettung Typ 3 dürfen bei gleichmäßigen, relativ lockeren, feinkörnigen Böden eingesetzt werden. Bei Bettung Typ 2 wird das Rohr in eine für das Rohr vorgeformte Grabensohle eingelassen, bei Bettung Typ 3 wird der Rohrschaft direkt auf die glattgezogene Grabensohle gelegt [33, S. 18f.] und Rohrmuffen ggf. ausgemuldet.

In der Leitungszone dürfen nur Baustoffe eingesetzt werden, die die Anforderungen nach [33, S. 10ff.] erfüllen und eine dauerhafte Stabilität und Tragfähigkeit der Rohrleitung im Boden gewährleisten. Es kann entweder der anstehende Boden wiederverwendet oder es können angelieferte Baustoffe eingesetzt werden. Baustoffe für die Bettung sollten keine größeren Bestandteile enthalten. Bei Rohrleitungsnennweiten von kleiner DN 200 dürfen diese Bestandteile nicht größer sein als 22 Millimeter, bei Rohrleitungen von DN 200 bis DN 600 nicht größer als 40 Millimeter sowie bei Nennweiten größer DN 600 nicht 60 Millimeter überschreiten [33, S. 10].

Für die Leitungszone können körnige ungebundene Baustoffe und gebundene Baustoffe eingesetzt werden. Körnige ungebundene Baustoffe (in DIN EN 1610 auch als „Granulat“ bezeichnet [33, S. 11]) sind Einkornmaterial(-kies), Material mit abgestufter Körnung, Sand, Korngemische (All-In) und gebrochene Baustoffe. Nach DIN 18196 [34, S. 9] sind auch unterschiedliche Sand-Kies- und Kies-Sand-Gemische als Baustoffe für Erd- und

Baustraßen, Straßen- und Bahndämme sowie Stützkörper als geeignet bis sehr gut geeignet klassifiziert.

Gebundene Baustoffe sind zementverfestigter Beton, stabilisierter Boden (z.B. mit Zement oder Kalziumkarbonat), Leicht- und Magerbeton, unbewehrter und bewehrter Beton sowie selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (vgl. Kapitel 3.2) [33, S. 11]. Andere Baustoffe, z.B. industriell hergestellte Gesteinskörnungen (u.a. Gießereisande) und Recycling-Baustoffe, dürfen in der Leitungszone eingesetzt werden, wenn u.a. die o.g. Anforderungen erfüllt werden [33, S. 12]. Feinkörnige Böden werden in DIN EN 1610 [33] nicht für die Nutzung in der Leitungszone genannt und sind auch nach DIN 18196 [34, S. 10f.] als Baustoffe für Erd- und Baustraßen, Straßen- und Bahndämme sowie Stützkörper als mäßig brauchbar, weniger geeignet bis ungeeignet eingestuft.

Anstehender Boden ist weitestgehend zur Wiederverwendung in der Leitungszone geeignet, wenn er die Anforderungen für angelieferte Baustoffe und den Verdichtungsanforderungen aus Ausführungsbestimmungen/Planung entspricht und allgemein durch die Ausführungsbestimmungen/Planung erlaubt ist. Zudem dürfen im anstehenden Boden keine Materialien enthalten sein, die das Rohr schädigen könnten, wie z.B. „Überkorn“, Baumwurzeln, Müll oder Tonklumpen die größer sind als 75 Millimeter [33, S. 11].

Als Baustoffe für die Hauptverfüllung ist der Großteil der Baustoffe geeignet, der auch für die Leitungszone genutzt werden kann. Als Verfüllung können Aushubböden verwendet werden mit Steinen kleiner der Abdeckungsdicke, der Hälfte der zu verdichtenden Schicht oder kleiner 300 Millimetern. Der kleinste Wert ist maßgebend. Manche Baustoffe, wie z.B. das Einkornmaterial, sind unter bestimmten Randbedingungen möglicherweise nicht für die Hauptverfüllung geeignet [33, S. 12].

Für Verdichtungsarbeiten ist ein angemessener Arbeitsraum notwendig [35, S. 22]. Daher sind nach EN 1610 [33, S. 14ff.] Mindestgrabenbreiten definiert. Die Grabenbreiten orientieren sich i.d.R. an dem horizontalen Außendurchmesser OD_h der einzubauenden Rohrleitung plus dem Mindestarbeitsraum oder sind abhängig von der Grabentiefe, je nachdem welcher Bemessungswert nach DIN EN 1610 [33, S. 14] größer ist. Der Mindestarbeitsraum ist der Raum zwischen Rohrleitung und Grabenwand, und die Größe ist bei verbauten Gräben und geböschten Gräben unterschiedlich definiert. Vereinfacht kann festgehalten werden, dass je kleiner die Rohrleitung und geringer die Baugrubentiefe, desto kleiner ist die vorgeschriebene Grabenbreite. Bei größeren Rohrleitungen können jedoch auch Grabenbreiten von über zwei Metern erforderlich werden [33, S. 14ff.].

Die Kanal- und Leitungstiefen sind abhängig von der einzuhaltenen Überdeckungshöhe, die nach [33, S. 7] der vertikale Abstand zwischen Rohrscheitel und Geländeoberkante ist. Überdeckungshöhen von Abwasserkanälen liegen i.d.R. zwischen 1,2 Metern (Mindestüberdeckung) bis vier Metern [31, S. 444f.]. Regenwasserkanäle in Trennsystemen sind i.d.R. mindestens 1,5 Meter tief [36, S. 25].

Abwasserleitungen und -kanäle werden u.a. aus Steinzeug, Beton, Stahl- und Spannbeton, Polymerbeton, Faserzement, Mauerwerk (Naturstein oder Klinker), PVC-U, PE-HD, PP, duktilem Gusseisen, Stahl und GFK hergestellt [36, S. 81, 99]. Nach einer Hochrechnung sind die am häufigsten in deutschen Abwasserkanälen eingesetzten Werkstoffe Steinzeug (ca. 39 %), unbewehrter Beton/Stahlbeton (ca. 31 %) und Kunststoff (ca. 18 %) [24, S. 5].

Die Rohrverbindungen sind entweder gesteckt, geschweißt, gequetscht, geschraubt oder geklebt [1, S. 14]. Obwohl es diese unterschiedlichen Rohrverbindungsarten gibt, sind eine Vielzahl der Standard-Verbindungen der im Abwasserbereich bisher eingesetzten Werkstoffe gesteckt. Diese sind auch die für Wurzel-Rohr-Interaktionen interessanteren Verbindungsarten und werden hier bereits kurz erläutert (mehr dazu in Kapitel 2.3.1 und 3.1). Auf die weiteren Kanalrohr-Verbindungsarten wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter eingegangen.

Mit Blick auf die in Deutschland am häufigsten eingesetzten Rohrwerkstoffe werden gesteckte Verbindungen i.d.R. bei Steinzeug [36, S. 93], Beton und Stahlbeton [37, S. 7], PP [36, S. 100] und PVC-U [36, S. 99] eingesetzt. Wird eine Rohrverbindung gesteckt hergestellt, so wird die Verbindung als Steckmuffe bezeichnet [36, S. 84]. Nach der zurückgezogenen Norm DIN 19543 [38, S. 1] werden Steckverbindungen hergestellt, in dem das Spitzende des einen Rohres mit der Muffe oder Kupplung eines weiteren Rohres zusammengesetzt wird. Die Dichtwirkung der Steckverbindung wird oftmals mit einem elastischen Dichtmittel erzielt. Konstruktionsbedingt ist bei vielen Steckmuffen i.d.R. außerhalb und innerhalb des Dichtelements ein luftgefüllter Raum. Der Raum außerhalb des Dichtelements und zwischen Dichtelement und Rohrwandung wird als Ringspalt (oder auch äußerer Ringraum), der Bereich dahinter als innerer Ringraum bezeichnet [18, S. 31]. Die Größen von Ringspalt und Ringraum wurden für mehrere Steckmuffen unterschiedlicher Werkstoffe in [17, S. 177ff.] analysiert. Der Bereich, in dem die Dichtung erstmalig direkt an der Rohrwandung anliegt, wird als (Rohr-)Zwickel bezeichnet [17, S. 181]. In Abbildung 3 ist eine Steckmuffenverbindung schematisch dargestellt.

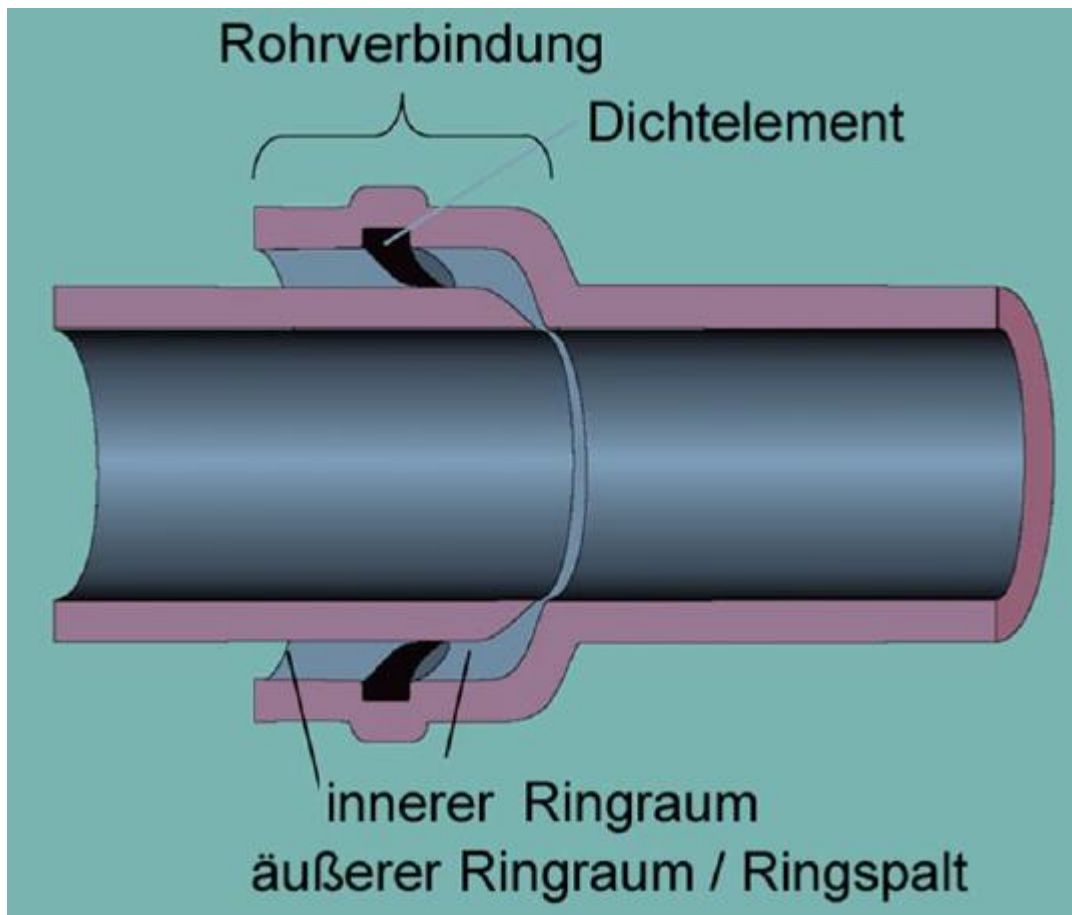


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Steckmuffenverbindung [19, S. 31]

2.1.2 Fernwärmeleitungen

Fernwärmesysteme bestehen aus der Wärmeerzeugungsanlage, dem Verteilersystem, der Übergabe-Hausstation und der Abnehmeranlage [39, S. 428]. Die Wärmeerzeugung erfolgt entweder in reinen Heizwerken, in denen ausschließlich Wärme erzeugt wird, oder Heizkraftwerken, in denen bei der Erzeugung von Strom die Abwärme für die Wärmeversorgung genutzt wird [39, S. 429f.]. Schwerpunkt der folgenden Beschreibungen sind die Verteilersysteme, insbesondere die Fernwärmeleitungen und Bettungen.

Der Großteil der Fernwärmeleitungen wird, vergleichbar mit Abwasserleitungen und -kanälen, direkt in den Boden bzw. die Bettung verlegt [39, S. 433]. Fernwärmesysteme sind Zweileitersysteme, da zunächst das Wasser aus der Wärmeerzeugungsanlage zum Abnehmer hin (Vorlauf), und anschließend wieder zur Wärmeerzeugungsanlage zurück (Rücklauf) transportiert werden muss [40, S. 1]. Vor- und Rücklauf werden entweder in einer Rohrleitung oder in zwei separaten Rohrleitungen eingesetzt [41, S. 2f.].

Bei Fernwärmeleitungen kommt es zu Dehnungen, da sich die Durchflusstemperatur erhöhen oder verringern kann. Damit insbesondere axiale Dehnungen ausgeglichen werden können, wird in bestimmten Abständen entweder die Rohrleitungsführung angepasst, z.B. in Form eines „L“, „Z“ oder „U“, die Rohre werden vorgespannt oder industriell gefertigte Kompensatoren eingesetzt [39, S. 445ff.].

Den größten Verlegeanteil in Fernwärmesystemen haben Kunststoffmantelrohre (KMR) [39, S. 433]. Weitere Rohrarten sind u.a. Stahlmantelrohre und sog. flexible Rohrsysteme mit Kunststoffmediumrohren (PMR) oder Metall-Mediumrohren (MMR) [39, S. 433, 442ff.]. Da der mit Abstand höchste Verlegeanteil bei KMR liegt und auch in den Versuchen in Kapitel 5 ausschließlich KMR eingesetzt werden, wird folgend das KMR tiefergehend beschrieben.

Kunststoffmantelrohre (KMR) bestehen aus einem Stahl-Mediumrohr mit Wärmedämmung aus Polyurethan (PUR) und einer Ummantelung aus Polyethylen (PE) [42, S. 7]. Das Stahl-Mediumrohr transportiert das Wasser bzw. den Dampf. Die Wärmedämmung ist maßgeblich für die Wärmedämmung des Mediumrohres, aber auch zur Übertragung der äußeren Belastungen, z.B. Erd-, Verkehrslasten sowie Schub-, Druckkräfte, von dem Mantelrohr auf das Mediumrohr. Die Standard-Dämmstärke ist abhängig vom Durchmesser des Stahlmediumrohres. Beispielsweise beträgt die empfohlene Standarddämmdicke bei einer Mediumrohr-Nennweite von 100 Millimetern 40 Millimeter und bei einer Mediumrohr-Nennweite von 500 Millimetern 90 Millimeter. Die Ummantelung schützt die Dämmung und das Stahl-Mediumrohr vor dem Eintritt von Wasser und Feuchtigkeit von außen und nimmt mechanische und thermische Belastungen auf [39, S. 461f.]. KMR besitzen eine hohe Temperatur- (kurzzeitige Spitzentemperaturen bis 140°Celsius) und Druckbeständigkeit (bis zu 40 bar). Des Weiteren können KMR mit einem Fehlerortungssystem ausgestattet werden, sodass Schäden und/oder Durchfeuchtungen lokalisiert werden können [39, S. 441f.]. KMR werden bei Überdeckungen von 0,5 bis 2,5 Metern eingesetzt [39, S. 458].

KMR-Verbindungen werden durch Muffen hergestellt. Die Herstellung von KMR-Verbindungen ist im Vergleich zu den Abwasser-Steckmuffen aufwendiger. Die Verfahrensschritte nach [43, S. 5] sind in chronologischer Reihenfolge das Verschweißen des Stahl-Mediumrohres, das Herstellen der Mantelrohrverbindung und das Ausschäumen des Muffenhohlraumes. Dabei ist die Herstellung der Mantelrohrverbindung auf der Baustelle die gefährdetste Stelle des KMR-Systems und sollte daher besonders beachtet und sorgfältig ausgeführt werden [43, S. 6]. Es sind unterschiedliche dauerelastische und stoffschlüssige Mantelrohrabdichtungen auf dem Markt verfügbar. Dauerelastische Systeme werden in Abdichtungen vor und nach Ausschäumung unterschieden. Zu den Systemen vor Ausschäumen gehören PE-Schrumpfmuffen mit vernetzten PE-X-Schrumpfbändern mit Schmelzkleber, PE-X-Schrumpfmuffen mit Schmelzkleber, PE-X-Biegemuffen mit Schmelzkleber sowie Stahlschalenmuffen mit Dichtungskleber. Das einzige System nach Ausschäumen ist eine PE-Überschiebemuffe mit Zentrierbändern und PE-X-Schrumpfbändern mit Schmelzkleber. Stoffschlüssige Systeme werden ausschließlich vor Ausschäumen hergestellt und sind PE-Schrumpfmuffen oder PE-Muffenplatten mit Heizwendelschweißung sowie PE-Einpassmuffen mit Warmgasextrusionsschweißung [43, S. 7].

Schrumpfmuffen werden durch Energie- und Wärmeeintrag an das Mantelrohr geschrumpft. Die Abdichtung zwischen Schrumpfmuffe und Mantelrohr erfolgt mittels Schmelzkleberbändern. Bei unvernetzten PE-Schrumpfmuffen müssen die Muffenenden zusätzlich mit PE-X-Schrumpfbändern abgedichtet werden, da ansonsten die Enden der PE-Schrumpfmuffe bei axialen Verschiebungen des KMR zum „Aufschnäbeln“ neigen. Diese zusätzliche Abdichtung ist bei vernetzten PE-X-Schrumpfmuffen nicht notwendig [43, S. 9]. Die Erläuterungen zu KMR-Verbindungen beschränken sich auf die eben beschriebene Herstellung von dauerelastischen Schrumpfmuffen, da nach Sicht des Autors der Begriff „dauerelastisch“ nicht unbedingt gleich dem Begriff „stoffschlüssig“ nach Regelwerk [1, S. 18] definiert ist und somit nicht zwangsläufig eine wurzelfeste Verbindung nach Regelwerk darstellen muss. Diese Verbindungsarten werden in den Versuchen in Kapitel 6.1.1 untersucht und dort mögliche Rückschlüsse zu „dauerelastisch“ gleich/ungleich „stoffschlüssig“ dargestellt.

Die Grabenbreite beim Bau von Fernwärmeleitungen ist abhängig vom erforderlichen Arbeitsraum, Rohrdurchmesser und der Böschungsart sowie beim Einsatz getrennter Vor- und Rücklaufleitungen vom Mindestabstand zwischen diesen Leitungen. Als Arbeitsraum wird in geböschten Baugruben 0,5 Meter gefordert, bei verbauten Baugruben 0,6 Meter. Dabei ist der Arbeitsraum der Abstand zwischen Außenseite des Bauwerks (Rohrleitung) und Böschungsfuß bzw. Verbau. Der Arbeitsraum ist notwendig, um die Sicherheit des Personals und die Freihaltung der Rettungswege zu gewährleisten sowie aus ergonomischen Gründen und für eine einwandfreie Bauausführung [44, S. 36]. Der horizontale Abstand z zwischen Vor- und Rücklaufleitung sollte bei kleineren Nennweiten mindestens 200 Millimeter betragen und bei Nennweiten größer DN 250 mindestens 350 Millimeter [45, S. 9]. Somit sind Grabenbreiten von mehr als einem Meter schnell erreicht.

Aufgrund der axialen Dehnungen werden bei Fernwärmeleitungen u.a. hohe Anforderungen an Bettungsmaterialien gestellt [45, S. 15]. Dabei sollen die dauerhaften Reibungsverhältnisse zwischen Verfüllmaterial und Ummantelung und die Verträglichkeit mit der Ummantelung sichergestellt sein. Insbesondere eine Beschädigung durch scharfkantiges Bettungsmaterial ist zu vermeiden. Zudem muss der Verfüllboden verdichtungsfähig sein. Entspricht der Bodenaushub nicht diesen Vorgaben, ist er durch verdichtungsfähigen Verfüllboden zu ersetzen [45, S. 17f.]. Als (externe) Bettungen können Natursande und -kiese oder fließfähige Verfüllmaterialien eingesetzt werden [45, S. 18]. Die Bettungsmaterialien werden in der Leitungszone eingesetzt. Die Leitungszone ist definiert als Bereich von der Rohrgrabensohle bis mindestens 10 Zentimetern über dem Rohrscheitel. Die Rohrsohle muss mindestens zehn Zentimeter über der Rohrgrabensohle liegen (vgl. Abbildung 4) [45, S. 14; 46].

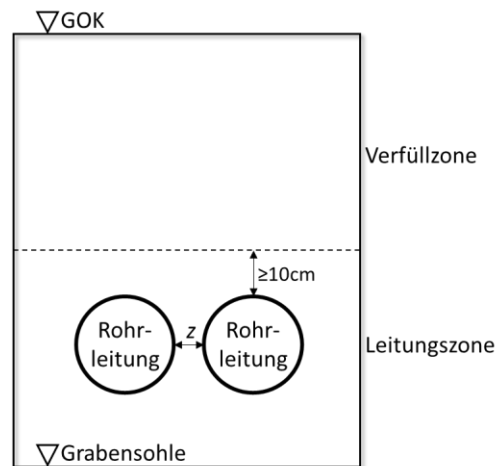


Abbildung 4: Darstellung der Rohrgrabenzonen von Fernwärmleitungen (unter unbefestigter Oberfläche) und ausgewählte Abstände in Anlehnung an AGFW FW 401-12 [45, S. 9, 14; 46]

Bei Bettungen aus Sand und Kies sind bei der Verfüllung alle Hohlräume auszufüllen. Die Verdichtungsarbeiten müssen händisch mit geeigneten Hilfsmitteln erfolgen. Rohrzwickel sowie der Raum zwischen den Rohren (Vor- und Rücklauf) und Grabenwänden müssen gesondert verdichtet werden. So sollen spätere Setzungen und Verschiebungen vermieden werden [45, S. 15]. In der Leitungszone sind Natursande 0/2 nach DIN 4226 [47] bzw. TL Min-StB 2000 [48] mit einem Größtkorn von 4 Millimetern einzusetzen. Bei bestimmten Voraussetzungen können auch Recyclingmaterialien eingesetzt werden, jedoch nicht zur Bettung der KMR [45, S. 18].

Alternativ zur Sandbettung können Beton, Porenleichtbeton und Boden-Bindemittel-Gemische als fließfähige Verfüllmaterialien in der Leitungszone eingesetzt werden. Dabei werden jedoch Verfüllmaterialien empfohlen, bei denen die Abtragbarkeit mit leichten Werkzeugen gewährleistet ist. Dabei sollen hydraulisch stabilisierte Sandmischungen, die fließfähig, selbstverdichtend und selbsterhärtend sind, genutzt werden [45, S. 18]. Nach Einordnung des Autors handelt es sich dabei um ZFSV, was in Kapitel 3.2 ausführlich beschrieben wird.

2.1.3 Wesentliche Eigenschaften in Verbindung zum Wurzelwachstum

Die Beschreibungen in Kapitel 2.1 beziehen sich schwerpunktmäßig auf die offene Bauweise von Abwasserleitungen und -kanälen sowie Fernwärmeleitungen. Folgend werden die wesentlichen Eigenschaften, die später auch in Verbindung mit Wurzelwachstum (vgl. Kapitel 2.2) bzw. Wurzel-Rohr-Interaktionen (vgl. Kapitel 2.3) diskutiert werden, dargestellt:

- Bei beiden Systemen werden hohe Anforderungen an die Bauausführung und die Bettungsmaterialien gestellt. Insbesondere ist vergleichsweise viel Platzbedarf für die fehlerfreie Ausführungen der Rohrverbindungen, Bettungen und Verdichtungsarbeiten notwendig.
- Aus diesen Gründen sind Mindestgrabenbreiten in Normen vorgeschrieben.
- Die üblichen Überdeckungen bzw. Leitungstiefen liegen bei Abwasserkanälen i.d.R. zwischen zwei bis drei Metern, bei Fernwärmeleitungen etwas geringer.
- Als Verfüllmaterialien werden oftmals nicht-bindige Gesteinsmischungen eingesetzt, an die in den Regelwerken ebenfalls hohe Anforderungen gestellt werden, um eine ausreichende Bettung bei Abwasserkanälen und Fernwärmeleitungen für einen dauerhaften Betrieb zu gewährleisten.
- Insbesondere der Zwickelbereich direkt unterhalb der Kämpfer ist insbesondere in schmalen Baugruben schlecht erreichbar, mit der Folge, dass in diesem Bereich ggf. geringere Verdichtungen auftreten können [17, S. 12].
- Abwasserleitungen können unter bestimmten Voraussetzungen auf den ausgemuldeten bzw. geglätteten Baugrund in der Grabensohle verlegt werden. Ob eine nachträgliche Verdichtung des Bereiches zwischen Rohrleitung und anstehenden Boden möglich ist, ist mit Blick auf Wurzel-Rohr-Interaktionen besonders interessant (vgl. Kapitel 2.3).
- Flüssige, selbstverdichtende Verfüllstoffe können ebenfalls als Bettung eingesetzt werden.
- Rohrleitungen werden i.d.R. unter versiegelten Flächen, wie Straßen und Gehwegen installiert und sind u.a. dadurch wechselnden (jahreszeitlichen) Wassergehalten im Boden ausgesetzt (z.B. durch Wasserentzug durch Straßenrandbäume und seitlichem Wasserzufluss) [17, S. 17]
- In Abwassersystemen werden die Rohrverbindungen häufig gesteckt hergestellt (Steckmuffen). Nach den Ergebnissen aus [24, S. 5] sind vermutlich weit mehr als 70% der Abwasser-Rohrverbindungen gesteckt.
- Bei Fernwärmeleitungen werden i.d.R. dauerelastische (Schrumpfmuffen) oder stoffschlüssige Verbindungen eingesetzt.

2.2 Wurzelwachstum und dazugehörige Bodeneigenschaften

Wird das Wurzelwachstum von Bäumen beschrieben, so sind für Bautechniker zwei Arten des Wurzelwachstums zu unterscheiden. Als erstes das Wurzelwachstum nach botanischen Lehrbüchern [z.B. 49, 50] in für die Bäume natürlichen Umgebungen. Als zweites botanisch-bautechnische Beschreibungen des Wurzelwachstums im urbanen, durch Menschen und Baumaschinen beeinflussten, Raum (vgl. Kapitel 2.3). Im hier vorliegenden Kapitel wird das Wurzelwachstum in der natürlichen Umgebung beschrieben mit den dazugehörigen maßgeblichen Bodenparametern.

Als natürliche Umgebungsbedingungen definiert der Autor Lebensräume, in denen keine anthropogenen Einflüsse über oder unter der Bodenoberfläche stattgefunden haben (z.B. Bebauung, Versiegelung und unterirdischer Leitungsbau).

2.2.1 Wurzelwachstum

Allgemein sind Wurzeln i.d.R. unterirdisch zu findende Organe von Pflanzen (oberirdisch bspw. bei Mangroven oder Epiphyten), welche zur Aufnahme von Wasser und Nährsalzen sowie zur Verankerung im Boden dienen [49, S. 641, 660].

In für Bäume natürlichen Umgebungen wird die Ausbreitungsart der Wurzeln verallgemeinert in die Wurzelsysteme Flach-, Pfahl- oder Herzwurzler unterschieden. Dies bedeutet, dass sich die Wurzeln je nach Wachstumstyp entweder flach an der Oberfläche, wie ein Pfahl vertikal (nur eine einzige Wurzel) oder mehrere Wurzeln weitestgehend vertikal (herzförmig) in den Boden ausbreiten [50, S. 149f]. Dabei wird in [50, S. 148] beschrieben, dass bei Bäumen die Ausbreitung des Wurzelsystems auf das Kronenwachstum abgestimmt ist, sodass die äußersten Zonen des Wurzelsystems i.d.R. in horizontaler Ausdehnung etwas über die von der Baumkrone überdeckte Bodenfläche hinauswachsen.

Für die Ausbreitung der Wurzeln im Untergrund ist das Wurzelspitzenwachstum maßgeblich. Dabei ist aus bautechnischer Sicht besonders interessant, dass das Längenwachstum der Wurzel tatsächlich nur an der Spitze stattfindet und nicht über die gesamte Länge der Wurzeln [50, S. 151]. Dies bedeutet nach Sicht des Autors, dass infolge von Wurzelwachstum nur geringe oder ggf. keine großflächigen axialen Reibungen zwischen den Wurzelsträngen und dem Boden bzw. Rohrleitungen stattfinden. Axiale, linienförmige Reibungen an Rohrleitungen durch das Längenwachstum der Wurzel und daraus resultierende Schäden an der Rohrleitung sind somit nicht zu erwarten.

Die Wurzelspitze besteht aus einer Wurzelhaube (Kalyptra), die den Vegetationspunkt umschließt. Diese Wurzelhaube ist kein steifer „Bohrkopf“, sondern eine weiche Schutzhülle, die u.a. als Gleitmittel für das Wurzelspitzenwachstum fungiert. Der Vegetationspunkt (auch Zone der Zellteilung genannt) erzeugt fortlaufend Zellen in radiärer Anordnung im Wurzelquerschnitt, wodurch die Wurzelspitze „wächst“ [49, S. 644]. Wurzelspitzen haben einen Durchmesser von mindestens 0,2 Millimetern [51, S. 142].

Um die Wurzelspitze herum bildet sich, durch das Absondern von sekundären Pflanzenstoffen sowie Stickstoffverbindungen, Kohlenhydraten, Vitaminen und Phytohormonen, eine Rhizosphäre. In dieser Rhizosphäre werden ca. fünf bis zehn Mal so viele Bodenorganismen angetroffen als im restlichen Boden, was u.a. auf einen geeigneten pH-Wert für die Bodenorganismen zurückzuführen ist [49, S. 662]. Dabei spielt auch die Wurzelatmung eine wichtige Rolle. Der Sauerstoff im Boden ist wesentlich für aerobe Wurzeln. Bei der Wurzelatmung geben die Wurzeln Kohlendioxid an den Boden ab. Durch das Kohlendioxid kommt es in der Rhizosphäre zu pH-Veränderungen, die ein Absenken des pH-Wertes an der Wurzeloberfläche um bis zu zwei Werte zur Folge haben kann [51, S. 156f.]. Diese pH-Absenkung beschränkt sich auf maximal zwei Millimeter Abstand zur Wurzel und ist zeitlich begrenzt auf zwei bis drei Tage. Ausnahmen sind u.a. alkalische und stark saure Böden, bei denen sich die pH-Werte der Rhizosphäre nicht wesentlich vom anstehenden Boden unterscheiden. Ein veränderter pH-Wert hat eher Auswirkungen auf Bakterien als auf Pilze, die i.d.R. einen weiter gestreckten pH-Bereich tolerieren und durch eigene Stoffausscheidungen den pH-Wert in der Nähe einstellen [51, S. 157f.].

Innerhalb der Wurzelhaube sind zudem Stärkekörner vorhanden, die der Wurzel zur Richtungsfindung dienen. Diese Richtungsfindung wird in der Botanik als Gravitropismus bezeichnet, was so viel bedeutet, dass Wurzeln „wissen“, ob sie vertikal nach unten, oben oder horizontal wachsen [49, S. 644]. Dabei sind nach [52] absolute Wurzeltiefen bis zu 68 Metern bekannt. Diese erstaunlichen Tiefen werden von Pflanzen in tropischen Savannen erreicht, vermutlich um an das tiefliegende Grundwasser zu gelangen. In immergrünen Wäldern sind maximale Wurzeltiefen von 7,5 Metern, in laubabwerfenden Wäldern bis zu 4,4 Metern und im kultivierten Land bis zu 3,7 Metern bekannt. Die dazugehörigen gemittelten Wurzeltiefen liegen bei 3,9 Metern, 2,9 Metern sowie 2,1 Metern. Allgemein werden nur in der Tundra und in alpinen Regionen mittlere Wurzeltiefen unter zwei Metern beobachtet [52]. Somit liegt ein Großteil der im urbanen Raum verlegten unterirdischen Leitungen und Leitungsgräben innerhalb der mittleren Wurzeltiefen (vgl. Kapitel 2.1) und kann durchwurzelt werden.

Wurzeln können sich mittels Seitenwurzeln verzweigen. Dabei ist die Wuchsrichtung (vertikal oder horizontal) abhängig davon, zu welcher Ordnung die Wurzel gehört. Die meisten Bäume besitzen ein heterogenes (allorrhizes) Wurzelsystem, dessen Ursprung eine vertikal wachsende Pfahlwurzel ist. Einige Baumarten, z.B. Tanne, Kiefer, Eiche, behalten über die Lebensdauer ausschließlich dieses reine Pfahlwurzelsystem. Weitere Baumarten, z.B. Lärche, Birke, Linde, bilden mit der Zeit weitere, ebenfalls mit der Pfahlwurzel vergleichbar kräftige, schräge Seitenwurzeln (Herzwurzelsystem). Andere Baumarten, z.B. Fichte und Esche, sind Flachwurzler, die ein sog. Senkerwurzelsystem besitzen. Dabei bilden sich aus kräftigen, direkt unter der Bodenoberfläche horizontal wachsenden Sekundärwurzeln, schwächere und kürzere Senkerwurzeln vertikal in den Boden aus [50, S. 148f.].

Seitenwurzeln werden in erste, zweite, dritte oder höhere Ordnung unterteilt. Seitenwurzeln erster Ordnung wachsen aus der Primärwurzel schräg oder horizontal weiter ins Erdreich und können sich ebenfalls weiter verzweigen mit Wurzeln zweiter, dritter oder höherer Ordnung [50, S. 148]. Aus Sicht des Autors ist für den bautechnischen Schutz von Leitungen und Kanälen die Aussage nach [50, S. 148] interessant:

„Spätestens die Seitenwurzeln höherer Ordnung wachsen ohne bestimmte Beziehung zum Schwerkraftvektor und können daher den Boden in alle Richtungen durchdringen.“

Nach Sicht des Autors bedeutet dies, dass Wurzeln auch von unten nach oben wachsen können, was bei dem Schutz von Leitungen und Kanälen durch bautechnische Schutzmaßnahmen (vgl. Kapitel 3) beachtet werden sollte.

Hinter Wurzelhaube und Vegetationspunkt befindet sich zunächst die Streckungszone [49, S. 650] und anschließend die Wurzelhaarzone mit einer Länge von wenigen Zentimetern, wobei die Wurzelhaare eine vergleichsweise kurze Lebensdauer von einem bis wenigen Tagen haben [49, S. 642]. Die wenigen Millimeter langen Wurzelhaare zeigen Spitzenwachstum, wodurch sie gut zwischen Bodenteilchen vordringen können [50, S. 143]. Durch die Wurzelhaare werden Wasser und Nährstoffe aufgenommen [49, S. 651]. Wurzelhaare haben einen Durchmesser von ca. zehn bis 20 μm [51, S. 63].

Das Wurzeldickenwachstum (auch als sekundäres Dickenwachstum bezeichnet) ist vom Wurzelspitzenwachstum getrennt zu betrachten und entsteht durch Neubildung von Gewebe. Das Wurzeldickenwachstum findet hauptsächlich bei mehrjährigen Pflanzen statt, damit diese ausreichend im Boden verankert und mit Wasser versorgt werden können [49, S. 654]. Durch das Wurzeldickenwachstum werden Bodenporen vergrößert und die Wurzeln bilden nach dem Absterben vergleichsweise große unterirdische Kanäle [51, S. 142].

U.a. zur Beschreibung von Wurzeln bei In-situ-Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.2 und 7.2) werden nach [53, S. 72] die Wurzelgrößen in Feinst- (kleiner 0,1 cm), Fein- (0,1 bis 0,5 cm), Schwach- (0,5 bis 2,0 cm), Grob- (2,0 bis 5,0 cm) und Starkwurzeln (größer 5,0 cm) unterschieden. Feinst- und Feinwurzeln nehmen Wasser und Nährstoffe bzw. -salze auf. Feinstwurzeln dienen zudem zur Wurzelatmung. Schwach-, Grob- und Starkwurzeln verankern den Baum im Boden, transportieren Wasser- und Nährstoffe und speichern Reservestoffe [53, S. 72].

Für das Verständnis, wie Wurzeln wachsen, sind auch Kenntnisse über die für das Wurzelwachstum maßgeblichen Bodeneigenschaften notwendig und wie Wurzeln mit dem Boden interagieren. In [51, S.3ff] werden dazu Boden-Wurzel-Organismen-, Boden-Wurzelhaar-Mikroorganismen- und Pflanzen-Mikroorganismen-Interaktionen beschrieben.

Das Boden-Wurzel-Organismen-System besteht aus der anorganischen Matrix des Bodens (mineralische Partikel), totem organischen Material (z.B. tote Blätter, Wurzeln und Tierkot)

und lebenden Wurzeln von Pflanzen. In diesem System entsteht durch Wechselwirkungen u.a. die oben beschriebene Rhizosphäre. In dem Boden-Wurzel-Organismen-System entstehen Primär- und Sekundärporen. Primärporen werden in Abhängigkeit ihrer Größe in Fein- ($<0,2 \mu\text{m}$), Mittel- ($0,2\text{-}50 \mu\text{m}$) und Grobporen ($>50 \mu\text{m}$) unterschieden. Durch Feinporen wird das Wasser so stark gebunden, dass es für einen Großteil der Pflanzen nicht nutzbar ist. In Mittelporen wird kapillares Wasser gespeichert, welches von Wurzeln verwertet werden kann. Zudem ist dieser Größenbereich dazu geeignet von Wurzelhaaren und Mikroorganismen erschlossen zu werden. Grobporen können durch Pflanzenwurzeln durchwurzelt werden. In Grobporen wird Wasser nur sehr schwach gebunden, diese sind dadurch eher für die Bodendurchlüftung maßgeblich. Fein-, Mittel- und Grobporen gehören zu den Primärporen (auch als Packungshohlräume bezeichnet), die sich aus Form und Packung der Einzelkörner zusammensetzen. Sekundärporen entstehen durch sekundäre hohlraumbildende Prozesse, wie z.B. Wurzelkanäle, Röhren, Gänge und Kammern von bodenbewohnenden Tieren sowie Schrumpf- und Schwindrisse. Sekundärporen sind im Vergleich zu Primärporen eher vertikal angeordnet und somit gut für Transportvorgänge von u.a. Wasser und Sauerstoff geeignet [51, S. 3f, 24ff].

Boden-Wurzelhaar-Mikroorganismen-Interaktionen finden im Bereich der Mittelporen statt. Diese Poren sind mit Kapillarwasser oder Gas gefüllt. Dabei werden die mineralischen Partikel durch einen Wasserfilm, Wurzelhaare und Pilzhyphen zu einer porösen Matrix zusammengehalten. Sind die Poren mit Kapillarwasser gefüllt, so findet an der Grenzfläche zwischen Fest- und Flüssigphase der Bodenpartikel ein Ionenaustausch mit der Wurzel statt. Von den negativ geladenen Bodenpartikeln werden Kationen freigesetzt und durch Protonen der Wurzel eingetauscht, welche von den Wurzelhaaren aus der Bodenlösung wieder aufgenommen werden. Mit Luft gefüllte Mittelporen sind für die aerobe Lebensweise von Pflanzen und Mikroorganismen wesentlich [51, S. 4].

Bei der Entnahme des Bodenwassers durch die Wurzelhaare wird der hydrostatische Druck gesenkt, wodurch das Wasserpotenzial des Bodens im Bereich der Wurzelhaare im Vergleich zu den nicht durchwurzelteten, oftmals tieferen Bodenzonen, geringer ist. Wasser kann durch den Massenfluss entlang des Druckgradienten nachfließen. Jedoch ist diese Nachleitfähigkeit je nach Bodentyp unterschiedlich und i.d.R. langsam und begrenzt auf wenige Zentimeter [50, S. 356]. Nach [50, S. 356] folgen die Wurzeln aus diesem Grund dem Wasser im Boden. Dabei können Wurzeln eines Baumes in Bodenbereichen mit weniger Wasser absterben und in anderen wasserreichen Bodenregionen stark wachsen, wodurch ein asymmetrisches Wurzelsystem entstehen kann. Das durch die Wurzeln aufgenommene Wasser wird zum größten Teil durch die oberirdische Pflanze als Wasserdampf abgegeben. Dieser Vorgang wird als Transpiration (Verdunstung) bezeichnet [50, S. 356].

Bei Pflanzen-Mikroorganismen-Interaktionen entsteht ein gegenseitiger Stoffaustausch u.a. zwischen Wurzeln und Pilzen (Mykorrhiza). Dabei geben die Pilze Mineralstoffe an die

Pflanze ab und nehmen von der Pflanze Kohlenhydrate auf. Dabei ist für den Stoffaustausch eine physische Durchdringung von Wurzel und Pilz notwendig [51, S. 5f].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Wurzeln nicht als „Bohrköpfe“ den Boden durchpflügen, sondern dass sie durch den Porenraum des Bodens gleiten. Somit ist ein wesentlicher Parameter für das Wurzelwachstum der Porenraum. Minimale Wurzelspitzendurchmesser betragen 0,2 Millimeter. Des Weiteren sind Wasser, Sauerstoff und Nährstoffe für das Wurzelwachstum wichtig. Auch der pH-Wert ist für das Wurzelwachstum und für Wurzel-Boden-Interaktionen maßgeblich.

2.2.2 (Wurzel-)Bodenparameter

Der Porenraum ist ein bodenmechanischer Parameter, der von vielen weiteren Bodenparametern abhängig ist bzw. beeinflusst wird. In der bodenmechanischen Norm 19683-13 [54, S. 4] wird der Porenraum als Porenanteil bezeichnet und zur Beschreibung der Durchwurzelbarkeit eines Bodens klassifiziert. Folgend werden weitere Bodenparameter identifiziert und beschrieben, die den Porenraum beeinflussen bzw. aus bautechnischer Sicht ebenfalls für das Wurzelwachstum maßgebend sein können.

Bei genauerem Blick wird ersichtlich, dass das Wurzelwachstum wesentlich von den drei Phasen des Bodens abhängig ist. Die Phasen unterteilen sich in fest (Bodenmatrix), flüssig (Bodenlösung) und gasförmig (Bodenluft) [51, S. 21]. Der feste Anteil besteht aus Bodenkörnern, deren Zwischenräume (Poren) entweder mit Wasser oder Luft (Zweiphasensystem) oder mit Wasser und Luft (Dreiphasensystem) gefüllt sind [55, S. 127]. Nach [51, S. 21] können Zweiphasensysteme jedoch nur durch spezialisierte Organismen besiedelt werden. Da Wurzeln Sauerstoff und Wasser für das Wachstum und das Überleben benötigen (vgl. Kapitel 2.2.1), wird folgend das Zweiphasensystem nicht weitergehend beschrieben.

Die Anordnung der Bodenkörner wird als Bodengefüge oder Bodenstruktur bezeichnet [51, S. 26; 55, S. 137], die Anordnung der Poren als Porenstruktur [51, S. 26]. Bodengefüge werden dahingehend unterschieden, inwieweit sich die Bodenkörner aneinanderfügen. Dies ist abhängig von der Größe und Art der Bodenkörner. Bei Kies- und Sandkörnern sowie Grobschluff sind die molekularen Anziehungskräfte und die elektrischen Ladungskräfte so gering, dass sich die Körner in die Hohlräume anderer Bodenkörner ablagern können. Dies wird als Einzelkorngefüge bezeichnet. Tonmineralien mit am Rand positiver und an der Seite negativer Ladung haften mit Ecken und Kanten an den Seitenflächen anderer Bodenteilchen und bilden ein Wabengefüge bzw. kartenhausartiges Gefüge. Zudem kann sich im Salzwasser ein Flockengefüge bilden, welches durch das Sedimentieren mehrerer flächig haftender Teilchen entsteht. Diese sog. Aggregate sinken gemeinsam ab zu einem lockeren Flockengefüge. Durch Verdichtung bilden sich sekundäre Strukturen mit Krümeln, bei denen größere Hohlräume im Boden entstehen können [55, S. 137]. Sind diese Hohlräume bzw.

Poren ausreichend groß, so werden diese ebenfalls durchwurzelt werden können (vgl. Kapitel 2.2.1).

Das Bodenvolumen V wird in die Volumenanteile der Phasen aufgeteilt. Sie können stark schwanken, i.d.R. sind 50 % aus Bodenmatrix und 50 % aus Bodenporen (Porenvolumen), wovon ca. 20 bis 50 % Bodenlösung (Wasser) und 0 bis 30 % Bodenluft sind. Die feste Phase besteht zu ca. 90 bis 98 % aus mineralischen Anteilen und ca. 2 bis 10 % aus organischen Anteilen [51, S. 21]. Mineralische Böden entstehen durch Verwitterung von Festgesteinen. Reste organischer Lebewesen sind in organischen und organogenen Böden enthalten [55, S. 123]. Nach [51, S. 34] ist der organische Anteil zu ca. 85 % der Gesamtmasse aus Humus, zu dem alle abgestorbenen Lebewesen und Umwandlungsprodukte gehören. Die restlichen 15 % der organischen Masse im Boden bestehen aus lebenden Organismen, der sog. Biomasse [51, S. 34]. Der organische Anteil bindet viel Wasser, wodurch sich die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften des Bodens verschlechtern können. Der Gehalt des organischen Anteils wird durch Glühen von vorher im Ofen getrockneten Bodenproben bei 550 °Celsius bestimmt (nach DIN 18128 [56, S. 4]), wobei der auftretende Gewichtsverlust auf die Trockenmasse bezogen als Glühverlust bezeichnet wird [55, S. 136]. Wurzeln nehmen u.a. Nährstoffe auf (vgl. Kapitel 2.2.1), daher ist auch ein bestimmter Anteil organischen Materials im Boden notwendig, damit Wurzeln und Bäume (vital) wachsen können.

Der Porenanteil n ist das Verhältnis zwischen Porenvolumen und gesamten Bodenvolumen. Nach [57, S. 20] wird der Porenanteil n auch als Porosität n eines Bodens bezeichnet. n_w ist der wassergefüllte Porenanteil, n_a der luftgefüllte Porenanteil. Äquivalent dazu ist die Packungsdichte D_P der Anteil des Bodengefüges zum Bodenvolumen [u.a. 57, S. 25] und wird insbesondere für die Beschreibung zur Wurzelfestigkeit von ZFSV genutzt (vgl. Kapitel 3.2 und 7). Das Verhältnis von Porenvolumen zu Festvolumen wird mit der Porenzahl e dargestellt [55, S. 137]. Die Porenzahl e wird nach DIN 19683 [54, S. 4] auch als Porenziffer ε bezeichnet. Dabei gelten u.a. folgende Zusammenhänge [55, S. 137]:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1) \quad \text{und} \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad (2)$$

Porenanteil und Porenzahl können durch die Bodendichte ρ , durch Kenntnis der Korndichte ρ_s sowie des Wassergehalts w berechnet werden [55, S. 137]. Die Korndichte ρ_s ist die Trockenmasse der Körner m_d bezogen auf das Kornvolumen V_{Kom} inklusive eingeschlossener Hohlräume [55, S. 132]. Die Bodendichte ρ ist die feuchte Bodenmasse m im Verhältnis zum feuchten Bodenvolumen V . Die Trockendichte ρ_d ist das Verhältnis zwischen Trockenmasse m_d und dem feuchten Bodenvolumen V [55, S. 140]. Der Wassergehalt w eines Bodens ist das Verhältnis zwischen der Masse des Porenwassers m_w und der Trockenmasse m_d .

Die eben beschriebenen Zusammenhänge zwischen Dichten, Bodenmassen und Wassergehalt des Bodens sind folgend dargestellt [55, S. 132; 140, 142]:

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_{Korn}} \quad (3); \quad \rho = \frac{m}{V} \quad (4); \quad \rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (5); \quad w = \frac{m_w}{m_d} \quad (6)$$

Daraus lassen sich u.a. folgende weitere Beziehungen ableiten [55, S. 140]:

$$\rho_d = (1 - n) * \rho_s \quad (7) \quad \text{und} \quad \rho = \rho_d * (1 + w) \quad (8)$$

Des Weiteren stehen nach [51, S. 26] die Körnung, Porung und Lagerungsdichte in engem Zusammenhang mit der räumlichen Anordnung der Bodenphasen. Die Körnung oder auch Korngrößenverteilung sind die Massenanteile der vorhandenen Korngrößengruppen in einem Boden [55, S. 129]. Die Zuteilung der Korngrößengruppen zu den unterschiedlichen Bodenarten wird in Tabelle 1 dargestellt. Die Porung ist die Einordnung der Poren in die bereits oben beschriebenen Porengrößenklassen grob, mittel und fein [51, S. 24].

Tabelle 1: Kornfraktionen und -größengruppen in Anlehnung an [55, S. 130]

Hauptgruppe	Benennung	Korngrößengruppe in [mm]
feinkörnige (bindige) Böden	Ton (Feinstes)	< 0,002
	Schluff	> 0,002 bis 0,063
	Feinschluff	> 0,002 bis 0,0063
	Mittelschluff	> 0,0063 bis 0,02
	Grobschluff	> 0,02 bis 0,063
grobkörnige (nicht-bindige) Böden	Sand	> 0,063 bis 2,0
	Feinsand	> 0,063 bis 0,2
	Mittelsand	> 0,2 bis 0,63
	Grobsand	> 0,63 bis 2,0
	Kies	> 2,0 bis 63
	Feinkies	> 2,0 bis 6,6
	Mittelkies	> 6,3 bis 20
	Grobkies	> 20 bis 63
sehr grobkörnige Böden	Stein	> 63,0 bis 200
	Block	> 200 bis 630
	großer Block	> 630

Mit Blick auf die räumliche Anordnung der Phasen sind des Weiteren auch die Kornform und -rauigkeit zu betrachten. Kornformen werden nach kugelig, gedrunen, prismatisch, plattig, stäbchenförmig und plättchenförmig unterschieden. Kornrauigkeiten in scharfkantig, kantig, rundkantig, gerundet und glatt [55, S. 134]. Sind die Körner gleichmäßig groß, desto größer ist i.d.R. auch der Porenanteil. Je abgestufter die Körnung ist, desto höher lässt sich die Lagerungsdichte erzielen, wodurch der Porenanteil kleiner wird, da sich die kleineren

Körner in die Porenräume der größeren Körner einlagern können. Runde Formen erhöhen eher die Lagerungsdichte im Vergleich zu eher sperrigen eckigen Formen [51, S. 26f.].

Wie in Tabelle 1 dargestellt, werden Böden in bindige (feinkörnige) und nicht-bindige (grobkörnige) Böden unterschieden. Zur Beschreibung und Bestimmung dieser zwei Bodentypen werden unterschiedliche Parameter und Verfahren genutzt. Welche Parameter für bindige und nicht-bindige Böden maßgeblich sind, wird folgend beschrieben. Inwieweit diese Parameter maßgeblich zur Beschreibung der Durchwurzelbarkeit eines Bodentyps sind, wird folgend diskutiert und ist u.a. Gegenstand der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 7).

Zur Beschreibung von bindigen Böden wird u.a. die Konsistenz genutzt. Je geringer der Wassergehalt w einer bindigen Probe ist, desto fester ist die Konsistenz und desto größer ist die Festigkeit. Konsistenzen von bindigen Böden werden in flüssig, breiig, weich, halbfest und fest unterschieden [55, S. 142f].

Die Lagerungsdichte D wird in bodenmechanischen Beschreibungen dazu genutzt, die lockerste und dichteste Lagerung von Schüttungen bzw. nicht-bindigen Böden zu beschreiben. Die Lagerungsdichte D ist wie folgt definiert [55, S. 141]:

$$D = \frac{\max n - n}{\max n - \min n} = \frac{\rho_d - \min \rho_d}{\max \rho_d - \min \rho_d} = \frac{1 + \min e}{1 + e} * I_D \quad (9)$$

mit I_D als bezogene Lagerungsdichte:
$$I_D = \frac{\max e - e}{\max e - \min e} = \frac{\max \rho_d}{\rho_d} * D \quad (10)$$

Somit kann im Vergleich von maximaler und minimaler Trockendichte ρ_d , Porenanteil n oder Porenzahl e der Verdichtungsgrad eines nicht-bindigen Bodens beschrieben werden [55, S. 140ff.]. Dabei werden die Lagerungsdichten eines Bodens nach [55, S. 142] wie in Tabelle 2 dargestellt benannt.

Tabelle 2: Benennung der Lagerungsdichten eines Bodens nach [55, S. 142]

Lagerungsdichte D [-]	0 - 0,15	0,15 – 0,30	0,30 – 0,50	0,50 – 0,80	> 0,80
Benennung	sehr locker	locker	mitteldicht	dicht	sehr dicht

Nach [51, S. 23f.] stehen die Lagerungsdichte (wird in der Geotechnik ausschließlich für nicht-bindige Böden ermittelt) und die Porosität (in Geotechnik Porenanteil) des Bodens in enger Beziehung zur Durchwurzelbarkeit des Bodens. Jedoch wird in [51] in diesem Zusammenhang die Lagerungsdichte als scheinbare Dichte ρ_a bezeichnet, die äquivalent zur Trockendichte ρ_d nach [55, S. 140] ist (*Einordnung des Autors*). Diese kurze Einordnung ist notwendig, da nach Flühler (unpubliziert und in Anlehnung dargestellt in [51, S. 24]) für Böden ein Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte (Trockendichte), Porosität (Porenanteil) und Durchwurzelbarkeit wie folgt dargestellt wird [51, S. 24]:

- **Gut durchwurzelbar** bei einer Lagerungsdichte ρ_a bzw. Trockendichte ρ_d von 0,9 bis 1,4 g/cm³ und einer Porosität bzw. Porenanteil von ca. 0,45 bis 0,65 [-]
- **Schlecht durchwurzelbar** bei einer Lagerungsdichte ρ_a bzw. Trockendichte ρ_d von 1,4 bis 1,8 g/cm³ und einer Porosität bzw. Porenanteil von 0,3 bis 0,45 [-]
- **Sehr dicht gelagert** bei einer Lagerungsdichte ρ_a bzw. Trockendichte ρ_d größer 1,8 g/cm³ und Porosität bzw. Porenanteil kleiner 0,3 (ohne Angaben zur Durchwurzelbarkeit)
- **Sehr locker gelagert** bei einer Lagerungsdichte ρ_a bzw. Trockendichte ρ_d kleiner 0,9 g/cm³ und einer Porosität bzw. einem Porenanteil größer 0,65 als (ohne Angaben zur Durchwurzelbarkeit)

Für ein Resümee dieser Aussagen sollte zunächst wiederholt werden, dass Wurzeln ausschließlich in Grobporen wachsen (vgl. Kapitel 2.2.1). Dies hat für die Aussagen aus [51, S. 24] zur Folge, dass mit steigender Porosität bzw. Porenanteil n und sinkender Trockendichte ρ_d zwangsläufig auch der Anteil der Grobporen steigen muss.

Nach [58; 59] können Wurzeln auch Bodenbereiche ohne starke Seitenverzweigungen durchwachsen, in denen Wasser und Nährstoffe nicht ausreichend zur Verfügung stehen oder die aufgrund der hohen Bodendichte nicht durch Feinwurzeln erschlossen werden können.

Transporteigenschaften des Bodens werden durch das Bodengefüge vergleichsweise stark beeinflusst. Aus diesem Grund sind u.a. die Wärme-, Wasser- und Gasleitfähigkeit als quantitative Charakterisierung des Bodengefüges geeignet [51, S. 26f.].

Nach [51, S. 39f.] erfolgt die Bindung des Wassers an die Bodenmatrix, welches nur wenige Moleküldurchmesser von der Matrixoberfläche entfernt ist, indirekt über Kohäsion, so dass dieses dann als Kapillarwasser bezeichnet wird. Die Oberflächenspannung des Wassers führt zu einem Anstieg des Wassers in sog. Kapillarrohren. Dabei ist α der Benetzungswinkel zwischen Wasser und Kapillarrohrwand. Der Benetzungswinkel ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und beträgt für Böden ca. null Grad [55, S. 148f.]. Nach [51, S. 40] ist eine vollständige Benetzung bei α gleich null Grad und eine unvollständige Benetzung bei α größer null Grad erreicht. Die Poren im Boden sind ungleichmäßig groß, ähnlich wie in einem Jamin-Rohr mit unterschiedlichen Durchmessern über die Höhe des Rohres [55, S. 149]. An diesem Jamin-Rohr lassen sich gut die aktive kapillare Steighöhe h_{ka} und passive kapillare Steighöhe h_{kp} erläutern: Wird das Rohr in Wasser getaucht, so ist das Ansteigen des Wassers durch die größten Rohrdurchmesser bis zur aktiven kapillaren Steighöhe begrenzt. Wird der Wasserspiegel abgesenkt, so halten die kleinsten Rohrdurchmesser das Wasser bis zur passiven kapillaren Steighöhe, oder auch kapillare Rückhaltehöhe genannt, zurück [55, S. 149]. Die kapillaren Rückhaltehöhen variieren von 0,08 Metern bei sandigen Kiesen bis zu 50 Metern bei Tonen [55, S. 151].

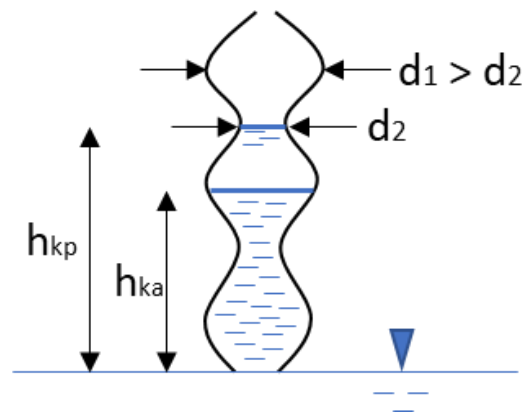


Abbildung 5: Aktive und passive kapillare Steighöhe im Jamin-Rohr nach [55, S. 149]

Das Wasserpotential ist die zu erbringende Arbeit pro Masseneinheit, um dem Boden Wasser zuzuführen bzw. zu entnehmen [51, S. 42]. Die Sättigungszahl S_r beschreibt den Anteil des mit Wasser gefüllten Porenvolumens. Sie beträgt 1,0 im vollgesättigten Bereich und ist $0 < S_r < 1$, wenn der Boden teilgesättigt ist [55, S. 140].

Ein Boden gibt erst Wasser ab, wenn die Saugspannung einen kritischen Schwellenwert überschreitet, der Lufteintrittswert genannt wird. Dabei zeigt eine Desorptionskurve die Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt auf. Das Matrixpotential ist der Anteil des Wasserpotentials, welches in den Kapillaren variiert. Der Wassergehalt eines Bodens wird oftmals als Funktion des negativen Logarithmus des Matrixpotenzials aufgetragen, was als pF-Wert und dann als pF-Kurve bezeichnet wird [51, S. 43]. In der pF-Kurve wird nicht verwertbares Wasser, pflanzenverfügbares Wasser und Gravitationswasser dargestellt. [51, S. 44]. Wasser ist für Pflanzen verfügbar (Wasserverfügbarkeit), wenn das Wasserpotential zwischen dem permanenten Welkepunkt (bei pF 4,2) und der Feldkapazität (bei pF 1,8) liegt, welches sich i.d.R. in Poren mit einer Größe von 0,2 bis 50 μm befindet. Die Feldkapazität ist der Wasserzustand eines normal durchlässigen Bodens, welcher sich nach ca. drei Tagen bei vorheriger vollständiger Wassersättigung einstellt, wodurch das Gravitationswasser aus den Grobporen vollständig drainiert ist. Wasser kann von Pflanzen auch bei höherer Sättigung aufgenommen werden, jedoch fließt i.d.R. das Wasser in durchlässigen Böden vergleichsweise schnell wieder aus der Wurzelzone ab oder führt bei schwach durchlässigen Böden zu einer unzureichenden Durchlüftung. Die Feldkapazität liegt bei Wasserpotentialen zwischen -0,4 und -1,6 kPa. Der permanente Welkepunkt ist der Bereich, in dem die Pflanzen dem Boden das Wasser nicht mehr entnehmen können und daher die Pflanzen zu welken beginnen und schließlich vertrocknen. Der Bereich des permanenten Welkepunkts ist von Pflanze zu Pflanze unterschiedlich und liegt ca. zwischen -0,5 und -2,5 MPa. In Sandböden liegt der Anteil des pflanzenverfügbaren Wassers bei 20 bis 30 %, des nicht verfügbaren Wassers bei 10 bis 20 % und des Gravitationswassers bei 60 bis 70 %. In tonigen Böden sind 20 bis 40 % des Wassers für Pflanzen verfügbar, 50 bis 70 % nicht verfügbar und 5 bis 15 % sind Gravitationswasser [51, S. 47f.].

Die Wasserdurchlässigkeit ist ein Maß für die Leitfähigkeit eines Bodens, welches angibt, wie schnell eine Bodenprobe mit Wasser durchströmt werden kann. Fließt Wasser durch das Porensystem eines Bodens, so wird die Fließbewegung durch die Eigenschaften des Porensystems behindert. Der Boden bildet einen Fließwiderstand, der mehr oder weniger stauend sein kann [60, S. 107]. Die absoluten Porengrößen und deren Verteilung sind maßgeblich für die Wasserdurchlässigkeit eines gesättigten Bodens [55, S. 147]. Die Filtergeschwindigkeit v_f eines Bodens ist der senkrechte (Wasser-)Durchfluss Q durch die (Proben-)Querschnittsfläche A [55, S. 151f.]. Die Wasserdurchlässigkeit wird mit dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f in m/s angegeben. Es wird in die Durchlässigkeitsbereiche sehr schwach durchlässig (unter 10^{-8} m/s), schwach durchlässig (10^{-8} bis 10^{-6} m/s), durchlässig (über 10^{-6} bis 10^{-4} m/s), stark durchlässig (über 10^{-4} bis 10^{-2} m/s) und sehr stark durchlässig (über 10^{-2} m/s) unterschieden [61, S. 3]. Die Wasserdurchlässigkeit wird in der Fachliteratur bisher nicht in den direkten Zusammenhang mit Wurzelwachstum gebracht. Jedoch sind insbesondere die absoluten Porengrößen und deren Verteilung ebenfalls maßgebliche Parameter für das Wurzelwachstum. Daher könnte hier ein Zusammenhang zwischen dem hydrogeologischen Parameter Wasserdurchlässigkeit und dem Wurzelspitzenwachstum vorliegen.

Die Bodentemperatur ist mit am stärksten von räumlichen und zeitlichen Schwankungen betroffen. Der Wärmetransport erfolgt durch Strahlung, Leitung und Strömung. Bei der Wärmestrahlung wird die Wärme über elektromagnetische Wellen durch den Boden transportiert. Die Wärmeleitung erfolgt über die Übertragung kinetischer Energie beim Zusammenstoßen von Molekülen und wird daher als Diffusionsvorgang bezeichnet. Bei der Wärmeströmung wird die Wärmeenergie konvektiv durch einen Massenfluss im Boden transportiert. Die Wärmeströmung findet insbesondere in den oberen Zentimetern des Bodens statt [51, S. 82f.]. Der Wärmetransport eines Bodens ist vom Wassergehalt des Bodens sowie der Textur und Wärmeleitfähigkeit der mineralischen Körner abhängig. Die Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK] des Bodens wird u.a. durch den Wassergehalt des Bodens beeinflusst [51, S. 84] und ist die Fähigkeit eines Stoffes bzw. Bodens die Wärmeenergie zu übertragen [62, S. 3].

Die Bodenluft besteht aus den gleichen Stoffen wie die oberirdische Atmosphäre, oftmals jedoch in stark abweichender Zusammensetzung. Durchschnittliche Werte für die Bodenluft sind bei Stickstoff ca. 79 bis 83 %, Sauerstoff und Kohlendioxid zusammen von ca. 17 bis 21 %. Bei gut durchlüfteten Bedingungen liegt der Sauerstoffgehalt bei 18 bis 21 % und der Kohlenstoffgehalt bei 1 bis 2 %. Bei schlecht durchlüfteten Bedingungen kann der Sauerstoffgehalt zwischen 0 und 5 % und der Kohlenstoffgehalt zwischen 5 bis 12 % liegen. Das Wurzelwachstum ist unterhalb von 4 % Sauerstoff eingeschränkt [51, S. 47f.]. Auch der Sauerstoffgehalt eines Bodens steht u.a. in Zusammenhang mit dem Porenvolumen und insbesondere der Porengrößenverteilung.

2.2.3 Wesentliche Eigenschaften in Verbindung zu unterirdischen Leitungen

Folgend werden die Eigenschaften des Wurzelwachstums diskutiert, die im urbanen Raum dazu führen können, dass Wurzeln in den Leitungsbereich einwachsen, bzw. die bei unterirdischen Leitungen und Kanälen zu Interaktionen führen können.

Das Wurzelwachstum in Böden ist u.a. von bodenphysikalischen, bodenchemischen und hydrogeologischen Faktoren abhängig. Wurzeln benötigen Raum, Wasser, Nährstoffe und Sauerstoff zum Wachsen. Jedoch sind diese Parameter nur in bestimmten Größenordnungen bzw. Konzentrationen für die Wurzeln verfügbar. Für das Wurzelwachstum ist nicht nur wichtig, ob z.B. allgemein Wasser im Boden vorhanden ist, sondern, ob die Wurzel auch fähig ist, dieses Wasser aufnehmen zu können.

Zudem muss das Bodengefüge so gestaltet sein, dass Wurzeln ausreichend große Poren zum Wachsen vorfinden. Ein hoher Porenanteil mit ausschließlich Fein- und Mittelporen scheint nicht für das Wurzelwachstum geeignet. Je mehr der Boden verdichtet ist, desto geringer ist auch der Porenraum. Zudem können Wurzeln auch bestimmte lebensunfreundliche Bodenbereiche durchwachsen bzw. überbrücken, bis sie wieder lebensfreundliche Bodenbereiche finden.

Es ist auch zu diskutieren, ob eine einzige, ausreichend große und durchgehende Pore (z.B. durch ein Tier) in einem ansonsten gut verdichteten und porenarmen Boden dazu führen kann, dass Wurzeln den gesamten Bodenabschnitt durchwachsen bzw. erschließen können. Weitergehend sollte diskutiert werden, ob es einen Unterschied für die maßgeblichen Bodeneigenschaften für das Wurzelwachstum zwischen bindigen und nicht-bindigen Böden gibt. Tonige Böden haben i.d.R. einen höheren Porenanteil als nicht-bindige Böden. Jedoch ist die Porenstruktur auch unterschiedlich. Zudem ist der Durchlässigkeitsbeiwert bei den bindigen Böden i.d.R. geringer als bei den nicht-bindigen Böden [63, S. 14, nach Garling & Dittrich, 1979].

Zusammenfassend werden in der Fachliteratur folgende Eigenschaften in direkten Zusammenhang mit Wurzelwachstum gebracht:

- Wurzelspitzenwachstum in Grobporen (Wurzelspitzengröße $> 0,2$ mm) [51, S. 24, 142]
- Durchwurzelung von Böden mit Trockendichten ρ_d zwischen 0,9 bis 1,4 g/cm³ [51, S. 24]
- Durchwurzelung von Böden mit Porenanteilen bzw. Porositäten zwischen ca. 0,45 bis 0,65 [51, S. 24]
- Vorhandensein von pflanzenverfügbarem Wasser zwischen permanentem Welkepunkt (bei pF 4,2) und Feldkapazität (bei pF 1,8) [51, S. 43]
- Wasserentnahme durch Haarwurzeln in Porengrößen (Mittelporen) von 0,2 bis 50 μm [51, S. 47]
- Für die Wurzelatmung wird ein Sauerstoffanteil im Boden größer 4 % benötigt [51, S. 48]

Ferner ist aus den bisherigen Beschreibungen ersichtlich, dass abhängig von der Fachrichtung in der Literatur für den gleichen Parameter bzw. die gleiche Aussage unterschiedliche Begriffe, wie z.B. Porenraum, Porenanteil, Porenvolumen oder Porosität, genutzt werden. In der vorliegenden Arbeit wird folgend der Begriff **Porenraum** definiert als allgemeine botanische sowie bodenphysikalische und bodenchemische Beschreibung, inwieweit Wurzeln im Boden überhaupt wachsen können. Es kann unterschieden werden in porenraumarme (wurzelabweisende) Böden und porenraumreiche (wurzelfördernde) Böden. Genau definierte Grenzwerte oder eine physikalische Einheit sind nicht definiert. Als zweiter bautechnischer Parameter wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff **Porosität** (in der Geotechnik der Porenanteil als Verhältnis zwischen Porenvolumen und gesamten Bodenvolumen) genutzt, der in der Fachliteratur insbesondere im Zusammenhang mit wurzelabweisenden ZFSV-Rezepturen genutzt wird. Für die Porosität (Porenanteil) wurden bisher auch Grenzwerte ermittelt, inwieweit ein dauerhafter Schutz vor Wurzeleinwuchs gewährleistet sein kann (vgl. Kapitel 3.2.2).

2.3 Wurzel-Rohr-Interaktionen

In den Lehrbüchern [z.B. 49; 50] liegt der Fokus auf dem Wurzelwachstum in für die Pflanzen natürlichen Umgebungen. Der unterirdische urbane Raum kann sich jedoch sehr deutlich von den natürlichen Umgebungen des Baumes unterscheiden, z.B. liegen eine Vielzahl an unterschiedlichen Leitungen und Kanälen im unterirdischen Straßenraum, die zudem in unterschiedlichen Bettungen bzw. Böden verlegt werden (vgl. Kapitel 2.1). Daher sind Stadtbäume i.d.R. anderen Randbedingungen ausgesetzt als Bäume in ihren natürlichen Umgebungsbedingungen. Nach [64, S. 27] können Bäume und Wurzeln im urbanen Raum insbesondere durch zu kleine Wurzelräume, Bodenversiegelungen und -verdichtungen, Wasser- und Nährstoffmangel, Vernässung, extreme Boden pH-Werte, Wurzelschäden, Bodenauf- und -abtrag sowie Streusalz und weitere Stoffeinträge (z.B. Schwermetalle und Pestizide) negativ beeinflusst bzw. gestört werden. Zudem sind nicht nur die allgemeinen Wachstumsbedingungen für Bäume und Wurzeln in urbanen Räumen oftmals nicht ausreichend genug, sondern Beschädigungen bei (Tief-)Bauarbeiten sind ebenfalls eine Belastung für Bäume und Wurzeln. In DIN 18920 [65, S. 4] werden als Schadensursachen bei Bau- und Instandhaltungsarbeiten Bodenverdichtungen (z.B. durch Befahren und Abstellen von Geräten und Fahrzeugen), Baugrundverdichtungen (z.B. als technische Maßnahme im Verkehrswegebau), Bodenversiegelungen, Erdarbeiten, chemische Verunreinigungen, Erosionen, mechanische Beschädigungen oder Zerstörung im Wurzel- und/oder im oberirdischen Bereich sowie das Freistellen von Bäumen beschrieben. Das Wurzelwachstum im urbanen Raum ist somit vielen Faktoren ausgesetzt, die so im natürlichen Raum nicht vorkommen.

Um urbane Baumstandorte bestmöglich zu gestalten und Schäden, auch bei Bauarbeiten, zu vermeiden, werden in mehreren „Baum“-Normen und -Regelwerken hohe Anforderungen an die Errichtung von bzw. Bauarbeiten an Baumstandorten gestellt. Eine Auswahl von Normen und Regelwerken wird folgend dargestellt:

- DIN 18920 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“ [65]
- RAS-LP 4, „Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen“ [2]
- FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege“ [66]
- FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“ [67]

In DIN 18920 [65] und RAS-LP 4 [2] werden Schutz- und Schadensbegrenzungsmaßnahmen an Bäumen beschrieben, wenn die o.g. Baumschäden während Bau und Betrieb von unterirdischen Leitungen und Kanälen auftreten können bzw. aufgetreten sind.

Insbesondere soll nach [65, S. 6] und [2, S. 10] zum Schutz des Baumes beim Aushub von Gräben und Baugruben sowie bei Gründungen ein Mindestabstand eingehalten werden. Der Mindestabstand von Baugrube/Gründung zum Wurzelanlauf beträgt das Vierfache des Stammumfanges in einem Meter Höhe oder mindestens 2,5 Meter bei Bäumen mit einem Stammdurchmesser von kleiner 20 Zentimetern. Anforderungen an den Baumstandort und den Wurzelraum werden u.a. in [67, S. 33] dargestellt, dabei werden u.a. Pflanzgruben mit Volumen von mindestens 12 Kubikmetern und einer Tiefe von mindestens 1,5 Metern gefordert.

Die eben genannten Regelwerksanforderungen an Baumstandorte sollen zeigen, dass nicht nur im Rohrleitungsbau und -betrieb nach Regelwerken hohe Anforderungen an Bauausführung und Platzbedarf im urbanen Raum gestellt werden (vgl. Kapitel 2.1), sondern auch durch die Baumstandorte. Bei Planung und Bau von Bäumen und unterirdischen Leitungen und Kanälen kann es daher zu Platz- bzw. Raumkonkurrenzen kommen [1, S. 9].

Aus diesem Grund wurde das interdisziplinäre Regelwerk DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [1] entwickelt. Das Besondere an diesem Regelwerk ist, dass es durch die drei genannten Branchenverbände textgleich veröffentlicht wurde und auch weitere Branchenverbände aus dem Bereich der unterirdischen und grünen Infrastruktur sowie aus dem Rohrleitungsbau wesentlich an der Ausarbeitung der Inhalte beteiligt waren [1, S. 3]. Ein wesentliches Ziel dieses Regelwerkes ist der Einklang von unterirdischen Leitungen, Kanälen und Baumwurzeln [1, S. 3]. In diesem Regelwerk werden nicht nur die Ursachen für Schäden an Rohr und Baum(wurzeln) erläutert, sondern u.a. auch Hinweise zu Planung, Bau und Schutzmaßnahmen gegeben. Insbesondere die Schutzmaßnahmen sind wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit und werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben und weitergehend untersucht (vgl. Kapitel 3 bis 8.6). Vorab werden zunächst die bisher bekannten Ursachen für Wurzel-Rohr-Interaktionen beschrieben.

Wurzeln wachsen u.a. aufgrund des geringen verfügbaren unterirdischen Raums im urbanen Raum oftmals dorthin, wo sie bestmögliche Lebens- und Wachstumsbedingungen vorfinden [1, S. 12]. Dies kann aus unterschiedlichen Gründen, die in diesem Unterkapitel später beschrieben werden, der Leitungsgraben sein. Wächst eine Wurzel in den Leitungsgraben, kann es zu Wurzel-Rohr-Interaktionen kommen. Wurzel-Rohr-Interaktionen bedeuten, dass Wurzeln in den Leitungsgraben einwachsen und dann an der Rohroberfläche entlang wachsen und in Rohrleitungen einwachsen können.

Wurzeln können nach [1, S. 10] in Rohrleitungen einwachsen, Rohrleitungen umwachsen oder durch Zugschlingen und Druckstempel statische und dynamische Lasten auf die Rohrleitung übertragen. Nach Stein [36, S. 216] wird die Betriebssicherheit von unterirdischen Ver- und Entsorgungsanlagen durch Wurzeln gefährdet, wenn u.a. Muffen und Rohrverbindungen verdrängt, beschädigt oder unwirksam gemacht werden. Weiter wird ausgeführt, dass Kippmomente ausgehend vom Baum und Entwurzelungen von Bäumen

bei Sturm- und Schneebruchschäden die Betriebssicherheit gefährden können. Ergänzend werden aggressive Böden und Materialien bei der Pflanzung, Verwendung von Düngemitteln, die den Leitungswerkstoff, dessen Umhüllung oder Dichtung angreifen, sowie Arbeiten an Pflanzgruben und Wurzelwerk als Gefährdungen der Betriebssicherheit von unterirdischen Leitungen und Kanälen aufgeführt [36, S. 216].

Des Weiteren können in den Rohrleitungen gekappte Wurzeln verstärkt neu austreiben und das Schadensrisiko erhöhen. Folgen für die Rohrleitung können Undichtheiten, Querschnittsverringerungen, Lageabweichungen sowie Verformungen, Risse und Rohrbrüche sein [1, S. 10].

Die Folgen von Wurzeleinwuchs und -umwuchs auf unterirdische Leitungen und Kanäle sind durch viele Beobachtungen bekannt. Um unterirdische Leitungen und Kanäle vor Wurzelbewuchs schützen zu können, müssen auch die Ursachen für das Wuchsverhalten der Wurzeln bekannt sein. Diese Ursachen werden in den folgenden Kapiteln untersucht und dargestellt.

Das Wachsen von Wurzeln im Bereich von unterirdischen Leitungen oder Kanälen wird in der Folge als Wurzel-Rohr-Interaktion bezeichnet. Auch wenn die Ursachen für das Wurzelwachstum an unterirdischen Leitungen und Kanälen gleich sind, so können sich jedoch die Auswirkungen bzw. entstehende Schäden des Wurzelwachses auf z.B. Abwasser- oder Gasleitungen unterscheiden. Zudem ist bisher wenig bekannt darüber, ob die Wärme von Fernwärmeleitungen das Wurzelwachstum beeinflusst. Folgend werden Wurzel-Rohr-Interaktionen an Abwasserleitungen und -kanälen sowie Versorgungsleitungen und -kabeln beschrieben. Ergänzt werden die Ausführungen durch die Darstellung biologischer Interaktionsmodelle und die Beschreibungen zur Beeinflussung des Wurzelwachstums durch Wärme.

2.3.1 Abwasserleitungen, -kanäle und Wurzeln

Erstmalige Untersuchungen und allgemein ein Großteil der bisher durchgeführten Untersuchungen [u.a. 17, 18, 19] zu Wurzel-Rohr-Interaktionen wurden in Deutschland im Abwasserbereich durchgeführt und sind auch in internationale Empfehlungen mit eingeflossen [68; 69; 70]. Eine Vielzahl von Datenerhebungen und Untersuchungen soll zunächst aufzeigen, warum Wurzel-Rohr-Interaktionen an Abwasserleitungen und -kanälen dazu geführt haben, dass dieses Thema so relevant für den Entwässerungssektor ist.

Nach der DWA-Umfrage 2020 zum Zustand der Kanalisation in Deutschland [24, S. 6] liegen die relativen Häufigkeiten bei betrieblichen Schäden mit 33,7 % durch Wurzeleinwuchs am höchsten, gefolgt von anhaftenden Stoffen mit 20,5 % und Ablagerungen mit 16,6 %. An der Umfrage haben sich 160 Abwasserbetriebe beteiligt mit einer Kanalnetzlänge von insgesamt 67.319 Kilometern. Absolute Zahlen werden in [24] nicht dargestellt. Jedoch zeigt sich aufgrund der im Vergleich hohen anteiligen Prozentzahl,

dass das Thema Wurzeleinwuchs für Abwasserbetriebe in Deutschland in der Sicherstellung der Abwasserableitung relevant zu sein scheint. In einer Datenerhebung zu Störfällen im Kanal [71, S. 268] wurde erfasst, dass 22,5 % der gemeldeten Störfälle (i.d.R. Verstopfungen) auf Wurzeleinwuchs zurückzuführen sind. Absolute Werte liegen auch hier nicht vor.

An einer dänischen Umfrage aus dem Jahr 2000 zu Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und -kanäle [72] nahmen 176 von 276 dänischen Gemeinden, i.d.R. die ansässigen Abwasserbetriebe, teil. In der Umfrage zeigte sich, dass bei 97 % der befragten Gemeinden Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und -kanälen festgestellt wurde [72, S. 287f.]. Absolute Werte liegen nicht vor. Ein Großteil der Wurzeleinwüchse zeigte sich in Abwasserleitungen und -kanälen mit Baujahr 1979 und älter. Es wurden aber auch in Abwasserleitungen und -kanälen mit jüngeren Baujahren Wurzeln ermittelt. Ein Großteil davon wurde in Betonrohren oder in Werkstoffübergängen zwischen zwei unterschiedlichen Rohrwerkstoffen festgestellt [72, S. 283]. 92 % der Wurzeleinwüchse ging von Bäumen aus, die weniger als sechs Meter vom festgestellten Einwuchs entfernt waren. Dabei stammten 78 % der Wurzeleinwüchse von Weiden (*Salix. sp.*), Pappeln (*Populus sp.*) und Birken (*Betula sp.*) [72, S. 289]. Im Durchschnitt wurden Wurzeln in 1,1 Kilometern Rohrleitungen pro Jahr und Stadt entfernt. Die Kosten für die Wurzelentfernungen in den Abwasserleitungen betragen im Durchschnitt pro Stadt und Jahr 6.350 US-Dollar. Die Erneuerung durch Wurzeln beschädigter Abwasserleitungen betrug im Schnitt pro Stadt und Jahr 38.824 US-Dollar. Somit wurden rund sieben Prozent der jährlichen Gesamtkosten in das dänische Abwassersystem für Wurzelentfernungen und Erneuerungen aufgrund von Schäden durch Wurzeleinwuchs aufgewendet [72, S. 283; 73, S. 29].

In Schweden teilten in einer Umfrage 99 % von 232 der teilnehmenden Gemeinden mit, dass sie Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und -kanälen festgestellt haben [74, S. 359]. Auch hier wurde der Großteil der Wurzeleinwüchse in älteren Kanälen festgestellt, jedoch traten ebenfalls Wurzeleinwüchse in neueren PVC- und Betonrohren auf, die nach 1979 installiert worden waren. Die meisten Wurzeleinwüchse wurden durch Pappeln (*populus x canadensis*, 'Robusta', *p. balsamifera*), Weiden (u.a. *salix alba* und *s. fragilis*) sowie Schwarzkiefern (*p. nigra*) erzeugt [74, S. 359ff.].

In einer polnischen Datenerhebung [75] wurden 29 Kilometer Abwasserleitungen aus Beton und Steinzeug bzgl. Wurzeleinwuchses ausgewertet. Es wurden 1,91 Wurzeleinwüchse pro 100 Metern in Betonrohren und 3,99 Wurzeleinwüchse pro 100 Metern in Steinzeugrohren festgestellt. In Polen sind die meisten Wurzeleinwüchse auf die Baumarten Silber-Pappeln (*Populus alba* L.) mit einem Anteil von 64,97 %, Winterlinde (*Tilia cordata* Mill.) mit 16,88%, Spitzahorn (*Acer platanoides* L.) mit 11,91% und Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum* L.) mit 6,24% zurückzuführen [75, S. 3].

In [76, S. 273] wird beschrieben, dass Bäume mit großen Kronenvolumen in der Wachstumsperiode am meisten Wasseraufnahme durch Wurzeln benötigen, wodurch diese

schnell austreiben und dadurch das größte Potenzial besitzen Schäden an Abwasserleitungen zu provozieren.

In einer australischen Datenerhebung teilten 16 von 17 teilnehmenden Wasserverbänden mit, dass über 50 % der festgestellten Abwasserrohrverstopfungen durch Wurzeln verursacht wurden, bei sechs Verbänden sogar über 75 % [77, S. 43; 78]. Bei weitergehenden Analysen von zwei Wasserverbänden wurde festgestellt, dass ein Großteil der Wurzeleinwüchse bei Steinzeug und Betonrohren auftritt, Rohrleitungen aus PVC und PE sind weniger betroffen, aber auch hier wurden Verstopfungen durch Wurzeleinwuchs festgestellt. Zudem wurden prozentual mehr Verstopfungen festgestellt, je kleiner der Rohrdurchmesser ist [77, S. 4345f.; 78]. In einer australischen Stadt wurde aufgrund der hohen Verstopfungszahl durch Wurzeln ein „blockage reduction programme“ entwickelt, bei dem ausgewählte Abwasserleitungen (Steinzeug DN 150) aus dem gesamten Abwassernetz alle sechs Monate gereinigt, alle zwölf Monate mit einem Cutter befahren und alle 36 Monate mit einem Schaum (*chemische Reinigung, Annahme des Autoren*) gereinigt wurden. Durch dieses Programm wurde der monatliche Durchschnitt von 107 Verstopfungen auf 88 Verstopfungen reduziert [79, S. 102, 104f.].

In einer weiteren australischen Studie [80] in Melbourne wurde eine Vielzahl von bekannten Verstopfungen durch Wurzeleinwüchse analysiert. Dabei wurde u.a. festgestellt, dass der Großteil der Wurzeleinwüchse bei Steinzeugrohren (60,2 %) stattfand, aber auch bei Beton- (15,1 %) und PVC-Rohren (19,6 %). Zudem waren die Wurzeleinwüchse bei 42,3 % in Rohrleitungen mit einem Durchmesser von DN150 und knapp 2/3 der Einwüchse in Rohrleitungen älter 20 Jahre [80, S. 118f.].

In einer schwedischen Analyse [81] wurden in 33,7 Kilometern Kanalnetz (Beton und PVC) 2.180 Wurzeleinwüchse ausgewertet [81; S. 1, 7]. Bei jedem Wurzeleinwuchs wurde ermittelt, welche Baum- und Straucharten sich innerhalb eines Radius von 20 Metern befanden. Dabei wurde festgestellt, dass sich 52 unterschiedliche Baum- und Straucharten alleine in diesem Radius befinden und somit zu Wurzeleinwuchs führen können [81, S. 7]. Ein Rückschluss nach [81, S. 10] war daraufhin, dass aus diesem Grund in sensiblen Leitungsbereichen keine Bäume gepflanzt werden sollten.

In einer geostatistischen Analyse in Bogota, Kolumbien [82] wurden 45,5 Kilometer Abwassernetz hinsichtlich des Wurzeleinwuchses u.a. unterschiedlicher Baumarten und -höhen sowie Stammdurchmesser verglichen. Ergebnisse sind, dass Leitungseigenschaften und Baumart wesentliche Faktoren für Wurzel-Rohr-Interaktionen sind. Es wurde u.a. festgestellt, dass größere Bäume mehr Wurzelschäden an Abwasserleitungen und -kanälen verursachen als kleinere Bäume. Auch der Abstand zwischen Baum und Leitung wurde als wesentlicher Einflussfaktor für die Wahrscheinlichkeit eines Wurzeleinwuchses ermittelt. Zudem wurden mehr Wurzelinteraktionen an gemauerten Kanälen festgestellt als an Kanälen aus Beton sowie in Hausanschlussleitungen als in öffentlichen Mischwasserkanälen [82, S. 36, 38, 40].

In einer statistischen Modellierung zu maßgeblichen Einflussgrößen auf die Verstopfung von Abwasserkanälen in einer schwedischen Stadt wurde analysiert, dass der Grad des Einflusses auf die Verstopfungen durch Wurzeleinwuchs auf 11 bis 17 % berechnet wurde. Dabei wurden Bäume berücksichtigt, die sich innerhalb von zwei Metern Abstand zu den Rohrleitungen befinden [83, S. 9].

In einer IKT-Studie [84] wurden mögliche Randbedingungen für Wurzeleinwüchse in Abwasserleitungen und -kanälen untersucht. Dabei zeigte sich, dass bei einem Großteil der untersuchten Wurzeleinwüchse der Einwuchs in die Rohrleitung unterhalb der Baumkrone festgestellt wurde. Jedoch wurden auch vereinzelt Wurzeleinwüchse an Rohrleitungen festgestellt, die nicht unterhalb der Baumkrone verlegt waren [84, S. 58]. Untersuchungen zu Wurzelwachstum unterhalb von Wegeböden [85, S. 122f.] zeigen, dass Wurzeln oftmals weit über die Baumkronenprojektionsfläche hinauswachsen können.

Wurzeleinwüchse in Abwasserleitungen und -kanälen werden i.d.R. durch TV-Kamerabefahrungen oder Begehungen festgestellt. Nach EN 13508 Teil 2 [86] werden Schäden von Entwässerungssystemen eingeordnet bzw. kodiert. Wurzeln wachsen in Abwasserleitungen und -kanäle bzw. -schächte durch Anschlüsse, Schadstellen oder Rohrverbindungen bzw. Anbindungen an den Schacht. Dies bestätigen In-situ-Beobachtungen aus [87, S. 52]. Dabei werden die eingewachsenen Wurzeln in Pfahlwurzel, einzelne feine Wurzeln und komplexes Wurzelwerk unterschieden. Die Lage des Schadens am Umfang des Rohres bzw. Schachtes soll dokumentiert werden [86, S. 31; 57]. Bei Rohrleitungen soll zudem der Schaden als Querschnittsverringering in Prozent quantifiziert werden [86, S. 31]. Nach DWA-M 139 Teil 3 [88, S. 17] haben Wurzeleinwüchse in Abwasserleitungen Auswirkungen auf die Dichtheit und Betriebssicherheit, jedoch nicht auf die Standsicherheit.

In Leitungen eingewachsene Wurzeln können entweder mit mechanischen, hydraulischen Werkzeugen oder chemischen Stoffen entfernt werden [19, S. 59]. Als Werkzeuge werden u.a. (schlagende) Bohr- bzw. Fräsgeräte, wie z.B. Kettenschleudern, eingesetzt. Als chemische Stoffe werden Herbizide benutzt, die entweder als Flüssigkeit oder Schaum in den Kanal eingefüllt oder auf die Wurzeln gesprüht werden [87, S. 11ff.]. Nach [36, S. 551] ist der Einsatz von chemischen Verfahren zur Wurzelentfernung in Deutschland bei Verfahrensbetreibern und Kommunen umstritten. Wurzeln wachsen jedoch nach mechanischer Abtrennung i.d.R. verstärkt nach bzw. treiben verstärkt neu aus und machen ggf. eine erneute Wurzelentfernung nach kurzer Zeit notwendig [36, S. 550]. Daher ist nach einer mechanischen Wurzelentfernung die Sanierung bzw. Erneuerung des beschädigten Kanalabschnittes zielführend, um weiteren Wurzeleinwuchs und Schäden zu verhindern. Sanierungsverfahren sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Zusammenfassend lässt sich darstellen:

- In einem Großteil der Untersuchungsgebiete sind Wurzeleinwüchse in Abwasserleitungen festgestellt worden [72, S. 287f.; 74, S. 359]
- Wurzeleinwüchse sind für viele der betrieblichen Schäden bzw. Störungen maßgebend [24, S. 6; 77, S. 43; 78]
- Wurzeleinwüchse treten vermehrt auf, wenn die Einwuchsstelle unterhalb der Baumkrone liegt [84, S. 58]. Jedoch sind Wurzeleinwüchse bei größeren Entfernungen ebenfalls nicht auszuschließen [84, S. 58].
- Bei zahlreichen Baum- und Straucharten wurde bereits Wurzeleinwuchs festgestellt [81, S. 7]
- Hauptverursacher für Wurzeleinwuchs sind oftmals unterschiedliche Arten der Gattungen von Pappeln und Weiden, jedoch mit länderspezifischen Unterschieden [72, S. 289; 74, S. 359ff.; 75, S. 3]
- Der Großteil der Wurzeleinwüchse wird in Abwasserleitungen und -kanälen festgestellt mit Baujahr 1979 und älter, aber auch Wurzeleinwüchse in jüngeren Abwasserleitungen und -kanälen sind bekannt [72, S. 283; 74, S. 359ff.]
- Wurzeln wachsen durch Risse, Rohrverbindungen und Anschlüsse in Abwasserleitungen und -kanäle ein [87, S. 52]
- Wurzeleinwüchse werden bei nicht-begehbaren Querschnitten durch TV-Kamerabefahrungen erfasst und nach Norm kodiert und klassifiziert [86, S. 31; 57]
- Eingewachsene Wurzeln werden durch mechanische oder chemische Verfahren aus der Abwasserleitung bzw. dem Abwasserkanal entfernt [19, S. 59]
- Wurzel treiben nach der Abtrennung im Kanal oftmals verstärkt neu aus [36, S. 550]

Die Studien und Datenerhebungen zeigen, dass Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und -kanälen ein (beinahe weltweites) Problem für Abwasserbetriebe darstellt. Die Ursachen des Wurzeleinwuchses in Abwasserleitungen werden folgend beschrieben.

Das Einwachsen von Wurzeln in Abwasserleitungen und -kanäle ist möglich, da bei Freispiegelleitungen der Querschnitt i.d.R. nur teilweise mit Schmutz- oder Regenwasser gefüllt ist. Dadurch ist für das Wurzelwachstum ausreichend Raum und Belüftung in Abwasserleitungen und -kanälen vorhanden. Zudem können durch Verdunstung des Leitungsinhalts die Abwasserleitungen und -kanäle mit Wasserdampf gesättigt sein [17, S. 9], wodurch für das Wurzelwachstum auch Flüssigkeit zur Verfügung steht.

Diese ersten Schlussfolgerungen erklären zunächst, warum Wurzeln überhaupt in Abwasserleitungen einwachsen wollen. Jedoch erklären sie nicht, warum Wurzeln vom Baumstandort zu einer Abwasserleitung hinwachsen und wie sie die Rohrverbindung überwinden. Dazu wurden in zwei Forschungsvorhaben [17; 18] mehrere In-situ-Aufgrabungen an Abwasserleitungen und -kanälen mit Wurzeleinwuchs sowie Analysen von gesteckten Rohrverbindungen durchgeführt.

Bei den In-situ-Beobachtungen zeigte sich, dass Wurzeln bevorzugt an Schichtgrenzen zwischen anstehendem Boden und Bettungsmaterial sowie Bettungsmaterial und Rohroberfläche wachsen. Der Leitungsgraben bzw. die Bodeneigenschaften des Bettungsmaterials sind für Wurzelwachstum geeignet, da sie oftmals im Vergleich zum anstehenden Boden geringer verdichtet sind. Wurzeln wachsen oftmals parallel zu den Rohrleitungen, oftmals im Zwickelbereich unterhalb des Kämpfers. In diesen porenreichen, gering verdichteten Bereichen bleiben die Wurzeln eingeschlossen und wachsen nicht zurück in porenärmere Bodenbereiche des anstehenden Bodens [17, S. 142; 18, S. 58f.]. Diese Beobachtungen werden auch durch Aufgrabungen unterhalb von Verkehrsflächen bestätigt [85, S. 95ff.]. Nach [85, S. 109, 121] sind das Porenvolumen, die Lagerungsdichte sowie Trennflächen zwischen zwei Bodenhorizonten maßgebend für mögliches Wurzelwachstum. Auch die Oberflächenstruktur bzw. Haftungseigenschaften der Rohroberfläche kann die Ausbildung des Wurzelwerks der Rohrleitung beeinflussen [17, S. 199].

Bevor Wurzeln in eine Leitung einwachsen, bilden sie im Ringraum und Ringspalt der Muffe ein dichtes Wurzelpolster, welches über mehrere Jahre den gesamten Muffenbereich ausfüllt [17, S. 142]. Die Wuchsform von Wurzeln verändert sich dabei, wenn sie mit der Oberfläche von Rohrleitungen oder Muffen in Kontakt kommt. Durch Verzweigen oder Veränderung der Wuchsform vergrößern Wurzeln zunächst ihre Kontaktfläche zum Rohr. Anschließend passen sich die Wurzeln der Rohrleitungs- bzw. Muffengeometrie an [18, S. 77] und wachsen in den Ringspalt und Ringraum (vgl. Kapitel 2.1.1). Sind ausreichend Wurzeln in die Muffe eingewachsen, können sie das Dichtelement durchdringen und in die Rohrleitung einwachsen [17, S. 142]. Dies ist möglich, wenn der Wurzeldruck größer ist als der Anpressdruck der Rohrverbindung [17, S. 212]. In Laborversuchen wurde nachgewiesen, dass beispielsweise Wurzeln einer Eiche bis zu 11,9 bar radialen Wurzelspitzendruck aufbringen können. Bei Robinien und Pinien wurden Wurzeldrücke bis 8,8 bar gemessen. [19, S. 105ff.]. Wurzeln können auf die folgenden zwei unterschiedlichen Weisen eine gesteckte Rohrverbindung durchdringen [19, S. 121f.]:

- Einzelne Wurzeln wachsen in den Zwickel (zwischen Dichtung und Rohrwandung) und drücken diesen auseinander. Die Wurzeln verzweigen sich in diesem Bereich und wachsen weiter in diesen neu gebildeten Raum ein. Ist der Anpressdruck der Verbindung geringer als der Wurzeldruck, kann die Wurzel einwachsen.
- Der äußere Ringraum ist groß genug, dass Boden bzw. Bettung in diesen Bereich einrieseln kann. In diesem Substrat bildet sich ein dichtes Wurzelgeflecht. Über die Zeit wird durch das Wurzeldickenwachstum die Rohrverbindung auseinander gedrückt und weitere Wurzeln können in die Rohrleitung einwachsen.

Die Ausprägung und Lage des Wurzeleinwuchses ist abhängig vom Leitungsmedium. In Schmutz- oder Mischwasserleitungen erfolgt Wurzeleinwuchs nicht im Bereich des Abwassers, sondern oberhalb des Abwassers bzw. durchfließenden Mediums. Zudem

wachsen Wurzeln nicht bevorzugt in Bodenbereiche, die durch Leckagen von Abwasserleitungen einen höheren Wassergehalt aufweisen als der restliche Bereich der Bettung [17, S. 142; 19, S. 58f.]. Der Kontakt mit Abwasser aus Schmutzwasserkanälen führt sogar zum Absterben der Wurzeln [17, S. 210]. In Regenwasserleitungen fließt nur temporär Wasser bei Regenereignisse ab, wodurch Wurzeln auch durch die Rohrsohle einwachsen können [76, S. 274] und sich deren Wurzelmasse über die Zeit permanent vergrößern kann [17, S. 210] bis vermutlich der gesamte Querschnitt bewachsen ist.

Zusammenfassend kann dargestellt werden:

- Wurzeln wachsen in den Leitungsgraben, da dieser oftmals im Vergleich zum anstehenden Boden geringer verdichtet ist und somit mehr Porenraum zur Verfügung steht [17, S. 142; 18, S. 58f.].
- Das Wurzelwachstum passt sich den Rohr- und Muffengeometrien an und kann dadurch in die Muffen einwachsen, wenn Ringspalt und Ringraum ausreichend groß vorhanden sind [18, S. 77].
- Sind ausreichend Wurzeln in die Muffe eingewachsen oder haben sich die in der Muffe befindlichen Wurzeln ausreichend verzweigt, können die Wurzeln das Dichtelement überwinden und in die Abwasserleitung einwachsen [17, S. 142].
- Wurzeln wachsen jedoch nicht in die Rohrleitung, um an das Abwasser zu gelangen [17, S. 210].

2.3.2 Versorgungsleitungen, -kabel und Wurzeln

Auch bei unterirdisch verlegten Versorgungssystemen sind Wurzel-Rohr-Interaktionen bekannt, z.B. bei Gasleitungen und Stromkabeln. Insbesondere durch Beobachtungen an Gasleitungen wird bestätigt, dass der Leitungsgraben für das Wurzelwachstum attraktiv ist [89, S. 825]. Im Gegensatz zu Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und -kanälen ist die Schadensursache an Gasleitungen oftmals auf Wurzelzugschlingen und -druckstempel zurückzuführen. In diesem Fall umwachsen Wurzeln die Gasleitungen [89, S. 825ff.]. Wirken in diesem Fall Windlasten auf die Baumkrone, so können die dabei entstehenden Kräfte über die Wurzeln in den Boden abgeleitet und auf die Gasleitung übertragen werden [90; S. 1]. Dies kann zu Undichtigkeiten an der Gasleitung führen. In einem dokumentierten Fall kam es durch austretendes Gas zu einer Explosion in einem Keller, wodurch ein Mensch verstorben ist [89, S. 825ff.; 91]. Durch Zugschlingen auf der Windseite unter dem Rohr kann es zu Rissen auf der Rohroberseite kommen. Durch Druckstempel kann es auf der vom Wind abgewandten Seite zu Rissen an der Rohrunterseite kommen [90, S. 16]. Ein spannender Aspekt wird in [90, S. 16] beschrieben und aus [92] zitiert, dass in einem Britischen Standard aus dem Jahr 1991 aus den o.g. Gründen empfohlen wird, Bäume direkt auf die Rohrleitung zu pflanzen, wenn sie nicht außerhalb der Kronentraufe verlegt werden können.

Für Gasleitungen wurde im Jahr 2016 ein Beiblatt [93] zum Regelwerk DVGW GW 125 [1] verfasst. Kern des Beiblattes sind Empfehlungen für die Vorgehensweise zur Beurteilung möglicher Baumwurzel-Gasrohrleitungs-Interaktionen. Es werden u.a. zu Interaktionen neigende, kritische Baumarten, wie z.B. Ahorn, Pappel und Platane, definiert. Des Weiteren werden kritische Wurzelanläufe als

„am Stammfuß sichtbare Ansätze von Starkwurzeln“

definiert, die

„einen Kontakt mit einer naheliegenden Gasrohrleitung vermuten lassen“ [93, S. 6].

Liegt ein solcher kritischer Wurzelanlauf vor, so sind weitere Handlungsmaßnahmen abhängig von u.a. Baumart, Rohrwerkstoffen und Abständen zwischen Gasleitung und Baum empfohlen. Mögliche Handlungsmaßnahmen sind Kronenrückschnitt, Wurzelentfernung, Baum fällen oder Leitung entfernen [93, S. 5ff.].

An städtischen, erdverlegten Stromkabeln sind ebenfalls Beschädigungen durch Baumwurzeln bekannt [94]. In einer Literaturstudie [95] zu Höchstspannungserdkabeln wird auch auf die Thematik Wurzel-Rohr-Interaktionen eingegangen. Der wesentliche Unterschied zu den anderen bisher dargestellten Ver- und Entsorgungsleitungen besteht darin, dass Höchstspannungserdkabel i.d.R. nicht im städtischen Bereich verlegt werden. Zudem ist eine wesentliche Vorgabe für Höchstspannungserdkabel, dass sie aus Gründen der Betriebssicherheit frei von Gehölzen sein sollen, die tiefer als einen Meter wurzeln können [95, S. 72]. Die durchschnittlichen Verlegetiefen liegen zwischen 1,5 und 1,7 Metern [95, S. 63]. Bisher sind nach [95, S. 102] keine dokumentierten Schadensfälle durch Wurzeln an Höchstspannungserdkabeln bekannt. Auch wurden bisher keine systematischen Untersuchungen zur Interaktion zwischen Wurzeln und Höchstspannungserdkabeln durchgeführt. In [95, S. 81] wird jedoch abgeleitet, dass Verformungen und Risse an der äußeren Ummantelung, Lageabweichung des Kabels sowie Beschädigung des Kabels durch Zugkräfte zu den möglichen Schadensformen durch Wurzeln an Höchstspannungserdkabel zählen können.

2.3.3 Biologische Interaktionsmodelle

Die in den Kapiteln 2.1 bis 2.3.2 aufgeführten Grundlagen des Rohrleitungsbaus und Wurzelwachstums sowie die durchgeführten Untersuchungen zu Wurzel-Rohr-Interaktionen wurden erstmalig durch Stützel et. al [17, S. 206f.] in biologische Wachstumsmodelle überführt, die das Wurzelwachstum im urbanen Raum beschreiben sollen. Die Modelle wurden im Rahmen von [6, S. 11ff.] ¹ (zu [96; 97]) durch das Autorenteam modifiziert und werden folgend dargestellt. Anschließend folgt eine Einordnung der biologischen Wachstumsmodelle in bautechnische Fragestellungen durch den Autor.

„Leck-Modell:

Die gängige Begründung für den Einwuchs von Wurzeln setzt die Attraktivität des Leitungsinhaltes voraus. Austretender Leitungsinhalt in der Nähe undichter Rohrverbindungen stellt demnach für die Wurzeln eine Quelle für Wasser und Nährstoffe dar. Der Einwuchs erfolgt gemäß dieser Vorstellung, da aus dem Kontakt zum Leitungsinhalt bessere Lebensbedingungen für die Pflanze hervorgingen. Dieses Modell hat sich als im Wesentlichen unzutreffend herausgestellt. In Abwasser sterben die Wurzeln rasch ab. In Outside-In Versuchen ist der Einwuchs in das Rohrinne auch dann erfolgt, wenn es mit Außenluft normaler Luftfeuchte (nicht gesättigt) gefüllt war, der Einwuchs in Leerrohre ist bekannt [17, S. 206].

Dichtefallenmodell:

Die gesamte Umgebung von Gebäuden und ihrer Infrastruktur stellt einen anthropogen geschaffenen Bodenraum mit einer im Gegensatz zum gewachsenen Boden, häufig verminderten Verdichtung bzw. größerem Porenraum dar. Die Ausrichtung des Wurzelwachstums wird durch Richtungsänderungen beeinflusst, welche die Wurzelspitzen als Folge von Dichteunterschieden im durchwachsenen Boden erfahren. Die Elastizität der Kalyptra (Wurzelspitze) führt dazu, dass die Wurzeln in die Richtung des leichter zu durchwurzelnden Substrates wachsen. Ein Zurückwachsen der Wurzeln in einen Bereich höherer Verdichtung bzw. schlechterer Durchwurzelbarkeit ist in der Regel ausgeschlossen. Die Wurzeln werden in Bodenbereichen mit großer Durchwurzelbarkeit „eingefangen“. Der Ringspalt bzw. Ringraum vor dem Dichtelement kann auch, in Abhängigkeit von der Rohrverbindung, einen Bereich darstellen, der durch Wurzeln leicht erschlossen werden kann. Sie können dort mehrere Jahre wachsen, bevor sie letztendlich in die Leitung einwachsen. Hierfür muss der Anpressdruck des Dichtmittels überwunden werden [17, S. 206].

¹ In dem Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ [6] wurden eine Masterarbeit [96] und eine Projektarbeit [97] durchgeführt, die der Autor betreut hat. Wurden (Projekt-)Ergebnisse erstmalig in den Abschlussarbeiten genutzt und/oder verfasst, so sind sie dementsprechend im vorliegenden Text gekennzeichnet. Beschreibungen aus den Literaturrecherchen werden aus der Primärliteratur zitiert und nicht den Abschlussarbeiten zugeordnet.

Quellungs- und Setzungsmodell:

Änderungen der Bodenfeuchtigkeit über die Zeit beeinflussen die Struktur von Böden und Wurzeln. Bestandteile des Substrates sind in der Lage unter Wasseraufnahme zu quellen und durch Wasserabgabe zu schwinden. Diese zeitlichen Veränderungen des zur Verfügung stehenden Raumes im Boden kann ein Ausbreiten der Wurzeln beeinflussen. Quellungs- und Schwundvorgänge können wahrscheinlich auch in verholzten Wurzeln auftreten [17, S. 206f.].

Hierbei ist von Bedeutung, dass Räume von weniger als 1/10 mm ausreichend sind, um durch Dickenwachstum der Wurzel ausgefüllt zu werden. Bei erneuter Quellung des Substrates wird die Wurzel dann passiv gegen ein Widerlager gedrückt. Ob dabei die Wurzel oder das Widerlager deformiert werden, hängt von den mechanischen Eigenschaften ab. Auf diese Weise können möglicherweise Kräfte auf Rohre und Rohrverbindungen wirken, die weit über den Kräften aus kambialem Dickenwachstum liegen. In der Umgebung von Leitungen und deren Verbindungen, die unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, sollten keine Schwankungen durch Quellungs Vorgänge auftreten [17, S. 206f.; 98].

Hierdurch können möglicherweise Kräfte auf Rohre und Rohrverbindungen wirken, die über den gemessenen, aus Dickenwachstum entstandenen Kräften liegen. So ist es denkbar, dass die hohen Kräfte, die für das Überwinden des Anpressdrucks einer Rohrverbindung notwendig sind, durch Quellung verholzter Zellwände erzeugt werden. In der Umgebung von Leitungen und deren Verbindungen, die unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, treten nur geringe Schwankungen durch Quellungs Vorgänge auf. Trifft dieses Modell zu, so tritt der Einwuchs von Wurzeln in Leitungen, die ständig unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, selten auf [17, S. 206f.].

Für das Eindringen von Leitungen an Wurzeln können auch weitere Bewegungen im Boden verantwortlich sein. So können durch Setzungen oder Hebungen des Bodenkörpers, z.B. infolge Grundwasserabsenkung oder -anstieg, die Leitungen gegen vergleichsweise steife Wurzeln gedrückt werden.

Sauerstoffmodell:

Die Verfügbarkeit von Sauerstoff im Boden hat großen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. Alle pflanzlichen Organe benötigen Sauerstoff zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels. Die Versiegelung städtischer Böden hat zur Folge, dass der Eintrag von Sauerstoff in den Boden stark eingeschränkt ist. Abwasserleitungen werden meist als Freispiegelleitungen betrieben und ausreichend über Wartungs- und Inspektionsöffnungen (Schächte) belüftet. Der größte Anteil der Leitung ist mit Luft gefüllt. Bei vergossenen Dichtungen können im Vergussmaterial durch Schwinden Risse entstehen. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff kann so in der

Umgebung von Rohren und Rohrverbindungen in den Boden gelangen. Aber auch Rohrverbindungen mit Elastomerdichtungen können mit der Zeit gasundicht werden (vgl. [99]). Die Rohrverbindung und der angrenzende Boden werden dadurch möglicherweise für Wurzeln attraktiv. Wurzeln wachsen gemäß diesem Modell nur dort weiter, wo die Sauerstoffversorgung ausreicht. Im Ergebnis wachsen sie damit bei Sauerstoffmangel und einer lokalen Sauerstoffquelle auf diese zu, obwohl sie über keine Sauerstoffsensoren verfügen und finden so die Rohrverbindung. Bei nicht gasdichten Rohrwerkstoffen kann auch bei intakten Leitungen Sauerstoff austreten, der einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann [17, S. 207].

Kombinationsmodell:

Das Einwachsen in die Leitung erfolgt im Allgemeinen nicht, weil der Leitungsinhalt gute Bedingungen bereitstellt, der Einwuchs ist hingegen die logische Konsequenz des Zusammenspiels verschiedener Gegebenheiten in der Nähe der Leitung. Es ist anzunehmen, dass ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren den Einwuchs von Wurzeln in Leitungen ermöglicht. Sowohl die Dichte des Bodens, sein Quellverhalten, wie auch die Verfügbarkeit von Sauerstoff und der Zustand der Leitung haben einen Einfluss auf das Wurzelwachstum. Das Erkennen von Faktoren, die vor Ort einem Schaden Vorschub leisten, kann helfen zukünftige Schäden zu vermeiden [17 S. 207]. In der Praxis ist in der Regel ein Faktor dominierend bzw. limitierend. Das kann dazu benutzt werden, Schäden zu verhindern und das Wachstum auf andere Bereiche zu konzentrieren.“

Einordnung der biologischen Wachstumsmodelle in bautechnische Fragestellungen

Sollen unterirdische Leitungen, Kanäle und Kabel vor Wurzeleinwuchs geschützt werden, so sind die wesentlichen Inhalte der Interaktionsmodelle zu betrachten. Für das urbane Wurzelwachstum ist der Porenraum bzw. die Verdichtung ein wesentlicher Faktor, ob Wurzeln bevorzugt in einen Bodenbereich wachsen. Hinzu kommt mögliche Diffusion von Sauerstoff aus den Abwasserleitungen, die den Wurzeln im oftmals versiegelten urbanen Straßenraum ausreichend Sauerstoff für den Stoffwechsel zur Verfügung stellen können. Auch mögliche Quellungsvorgänge im Boden können ggf. den Porenraum zeitweise erweitern, wodurch dieser durch Wurzel erschlossen werden kann. Dies bedeutet für bautechnische Schutzmaßnahmen, dass sie:

- a) den Wurzeln keinen Raum zum Wachstum bieten (auch nicht temporär) und
- b) keinen Sauerstoff an den umgebenden Boden abgeben dürfen.

Werden diese Faktoren eingehalten, so sollten die bautechnischen Schutzmaßnahmen nach den Interaktionsmodellen wurzelfest sein. Inwieweit diese Vorgaben auch technisch eingehalten werden im Rahmen üblicher bautechnischer Schutzmaßnahmen, ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

2.3.4 Wärme und Vegetation

In den bisher dargestellten Untersuchungen (vgl. Kapitel 2.3.1 bis 2.3.3) wurde nicht untersucht, inwieweit mögliche Wärmeveränderungen bzw. Wärmeeinträge in den Boden das Wurzelwachstum beeinflussen können, z.B. durch Fernwärmesysteme. Daher wurde dies auch noch nicht in den biologischen Wachstumsmodellen berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.3.3). Aus diesem Grund wird der derzeitige Kenntnisstand zu (Boden-) Wärme und Vegetation zunächst dargestellt. Anschließend wird beschrieben, inwieweit bisher bekannt ist, in welchem Ausmaß die Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen und Hochspannungs-Erdkabeln den umliegenden Boden und möglicherweise Wurzeln beeinflussen kann.

2.3.4.1 Ergebnisse aus Vorstudie und Forschungsbericht

Die folgenden Ausarbeitungen in Kapitel 2.3.4.1 wurden teilweise in [100] durchgeführt und vereinzelt textlich übernommen ohne Zitationsangabe im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“, da es sich um einen unveröffentlichten, internen Bericht als Vorarbeit für das o.g. Forschungsvorhaben handelt. Weitergehend wurden Textpassagen überarbeitet und ergänzt und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde, mit fachlicher Unterstützung von insbesondere Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel (RUB) und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc. (AGFW) [6, S. 16ff.]¹; S. 41.

Durch Baumwurzeln verursachte Schäden an unterirdischen Leitungen und -kanälen, die bisher bekannt und erforscht sind, hängen u.a. von den verwendeten Rohrwerkstoffen, Korrosionsschutzmaßnahmen und Verbindungselementen ab [100, S. 19]. Dies bedeutet auch, dass bisherige Untersuchungen schwerpunktmäßig durch Wurzeln verursachte Schäden an unterirdischen Leitungen und Kanälen betrachten. Ob jedoch Wärmefelder im Erdreich, insbesondere von Fernwärmeleitungen, Einfluss auf das Wachstumsverhalten von Bäumen und Wurzeln haben, ist bisher weitgehend unbekannt.

Im Vorfeld des hier dargestellten Forschungsvorhabens [6] wurde im Jahr 2013 eine wissenschaftliche Vorstudie [100] auf Basis einer Literaturlauswertung zum Themengebiet „Interaktion zwischen Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur“ sowie zum Thema „Einfluss der Bodentemperatur auf das Wurzelwachstum“ erstellt.

Das Ziel dieser Vorstudie [100] war es, ein umfassendes Konzept zur Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen zu erarbeiten und den sich daraus ergebenden Forschungsbedarf abzuleiten. Die Erkenntnisse aus dieser Vorstudie sind die Basis für das Forschungsvorhaben [6]. Folgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Vorstudie [100] in diesen Bericht [6] übertragen und durch eine im Forschungsvorhaben [6] durchgeführte Literaturrecherche ergänzt und aktualisiert.

In der AGFW-Information zur Bodenbeeinflussung durch Bau und Betrieb erdverlegter Fernwärmeleitungen [101, S. 3ff.] aus dem Jahr 1988 wurden Messungen bzw. FE-Berechnungen der Bodentemperaturen in Bereichen von Fernwärmeleitungen dargestellt. Folgende Temperaturen im Umfeld von erdverlegten Fernwärmeleitungen können daraus abgelesen werden:

- Messungen der Bodentemperaturen an Fernwärmeleitungen im Jahr 1988 im Sommer bei einer Außentemperatur von 25° Celsius mit identischen Vor- und Rücklauftemperaturen von 115°C ergaben maximale Temperaturen im direkten Leitungsumfeld von ca. 39 °C [101, S. 39].
- Aus FE-Berechnungen zur Temperaturverteilung im Boden bei Fernwärmeleitungen (Vorlauftemperatur 120° Celsius und Rücklauftemperatur 60° Celsius) in 1,2 Metern Tiefe bei einer Außentemperatur von 0° Celsius können Temperaturen im Bereich zwischen Vor- und Rücklauf von maximal 22 °C abgelesen werden [102].

Mit Blick auf den Einfluss von Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum von Bäumen gibt es somit – auf Basis der Literaturrecherche – keine umfassenden Untersuchungen. Auch in dem Merkblatt „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ [1] wird im Detail nicht näher auf diese Thematik eingegangen. Es können lediglich Hinweise zum Einfluss aus grundsätzlichen Untersuchungen (vgl. [103]) oder aus Einzelbeobachtungen (vgl. [104], [105]) abgeleitet werden, deren Kernaussagen folgend kurz beschrieben werden.

Untersuchungen von Lyr [103] beschreiben den Einfluss der (Wurzel-)Temperatur auf den Wurzelzuwachs an europäischen Waldbäumen. Dazu wurden Pflanztöpfe mit Stecklingen von acht unterschiedlichen Baumarten bepflanzt und über einen Zeitraum von vier Monaten in Wasserbädern mit Temperaturen von 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° und 35°Celsius wachsen gelassen. Als ein wesentliches Ergebnis ist eine Übersicht verschiedener Baumarten mit einem Temperaturoptimum des Wurzelmassenzuwachses (*total dry mass increment*) und den jeweiligen Wachstumstoleranzräumen (minimaler Grenzwert 5°C und maximaler Grenzwert 35°C) erarbeitet worden. Wachstumsoptima von 15°Celsius wurden bei Rottanne (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Birke (*Betula verrucosa*), Wachstumsoptima bei 25°Celsius bei Stieleiche (*Quercus robur*) und Hainbuche (*Carpinus betulus*) sowie bei Schwarzkiefern (*Pinus nigra*) bis zu 30° Celsius festgestellt. Bei der maximalen Temperatur von 35° Celsius konnte bei den Baumarten Stieleiche, Hainbuche und Schwarzkiefer noch ein Wurzelmassezuwachs festgestellt werden. Die o.g. Baumarten Rottanne, Lärche und Douglasie überstanden die Versuchslaufzeit bei 35° Celsius nicht und sind abgestorben [103, S. 318ff.]. Die o.g. Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Wurzeltemperaturen, je nach Baumart, einen Einfluss auf den Wurzelmassenzuwachs haben können. Die Versuchsdauer von nur vier Monaten ist für die hier zu untersuchenden Fragestellungen zu kurz, da das Hauptwachstum bei immergrünen Bäumen ebenso wie bei verschiedenen Laubgehölzen in verschiedene Jahreszeiten fällt und die Unterschiede des Wurzelmassenzuwachses daher nicht notwendigerweise

aussagekräftig sind. Eine Versuchsdauer über nur vier Monate ist nicht ausreichend lang genug, da nicht eine gesamte Wachstumsperiode betrachtet wird.

Erste beispielhaft durchgeführte Aufgrabungen an einer Fernwärmeleitung durch Herrn Dr. Heidger [104] zeigten, dass Wurzeln in der direkten Umgebung von Fernwärmeleitungen und auf deren Rohraußenmantel gewachsen waren. Diese Beobachtungen in Hannover wurden für die Baumart Eiche gemacht.

Weitere Hinweise zum Wurzelwachstum in der Nähe von Fernwärmeleitungen können einem Gutachten des Sachverständigenbüros Dengler im Auftrag der Stadt Münster aus dem Jahr 1986 [105] entnommen werden. Im Rahmen von Untersuchungen des Baumbestandes vor einer Baumaßnahme wurden Bodentemperaturmessungen im Umfeld einer Fernwärmeleitung durchgeführt. Als Ergebnis wird dort beschrieben, dass die Bodentemperaturen sich in einem Abstand von fünf bis sechs Metern Entfernung zur Fernwärmeleitung wieder normalisiert hatten [105, S. 115]. Als Hinweise beschreibt der Gutachter das Wuchsverhalten der Wurzeln wie folgt [105, S. 112f.]:

„Es hat sich bei den vorgenommenen Wurzelfreilegungen gezeigt, dass bei jenen, in Nähe der Fernwärmeleitung befindlichen, von der Wärmeabstrahlung beeinflussten Bäumen, die Tendenz besteht, daß die der Fernwärmeleitung zugewandten Wurzeln aus ihrer natürlichen Verlaufsrichtung „fliehen“, indem sie seitlich abzweigen.“

Dem Gutachten ist die Leitungsart und die Mediumtemperatur nicht zu entnehmen.

Aus dem Bereich einjähriger Kulturpflanzen (Getreide, Mais, Tomaten u.a.) gibt es Untersuchungen zum Wachstumsverhalten bei Wärme. Diese ist aber aufgrund des abweichenden Wurzelverhaltens nicht als Referenz für das Wachstumsverhalten von Großbäumen heranzuziehen. So haben unter anderem Richner im Jahr 1992 [106] und Engels im Jahr 1988 [107] das Wurzelwachstum von Maispflanzen unter Temperatureinfluss beschrieben. Canahm [108] hat den Temperatureinfluss auf Tomatenpflanzen erforscht. Résumé dieser und weiterer Literaturstellen wie von Macduff [109], der den Temperatureinfluss auf Gerste und Ölraps untersuchte, ist, dass die untersuchten Wurzeln nicht auf langfristiges Wachsen und eine große Standfestigkeit ausgelegt sind, sondern primär für die Nährstoffaufnahme und das kurzfristige Wachstum.

Folgende Themengebiete wurden ergänzend zur Vorstudie [100] recherchiert und einzelne Inhalte sind kurz dargestellt.

Wärmeausbreitung von erdverlegten Stromtrassen

Bei erdverlegten Stromtrassen erfolgt, ähnlich wie bei Fernwärmestrassen, eine Wärmeausbreitung im Erdreich [110, S. 712ff.] (vgl. Wärmeausbreitung von Fernwärmeleitungen im Erdreich, Kapitel 6.3). Jedoch sind, auf Basis der hier durchgeführten Literaturrecherche und Vorstudie [100], bisher keine Untersuchungen zu Wärme und Wurzeln bei erdverlegten Stromtrassen bekannt.

Deponiebau – Angaben zu Wurzeltiefen

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) hat „Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme“ [111] veröffentlicht. Aufgrund von Begrünungen stillgelegter Deponien werden an Deponieabdichtungssysteme auch Anforderungen gegen Durchwurzeln gestellt. In den Anforderungen ist eine Orientierungstabelle erstellt worden, welche die Wurzeltiefen von Bäumen auf natürlichen Böden darstellt. Anhand dieser Tabelle liegen Wurzeltiefen je nach Baumart in Bereichen von 0,6 m bis 4,5 m [111, S. 123ff.]. Datengrundlage ist der Wurzelatlas von Kutschera und Lichtenegger aus dem Jahr 2002 [112]. Die maximalen Wurzeltiefen können bei der Interpretation der Simulationsergebnisse von Wärmefeldern durch erdverlegte Fernwärmeleitungen berücksichtigt werden.

Optimale Temperaturen zum Rasenwachstum

Nach Hausen [113] ist bei bewölkten Wetterverhältnissen die Lufttemperatur mit der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe ungefähr äquivalent. Die optimale Bodentemperatur für das Rasenwurzelnwachstum liegt zwischen 10°C und 18°C. Für das Rasensprosswachstum gilt ein Optimum von 15°C bis 24°C. Diese Bereiche ergeben folglich eine Überlappung von einer Temperaturspanne zwischen 15°C und 18°C, in der ein unterirdisches und oberirdisches Rasenwachstum bestmöglich stattfindet. Unterschreitet die Temperatur ein Minimum von 0,5°C oder übersteigt die Temperatur ein Maximum von 25°C, findet kein Wurzelnwachstum mehr statt. Das Sprosswachstum unterscheidet sich dahingegen, dass ein Wachstum bereits unter 5°C und über 32°C zum Stillstand kommt [113, S. 2]. Nach Lyr [103; S 319f.] wachsen Wurzeln einzelner Großbaumarten auch bei 35°C und ggf. mehr. Ein Vergleich zwischen Rasen- und Wurzelnwachstum ist somit nicht zielführend.

2.3.4.2 Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen und Erdkabeln

Ergänzend zu Kapitel 2.3.4.1 und dementsprechend zur Vorstudie [100] und dem Forschungsvorhaben [6] wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ergänzende Ergebnisse zur Wärmeabstrahlung von Erdkabeln in das Erdreich recherchiert. Anschließend werden die zu erwartenden Temperaturen und maßgeblichen Parameter zur Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen (KMR) in das Erdreich kurz dargestellt, die durch Grimm im Forschungsvorhaben [6, S. 45ff.] ermittelt und ausgearbeitet wurden.

Die Bodentemperaturen werden abhängig von der Tiefe u.a. von der Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung beeinflusst. Beispielhafte Bodentemperaturen in Potsdam aus dem Jahr 2005 sind in [114, S. 86] dargestellt. Im Hochsommer liegen die Temperaturen in einem Meter Tiefe bei ca. 20°Celsius und im Winter bei ca. 3°Celsius. Je tiefer, desto geringer ist der äußere Einfluss. Ab zwölf Metern Tiefe ist der jahreszeitliche Einfluss gering und die Temperatur liegt bei ca. 10°Celsius [114, S. 86].

Weitergehend als bei Fernwärme wurden zur Wärmentwicklung von Höchstspannungserdkabeln in Böden in den letzten ca. 15 Jahren Feldversuche in Osterath

und Freiburg [115] sowie ein Pilotprojekt von Amprion mit Monitoringprogramm in Raesfeld [116; 117; 118] durchgeführt. Auch durch Tennet wurde mittlerweile eine Pilotstrecke eingerichtet [119]. Zudem wurden in Literaturstudien weitere bisher vorliegende Erfahrungen und Untersuchungen von Höchstspannungserdkabeln zusammengetragen [95; 120; 121]. Hintergrund der Untersuchungen ist der geplante Ausbau der Stromnetze in Deutschland, in dem auch Höchstspannungserdkabel eingesetzt werden sollen [95, S. 3]. Schwerpunkte dieser Untersuchungen liegen jedoch nicht beim Einfluss der Abwärme auf das Wurzelwachstum langjähriger Pflanzen. Trotzdem werden auch für die vorliegende Arbeit wichtige Erkenntnisse dargestellt, die folgend zusammengefasst werden.

I.d.R. werden maximale Temperaturen direkt an Höchstspannungserdkabeln von weniger als 50° Celsius erwartet [115, S. 4]. In den Feldversuchen wurden bei diesen Leitertemperaturen maximale Temperaturanstiege vertikal über den Erdkabeln in 30 Zentimetern unterhalb GOK von bis zu drei Kelvin ermittelt [115, S. 41f]. In [120, S. 107] wird ebenfalls davon ausgegangen, dass in 30 Zentimetern Tiefe unter GOK maximale Temperaturerhöhungen von zwei bis drei Kelvin auftreten. Bei einem Meter horizontaler Entfernung werden die Temperatureinflüsse an der Oberfläche weniger als ein Kelvin betragen [115, S. 41]. Jedoch sind im Bettungsbereich der Kabel erhebliche Temperaturerhöhungen zu erwarten [115, S. 41].

Im Pilotprojekt Raesfeld wurden bzw. werden u.a. Temperatur- und Feuchtemessungen im Bereich einer realen Erdkabeltrasse durchgeführt [116, S. 10f; 117, S. 16; 118, S. 49ff]. Erste Ergebnisse der Temperaturmessungen zeigen, dass in zehn Zentimetern unter GOK Temperaturschwankungen bis zu 20° Celsius auftreten und im Bereich der Grabensohle um 6° Celsius [116, S. 28]. Weitere Ergebnisse bzw. Erläuterungen dazu liegen nicht vor. Die Ergebnisse ordnet der Autor so ein, dass die vergleichsweise großen Temperaturschwankungen an der Oberfläche zeigen sollen, dass die Einflüsse der Atmosphäre, z.B. Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung, einen höheren Einfluss auf die Geländeoberfläche haben als das Höchstspannungserdkabel.

Im Feldversuch in Raesfeld werden zudem Untersuchungen zum Einfluss auf die landwirtschaftlichen Erträge über der Erdkabeltrasse durchgeführt [116, S. 15f, 30f]. Ergebnisse dazu lagen dem Autor jedoch nicht vor.

Insbesondere die Temperaturangaben direkt unter der GOK verdeutlichen, dass der Hauptfokus der o.g. Untersuchungen zum Einfluss von Wärme aus Höchstspannungserdkabeln nicht auf langjährige, tieferliegende Wurzeln liegt, sondern auf den Einfluss auf landwirtschaftliche Pflanzen, für die eher Einflüsse auf die Oberfläche und den direkten Bereich darunter maßgeblich sind. Dies liegt u.a. daran, dass erste Pilotvorhaben von Höchstspannungserdkabeln im landwirtschaftlichen Bereich durchgeführt wurden. Landwirte fürchten u.a. die betrieblichen Wärmeeinflüsse von Erdkabeln auf ihren landwirtschaftlichen Ertrag [122, S. 1].

Baumwurzeln wurden in den o.g. Untersuchungen und Literaturstudien, bis auf in [95], wenig betrachtet. Ein Grund dafür ist vermutlich, dass das Bepflanzen mit Gehölzen, die tiefer wurzeln als einen Meter, auf Erdkabeltrassen bisher untersagt ist [120, S. 87]. Jedoch wird bereits darüber diskutiert, ob auch bei Erdkabeltrassen in Wäldern ggf. wieder eine Aufforstung auch auf den Erdkabeltrassen erfolgen sollte [95, S. 86ff].

Aussagen zur ökologischen Relevanz oder zum Wurzelwachstum in den Wärmefeldern sind in den o.g. Literaturquellen vereinzelt vorhanden. Nach [115, S. 42] sind die zu erwartenden Temperaturerhöhungen von drei Kelvin in einer Entfernung von 2,5 Metern von den Erdkabeln in größerer Bodentiefe aus ökologischer Sicht von geringer Relevanz. In [95, S. 79, 103] wird dargestellt, dass das Wurzelwachstum vermutlich bei absoluten Temperaturen ab 40°Celsius eingeschränkt wird und das Absterben von Wurzeln die Folge dieser erhöhten Temperaturen sein kann. In [120, S. 87] werden die

„*Beeinträchtigung der abiotischen Bodenfunktion durch Erwärmung*“ und die

„*Verminderung der Lebensraumfunktion des Bodens durch Erwärmung*“

als Kritikpunkte für Erdkabeltrassen dargestellt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Wärmemessungen an Höchstspannungserdkabeln zeigen, dass im direkten Leitungsbereich ein hoher Temperatureinfluss zu erwarten ist. Direkt über den Erdkabeln im direkten Bereich unter GOK werden Temperaturanstiege von bis zu drei Kelvin erwartet. Untersuchungen mit langjährigem Pflanzenwachstum liegen nicht vor.

Die Wärmemessungen an Fernwärmeleitungen (vgl. Kapitel 2.3.4.1 und [101; 102]), insbesondere mit Blick auf die oben dargestellten Untersuchungen an Höchstspannungserdkabeln, sind vergleichsweise alt. Aus diesem Grund wurde in [6, Kapitel 3, S. 45ff] durch Grimm zunächst herausgearbeitet, welche Faktoren an Kunststoffmantelrohren für einen Temperaturanstieg im Erdreich verantwortlich sind. Zudem wurden durch Grimm erstmalig tatsächliche Temperatur-Messwerte aus zwei Feldversuchen mit Temperaturmessungen im Erdreich direkt am Außenmantel von Fernwärmeleitungen ausgewertet. Folgend werden die Ergebnisse aus [6, S. 45ff.] durch den Autor zusammenfassend dargestellt.

Zunächst ist ein wesentlicher Unterschied zwischen Fernwärmeleitungen und Erdkabeln darzustellen: Bei Erdkabeln soll die Wärme möglichst in das umgebende Erdreich abgeführt werden. Bei Fernwärmeleitungen ist jedoch das Ziel so wenig Wärme wie möglich an das umgebende Erdreich abzugeben, um den physikalischen Wärmeverlust zu reduzieren [6, S. 45]. Nach [6, S. 45f.] sind für die Wärmeabstrahlung ins Erdreich u.a. die Umgebungsbedingungen, die Betriebstemperatur, die konstruktive Ausführung der Fernwärmeleitungen (z.B. Nennweite, Dämmstärke, Verlegetiefe und Bettungsmaterial (vgl. Kapitel 2.1.2)) sowie die Alterung von Rohrwerkstoffen maßgebend.

Bei der Auswertung der Messdaten aus den Feldversuchen zeigten sich maximale Temperaturen von 36° Celsius an einem KMR-Außenmantel im Bogenbereich ohne Dehnpolster bei einer vergleichsweise sehr hohen Betriebstemperatur von 140° Celsius. Bei der durchschnittlichen Betriebstemperatur von ca. 100° Celsius wurden Temperaturen am Außenmantel zwischen 24 und 27° Celsius gemessen. In einer weiteren Teststrecke wurden die Außentemperaturen von maximal 23,5° Celsius bei einer durchschnittlichen Betriebstemperatur von knapp 90° Celsius direkt an der Rohroberfläche eines KMR ermittelt [6, S. 53ff.]. Die Messungen zeigen, dass mit maximalen Temperaturen von 36°Celsius direkt am Außenmantel eines KMR zu rechnen ist, wobei die Betriebstemperatur in diesem Fall vergleichsweise hoch ist. Die Messungen wurden im Rahmen von Feldversuchen durchgeführt, wodurch die ermittelten Temperaturen bestmöglich den Praxisfall darstellen sollen [6, S. 53]. Auch bei dieser maximalen Temperaturannahme zeigt sich jedoch eine Temperaturdifferenz zwischen KMR und Höchstspannungserdkabel von ca. 14 Kelvin.

2.4 Zusammenfassung und Diskussion

Der Schwerpunkt der bisherigen Erfahrungen und Beobachtungen zu Wurzel-Rohr-Interaktionen liegt bei Abwasserleitungen und -kanälen sowie Gasleitungen. Bei Wurzeln ist bekannt, dass sie bevorzugt dorthin wachsen, wo sie ausreichend Raum, Wasser, Nährstoffe und Sauerstoff vorfinden. In vielen Studien wird dargestellt, dass bestimmte Baumarten öfter zu Wurzeleinwuchs führen als andere Baumarten. Zudem wird ein Wurzeleinwuchs unwahrscheinlicher, je weiter der Abstand zwischen Baumstamm und Leitung ist. Da jedoch bereits durch eine Vielzahl von Baum- und Straucharten Wurzeleinwuchs und auch trotz größerer Entfernungen zwischen Baum und Leitung in einigen Fällen Wurzeleinwuchs festgestellt wurde, werden diese Faktoren nicht weitergehend in den folgenden Beschreibungen und Untersuchungen betrachtet (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3).

Kern und Ziel der Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit ist es, unterirdische Leitungen und Kanäle mit bautechnischen Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs zu schützen. Dabei ist es zunächst zweitrangig, welche Baumart und welcher Abstand zwischen Baum und Leitung vorliegen, wenn alle untersuchten bautechnischen Schutzmaßnahmen Wurzeleinwuchs allgemein verhindern können. Des Weiteren ist Ziel der hier vorliegenden Arbeit zu ermitteln, welche Parameter in Zusammenhang mit Wurzeleinwuchs maßgebend sind, damit die bautechnischen Schutzmaßnahmen dementsprechend auf ihre Wurzelfestigkeit geprüft werden können. Die Ergebnisse sollen in die (Weiter-)Entwicklung von bautechnischen Schutzmaßnahmen einfließen. Eine (Weiter-)Entwicklung der bautechnischen Schutzmaßnahmen an sich ist allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig darzustellen, dass Wuchsvorgänge in Rohr-Boden-Systemen nicht auf eine einfache Weise beschrieben werden können. Denn Wurzeln sind lebende Organismen, die auf ihre Umwelt reagieren [19, S. 118].

In-situ-Beobachtungen zeigen, dass Wurzeln im urbanen Raum oftmals im Leitungsgraben einen im Vergleich zum anstehenden Boden für das Wurzelwachstum attraktiven Boden vorfinden [17, S. 142; 18, S. 58f.]. Dies liegt u.a. an den in den Leitungsgräben eingesetzten Bettungsmaterialien, die i.d.R. bei Abwasserleitungen aus Sand- oder Sand-Kies-Gemischen bestehen (vgl. Kapitel 2.1.1) und im Vergleich zum anstehenden Boden oftmals geringer verdichtet sind [17, S. 142; 18, S. 58f.]. Somit finden Wurzeln im Leitungsgraben ausreichend Porenraum zum Wachsen. Porenraum bedeutet, dass Wurzeln dort genügend Platz zum Wachsen finden, aber auch Wasser und Sauerstoff in für Wurzeln geeigneten Gehalten vorliegen. Eine porenraumarme Gestaltung der Bettung ist somit eine Lösungsmöglichkeit, um Wurzeleinwuchs zu verhindern.

Dazu wird in der vorliegenden Arbeit recherchiert und diskutiert, welche Bettungsmaterialien als porenraumarmen Verfüllstoff eingesetzt werden können und welche Prüfverfahren und Untersuchungen bisher dazu vorliegen (vgl. Kapitel 3.2 und 3.4.2). Es werden

Untersuchungen durchgeführt zur Ermittlung maßgeblicher wurzelabweisender Kenn- und Grenzwerte (vgl. Kapitel 7). Zudem wird ein Prüfkonzept entwickelt, welches die Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen nachweisen soll (vgl. Kapitel 8.3).

Sind die Wurzeln im Leitungsgraben eingewachsen, so wachsen sie nicht mehr in stärker verdichtete Bereiche zurück (vgl. Kapitel 2.3.3 „Dichtefallenmodell“) und finden oftmals den Weg zur unterirdischen Leitung. Wachsen Wurzeln an unterirdischen Leitungen und Kanälen entlang, so treffen sie irgendwann auf eine Rohrverbindung. Das Wurzelwachstum passt sich den Rohr- und Muffengeometrien an und die Wurzel kann im ungünstigsten Fall in die Rohrverbindung einwachsen [18, S. 77]. Studien und Datenerhebungen aus mehreren Ländern zeigen, dass insbesondere Wurzeleinwüchse in Abwasserleitungen bekannt sind [u.a. 72; 74]. In der vorliegenden Arbeit wird recherchiert und diskutiert, welche Prüfverfahren und Untersuchungen zur Wurzelfestigkeit von (Abwasser-)Rohrverbindungen vorliegen und inwieweit diese auch eine valide Aussage zur tatsächlichen Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen geben können (vgl. Kapitel 3.1 und 3.4.1).

Bzgl. der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln bestehen noch offene Fragestellungen. Es ist bisher nicht bekannt, inwieweit Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder in dauerelastische Verbindungen einwachsen können. Insbesondere bei den aktuell i.d.R. genutzten Kunststoffmantelrohren mit vergleichsweise geringen Ummantelungsstärken sind bisher wenige Erkenntnisse über Wurzel-Rohr-Interaktionen bekannt. Die Herstellung von KMR-Verbindungen auf der Baustelle ist nach Regelwerk [43, S. 6]

„die gefährdetste Stelle im Kunststoffmantelrohrsystem und bedarf besonderer Beobachtung“.

Daher wird in der vorliegenden Arbeit untersucht, inwieweit Wurzeln in fachgerecht und nicht-fachgerecht ausgeführte KMR-Verbindungen einwachsen können und welche Montagefehler besonders anfällig für Wurzeleinwuchs sind (vgl. Kapitel 6.1.1). Zudem wird untersucht, wie widerstandsfähig die vergleichsweise dünne PE-Ummantelung von KMR ist, um durch Wurzeldickenwachstum nicht beschädigt zu werden (vgl. Kapitel 6.1.2).

Weitere offene Fragestellungen bei der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Bäumen bzw. Baumwurzeln ergeben sich aus botanischer Sicht, da bisher nicht umfassend untersucht wurde, inwieweit die Abwärme von Fernwärmeleitungen ggf. das Wurzelwachstum sowie die Vitalität und Periodizität der Bäume beeinflussen kann (vgl. Kapitel 6.1.3). Dazu wurden in [100, S. 28f.] folgende Hypothesen entwickelt, die hier ausschließlich zur Vollständigkeit der botanischen Fragestellungen dargestellt werden:

Entwicklung von Hypothesen zum Wurzelwachstum an Fernwärmeleitungen

Die Ausarbeitung der Hypothesen erfolgte in [100, S. 28f.] und sie wurden im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und

Fernwärmeleitungen“ aufgegriffen und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde [6, S. 19f.]¹; S. 41.

„Die Literaturrecherche zeigt, dass bisher keine umfassenden Untersuchungen mit Blick auf den Einfluss von Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum von Bäumen vorliegen. Offene Fragestellungen zu Wurzeln und Wärme im Boden wurden in der Vorstudie [100, S. 28f.] in folgende Arbeitshypothesen formuliert:

- » *Hypothese A: Das Temperaturfeld schützt die FW-Leitungen vor Wurzeln (Stimmt nicht im Fall von Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung).*
- » *Hypothese B: Das Temperaturfeld fördert das Wurzelwachstum (Stimmt im Fall Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung, wobei das „wieso“ offenbleibt).*
- » *Hypothese C: Die Wasserversorgung der Wurzeln (z.B. diskontinuierlich, vgl. Wurzelentwicklung in Regenwasserkanälen) auch in warmen Böden muss gewährleistet sein. Hier ist der Versiegelungsgrad für das Zufließen von Oberflächenwasser maßgeblich. Hinweis: Der Porenraum hat einen Einfluss auf das Wasserhaltevermögen des Bodens.*
- » *Hypothese D (Heidger-Hypothese):
Auf der Rohroberfläche setzen sich nach Verdunstung Mineralien ab, die der Pflanze als Nährstoff zur Verfügung stehen. Hierdurch wird das Wurzelwachstum gefördert. Hinweis: Die Grenzfläche zwischen Rohroberfläche und Bodenkörper wirkt wie eine durchgängige Bodenpore (Grenzflächenraum). Möglicher negativer Effekt: Es können sich auch Schadstoffe akkumulieren (wie z.B. kristallines Streusalz).*
- » *Hypothese E: Durch die nachlassende Dämmwirkung des Isolationsmaterials (Alterung) erhöht sich die Bodentemperatur. Ältere Literatur geht von 80-90 % aus, die von Dämmung abgefangen wird (vgl. [123]), gibt aber keine Auskunft über den Alterungsprozess. Durch eine Temperaturerhöhung aufgrund einer verminderten Dämmwirkung beschleunigen sich alle Bodenprozesse und die jahreszeitliche Periodizität geht verloren. Die Wurzeln reagieren besonders empfindlich auf diese Veränderungen.*
- » *Hypothese F: Wachsen Wurzeln im Bereich von Fernwärmeleitungen verändern die erhöhten Bodentemperaturen die Vegetationsperioden der Stadtbäume und verändern das Wachstumsverhalten der ober- und unterirdischen Teile des Baumes. Die Auswirkungen können unterschiedlich sein. Falls*

beispielsweise der Laubfall verzögert wird, erhöht [sic] die Bruchgefahr bei Schneefall aufgrund der Blattflächen.

Die in der Vorstudie [100, S. 28f.] entwickelten Arbeitshypothesen veranschaulichen die Breite der offenen Fragestellungen zum Thema Wärme und Vegetation im Erdreich und stellen keine abschließende Liste dar. Unberücksichtigt bleiben beispielsweise die Interaktionen von Wurzeln mit bestehenden Fernwärme- bzw. Dampfleitungssystemen die unter Haubenkanälen verlegt werden. Die Arbeitshypothesen veranschaulichen, dass ggf. verschiedene Szenarien in der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Baumvegetation möglich sind. Daher dienen die Arbeitshypothesen als Grundlage für die Entwicklung der Untersuchungen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens.“

Einordnung der Hypothesen in Bezug auf bautechnische Schutzmaßnahmen

Die o.g. Hypothesen bzgl. des Wurzelwachstums an Fernwärmeleitungen bzw. in deren Wärmefeldern werden in der hier vorliegenden Arbeit zur Vervollständigung der wesentlichen Untersuchungen und Beschreibungen aus [6] dargestellt. Jedoch ist für bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzel-Rohr-Interaktionen zunächst zu untersuchen, ob die Abwärme einen maßgeblichen Einfluss auf das Wurzelwachstum sowie die Vitalität und Periodizität der Bäume hat. Ist dies nicht der Fall, so sind die Schutzmaßnahmen im Regelfall auch nicht für mögliche Wärmebeeinflussungen anzupassen bzw. durchzuführen. Daher sind für die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit zunächst folgende, vereinfachte Hypothesen aus [6] maßgeblich:

1. Wurzelwachstum sowie Vitalität und Periodizität der Bäume wird durch die höhere Wärme im Erdreich durch die Fernwärmeleitungen beeinflusst.
2. Wurzelwachstum sowie Vitalität und Periodizität der Bäume wird durch die höhere Wärme im Erdreich durch die Fernwärmeleitungen nicht beeinflusst.

Weitere Einflüsse, wie z.B. mögliche Nährstoff-Ablagerungen an der Rohroberfläche oder der Einfluss von über das Alter nachlassender Dämmwirkungen von KMR sollten im Nachgang der ersten Untersuchungen, falls zielführend, weitergehend untersucht werden.

3 Bautechnische Schutzmaßnahmen

Die Beschreibungen der passiven Schutzmaßnahmen im Leitungsgraben in Kapitel 3 wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“ durchgeführt und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde [9, S. 23ff.]² (zu [124]). Basis der Literaturrecherche sind die Ausführungen in [17; 18; 19]. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden weitere Untersuchungen und Prüfungen ergänzt. Diese Ergänzungen durch den Autor sind dementsprechend gekennzeichnet. Eine Diskussion und Einordnung der Prüfverfahren und bisherigen Untersuchungen durch den Autor erfolgt im Anschluss in Kapitel 3.4.

Passive Schutzmaßnahmen (im Leitungsgraben) sind nach deutschem Regelwerk (textgleich in DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [1]) Schutzvorkehrungen im Leitungsgraben gegen Wurzelbewuchs und Wurzeleinwuchs, also im unmittelbaren Bereich unterirdischer Leitungen. Zu den passiven Schutzmaßnahmen (im Leitungsgraben) gehören nach [1, S. 17f.]:

- Einsatz porenraumarmer Verfüllstoffe im Rohr oder Leitungsgraben
- Einbau von Mantelrohren (Schutzrohren) um die Leitung
- Einbau von Platten oder Folien im Leitungsgraben
- Auswahl wurzelfester Rohrverbindungen
- Weitere Schutzmaßnahmen

Inhalt und Gliederung der folgenden Unterkapitel orientieren sich u.a. an dem deutschen Regelwerk [1].

Für passive Schutzmaßnahmen im Leitungsgraben, wie geschlossene Rohrverbindungen, wurzelundurchlässige Folien und Platten sowie porenraumarme Verfüllstoffe, werden (Labor-) Prüfverfahren nach deutscher und europäischer Normung durchgeführt, die die „Wurzelfestigkeit“ der Produkte nachweisen sollen. Werden die Prüfkriterien durch ein Produkt erfüllt, gelten diese Produkte nach Norm als „wurzelfest“³.

Nachfolgend werden die genormten Prüfverfahren und deren Aussagen beschrieben. Ergänzend werden weitere Prüfverfahren dargestellt, die ggf. zur Prüfung der Wurzelfestigkeiten von Produkten eingesetzt werden können, jedoch zurzeit nicht standardisiert sind. Darüber hinaus werden Hinweise aus weiteren Untersuchungen, z.B. aus Forschungsvorhaben, ergänzt. Durchgeführte (gutachterliche) Prüfungen und

² In dem Forschungsvorhaben „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“ [9] wurde eine Bachelorarbeit [124] durchgeführt, die der Autor betreut hat. Wurden (Projekt-)Ergebnisse erstmalig in der Abschlussarbeit genutzt und/oder verfasst, so sind sie dementsprechend im vorliegenden Text gekennzeichnet. Beschreibungen aus der Literaturrecherche werden aus der Primärliteratur zitiert und nicht der Abschlussarbeit zugeordnet.

³ Ergänzung durch den Autor in der vorliegenden Arbeit: Der Begriff „wurzelfest“ ist in [1, S. 8] definiert als: *„Eigenschaft von Stoffen und Bauteilen, in die Wurzeln nicht eindringen können“*

Untersuchungen von einzelnen Produkten sind nicht Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Einordnung des Autors zu den folgenden Darstellungen und Beschreibungen

Der Schwerpunkt der folgenden Darstellungen liegt auf Schutzmaßnahmen, die als standardisierte Systeme bzw. Produkte verfügbar sind. Die Betrachtung von individuellen Maßnahmen im Einzelfall, wie z.B. der Einsatz von Spundwänden oder das Tieferlegen von Leitungen und Kanälen, ist nicht Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit.

Die Ergebnisse aus den dargestellten Beschreibungen und Beobachtungen in Kapitel 2 geben folgende Hinweise für die Gestaltung von bautechnischen Schutzmaßnahmen:

- **Wurzelfeste Rohrverbindungen** und die **Verbindungen von Folien und Platten** sollten so gestaltet sein, dass Wurzeln möglichst wenig (Poren-)Raum zum Einwachsen zur Verfügung haben.
- **Porenraumarme Verfüllstoffe** sollten so gestaltet sein, dass sie höher verdichtet sind und einen geringeren Porenraum vorweisen als der anstehende Boden.

Die aktuellen, technischen Voraussetzungen und bisherige Untersuchungen zu den bautechnischen Schutzmaßnahmen werden folgend dargestellt.

3.1 Wurzelfeste Rohrverbindungen

Prüfverfahren zur Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen haben Eingang in die europäische Normung gefunden. Prüfanforderungen werden insbesondere nach den Rohrwerkstoffen unterschieden. Da geschweißte Rohrverbindungen allgemein nach Regelwerk [1, S. 18] keine Angriffspunkte für Wurzeleinwuchs bieten, liegt der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen auf den gesteckten Rohrverbindungen.

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Zudem bieten sich für den Einbau von Mantelrohren (Schutzrohren) um die Leitung nach [1, S. 18] verschweißte Rohre an. Diese Schutzmaßnahmenart wird in der vorliegenden Arbeit nicht weitergehend betrachtet.

Zur Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen wurden bereits eine Vielzahl an Untersuchungen durchgeführt [u.a. 17; 18; 19; 126], wodurch die wesentlichen Erkenntnisse dieser Wurzel-Rohr-Interaktionen vorliegen. Jedoch sind seit den Untersuchungen mittlerweile über zehn Jahre vergangen, wodurch eine Aktualisierung der Norm-Prüfverfahren und eine weitergehende Recherche möglicher neuer wissenschaftlicher Untersuchungen zunächst zielführend ist. Zudem wird die Literaturlauswertung hinsichtlich Schrumpfmuffen, wie sie oftmals an KMR genutzt werden, erweitert. Bisher wurden bereits unterschiedliche mechanische und botanische (Norm-) Prüfungen und wissenschaftliche Untersuchungen zu wurzelfesten Rohrverbindungen entwickelt bzw. durchgeführt. Die Prüfungsarten werden durch den Autor aufgeteilt in

mechanische oder botanische Norm-Prüfungen mit oder ohne Aussage zur Wurzelfestigkeit, wissenschaftliche Untersuchungen auf rein mechanischer Basis sowie wissenschaftlichen Untersuchungen mit Pflanzen (Pflanzversuche). In den einzelnen Unterkapiteln werden diese Prüfverfahren und Untersuchungen beschrieben. In Tabelle 3 werden zur besseren Übersicht die recherchierten Verfahren zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 3: Übersicht zu bisherigen (Norm-)Prüfungen und Untersuchungen von wurzelfesten Rohrverbindungen

Titel	Art	Beschrieben durch Autor in
Prüfung nach DIN 4060 [125]	mechanische Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit	[9, S. 23f.]
Messung der Anpressdrücke bei Prüfung nach DIN 4060 [125; 19; 126]	mechanische Untersuchung	[9, S. 24f.]
Prüfung nach DIN EN 1916 [37] in Ergänzung mit DIN V 1201 [127]	mechanische Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit	v.A.
Prüfung nach DIN EN ISO 13529 [128]	mechanische Norm-Prüfung	[9, S. 25]
Prüfung nach bzw. in Anlehnung/angepasst an EN 14741 [129; 130; 131]	mechanische Norm-Prüfung (in Anlehnung/angepasst an genutzt zur Wurzelfestigkeit)	[9, S. 26], v.A.
Prüfung nach AS/NZS 1462.13 [132]	mechanische Norm-Prüfung	v.A.
Prüfung nach DIN 4062 [133]	botanische Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit	v.A.
Außendruckuntersuchung nach [19]	mechanische Untersuchung	[9, S. 26f.]
Untersuchung zur Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen nach [99]	mechanische Untersuchung	v.A.
Einwuchsversuche mit unterschiedlichen Steckverbindungen nach [19; 126; 134; 135, 136]	Pflanzversuche	[9, S. 27f.]; v.A.
Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, Australien [134, 136]	Pflanzversuche	v.A.
Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, USA [137]	Pflanzversuche	[9, S. 28]; v.A.
Wegabhängige Scherlastversuche nach [126]	Pflanzversuche	v.A.
In-situ-Versuche an Beton- und PVC-Rohren, Schweden [76]	Pflanzversuche	[9, S. 28]
Untersuchungen zum Einsatz von Schrumpfschläuchen an Abwasserleitungen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs [76; 70]	Pflanzversuche	v.A.

v.A. = vorliegende Arbeit

3.1.1 Prüfung nach DIN 4060

Besteht eine Rohrverbindung die (Innendruck-)Dichtheitsprüfung mit Wasser unter Scherlasteinwirkung und Abwinklung bei Über- bzw. Unterdruck nach DIN 4060 [125, S. 6], so gilt diese Rohrverbindung nach dieser Norm als wurzelfest.

Bei diesem Prüfverfahren wird die Rohrverbindung zwischen zwei Rohren i.d.R. mit Wasserinnendruck auf Dichtheit geprüft. Dabei wird die Rohrverbindung in hintereinander folgenden Schritten durch Abwinklung der zwei Rohre und Aufbringen einer Scherlast für drei Monate beansprucht. Die nach Normvorschrift zu wählende Langzeit-Scherlast ist u.a. abhängig von der Rohr-Nennweite und dem Rohrwerkstoff. Rohrverbindungen müssen bei Einwirkung einer Scherlast mindestens in Höhe des zehnfachen Zahlenwertes der Nennweite in Newton dicht bleiben. Die Größe der Abwinklung ist abhängig von der Rohr-Nennweite und variiert von zehn bis 50 Millimeter pro Meter Baulänge. Geprüft wird jeder Versuchsschritt mit 0 und 0,05 bar für jeweils 5 Minuten sowie 0,5 bar für 15 Minuten. Nach einer Belastungsdauer von drei Monaten werden die Scherlast-Prüfungen erneut durchgeführt [125, S. 5, 7ff.].

Abweichend werden in einzelnen Produktnormen höhere Prüfanforderungen gefordert. So wird bei Steinzeugrohren nach DIN EN 295 [138, S. 17] eine Scherlast des 25-fachen Durchmessers und bei duktilen Gussrohren nach DIN EN 598 [139, S.23f.] eine Scherlast des 30-fach Durchmessers gefordert. Zudem erfolgt die Prüfung von duktilen Gussrohren bei 2,0 bar für 120 Minuten. Bei PVC-U-Rohrverbindungen wurde die o.g. Scherlastprüfung bis Dezember 1998 nach DIN V 19534-2 [140, S. 3, 5f.] durchgeführt und die Rohrverbindungen waren bei Erfüllung dieser Prüfung ebenfalls nach Norm wurzelfest. Die DIN V 19534-2 [140] wurde im Dezember 1998 durch die DIN EN 1401-1 [141] ersetzt, in der keine Angaben zur Wurzelfestigkeit nach Norm dargestellt werden.

3.1.2 Messung der Anpressdrücke bei Prüfung nach DIN 4060

Ergänzend wurden weitere Untersuchungen zur Prüfung nach DIN 4060 [125] im Rahmen von [19, S. 35ff.] durchgeführt. Dabei wurden die Anpressdrücke von Dichtmitteln sowie die korrespondierenden Dichtflächen unterschiedlicher Steckmuffen (unterschiedliche Werkstoffe und Produkte) unter Scherlasteinwirkung nach DIN 4060 [125] und ohne Scherlasteinwirkung untersucht. Hierzu wurden Steckmuffen mit einer Druckmessfolie bestückt, welche die am Kreisring wirkende Anpressdruckverteilung zwischen Spitze und Elastomerdichtung messen sollte. Durch das Aufbringen der Scherlast aus Richtung der Sohle erhöht sich der Anpressdruck im belasteten Scheitelbereich und reduziert gleichzeitig den Anpressdruck im Sohlbereich einer Rohrverbindung. Die Prüfergebnisse zeigten, dass bei Rohrverbindungen mit einem großen Ringspalt ein vergleichsweise starker Abfall der mittleren Anpressdrücke im entlasteten Bereich der Rohrverbindung festgestellt werden konnte. Bei Rohrverbindungen mit einem kleinen Ringspalt hatten die Scherlasten aufgrund von Bewegungsbegrenzungen vergleichsweise einen geringeren

Einfluss auf die Veränderung des Anpressdrucks. Daraus lässt sich schließen, dass die Geometrie der Steckmuffen (Ringspalt, Ringraum und Dichtmittel) ebenfalls eine große Auswirkung auf die Wurzelfestigkeit haben kann [19, S. 44; 126, S. 39ff.].

3.1.3 Prüfung nach DIN EN 1916 in Ergänzung mit DIN V 1201

Eine vergleichbare Prüfung zu DIN 4060 [125] wird für Beton- und Stahlbetonrohrleitungen in DIN EN 1916 [37, S. 54ff.] dargestellt. Auch dort wird eine Rohrverbindung unter Scherlastbeanspruchung und Abwinklung auf Wasserdichtheit geprüft. Scherlast und Abwinklung können in jeweils separaten Prüfungen oder in einer gemeinsamen Prüfung durchgeführt werden. Der Prüfdruck beträgt 0,5 bar für 15 Minuten. Die aufzubringende Scherkraft in Kilonewton beträgt 0,03-mal DN, bei kombinierter Prüfung 0,01-mal DN. Die Abwinklung beträgt 12.500 durch DN oder 50 Millimeter pro Meter. Es zählt der Wert, der kleiner ist. Wird die Prüfung bestanden, so ist die Rohrverbindung nach DIN V 1201 wurzelfest [127, S. 25].

3.1.4 Prüfung nach DIN EN ISO 13259

Eine weitere Prüfung, vergleichbar zur DIN 4060 [125], kann für Rohrleitungen aus Thermoplasten nach DIN EN ISO 13259 [128] durchgeführt werden. Nach DIN EN ISO 13259 [128] werden keine Aussagen zur Wurzelfestigkeit beschrieben. Die Prüfung wird hier aufgrund der Ähnlichkeit zur Prüfung nach DIN 4060 [125] zur Vollständigkeit mitaufgeführt. Dabei wird ein aus zwei Rohren bestehender Prüfkörper einem festgelegten negativen inneren Anfangsluftdruck ausgesetzt, gefolgt von einem niedrigen hydrostatischen Anfangsinnendruck und einem höheren hydrostatischen Innendruck. Während der Prüfung werden die Rohrverbindungen Verformungen und/oder Abwinklungen ausgesetzt. Die Druckarten und Verformungsbedingungen sind abhängig von der jeweiligen Produktnorm [128, S. 5ff.]. Auch in den Produktnormen von PVC-U [141], PP [142; 143], PE [144] sowie Rohrleitungssystemen mit profilierter Wandung aus PVC-U, PP und PE [145; 146; 147] sind keine Aussagen zur Wurzelfestigkeit beschrieben.

3.1.5 Prüfung nach EN 14741

Eine andere Art der Prüfung wird in DIN EN 14741 [129] beschrieben. Es handelt sich hierbei um eine Prüfung des Langzeit-Dichtheitsverhaltens von Elastomer-Dichtmitteln von Rohrleitungen aus Thermoplasten. In dieser Norm werden keine Aussagen zur Wurzelfestigkeit beschrieben. Es wird der für das Anheben des Dichtmittels erforderliche Gasdruck in einem Schlauch mit definierten Durchmesser gemessen. Der Stickstoff wird mit einem konstanten Durchfluss von 120 ml/min durch drei dünne Polytetrafluorethylen-Schläuche (PTFE-Schläuche) geführt, welche in den Drittelpunkten des Rohrumfanges zwischen Dichtring und Spitzende angeordnet sind. Der für das Erreichen des Durchflusses erforderliche Druck wird zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb eines Zeitraums von 2000 Stunden gemessen. Die extrapolierten Regressionslinien für den Druck werden verwendet,

um die geschätzten Werte nach 100 Jahren und nach 24 Stunden zu errechnen [129, S. 5ff.].

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Jedoch werden beispielsweise nach [130, S. 3; 131, S. 3ff.] in Anlehnung nach bzw. angepasst an EN 14741 und mit höheren Belastungen Wurzelfestigkeitsprüfungen durchgeführt. Dies bedeutet, dass eine Prüfung nach EN 14741 durchgeführt wird, jedoch die zu prüfenden Rohrverbindungen weitergehende Belastungen, als im Vergleich zur reinen Prüfung nach EN 14741, ausgesetzt werden. Nach [130, S. 3] ist für Kanalrohre aus PP die höhere Belastung im Vergleich zu EN 14741 das Aufbringen eines maximalen Spaltmaßes (nach EN 1852-1 [148]) und eine Deformation um 10 % bezogen auf den Innendurchmesser. Die Verbindung gilt als beständig gegen Wurzeleinwuchs, wenn sie einen Anpressdruck nach 100 Jahren (extrapoliert) von $\geq 2,0$ bar und einen Abfall des Anpressdrucks von ≤ 30 % aufweist [130, S. 3].

Nach [131, S. 2f.] sind für Steckmuffen-Verbindungen duktiler Guss-Rohrsysteme die Prüfungen angepasst an EN 14741 auf der entlasteten Seite mit größtmöglichem Ringraum und einer Scherlastbeanspruchung von $3 \times DN$ in Newton durchzuführen. Die Rohrverbindung gilt als wurzelfest, wenn bei der Extrapolation auf 100 Jahre ein Anpressdruck von mindestens 7 bar erreicht wird [131, S. 2, 5].

3.1.6 Prüfung nach AS/NZS 1462.13:2006

Nach der australischen und neuseeländischen Norm AS/NZS 1462.13 [132, S. 1] sind ein Mindestgrenzflächendruck und eine Mindestkontaktbreite zwischen der Elastomerdichtung und dem Spitzende des Rohrs oder Formstücks erforderlich, um das Risiko des Eindringens von Baumwurzeln und des Eindringens oder Austretens von Flüssigkeiten zu minimieren. Die Norm gilt für Kunststoffrohre. Eine Muffe mit Elastomerdichtung wird über einen Stutzen mit kleiner Bohrung oder ein Stutzen mit Elastomerdichtung wird über eine Muffe mit kleiner Bohrung gesetzt. In beiden Fällen wird die Bohrung soeben von der Elastomerdichtung abgedeckt. Zur Prüfung wird ein steigender (Wasser-)Druck durch die Bohrung ausgeübt, bis eine Leckage auftritt. Der Druck bei der Leckage und die anschließende relative Lage der Dichtung werden dokumentiert [132, S. 1]. Für PVC-U-Rohrverbindungen werden nach [149, S. 15], im Vergleich zu DIN 4060 [125, S. 7], höhere Prüfdrücke von mindestens 0,40 MPa gefordert.

3.1.7 Prüfung nach DIN 4062

In der zurückgezogenen DIN 4062 aus dem Jahr 1978 [133, S. 3, 11] wurde die Wurzelfestigkeit plastischer Dichtstoffe (Kitte und Bänder) von Abwasserleitungen und -kanälen aus Beton geprüft. Dabei wurden Pflanzversuche mit Lupinen durchgeführt, bei denen die Lupinenwurzeln auf einen mit Dichtstoff ausgefüllten Spalt zwischen zwei Platten wuchsen. Die Dichtstoffe galten als wurzelfest, wenn keine Wurzeln durch den mit Dichtstoff

abdichteten Spalt innerhalb von sechs Wochen im Sommer bzw. acht Wochen im Winter im Gewächshaus durchgewachsen waren [133, S. 3, 11].

3.1.8 Außendruckuntersuchungen

Im Rahmen von [19, S. 45ff.] wurden zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit auch Außendruckuntersuchungen an Rohrverbindungen durchgeführt. Der Prüfraum (Rohrleitung mit größerer Nennweite als Prüfrohrleitung) wird mit zwei Deckeln und Dichtelementen an den Austrittsstellen geschlossen. Im oberen Bereich eines Deckels findet die Entlüftung statt und im unteren Bereich die Befüllung mit Wasser sowie die Druckmessung. Um ein Beulen biegeweicher Rohre am Rohrschaft zu verhindern und ein mögliches Versagen ausschließlich an der Verbindung sicher zu stellen, wird eine Stützvorrichtung in das Rohr eingeführt (vgl. Abbildung 6).

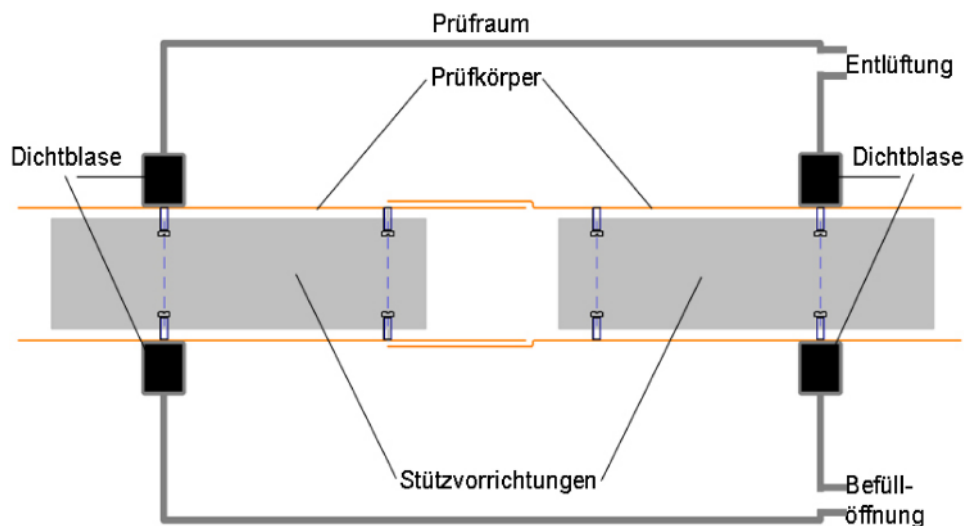


Abbildung 6: Längsschnitt des Versuchsaufbaus der Außendruckprüfung [19, S. 47]

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Ergänzend in der vorliegenden Arbeit werden hier folgend die Ergebnisse nach [126, S. 51f.] dargestellt. Demnach können die in [19, S. 45ff.] geprüften Rohrverbindungen in die folgenden drei Belastungsstufen eingeordnet werden [126, S. 51f.]:

- Außenwasserdruckbeständig bis ca. zwei bar
- Außenwasserdruckbeständig von drei bis vier bar
- Außenwasserdruckbeständig über vier bar

Die Außenwasserdruckbeständigkeit scheint von der Beschaffenheit des Dichtungsmaterials abhängig zu sein und nicht von der Steifheit des Rohrmaterials [126, S. 51f.].

3.1.9 Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen

Wurzeln benötigen Sauerstoff für die Wurzelatmung. Daher sind ggf. auch Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen zielführend, um ermitteln zu können, bei welchen Rohrverbindungen mit viel Sauerstoffaustritt in das Erdreich zu rechnen ist. In [99] wurden erste Untersuchungen zur Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen durchgeführt, jedoch mit dem Untersuchungsschwerpunkt, ob mittels der Gaspermeabilität einer Dichtung abgeschätzt werden kann, wann die Dichtung flüssigkeitsundicht wird. Es zeigte sich, dass über die Zeit die Gaspermeabilität zunimmt und ein Zusammenhang zwischen Gaspermeabilität und Wasserdichtheit besteht [99, S. 183f.; 17, S. 38f.].

3.1.10 Einwuchsversuche mit unterschiedlichen Steckverbindungen

In [19] wurden sog. Outside-In-Versuche an Rohrverbindungen durchgeführt, um Erkenntnisse über den Einfluss unterschiedlicher Verbindungs- bzw. Dichtungsgeometrien auf das Einwachsen von Wurzeln zu erhalten. Dazu wurden zehnmonatige Kulturversuche in Anlehnung an Versuche des CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation in Australien [134, S. 4] durchgeführt. Bei dem Versuchsaufbau werden unterschiedliche Steckverbindungen hergestellt und vertikal mit der Glockenmuffe nach oben zeigend aufgestellt. Der Bereich oberhalb des Glockenendes wird dabei mit einer Folie zu einem Blumentopf erweitert. Das Spitzende wird entweder bündig zur Muffe (vgl. Abbildung 7, links) oder nicht-bündig zur Muffe, um einen Trichtereffekt einzustellen (vgl. Abbildung 7, rechts), eingesetzt. Anschließend wird der entstandene Raum mit Substrat gefüllt und mit Weiden bepflanzt. Durch den vertikalen Aufbau kann ein Einwachsen der Wurzeln in Richtung der Muffen provoziert und beschleunigt werden. Um nach Abschluss der Versuchszeit den Verlauf der Wurzeln und ein Einwachsen überprüfen zu können, kann ein Längsschnitt durch die Rohrverbindungen erfolgen [19, S. 69ff.; 124, S. 42f.].

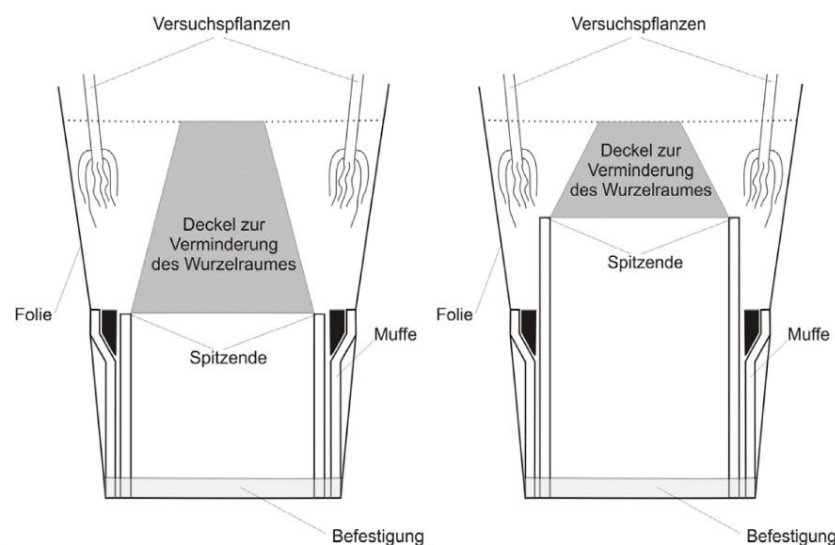


Abbildung 7: Längsschnitt des Aufbaus der Outside-In-Versuche. Spitzende und Muffe bündig (links), Spitzende und Muffe nicht bündig (rechts) [19, S. 71]

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

In Australien wird nach Norm eine Dichtheit von 0,4 MPa bei PVC-Rohrverbindungen vorgeschrieben (vgl. Kapitel 3.1.6 [149, S. 6]). Als Versuchspflanzen wurde eine Grasart mit aggressiven Wurzeln (Weidelgras, *Lolium perenne*) mit einer Versuchslaufzeit von sieben Monaten und ein Myrtengewächs (*Melaleuca armillaris*) mit einer Versuchslaufzeit von 14 Monaten eingesetzt [134, S. 4]. Wurzeleinwuchs wurde bei nach Stand der Technik ausgeführten Verbindungen und bei Verbindungen, die geringere Anpressdrücke und Kontaktbreiten als nach Stand der Technik aufwiesen, nicht festgestellt [134, S. 5; 136, S. 1].

Im Vergleich dazu wurde in den deutschen Versuchen in einem Großteil der eingesetzten Verbindungen (Steinzeug, PVC-U und PP) eine Unterwanderung des Dichtmaterials durch Wurzeln nach einer Versuchslaufzeit von 21 Monaten festgestellt, teilweise innerhalb einer Wachstumsperiode [126, S. 59, 66, 124f.]. Hier liegt der nach Stand der Technik erforderliche Druck bei 0,5 bar [125, S. 7], also 0,05 MPa. Als Versuchspflanze wurden Weiden (*Salix spec.*) eingesetzt.

3.1.11 Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, Australien

Zusätzlich zu den vertikalen Pflanzversuchen (vgl. Kapitel 3.1.10) wurden durch das CSIRO Pflanzversuche in Versuchsbehältern an horizontal eingebauten PVC-Rohrleitungen durchgeführt [134, S. 4]. Je Versuchsbehälter wurden zwei Rohrverbindungen getestet. Als Versuchspflanzen wurden ebenfalls die Grasart mit aggressiven Wurzeln (Weidelgras, *Lolium perenne*) und das Myrtengewächs (*Melaleuca armillaris*) eingesetzt. Bei den Versuchen mit Gras als Versuchspflanze wurde nach sechs Monaten Versuchszeit kein Wurzeleinwuchs festgestellt [134, S. 6].

In weiteren späteren Veröffentlichung durch das CSIRO und Whittle [135; 136] wurde dargestellt, dass auch der Einfluss eines zu geringen Anpressdruckes der Dichtung auf das Einwuchsrisiko erfasst wurde. Es kam häufiger zu Wurzeleinwuchs, wenn die getesteten Verbindungen den australischen Anforderungen für den Anpressdruck (0,4 MPa) nicht entsprachen. Jedoch wuchsen nicht in alle Rohrverbindungen mit geringerem Anpressdruck Wurzeln ein. Sogar bei Rohrverbindungen mit sehr niedrigem Anpressdruck (kleiner 0,1 MPa) wurde nicht in allen Rohrverbindungen Wurzeleinwuchs festgestellt [17, S. 37f.]. In [136, S. 2] wird zusätzlich dargestellt, dass kein Wurzeleinwuchs festgestellt wurde bei Anpressdrücken von 0,38 MPa, wenn zeitgleich die PVC-Rohrleitungen um 7,5 % verformt wurden.

Zudem werden in [136, S. 2] Untersuchungen an Steinzeugrohren und faserverstärkten Betonrohren beschrieben. Ziel der Untersuchungen ist herauszufinden, ob zusätzlich zum Anpressdruck auch andere Rohreigenschaften für Wurzeleinwuchs maßgeblich sein können. Bei sieben von acht Versuchen mit Steinzeugrohren sowie drei von acht Versuchen mit faserverstärkten Betonrohren mit dem Myrtengewächs (*Melaleuca armillaris*) wurde

nach 32 Monaten Versuchszeit Wurzeleinwuchs festgestellt. Zu den Steinzeugrohren wird diskutiert, ob die höhere Oberflächenrauigkeit und -porosität im Vergleich zu PVC einen Einfluss auf den Wurzeleinwuchs hat. Es wird geschlussfolgert, dass die Größe des Muffenspalts nicht maßgeblich für den möglichen Wurzeleinwuchs ist, da bei den PVC-Verbindungen kein Einwuchs festgestellt wurde. Das bei den faserverstärkten Betonrohren weniger Wurzeleinwuchs festgestellt wurde als bei den Steinzeugrohren wird darauf zurückgeführt, dass der Beton einen pH-Wert von größer 9 aufwies und durch das Auslaugen des pH-Wertes aus dem Rohrmaterial und das eingeschränkte Wurzelwachstum weniger Wurzeleinwuchs festgestellt werden konnte. Jedoch werden keine Anpressdrücke der Steinzeug- und Betonrohrverbindungen in den Versuchen dargestellt. Bei allen dargestellten Versuchen wurden die Rohrleitungen mit Hydrokultur-Lösungen befüllt, um einen Wurzeleinwuchs zu provozieren [147, S. 2].

3.1.12 Pflanzversuche an horizontalen Steckverbindungen, USA

1977 wurden in den USA mittelformatige Laborversuche zum Nachweis der Wurzelfestigkeit von PVC-Rohren durchgeführt. Im Versuchsaufbau wird ein PVC-Rohrstrang mit mehreren Verbindungen in Boden eingebettet und darüber als Versuchspflanze eine Trauerweide eingepflanzt. Der Versuch wurde nach 15 Monaten beendet, als die Versuchspflanze vertrocknet war. Es konnte kein Wurzeleinwuchs in die Rohrverbindungen festgestellt werden und nur wenige Feinwurzeln im Bereich des Glockenendes [137, S. 5f.].

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Das Erscheinungsjahr von [137] kann dem Dokument nicht entnommen werden. Jedoch wurden die Versuche im Juni 1977 begonnen [137, S. 5]. Die Ausgangshypothese des Versuchs war nachzuweisen, dass die Wurzeln nicht zu einer Leckage durch die eingesetzten PVC-Rohrverbindungen wachsen konnten. Aus diesem Grund floss durch die PVC-Rohrleitung konstant Wasser. Die eingesetzte Weide wurde hingegen nicht bewässert. Das Vertrocknen der Weide galt als Beweis, dass PVC-Rohrverbindungen wurzelfest sind, da kein Wasseraustritt und somit den Wurzeln kein Wasser zur Verfügung stand bzw. kein Anreiz für die Wurzel bestand zu einer fehlenden Leckage zu wachsen. Bei diesen Untersuchungen wurde vornehmlich das Leck-Modell betrachtet (vgl. Kapitel 2.3.3).

3.1.13 Wegabhängige Scherlastversuche

Streckenbach [126, S. 45ff.] führte sog. „Wegabhängige Scherlastversuche“ mit Pflanzen an horizontal eingebauten Steinzeug- und Gusseisen-Rohrverbindungen durch. Dabei wurden die Rohrverbindungen unter Scherlast (mit Hilfe eines Rahmens) in Pflanzcontainer eingebaut und bepflanzt. Die Versuchsbehälter wurden entweder nach 18, 30 oder 60 Monaten Versuchslaufzeit geöffnet. Dabei wurden Wurzeln in direkter Nähe zum Muffenspalt bei einem Großteil der eingesetzten Rohrverbindungen festgestellt, jedoch in keinem Fall eine Einwurzelung in die Rohrverbindung bzw. Durchwurzelung der

Rohrverbindung. Die Versuche, die nach 18 und 30 Monaten geöffnet wurden, wurden im Anschluss bis zur Unterkante der Rohrverbindungen mit Flüssigboden befüllt. Ergebnisse dieser Untersuchungen liegen dem Autor nicht vor.

3.1.14 In-situ-Versuche an Beton- und PVC-Rohren, Schweden

In-situ-Versuche in Schweden [76] zeigen eine Möglichkeit der Langzeituntersuchung zur Wurzelfestigkeit von Abwasserrohren und deren Verbindungen. Dazu werden ein PVC- und ein Betonrohr mit jeweils zwölf Verbindungen im Erdreich horizontal verlegt und darauf Pappeln gepflanzt. Von den zwölf Verbindungen wurden ein Teil fachgerecht und ein Teil schadhaft eingebaut. Nach elf Jahren Versuchsdauer wurde die Versuchsanlage aufgegraben und die jeweiligen Rohrverbindungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass Wurzeln sowohl in die fachgerecht hergestellten als auch in die schadhaften Verbindungen eingewachsen sind [76, S. 282; 124, S. 44].

3.1.15 Untersuchungen zum Einsatz von Schrumpfschläuchen an Abwasserleitungen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, werden als Fernwärmerohrverbindungen oftmals dauerelastische Schrumpfmanschetten eingesetzt. An Abwasserleitungen wurde der Einsatz von Schrumpfschläuchen über gesteckten Abwasserrohrverbindungen in Pflanzversuchen bereits untersucht [76; 70].

In [76, S. 279ff.] wurden, ergänzend zu den Beschreibungen in Kapitel 3.1.13, jeweils sechs Verbindungen an Beton- und PVC-Rohren zusätzlich mit Schrumpfschläuchen umhüllt. An den Betonrohren konnte nach elf Jahren kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden. An den PVC-Rohren wurde bei vier von sechs Rohrverbindungen Wurzeleinwuchs festgestellt.

In [70, S. 30ff.] wurden ebenfalls Pflanzversuche an PVC-Rohrverbindungen mit Schrumpfschläuchen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde ein Schrumpfschlauch eingesetzt, der zwischen Schrumpfschlauch und Rohrwand verklebt wird und für mindestens 200 Millimeter die Rohrverbindung überlappt. Der Schrumpfschlauch wird durch Wärmeeintrag an die Rohrwandung bzw. Rohrverbindung angeschrumpft. Der Kleber wird in diesem Vorgang flüssig und füllt alle Freiräume aus, wodurch keine Porenräume mehr für Wurzelwachstum vorhanden sein sollten. In den Pflanzversuchen sind nach zwölf Monaten keine Wurzeln in diese Rohrverbindung eingewachsen [70, S. 30ff.].

3.2 Porenraumarme Verfüllstoffe

Zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen sind keine Norm-Prüfverfahren vorhanden. Jedoch wurden in Forschungsvorhaben Labor- oder Kleinuntersuchungen zur Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen durchgeführt.

Wurzeln nutzen für ihr Wachstum möglichst lockere und porenreiche Böden. Nach deutschem Regelwerk [1] sollen durch Verfüllen des Leitunggrabens mit porenraumarmen Verfüllstoffen für die Wurzeln unattraktive Bedingungen geschaffen werden, um ein Einwachsen der Wurzeln in den Leitungsraben zu verhindern. Ein dauerhafter Wurzelschutz ist insbesondere abhängig von den vor Ort eingesetzten Stoffen, der Art des Einbaus und der Ausführungsqualität [1, S. 17].

Porenraumarme Verfüllstoffe können u.a. in mineralische Kapselungen und zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (kurz ZFSV, auch als Flüssigboden bekannt) unterteilt werden. Mineralische Kapselungen werden im Leitungsraben oder als Ummantelung um die Rohrleitung manuell verteilt und mechanisch verdichtet. Weitere Informationen und Anforderungen zu mineralischen Kapselungen werden im Merkblatt DWA-M 146 [150, S. 38f.] beschrieben.

ZFSV sind fließfähig und werden flüssig in den Leitungsraben verfüllt und verdichten selbstständig. Weitere Hinweise zum Einsatz von ZFSV werden im Arbeitsblatt DWA-A 139 [32, S. 46ff.] beschrieben. Nach dem DBU-Forschungsvorhaben „Wurzelmehmende Verfüllbaustoffe“ [151, S. 42] sollte ein ZFSV eine deutlich geringere Porosität aufweisen als der umgebende Boden. Die Porosität sollte kleiner als 30 Vol.-% sein, um einen dauerhaften Wurzelschutz des Leitungsrabens zu gewährleisten.

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Des Weiteren wird nach Stein [36, S. 215] auch die Ummantelung von Rohren mit Beton als passive Schutzmaßnahme aufgeführt und vom Autor zu den porenraumarmen Verfüllstoffen eingegliedert.

In der hier vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchungen auf der Betrachtung des ZFSV als bautechnische Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs. Aus diesem Grund werden folgend die Zusammensetzung und die wesentlichen Eigenschaften von ZFSV beschrieben.

ZFSV sind aufgrund ihrer Fließfähigkeit und Selbstverdichtbarkeit insbesondere dazu geeignet in schwer zugänglichen oder zu verdichtenden Leitungsbereichen als Verfüllbaustoff eingesetzt zu werden. Dabei sollen Hohl- und Zwischenräume vollständig ausgefüllt werden [32, S. 46].

ZFSV bestehen aus Wasser, Böden bzw. Baustoffen, Zement, Kalk und unterschiedlichen Zusatzstoffen [32, S. 46; 152, S. 5]. Es können natürlich anstehende Böden, aufbereitete Böden und geeignete Recyclingbaustoffe für die Herstellung genutzt werden [32, S. 46].

Zudem ist nach [152, S. 13] der Einsatz von natürlichen Gesteinskörnungen aus Gewinnungsbetrieben möglich. Nach [152, S. 13] ist auch der Einsatz von organogenen Böden und Böden mit organischen Beimengungen bedingt geeignet. Organische Böden sind hingegen für die Bodenbehandlung ungeeignet [152, S. 13].

Als Bindemittel werden i.d.R. Zement und Kalk eingesetzt. Zudem können je nach geforderten Eigenschaften Zusatzmittel, wie z.B. Tonminerale, Verflüssiger, Stabilisierer, Abbindebeschleuniger oder Farbpigmente eingesetzt werden [152, S. 14].

Die ZFSV-Rezeptur wird durch die Anforderungen des Auftraggebers und in Abhängigkeit der Eigenschaften der Ausgangsstoffe vor dem Einbau festgelegt. Zudem sollte für die Eignung der Rezeptur die Interaktion mit dem anstehenden Boden berücksichtigt werden. Dabei sollten u.a. einaxiale Druckfestigkeit, Wichte, Scherparameter, Durchlässigkeit, Porenvolumen sowie Quell- und Schwindeigenschaften des anstehenden Bodens bekannt sein [32, S. 46], damit der eingebaute ZFSV nicht wie ein Fremdkörper im Boden wirkt.

Die Zusammensetzung der Baustoffgemische ist durch Eignungsprüfungen von zulässigem Größtkorn, Fließfähigkeit (Konsistenz), Tragfähigkeit (Verformungsmodul E_{V2} oder E_{Vd}), Druckfestigkeit oder CBR-Wert, Wiederaushubfähigkeit und Volumenstabilität nachzuweisen [152, S. 20]. Des Weiteren werden nach [32, S. 47] für die Ermittlung des Aushubmaterials u.a. Kornverteilung, Wassergehalt, Gehalt organischer Stoffe, Durchlässigkeitsbeiwert und Schadstoffuntersuchung nach landesüblichen Regelungen gefordert. Zusätzlich sollten vor Einbau u.a. der Durchlässigkeitsbeiwert k_f und die Volumenstabilität (Quell- und Schwindeigenschaften) des einzusetzenden ZFSV definiert werden [32, S. 47].

Die wesentlichen ZFSV-Endeigenschaften sind die Tragfähigkeit, Wiederaushubfähigkeit, Druckfestigkeit oder der CBR-Wert und die Volumenstabilität [152, S. 21]. Ergänzt wurde im IKT-Warentest [7] als eine wesentliche ZFSV-Endeigenschaft die Wiederverwertbarkeit. Dabei wird die Wiederaushubfähigkeit über die Druckfestigkeit bzw. den CBR-Wert definiert. Eine leichte Wiederaushubfähigkeit von Hand ist möglich bis zu einer Druckfestigkeit von $0,3 \text{ N/mm}^2$ oder einem CBR-Wert bis 25 %. Eine mittlere Wiederaushubfähigkeit ist gegeben, wenn der Aushub des ZFSV mit Hilfe leichter Geräte (Spitzhacke oder Löffel des Minibaggers) gewährleistet ist. Dies erfolgt bei Druckfestigkeiten von $0,3$ bis $0,8 \text{ N/mm}^2$ oder einem CBR-Wert von 25 % bis 60 %. Eine schwere Aushubfähigkeit, die schweren Geräteeinsatz (Baggerlöffel, Hydraulikmeißel) fordert, liegt bei Druckfestigkeiten über $0,8 \text{ N/mm}^2$ oder einem CBR-Wert größer 60 % [32, S. 22].

Das Ziehen des Verbaus erfolgt im fließfähigen Zustand des ZFSV, damit beim Ziehen der Verbauelemente entstehende Hohlräume vollständig verfüllt werden [152, S. 18].

Zur Wurzelfestigkeitsprüfung von porenraumarmen Verfüllstoffen sind keine Norm-Prüfverfahren vorhanden. Jedoch wurden wissenschaftliche Labor- und Pflanzversuche zur Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen durchgeführt [9, S. 47]. Schwerpunkt

der Darstellungen aus den folgend beschriebenen Untersuchungen sind bodenmechanische Kennwerte und Versuche mit Pflanzen. In den einzelnen Unterkapiteln werden diese Untersuchungen beschrieben. In Tabelle 4 werden zur besseren Übersicht die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Untersuchungen zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4: Übersicht zu bisherigen Untersuchungen von porenraumarmen Verfüllstoffen zur Wurzelfestigkeit

Titel	Art	Beschrieben durch Autor in
Pflanzversuche mit Bentonit [17; 126]	Pflanzversuche	[9, S. 32]; v.A.
Granulometrische Untersuchungen an ZFSV [151; 57]	Bodenmechanische Laboruntersuchungen	[9, S. 32]; v.A.
Pflanzversuche mit angepassten ZFSV [151; 57]	Pflanzversuche	v.A.
Pflanzversuche zum Wurzelwachstum in Substraten [126; 153]	Pflanzversuche	v.A.
Untersuchungen von chemisch und pyhsikalisch behandelten Böden zur Verhinderung von Wurzeleinwuchs [80]	Pflanzversuche	v.A.

v.A. = vorliegende Arbeit

3.2.1 Pflanzversuche mit Bentonit

Porenraumarme Verfüllstoffe können z.B. durch Laborversuche in Pflanzgefäßen untersucht werden. Beispielhaft wurden Pflanzgefäße mit wechselweise angeordneten Lagen von Bentonit um eine zentrale Säule aus Komposterde befüllt (vgl. Abbildung 8). Nach drei Monaten Versuchsdauer wurden die Gefäße im Längsschnitt geöffnet und untersucht [17, S. 160ff.].

Die Ergebnisse der Kleinversuche bestätigten, dass die Substrate geringen Porenanteils (hier Bentonit) nicht durchwurzelt wurden und sich das Wurzelwachstum auf die Bereiche mit Komposterde beschränkt [17, S. 160ff.].

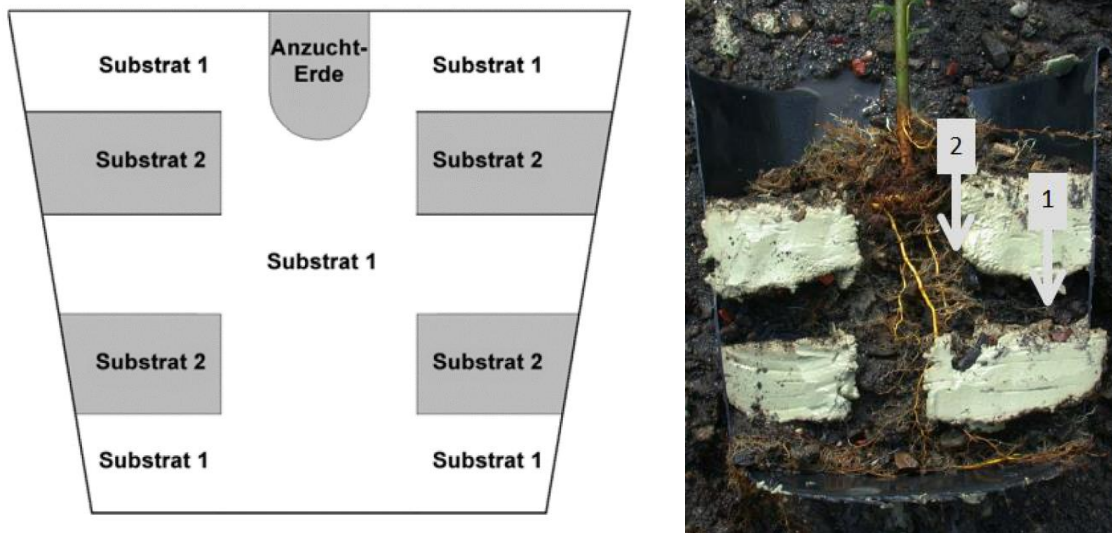


Abbildung 8: Aufbau (links) und Längsschnitt (rechts) eines Kleinversuchs mit Bentonit (2) und Komposterde (1) als Substrate unterschiedlicher Porengröße [17, S. 161, 163]

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

In den oben aufgeführten Untersuchungen wurde ein Bentonit eingesetzt aus Tonmineralien mit einer mittleren Partikelgröße von 0,063 Millimetern und einer Korndichte von 2,65 g/cm³. Es wird erwartet, dass die Poren eine Größe von 100 µm nicht überschreiten [17, S. 160f.]. Wird diese Porengröße mit den minimalen Wurzelspitzenlängen von 0,2 Millimetern verglichen, sollten Wurzeln nicht in Bentonit einwachsen können, da sie diese bereits mit der Wurzelspitze nicht erschließen können.

Zu den in Abbildung 8 dargestellten Versuchen wurden zudem inverse Kontrollversuche durchgeführt. D.h., dass die Anordnung von Substrat und Bentonit in den Versuchsbehältern getauscht wurde. Als Ergebnisse zeigte sich zunächst an der Oberfläche der Kontrollversuche, dass die Pflanzen, im Vergleich zu den Pflanzen in den Substrat-Versuchen, ein langsames und vermindertes Wachstum aufzeigten. Beim Öffnen der Kontrollversuche wurde kein Wurzeleinwuchs in das Bentonit festgestellt, sodass das dahinter liegende Substrat ebenfalls nicht durchwurzelt werden konnte. Das eingesetzte Bentonit wurde als feucht und plastisch verformbar beschrieben [17, S. 166f.].

Weiterführend wurden in [19, S. 97ff.; 126, S. 86ff.] modifizierte Pflanzversuche mit Bentonit durchgeführt. In einer ersten Versuchsreihe wurde Bentonit im gequollenen Zustand in Pflanzcontainer eingebaut. In einer zweiten Versuchsreihe wurde Bentonit in trockenem Zustand als Rohrummantelungen an Rohrprobestücken in Pflanzcontainern eingesetzt.

Teile der ersten Versuchsreihe mit Bentonit im gequollenen Zustand wurden nach 21 Wochen und der Rest nach 24 Monaten geöffnet. Dabei wurde in fünf von sechs Versuchen Wurzeleinwuchs in Rissen im Bentonit festgestellt [19, S. 119; 126, S. 120]. Diese Risse sind vermutlich durch Quellung oder Schrumpfung des Bentonits entstanden [19, S. 119].

Die Versuche mit trockenem Bentonit wurden nach zwölf Monaten geöffnet. Dort wurden keine Risse im Bentonit und auch kein Wurzeleinwuchs festgestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass Wurzeln nicht in Bentonit einwachsen, außer die Wurzeln konnten Risse im Bentonit erschließen [126, S. 120].

3.2.2 Granulometrische Untersuchungen an ZFSV

Im DBU-Forschungsvorhaben „Wurzelhemmende Verfüllbaustoffe“ [151, S. 42] wurden in Laborversuchen die Eigenschaften von unterschiedlichen ZFSV-Rezepturen hinsichtlich der Wurzelfestigkeit untersucht. Zusammenfassend wurde u.a. ermittelt, dass ein sicherer und dauerhafter Wurzelschutz des Leitunggrabens dann gewährleistet ist, wenn das Bettungsmaterial eine deutlich geringere Porosität aufweist als der umgebende Boden. Auch wenn der Umgebungsboden (je nach Zusammensetzung) unterschiedliche Verdichtungsgrade aufweist, sollten Verfüllbaustoffe eine Porosität von kleiner 30 Volumenprozent dauerhaft gewährleisten, um wurzelfest zu sein [151, S. 42].

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Die geringe Porosität kann durch eine packungsdichte-optimierte ZFSV-Rezeptur erreicht werden, die eine breite, gut abgestimmte Sieblinie, maximales Größtkorn und einen minimalen Gehalt quellfähiger Tone aufweist. Aufgrund einer geringen Porosität werden nach [151, S. 42] zusätzlich die Wasserleitfähigkeit und der Gasaustausch im Boden durch einen geringen Gehalt an Sekundärporen und eine geringe Luftkapazität reduziert. Dies sind ebenfalls weitere für Baumwurzeln unattraktive Bedingungen [151, S. 42]. Des Weiteren wurden u.a. bei den untersuchten Rezepturen pH-Werte von 9,5 bis 11,6 ermittelt. Der kleinste pH-Wert wurde an einer Rezeptur mit Bodenaushub festgestellt [151, S. 39]. Messungen des pF-Wertes zeigten in allen untersuchten ZFSV-Rezepturen Anteile von potentiell pflanzenverfügbarem Wasser zwischen permanenten Welkepunkt (bei pF 4,2) und der Feldkapazität (bei pF 1,8) [151, S. 35f.]. Mit Blick auf durchgeführte LAGA M20 Untersuchungen der Rezepturen ist der pH-Wert zu nennen, der jeweils eine Einordnung in die Einbauklasse Z1.2 zur Folge hätte [151, S. 37f.]. Weitere Parameter der LAGA M20 Untersuchung werden hier nicht weitergehend beschrieben.

Aufbauend auf den oben aufgeführten Ergebnissen aus [151] wurden durch Simon [57] weitergehende ZFSV-Rezepturen entwickelt. Basis der Untersuchungen war eine Vielzahl an granulometrischen Laboruntersuchungen u.a. zu Packungsdichte und Porenraum, Druckfestigkeit, Gaspermeabilität sowie pH-Wert. Die gewonnenen Ergebnisse wurden im Nachgang u.a. mit Blick auf die Wurzelfestigkeit von ZFSV diskutiert. Als wesentliche Ergebnisse für die Erstellung einer wurzelhemmenden ZFSV-Rezeptur ist ein dichtes Gefüge bzw. eine hohe Packungsdichte notwendig, welches durch möglichst großes Größtkorn bei maximaler Sphärizität und Rundung erreicht wird. Die geringste Porosität der untersuchten Rezepturen wurde mit 31 Vol.-% erreicht. Die Vorgabe aus [151] von 30 Vol.-% wurde somit knapp nicht erreicht, jedoch sollte dies mit größerem Größtkorn in weiteren

Rezepturen möglich sein. Die untersuchten ZFSV-Rezepturen sind stark saugend, was für die Wurzelfestigkeit als nachteilig angesehen wird. Eine Reduzierung der Gasdurchlässigkeit mit ansteigender Packungsdichte wurde zunächst nicht festgestellt [57, S. 148].

Bei einem Teil der untersuchten ZFSV-Rezepturen wurden erste Untersuchungen zur Entwicklung von pH-Werten im ZFSV durchgeführt. Im ungebundenen Zustand wurden pH-Werte von 12,5 gemessen. Die pH-Werte im alkalischen Bereich sind auf den Zementanteil im ZFSV zurückzuführen. Es wurde auch mit Blick auf die LAGA TR-Böden (Bodenentsorgung) [154] untersucht, ob der pH-Wert über die Zeit abnimmt. Eine Versuchsreihe wurde ohne äußere Einflüsse gelagert, eine andere Versuchsreihe wurde zweimal in der Woche mit Wasser um- und durchströmt. Nach 56 Tagen wurde beim mit Wasser um- und durchströmten ZFSV eine pH-Wert-Reduzierung von 2,1 ermittelt. Bei dem ZFSV ohne äußere Einflüsse reduzierte sich der pH-Wert um 1,1 [57, S. 131f.].

Ein bisher nicht weitergehend betrachteter Parameter, der die feuchtebedingten Transportprozesse in ZFSV beschreiben kann, ist die Wasserdurchlässigkeit k_f . Es wird vermutet, dass die Wasserdurchlässigkeit bei erhöhter Packungsdichte sehr schwach durchlässig sein wird (10^{-8} bis 10^{-9} m/s) [57, S. 148].

3.2.3 Pflanzversuche mit angepassten ZFSV

In ersten Pflanzversuchen mit angepassten ZFSV konnte durch [57, S. 57f.;151, S. 51] nachgewiesen werden, dass in packungsdichteoptimierten ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen keine Wurzeln eingewachsen sind. Jedoch wurde Wurzeleinwuchs in ZFSV aus Bodenaushub mit einer Porosität kleiner 30 Vol.-% festgestellt [57, S. 57f.]. In [57, S. 57f.] wird diskutiert, ob ggf. der hohe Anteil quellfähiger Tone aus dem verwendeten Bodenaushub zu einer Lockerung des Gefüges geführt hat und somit den Wurzeln ein geringerer Widerstand entgegen gebracht werden konnte.

Zudem zeigten Analysen der Wurzeln aus diesen Pflanzversuchen, dass ein hohes Verhältnis zwischen Wurzelradius und -länge vorlag. Dies spricht für ein sekundäres Dickenwachstum der Wurzeln und somit für einen hohen Eindringwiderstand des eingesetzten ZFSV [57, S. 58.;151, S. 51].

3.2.4 Untersuchungen zum Wurzelwachstum in Substraten

Die oben aufgeführten Pflanzversuche zeigen, dass Wurzeln in porenraumarmen Böden (Bentonit und ZFSV) nicht oder vergleichsweise wenig wachsen. Als Umkehrschluss ist es naheliegend, dass Wurzeln hingegen in porenreichen Böden bevorzugt und ausgeprägt wachsen können. Nach [1; S. 18] sollen Wurzeln ausreichend Entwicklungsraum zur Verfügung haben in vegetationstechnisch günstigen Bedingungen. Folgend wird eine Auswahl von Untersuchungen zum Wurzelwachstum in Substraten dargestellt, um

weitergehende Informationen zum Wurzelwachstum in Böden darzustellen, die ggf. auch für die Beschreibungen von porenraumarmen Verfüllstoffen genutzt werden können.

Es wurden Pflanzversuche zum Einfluss unterschiedlicher Körnungsabstufungen von Sanden und Kiesen auf das Wurzelwachstum durchgeführt [126, S. 26ff., 74ff.]. Dabei wurden in Pflanzgefäßen jeweils eine feinere und eine gröbere Körnungsabstufung in mehreren horizontalen Lagen (Etagen) übereinander eingefüllt. Die feinste Körnung betrug 0,063 bis 0,25 Millimeter und die gröbste Körnung 3,0 bis 6,0 Millimeter. Als Versuchspflanzen wurden die drei Pflanzenarten *Aesculus hippocastanum* L. (Gew. Rosskastanie), *Acer pseudoplatanus* L. (Berg-Ahorn) und *Fraxinus excelsior* L. (Gew. Esche) eingesetzt [126, S. 26ff.]. Nach einer Versuchsdauer von zehn Monaten zeigte sich, dass die Versuchspflanzen jeweils eine Lage bevorzugt durchwurzelt. Bei den Arten *Fraxinus excelsior* L. und *Aesculus hippocastanum* L. wurde bevorzugt die feinere Körnung durchwurzelt. Die Art *Acer pseudoplatanus* L. durchwurzelt bevorzugt die gröbere Körnung. Somit scheint hier ein artenspezifisches Wachstumsverhalten in Sanden und Kiesen unterschiedlicher Körnung möglich zu sein [126, S. 107].

Weitere Pflanzversuche in [126, S. 28f., 80ff.] wurden zu unterschiedlichen Tragschichten unter Flächenbelägen durchgeführt. In Pflanzcontainern wurden unter Betonplatten unterschiedliche Tragschichten mit einer Dicke von 50 Millimetern eingebaut. Als Tragschichten wurden Splitt (Korngröße drei bis fünf Millimeter) und Sand (Korngröße ein bis drei Millimeter) eingesetzt. Unterhalb dieser Tragschichten wurde Schotter und Bodensubstrat verbaut. Die Versuchsdauer betrug 22 Monate [126, S. 29]. Wesentliches Ergebnis war, dass in der Tragschicht aus Sand (mit vergleichsweise feinerer Körnung und somit kleineren Porenräumen) mehr Wurzelwachstum festgestellt wurde als in den Tragschichten aus Splitt. Die Sandtragschicht war durchgehend feucht. Die Tragschicht aus Splitt war weitestgehend trocken. Als Ursachen für das vermehrte Wurzelwachstum im Sand wird u.a. der bessere Rückhalt von pflanzenverfügbarem Wasser genannt, welches beispielsweise durch Kondenswasserbildung durch Temperaturunterschiede im Tagesverlauf an den Betonplattenunterseiten entstehen kann. Beim Splitt waren die Poren zu groß, um Wasser zu halten, wodurch die Wurzeln nicht bevorzugt in diesem Bodenbereich gewachsen sind, obwohl im Vergleich zum Sand mehr Porenraum vorhanden war [126, S. 106f.]. Nach diesen Versuchen ist unter bestimmten Randbedingungen nicht ausschließlich der Porenraum für das Wurzelwachstum maßgeblich.

In [153] werden Untersuchungen zum Wurzelwachstum von Bäumen in unterschiedlichen Böden im Maßstab 1:1 dargestellt. Bäume der Arten japanische Blütenkirsche (*prunus serrulata*) und chinesische Ulme (*ulmus parvifolia*) wurden in Kies-Boden-Gemisch, Stalit-Boden-Gemisch, Stalit, verdichteten sandig-tonigen Lehm und unverdichteten sandig-tonigen Lehm eingesetzt. Auf einen Teil der Bäume wurde Pflasterbelag direkt auf die Baumscheiben aufgesetzt. Bei anderen Bäumen wurde sog. *suspended pavement* über die Baumscheiben installiert. Nach 14 Monaten Versuchslaufzeit zeigte sich, dass die Bäume

im unverdichteten Boden mit *suspended pavements* am größten und schnellsten gewachsen waren sowie das meiste Wurzelwachstum aufwiesen [153, S. 167]. Die Ergebnisse zeigen nach Sicht des Autors, dass Böden mit geringer Dichte und daraus abgeleitet größeren Porenraum sowie ausreichend Sauerstoffgehalt bevorzugt durchwurzelt werden.

Die dargestellten Untersuchungen wurden zwar nicht mit porenraumarmen Verfüllstoffen durchgeführt, jedoch zeigen die Ergebnisse sehr anschaulich, inwieweit Bodenarten mit u.a. unterschiedlichen Korngrößen und Porenräumen das Wurzelwachstum und auch die Vitalität der Bäume beeinflussen können.

3.2.5 Untersuchungen von chemisch und pyhsikalisch behandelten Böden zur Verhinderung von Wurzeleinwuchs

In australischen Versuchen [80] wurden Böden in Versuchsbehältern mit Pflanzen mit chemischen Stoffen sowie Kalk und Zementschleim präpariert. Nach 177 Tagen wurden die Versuche beendet und die Wurzelmassenzunahmen gemessen. Dabei zeigte sich, dass neben einigen chemischen Stoffen auch die Wurzelmassenzunahme in den Böden mit Kalk und Zementschleim im Vergleich zu den Versuchen ohne stoffliche Behandlung geringer ausfiel. Die mit Kalk behandelten Böden waren teilweise so fest wie Mörtel oder Beton. Daher wird als Ergebnis diskutiert, dass die Festigkeit höher war als die von den Wurzeln aufzubringende Kraft, wodurch die Veränderung der Bodenstruktur und die Erhöhung der Bodenfestigkeit maßgeblich für die geringe Wurzelmassenzunahme sein können [80, S. 114ff.].

3.3 Folien und Platten

Basis der folgenden Beschreibungen ist eine durchgeführte Marktübersicht, die im Rahmen von [9] erstellt wurde.

Folien und Platten dienen als Sperre zwischen Wurzeln und unterirdischen Leitungen. Sie sollen das Einwachsen von Wurzeln in den Leitungsgraben durch Umlenkung der Wurzel an der Folien- bzw. Plattenoberfläche verhindern. Dazu werden wurzelfeste Folien und Platten eingesetzt mit wurzelfesten Verbindungen [1, S. 18]. Die Verbindungen werden je nach Hersteller verklebt, verschweißt, gesteckt, eingeschoben oder verschraubt.

Die Produkte bestehen u.a. aus Geotextilien, Vliesstoffen, PVC, PE oder PP und variieren hinsichtlich der Maße (Längen, Breiten, Wandstärken bzw. Flächengewichte).

Die Hersteller bieten Produkte mit unterschiedlichen Bau- bzw. Funktionsweisen an. Die Funktionsweisen unterscheiden sich je nach Herstellerangaben, die u.a. zwischen Wurzelschutz und Rhizomenschutz⁴ unterscheiden. Zudem werden vereinzelt durch die Anbieter wasserdurchlässige und wasserundurchlässige Produkte beworben.

Als beispielhafte Bauweisen sind Produkte mit eingebauten Erdankern zu finden, um ein Hochdrücken der Folien bzw. Platten durch unterwachsende Wurzeln zu verhindern oder mit einem erhöhten oberen Rand, um ein Überwachsen zu verhindern [u.a. 155, 156].

Bei einigen Anbietern werden Systeme unterschieden als Wurzelschutz bzw. Wurzelsperre und als Wurzelführung. Bei Wurzelschutz bzw. Wurzelsperren ist das vorrangige Ziel einen Wurzeleinwuchs von Wurzeln z.B. in den Leitungsgraben zu verhindern. Dabei ist nach Herstellerangaben ein Mindest-Abstand von zwei Metern vom Stamm einzuhalten (abhängig vom Stammdurchmesser), um den Wurzeln ausreichend durchwurzelbaren Boden und somit Stabilität zur Verfügung zu stellen [156, 157, 158].

Kann der Mindestabstand von zwei Metern nicht eingehalten werden, empfehlen die Anbieter Wurzelführungen, wodurch die Wurzeln durch senkrechte Rippen ins untere Erdreich geführt werden sollen und unterhalb der Wurzelführung horizontal und/oder vertikal weiterwachsen können [156, 157, 158]. Je nach Breite der Wurzelführungen werden auch diese Systeme z.T. zum Leitungsschutz angeboten. Im Vergleich zum deutschen Regelwerk [1, S. 18] sind passive Schutzmaßnahmen i.d.R. Wurzelschutz bzw. Wurzelsperren, wobei die Wurzelführungen eher im Bereich der aktiven Schutzmaßnahmen (Trennelemente im Bereich der Pflanzgrube und Wurzelgräben) einzugliedern sind. Jedoch werden von den Anbietern auch Wurzelführungen zum Schutz von Leitungen und Kanälen angeboten.

⁴ „Zu unterscheiden ist das Wachstum von Wurzeln und Rhizomen (z. B. bei Bambus). Rhizome sind wie Wurzeln unterirdische Bestandteile der Pflanze. Wurzelfest bedeutet nicht rhizomfest, da Rhizome in der Regel die Wachstums-/Ausbreitungsrichtung beibehalten und ein Hindernis, z.B. wurzelfeste, aber nicht rhizomfeste Folien durchstoßen können.“ [1, S. 14]

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

Nach [1, S. 18] ist die Wirksamkeit von Folien und Platten abhängig von den Randbedingungen bei jedem Einzelfall. Für Folien und Platten sind bereits Norm-Prüfverfahren zur Wurzelfestigkeit mit Pflanzen vorhanden. Diese Prüfverfahren beziehen sich jedoch auf den horizontalen Einbau auf Flachdächern. Für vertikale Folien und Platten, wie sie i.d.R. im Leitungsgraben eingesetzt werden, liegen keine Norm-Prüfverfahren vor. Jedoch wurden bereits unterschiedliche Feldversuche und In-situ-Beobachtungen an vertikal eingebauten Folien und Platten durchgeführt.

In den einzelnen Unterkapiteln werden diese Prüfverfahren und Untersuchungen beschrieben. In Tabelle 5 werden zur besseren Übersicht die recherchierten Verfahren zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht zu bisherigen (Norm-)Prüfungen und Untersuchungen von Folien und Platten

Titel	Art	Beschrieben durch Autor in
Prüfung nach FLL-Verfahren [159]	Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit mit Pflanzen	[9, S. 30]
Prüfung nach DIN EN 13948 [160]	Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit mit Pflanzen	[9, S. 30]
Feldversuche an Kunststofffolien [161; 126]	Pflanzversuche	[9, S. 30f.]; v.A.
Untersuchungen an Folien und Platten zum Schutz von Gehwegen und Straßen [162; 163; 164; 165; 166]	Pflanzversuche	v.A.
Feldversuche an Folien und Platten um den Baumstandort [166, 167; 168; 169, 170]	Pflanzversuche	v.A.

v.A. = vorliegende Arbeit

3.3.1 Prüfung nach FLL-Verfahren

Das FLL-Verfahren zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Bahnen und Beschichtungen für Dachbegrünungen [159] dient u.a. zur Prüfung der Wurzelfestigkeit von Wurzelschutzbahnen zur Dachbegrünung. Die zu untersuchende Wurzelschutzbahn, die mehrere Nahtstellen bzw. eine Arbeitsunterbrechungsfuge aufweisen muss, wird in acht Prüfgefäßen eingebaut, mit weiteren drei Gefäßen ohne Wurzelschutzbahn zur Kontrolle des Pflanzenwachstums. Die Prüfgefäße haben ein Innen-Mindestmaß von 800 x 800 x 250 Millimeter. In die Gefäße wird eine dünne Vegetationstragschicht eingefüllt. Die Prüfdauer kann vier Jahre bei Freilandbedingungen betragen oder zwei Jahre in klimagesteuerten Gewächshäusern. Bei den vierjährigen Prüfungen werden Grauerle und Quecke als Testpflanze verwendet, bei der zweijährigen Prüfung Feurdorn und Quecke. Ein Produkt

gilt als wurzelfest, wenn nach Ablauf der Prüfung in allen Prüfgefäßen keine Wurzeleindringung oder Wurzeldurchdringung zu beobachten ist. Wurzeleindringung sind in die Fläche oder in die Nähte eingewachsene Wurzeln, wobei sich die Wurzeln aktiv Hohlräume geschaffen und die Bahn somit beschädigt haben. Als Wurzeldurchdringungen werden in den Flächen und Nähten durchgewachsene Wurzeln, welche bereits in der Bahn vorhandene Poren genutzt oder aktiv Hohlraum geschaffen haben, bezeichnet [159, S. 133ff.].

3.3.2 Prüfung nach DIN EN 13948

Die Prüfung nach DIN EN 13948 „Abdichtungsbahnen – Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen – Bestimmung des Widerstandes gegen Wurzelpenetration“ [160] ist vergleichbar mit dem Prüfaufbau nach FLL-Verfahren [159] (vgl. Kapitel 3.3.1). Nach DIN EN 13948 [160, S. 5, 8] werden sechs Prüfgefäße mit Bahnen und zwei Kontrollgefäße ohne Bahnen untersucht sowie ausschließlich zweijährige Prüfungen im Gewächshaus mit Klimaregelung durchgeführt und als Prüfpflanze Feuerdorn eingesetzt. Eine Bahn gilt als wurzelfest, wenn in allen Prüfgefäßen nach Ablauf der Untersuchungsdauer keine Durchwurzelung in der Fläche und in den Nähten festzustellen ist [160, S. 13]. Auf dieses Prüfverfahren wird auch in DIN 16726 „Kunststoffbahnen – Prüfungen“ [171, S. 11] verwiesen.

3.3.3 Feldversuche an Kunststofffolien

Im Forschungsvorhaben „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre“ [161] und in [126] wurde in In-situ-Versuchsaufbauten das Wachstumsverhalten von Wurzeln an Baumstandorten mit substratgefüllten Pflanzgruben untersucht.

Dabei wurden u.a. das Wachstumsverhalten von Baumwurzeln an Kunststofffolien zwischen Pflanzgrube und anstehenden Boden betrachtet. Es zeigte sich, dass Wurzeln selbst unter optimalen Substrateigenschaften in der Pflanzgrube bevorzugt die Grenzflächen im Boden entlang der Folien durchwurzeln [161, S. 16].

Ergänzung in der hier vorliegenden Arbeit durch den Autor

In [126] wird aus den oben aufgeführten Ergebnissen abgeleitet, dass Wurzeln bevorzugt im Boden befindliche Grenzflächen durchwachsen können, da diese für sie leicht durchwurzelbaren und durchgehenden Porenraum darstellen. Trifft eine Wurzel auf diesen Spalt, führt sie ihr Wachstum in diesem Spalt fort. Ergänzend wird dargestellt, dass vermutlich die Pflanzgruben während des Versuchsaufbaus mit schwerem Gerät stark verdichtet wurden. Daher waren die eingesetzten Substrate, im Vergleich zu der Trennfläche zwischen diesem Substrat und den eingesetzten Folien, nicht so attraktiv für das Wurzelwachstum [126, S. 110f.].

3.3.4 Untersuchungen an Folien und Platten zum Schutz von Gehwegen und Straßen

Bisher wurden unterschiedliche Feldversuche zu Folien und Platten zum Schutz vor Wurzelwuchs unter Gehwegbelegen bzw. Straßenbelägen durchgeführt.

Die folgenden zwei Feldversuche bzw. deren Versuchsaufbauten sind miteinander vergleichbar [162; 163]. Zur Überprüfung, ob u.a. vertikale Folien und Platten das Wurzelwachstum unter Gehwegen verhindern können, wurden Bäume parallel zu (Versuchs-)Gehwegen gepflanzt. Zwischen den Bäumen und dem Gehweg wurden die vertikalen Folien als Wurzelsperre eingesetzt.

In [162] wurde das Wurzelwachstum von Eichen (*Quercus virginiana*) und Platanen (*Platanus occidentalis*) an Folien, genannt Biobarrieren, mit 30 Zentimeter Höhe untersucht. Der Versuchsboden wurde als locker sandig bezeichnet, und die Versuchsdauer betrug drei Jahre [162, S. 151]. Viele der Wurzeln, die 30 Zentimeter oder tiefer gewachsen sind, unterwuchsen die Barrieren und wuchsen wieder zurück zur Geländeoberkante [162, S. 153]. Jedoch war bei diesen Versuchen ein hoher Grundwasserspiegel vorhanden, wodurch ein tieferes Wurzelwachstum nicht möglich war [162, S. 151]. Ein Durchwachsen der Barrieren wurde nicht festgestellt [162, S. 152].

In [163] wurden an Eichen (*Quercus phellos*) ebenfalls Untersuchungen an u.a. vertikalen Folien und Platten aus Polypropylen und Polyethylen durchgeführt. Die Versuchszeit betrug zehn Jahre und der Versuchsboden war ein mäßig entwässerter toniger Lehm [163, S. 182]. Die Folien und Platten hatten eine Höhe von 45 Zentimetern [163, S. 182] und sind somit 15 Zentimeter höher als die Folien in [162]. Ein Unterwachsen der Folien wird in [163] nicht beschrieben. Nach [163, S. 182] könnten die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen [162] und [163] an den höheren Folien und den unterschiedlichen Böden liegen. Weitere Ausführungen dazu liegen nicht vor. Jedoch wurde an den elastischen Polyethylen-Folien ein Überwachsen festgestellt, da die oberen Kanten der Folien im oberen Bodenbereich umklappten und somit Wurzeln diesen Bereich durchwachsen konnten [163, S. 182].

In einem weiteren Feldversuch [164] wurden Bäume zwischen zwei vertikalen Folien und Platten aus Polypropylen gepflanzt. Die eingesetzten Folien und Platten waren 45 Zentimeter hoch, und die Versuchsdauer betrug zwei Jahre [164, S. 150]. Es wurde kein Wurzeldurchwachsen in den Folien festgestellt. Jedoch wuchsen einige Wurzeln unterhalb der Folien entlang und anschließend wieder nach oben. Allerdings wird nach [164, S. 151] eine Veränderung der Wuchsrichtungen weg von den Gehwegen erreicht.

16 In-situ-Aufgrabungen an Folien und Platten im Jahr 1988 zeigten, dass bei allen untersuchten Folien und Platten unterschiedlicher Werkstoffe (Plastikfolien, nicht-gewebte Materialien und gewebte Kunststoffbänder) Wurzeln über oder unter den Folien und Platten wachsen konnten [165, S. 176]. Die Folientiefen sind nicht dargestellt. Es wird empfohlen,

die Folien bis zum Grundwasserspiegel einzusetzen, um ein Unterwachsen zu vermeiden [165, S. 177].

Ergänzend werden Aufgrabungen an Randsteinen von Baumscheiben beschrieben. Dort wurde ebenfalls festgestellt, dass Wurzeln Randsteine unterwachsen können und dabei anschließend die Wurzeln oftmals zurück an die Bodenoberfläche wachsen [85, S. 120]. Die Barrierewirkung der Randsteine wird demnach als temporär dargestellt [85, S. 208, 235]. Jedoch zeigen die Beobachtungen auch, dass an Bäumen mit Randsteinen vergleichsweise weniger Schäden an Wegdecken entstehen als an Baumstandorten ohne Randsteine [85, S. 249]. Des Weiteren sollten die Böden hinter den Randsteinen so hergestellt werden, dass sie nicht durchwurzelt werden können, um ein Hochwachsen zu vermeiden [85, S. 245].

3.3.5 Feldversuche an Folien und Platten um den Baumstandort

In [167] wurden Feldversuche an europäischen Zürgelbäumen (*Celtis australis*) mit unterschiedlich tiefen Wurzelballen durchgeführt, die teilweise mit direkt anliegenden kreisrunden Folien mit 35 Zentimetern Höhe umschlossen wurden [167, S. 202f.]. Der eingesetzte Boden war ein Schlemmlehmboden, der nach [167, S. 207] sehr gut für das Wachstum von Obstbäumen geeignet ist. Es wurde nicht festgestellt, dass Wurzeln die Folien unterwachsen und wieder nach oben wuchsen. Es wurde beobachtet, dass die Wurzeln eher horizontal in der Tiefe unterhalb der Barriere weiterwuchsen [167, S. 206].

In [168] wurden die gleichen Versuche mit der Baumart Schwarzkirsche (*Prunus serotina* var. *virens*) durchgeführt. Es wurden Folien aus Polyethylen mit einer Dicke von 0,15 und 1,5 Millimeter sowie Höhen von 35 und 70 Zentimetern eingesetzt [168, S. 251f.]. Auch in diesen Versuchen wurde nicht festgestellt, dass Wurzeln, die die Folie unterwachsen, hinter den Folien wieder nach oben wuchsen. Es wird diskutiert, dass Wurzeln in dieser Bodentiefe bleiben, wenn die Bodenbedingungen für das Wurzelwachstum geeignet sind. Ggf. können Wurzeln nach oben wachsen, wenn die Bodenbedingungen dort besser sind. Zudem wurde festgestellt, dass die vergleichsweise dünnen Folien mit 0,15 Millimetern Dicke gerissen sind. Es wird vermutet, dass die Risse durch das radiale Wurzeldickenwachstum entstanden sind [168, S. 257].

Weitere Feldversuch mit kreisrunden Folien und Platten um den Baumstandort wurden in [169] durchgeführt. Der Versuchsboden ist ein kiesiger, toniger Lehm. Als Folien und Platten wurden vier unterschiedliche Produkte aus (gesponnenem) Polypropylen mit einer Höhe von 42 Zentimetern eingesetzt [169, S. 212]. Versuchsbäume waren Eschen (*Fraxinus oxycarpa* ‚Raywood‘) und Pappeln (*Populus nigra* ‚Italica‘) [169, S. 212]. In diesen Versuchen wuchsen eine Vielzahl der Wurzeln nach dem Unterwachsen der Folien wieder zur Bodenoberfläche. Hier wird die Hypothese aus [168] aufgegriffen, dass vermutlich in diesem Versuchsboden der Bereich an der Geländeoberkante besser für das Wurzelwachstum geeignet ist als der tiefer liegende Boden. Daher sind die Wurzeln

vermutlich wieder nach oben gewachsen. Zudem wird dargestellt, dass die Folien und Platten nur einen geringen Einfluss auf das Wurzelwachstum haben, wenn sie unterwachsen wurden. Eher wird in diesem Bereich das Wurzelwachstum durch die Pflanzengenetik und die Bodeneigenschaften beeinflusst. Ein Unterschied in der Wirksamkeit der getesteten Materialien wurde nicht festgestellt. [169, S. 216f.].

In weiteren, vergleichbaren Versuchen wurden auch Barrieren mit vertikalen Rippen eingesetzt [170]. Es wurde dort ebenfalls ein Unterwachsen der Barrieren festgestellt [170, S. 8].

In einem Review-Paper zu Wurzelbarrieren [166] werden noch weitere vergleichbare Untersuchungen dargestellt. Ein Fazit ist, dass Folien und Platten in wenig verdichteten Böden den Schutz vor Wurzeleinwuchs am effektivsten sicherstellen, diese Art von Böden aber i.d.R. nicht im Straßenbereich zu finden sind [166, S. 86].

3.4 Diskussion der aktuellen (Norm-)Prüfverfahren

Folgend werden die aktuellen (Norm-)Prüfverfahren und wissenschaftlichen Untersuchungen von wurzelfesten Rohrverbindungen (vgl. Kapitel 3.1), Folien und Platten (vgl. Kapitel 3.3) sowie porenraumarmen Verfüllstoffen (vgl. Kapitel 3.2) hinsichtlich der Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit zusammengefasst und diskutiert.

3.4.1 Wurzelfeste Rohrverbindungen

Gesteckte Rohrverbindungen können derzeit als „wurzelfest“ im Sinne der Normung bezeichnet werden, wenn sie die (Wasser-)Innendruck-Prüfungen nach DIN 4060 [125] mit weitergehenden Anforderungen der jeweiligen Produktnormen [138; 139] oder DIN EN 1916 [37] in Ergänzung mit DIN V 1201 [127] bestehen. Die Ergebnisse der wissenschaftlichen mechanischen und botanischen Untersuchungen, insbesondere die Outside-In-Versuche (vgl. Kapitel 3.1.10), zeigen jedoch, dass Wurzeln auch in nach DIN 4060 [125] wurzelfesten gesteckten Rohrverbindungen einwachsen können.

Nach [17, S. 204] werden bei den stark idealisierten mechanischen Prüfungen [125] insbesondere die Versagensmechanismen (vgl. Kapitel 2.3.1) aus der Interaktion zwischen Rohrleitung und Wurzeln vernachlässigt. In [126, S. 114] wird beschrieben, dass bei der Prüfung nach DIN 4060 die Annahme besteht, dass kein Wasser aus der Verbindung austritt und somit kein Anreiz für ein Wurzelwachstum zur Rohrverbindung vorliegt (vgl. Leckmodell in Kapitel 2.3.3).

Die ausführlichen wissenschaftlichen Untersuchungen [u.a. 17; 18; 19; 126] zur Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen liegen bereits über zehn Jahre zurück. Jedoch haben sich die Anforderungen und Aussagen zur Wurzelfestigkeit in einem Teil der mechanischen Normen [125; 138] in den letzten zehn Jahren nicht wesentlich geändert, obwohl in dieser Zeit die Normen überarbeitet und in neuen Versionen herausgegeben wurden.

Outside-In-Versuche an gesteckten (Stahl-)Beton-Rohrverbindungen nach DIN EN 1916 [37] in Verbindung mit DIN V 1201 [127] wurden bisher noch nicht durchgeführt. Allerdings werden Wurzeleinwüchse auch in modernen Betonrohren [74; S. 359] beschrieben und konnten auch in horizontalen In-situ-Pflanzversuchen festgestellt werden [76, S. 282]. Aufgrund der vergleichbaren Prüfungsarten zwischen EN 1916 [37] und DIN 4060 [125] sowie der bisher bekannten Wurzeleinwüchse in gesteckte (Stahl-)Beton-Rohrverbindungen ist auch hier nicht auszuschließen, dass Wurzeln in nach Norm wurzelfeste Rohrverbindungen einwachsen können.

Im Gegensatz dazu werden für Kunststoffrohrverbindungen in DIN EN ISO 13259 [128] und den dazugehörigen Produktnormen in den aktuell geltenden Fassungen [141; 142; 143; 144; 145; 146; 147] keine Aussagen mehr zur Wurzelfestigkeit beschrieben, obwohl das Prüfverfahren ebenfalls vergleichbar mit DIN 4060 [125] und EN 1916 [37] ist.

In DIN EN 14741 [129] werden keine Aussagen zur Wurzelfestigkeit beschrieben. Jedoch werden in [130, S. 3; 131; 5] Aussagen zur Wurzelfestigkeit in Anlehnung oder angepasst an diese Prüfung mit höheren Belastungen getätigt. Durch das Prüfverfahren wird nach [131, S. 3] das Eindringen einer Wurzelspitze in den Dichtungsspalt simuliert. Der aufzubringende Druck wäre dann der für die Wurzeln mindestens zu erzeugende Druck, um die Muffe überwinden zu können [9, S.29].

Im Vergleich zur Wasserinnendruckprüfung scheint der Ansatz nach DIN EN 14741 [129] eher geeignet zu sein, um das Wurzelwachstum mechanisch nachzubilden. Ein dünner Schlauch, der konstant radial größer wird und einen linienförmigen Druck zwischen Dichtung und Rohr ausübt, kann das radiale Wurzelwachstum vergleichsweise besser nachbilden. In Zukunft wäre zunächst zu untersuchen, inwieweit mit diesem Prüfverfahren beide Wurzeleinwuchsmechanismen in gesteckten Rohrverbindungen nachgebildet werden können (vgl. Kapitel 2.3.1). Bei dem Prüfverfahren werden an drei bzw. vier gleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilten Stellen die Schläuche eingeführt. Vermutlich wird dadurch eher der Einwuchsmechanismus nachgebildet, bei dem der Ringraum durch ein Wurzelgeflecht erschlossen wird und durch das Dickenwachstum die Rohrverbindung über die gesamte Querschnittsfläche aufdrückt. Wie nachgebildet werden kann, dass eine einzelne feine Wurzel zwischen Dichtung und Rohrwandung wächst und sich dort verzweigt ist hingegen diffiziler nachzubilden. Zum einen liegen die Schläuche bereits zwischen Dichtung und Rohrwandung, wodurch bereits die Wurzel minimal ausreichend Platz gefunden haben müsste, um überhaupt zwischen Dichtung und Rohrwandung einwachsen zu können. Bei der Prüfung wird zwar der Druck erst nach dem Einsetzen der Schläuche aufgebracht, jedoch scheint dadurch der erste Schritt „Wurzel findet Angriffspunkt“ bereits vorausgesetzt zu sein. Zum anderen stellt sich die Frage, ob es eine realistische Situation ist, dass zeitgleich drei Wurzeln im gleichen Abstand in eine Verbindung einwachsen. Für diesen Einwuchsmechanismus sind ggf. Versuche zielführender, bei denen die Prüfung mit nur einem Schlauch durchgeführt wird. Dies sollte in Zukunft weitergehend untersucht werden.

Allgemein sollten Outside-In-Versuche an gesteckten Rohrverbindungen durchgeführt werden, die nach, in Anlehnung oder angepasst an EN 14741 [129] geprüft wurden. So können die bisherigen Anforderungen hinsichtlich Belastung und Anpressdruck überprüft werden, ob sie auch ausreichend den Lastfall Wurzeleinwuchs nachbilden können. Dadurch ist es möglich nachzuweisen, ob Wurzeln in eine gesteckte Rohrverbindung wachsen können, die die Prüfung nach, in Anlehnung oder angepasst an EN 14741 [129] bestanden haben und die Eignung nach DIN 4060 [125] oder EN 1916 [37] in Verbindung mit DIN V 1201 [127] aufweisen.

Höhere Prüfanforderungen zur mechanischen Bestimmung der Wurzelfestigkeit existieren in Australien und Neuseeland [132]. Dort müssen bei Innendruckprüfungen vergleichsweise hohe Prüfdrücke von 0,4 MPa eingehalten werden (in Europa bei den meisten Werkstoffen

0,5 bar, dies entspricht 0,05 MPa). Australische Pflanzversuche an PVC-Rohrverbindungen zeigten, dass bei Einhaltung dieser Prüfanforderungen kein Wurzeleinwuchs festgestellt wurde [134, S. 6; 136, S. 1f.]. Werden die 0,4 MPa mit den gemessenen Wurzeldrücken bis zu knapp 1,2 MPa (12 bar bei Eichen, vgl. Kapitel 2.3.1) verglichen, scheint auch bei dieser Prüfanforderung ein Restrisiko bzgl. der Aussage zum Schutz vor Wurzeleinwuchs zu bestehen.

Die mechanischen Untersuchungen zeigen insbesondere, dass bauartbedingte Unterschiede zwischen den untersuchten Rohrverbindungen bestehen. Bei den lastabhängigen Scherlastversuchen wurden Anpressdrücke um bis zu 97 % herabgesetzt. Jedoch bis auf Einzelfälle wurden die Vorgaben nach DIN 4060 [125] eingehalten [126, S. 40]. Wesentliches Ergebnis ist, dass je geringer der Ringraum ist, desto geringer ist auch die Veränderung in der Verteilung des Anpressdrucks [126, S. 115]. Wesentliches Ergebnis der Außendruckuntersuchungen ist, dass die Widerstandsfähigkeit einer gesteckten Rohrverbindung gegen Kräfte von außen nicht nur vom Anpressdruck der Dichtung abhängig ist. Einzelne Rohrverbindungen, die in den lastabhängigen Scherlastversuchen vergleichsweise geringe Anpressdrücke aufwiesen, konnten vergleichsweise großen Außendrücken standhalten [126, S. 116]. Mit beiden Prüfmethoden kann ein Wurzeleinwuchs nicht direkt nachgestellt werden [124, S. 39f.]. Jedoch zeigen beide Untersuchungen, dass bereits eine Vielzahl an mechanischen Faktoren die Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen beeinflusst.

Die Untersuchung der Gasdurchlässigkeit von Rohrverbindungen bezieht sich nicht auf das Wurzelwachstum. Jedoch geben die Ergebnisse wesentliche Hinweise darauf, dass durch gesteckte Rohrverbindungen Luft in das Erdreich diffundieren kann [99, S. 183f.]. Denn in [126, S. 116] wird beschrieben, dass die Luft aus Abwasserleitungen ggf. das Wurzelwachstum im Bereich von Freispiegel-Abwasserleitungen fördert.

Dem Autor liegen keine Prüfungsergebnisse nach DIN 4062 [133] vor. Jedoch scheint der Ansatz zur Prüfung der Wurzelfestigkeit mit echten Pflanzen durchaus vielversprechend zu sein. Allein die kurze Versuchsdauer von sechs bis acht Wochen scheinen im Vergleich zu den anderen dargestellten vertikalen Pflanzversuchen [19; 126] zu kurz zu sein. Die Norm wurde inzwischen zurückgezogen.

Mit den Einwuchsversuchen (Outside-In-Versuchen) kann Wurzeleinwuchs an Rohrverbindungen bei einer vergleichsweise kurzen Versuchsdauer von einer Wachstumsperiode und unter kontrollierten Bedingungen direkt provoziert werden [19, S. 69ff.]. U.a. zeigten die Versuche, dass in allen getesteten Rohrverbindungen und somit auch in allen Spaltgrößen (0,3 bis 7 Millimeter) Wurzeln festgestellt wurden [19, S. 121]. Durch die Ergebnisse der Outside-in-Versuche konnten die Einwuchsmechanismen weitergehend analysiert werden. Wurzeln, die direkt in den Zwickel zwischen Dichtung und Rohrwandung wachsen, werden in ihrer Entwicklung behindert, wodurch das Wachstum zeitweise gestoppt wird und anschließend eine Verdickung der

Wurzelspitze stattfindet [172; 173]. Dadurch kann die Wurzel den Spalt bzw. Porenraum erweitern und weiterwachsen. Ist der Wurzeldruck größer als der Anpressdruck, kann die Wurzel die Dichtung überwinden und in das Rohr einwachsen [126, S. 119]. Im Gegensatz dazu, zeigten die vertikalen Versuche in Australien an PVC-Rohrverbindungen keine Wurzeleinwüchse [136, S. 1]. Ggf. ist dies auf die unterschiedlichen Pflanzenarten und Versuchslaufzeiten zurückzuführen.

Es ist wichtig darzustellen, dass insbesondere Outside-In-Versuche einen Extrem-Fall darstellen. Das Wurzelwachstum wird vertikal auf die Rohrverbindung mit wenig Substrat für das Wurzelwachstum provoziert. Allgemein sind in der Praxis nur sehr selten und i.d.R. kurze Abschnitte vertikal verbaut [9, S.29]. Daher wird auch in Zukunft nicht in jede gesteckte Rohrverbindung eine Wurzel einwachsen. Jedoch zeigen die Ergebnisse, dass im Worst-Case-Fall Wurzeln auch in wasserdichte Rohrverbindungen einwachsen können. Somit kann mit Outside-In-Versuchen derzeit auch unter Berücksichtigung tatsächlicher Wurzel-Rohr-Interaktionen die Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen betrachtet werden. Zudem sind Outside-In-Versuche vergleichsweise einfach auszuführen, im Betrieb und Unterhalt günstig (Flächenbedarf, Pflege) und führen i.d.R. in kurzer Zeit zu Wurzelwachstum an einer Rohrverbindung.

Die Ergebnisse der Pflanzversuche in Versuchsbehältern mit horizontal eingebauten gesteckten Rohrverbindungen zeigen unterschiedliche Ergebnisse. In den amerikanischen Versuchen [137] wurde nur das Leckmodell betrachtet. Der Baum wurde nicht gewässert und vertrocknete, da die Rohrverbindungen wasserdicht waren. Die wegabhängigen Scherlastversuche führten zu keinem Wurzeleinwuchs in die gesteckten Rohrverbindungen, obwohl sie undicht waren [126, S. 114f.]. Dies ist nach [126, S. 114f.] auf die eingesetzten Pflanzsubstrate zurückzuführen. Die Substrate wurden manuell verdichtet, wodurch sich ausreichend Porenraum im Substrat befand, welcher bevorzugt durch die Wurzeln erschlossen wurde. Somit wurde mit dem Versuchsaufbau nicht genug Anreiz geschaffen, dass Wurzeln an die gesteckten Rohrverbindungen heranwachsen und diese beanspruchen [126, S. 114f.]. In den australischen Versuchen [135] wurde teilweise Wurzeleinwuchs in dichte und undichte Rohrverbindungen nachgewiesen. Nach [17, S. 37f.] wurde dort der Anpressdruck ebenfalls betrachtet. Wurzeln wuchsen in dichte und undichte Verbindungen. Zudem wuchsen Wurzeln auch in Verbindungen, die einen Anpressdruck von weniger als 0,1 MPa aufwiesen [17, S. 37f.]. In einer weiteren Veröffentlichung [136] wurden in PVC-Rohrverbindungen mit unterschiedlichen Anpressdrücken und Ringspaltengrößen keine Wurzeleinwüchse festgestellt, jedoch in Rohrverbindungen bei Steinzeug- und glasfaserverstärkten Betonrohrleitungen [136, S. 2]. Daher sind diese Ergebnisse mit großen Unsicherheiten verbunden.

Durch die In-situ-Versuche [76] kann die Wurzelfestigkeit von dichten und undichten gesteckten Rohrverbindungen überprüft werden. Sie zeigen ebenfalls, dass auch in dichte

gesteckte Rohrverbindungen Wurzeleinwuchs stattfinden kann [9, S.28; 124, S. 44]. Jedoch ist die Versuchslaufzeit von elf Jahren sehr lang und somit aufwändig zu reproduzieren.

In-situ-Prüfungen unter realen Bedingungen im Maßstab 1:1 sind trotzdem wesentlich, um das Wuchsverhalten von Wurzeln im Leitungsraben und an Rohrleitungen weitergehend analysieren zu können. Zudem können in Versuchen im Maßstab 1:1 auch Kombinationen von unterschiedlichen bautechnischen Schutzmaßnahmen untersucht werden [9, S.28].

Die bisher durchgeführten Pflanzversuche an Schrumpfmuffen zeigen widersprüchliche Ergebnisse. In [76] sind Wurzeln in Schrumpfmuffen eingewachsen. In [70] wurde bisher kein Einwuchs festgestellt. Vermutlich liegt das an den unterschiedlich eingesetzten Produkten und Verfahren sowie der unterschiedlichen Versuchslaufzeit. Zur Überprüfung der Ergebnisse sind weitere Untersuchungen, z.B. Outside-In-Versuche an Schrumpfmuffen von Fernwärmeleitungen, erforderlich.

Die hier vorliegende Literaturstudie zeigt, dass eine Diskrepanz zwischen den Aussagen zur Wurzelfestigkeit nach Norm und den Ergebnissen der Pflanzversuche bestehen. Um diese Diskrepanz auszuräumen, wäre eine erste und vergleichsweise einfache Möglichkeit eine Änderung der Begriffsdefinition zum Schutz vor Wurzeleinwuchs. So wird beispielsweise bei bestandener Prüfung nach DIN EN 598 [139, S.60] nicht der Begriff Wurzelfestigkeit genutzt, sondern

„sehr widerstandsfähig gegen Wurzeleinwuchs“.

Auch in der australisch-neuseeländischen Prüf-Norm [132, S. 1] wird bei Bestehen der Prüfung von einer Verringerung des Risikos vor Wurzeleinwuchs gesprochen. In [1, S. 14] wird ergänzend beschrieben, dass bei Neubau und fachgerechter Herstellung von Rohrverbindungen die Gefahr des Wurzeleinwuchses gering ist. Daher wäre ggf. die Änderung der Begrifflichkeiten ein erster wesentlicher Schritt, um in Zukunft Wurzeleinwuchs in der Praxis besser entgegen zu wirken. Denn dadurch ist bereits bei der Planung ersichtlich, dass es einen erhöhten, aber nicht vollumfänglichen Schutz vor Wurzeleinwuchs gibt. Somit können frühzeitig weitere bautechnische Schutzmaßnahmen berücksichtigt werden, falls dies die örtlichen Randbedingungen erforderlich machen. Diese Vorgehensweise wäre ein erster wichtiger Schritt zur besseren Einordnung der bautechnischen Schutzmaßnahmen.

Jedoch sollte auch bautechnisch und botanisch weitergehend untersucht werden, wie die Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen in Zukunft bestmöglich überprüft werden kann. Daher werden die Ergebnisse der Literaturstudie (vgl. Kapitel 2 und 3.1) sowie die durchgeführten Untersuchungen (vgl. Kapitel 6) dazu genutzt, mögliche Diskrepanzen zwischen Norm-Aussagen und Pflanzversuchen mit einem mehrstufigen Prüfkonzept zu überwinden (vgl. Kapitel 8.2).

Mit Blick auf die Untersuchungen in der hier vorliegenden Arbeit zeigt die Literaturstudie, dass bisher keine Untersuchungen zur Wurzelfestigkeit von Fernwärmeleitungen

durchgeführt wurden. Hier sind zunächst Outside-In-Versuche an Fernwärmeverbindungen zur Klärung zielführend, ob in die dauerelastischen Schrumpfmuffen Wurzeln einwachsen können. Zudem sind auch nur wenige In-situ-Beobachtungen zu Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen bekannt. Fernwärmeleitungen werden unter Druck betrieben, sind zusätzlich gedämmt und werden i.d.R. kürzer betrieben als Abwasserleitungen und -kanäle. Die vorliegende Arbeit soll einen besseren Überblick verschaffen, welche Parameter maßgeblich dafür sind, dass bisher so wenige Wurzel-Fernwärmrohr-Interaktionen bekannt sind (vgl. Kapitel 6).

3.4.2 Porenraumarme Verfüllstoffe

Zur Wurzelfestigkeit von porenraumarmen Verfüllstoffen liegen bisher, im Vergleich zu wurzelfesten Rohrverbindungen (vgl. Kapitel 3.4.1) sowie Folien und Platten (vgl. Kapitel 3.4.3), keine Norm-Prüfungen vor. Dies liegt vermutlich auch daran, dass bisher grundlegende Informationen über die bodenphysikalischen Eigenschaften in Leitungsräumen fehlen [126, S. 123]. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurden bisher Pflanzversuche an Bentonit und ZFSV sowie bodenmechanische Untersuchungen an ZFSV durchgeführt. Basis der dargestellten Untersuchungen sind die Erkenntnisse aus [17, S. 204], dass ein wesentlicher Einfluss auf das Wurzelwachstum der Porenraum im Boden ist.

Die Pflanzversuche mit Bentonit bestätigen zum einen die Wirksamkeit von Bentonit gegenüber Wurzeleinwuchs [124, S. 49]. Verfahrensbedingt können aber bei falschem Einbau Risse entstehen, die wiederum durch Wurzeln erschlossen werden können [126, S. 120]. Zum anderen zeigen die Bentonitversuche, dass Böden mit sehr kleinen Porenräumen bzw. Porenräumen, die durchgehend kleiner sind als die minimalsten Wurzelspitzen, nicht von Wurzeln durchwachsen werden können.

Im Rahmen von [57; 151] wurden bereits wesentliche Erkenntnisse für die Rezeptur von ZFSV zum Schutz vor Wurzeleinwuchs untersucht und beschrieben. Als wesentlicher Grenzwert für einen dauerhaften Schutz vor Wurzeleinwuchs durch ZFSV wurde u.a. eine Porosität von kleiner 30 Vol.-% ermittelt [151, S. 42]. Somit sollte der Porenraum im ZFSV so gering sein, dass keine Wurzeln einwachsen können. Diese Anforderungen werden durch erste Pflanzversuche mit ZFSV bestätigt [57, S. 57f.; 151, S. 51]. Eine Ausnahme bildete ZFSV mit Bodenaushub, darin konnte Wurzeleinwuchs festgestellt werden [57, S. 57f.].

Pflanzversuche mit Substraten zeigen, dass porenreiche Böden oftmals bevorzugt durchwurzelt werden [141, S. 167]. Jedoch gibt es auch hier unter bestimmten Randbedingungen Ausnahmen. Teilweise gibt es pflanzenartenspezifische Unterschiede, ob eine feinere oder gröbere Körnung bevorzugt durchwachsen wird [126, S. 107]. Jedoch ist bei in diesen Versuchen eingesetzten Böden in allen Körnungen ausreichend Porenraum vorhanden, damit Wurzeln überhaupt einwachsen können. Untersuchungen zu

Tragschichten unterhalb von Gehwegbelägen weisen darauf hin, dass auch ausreichend pflanzenverfügbares Wasser vorhanden sein muss, damit ein Boden durchwachsen werden kann [126, S. 106f.]. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein geringer Porenraum wesentlich für den Schutz vor Wurzeleinwuchs ist, jedoch nicht immer alleine dafür entscheidend sein muss. Die Feldversuche mit Bäumen im Maßstab 1:1 [153] bestätigen die bisherigen Annahmen, dass Wurzeln in gering verdichteten Böden mit ausreichend Sauerstoff bevorzugt wachsen. Die Untersuchungen an Substraten unterstreichen die Aussage aus [13, S. 118], dass Pflanzen lebende Organismen sind, die sich ihrer Umgebung anpassen.

In den australischen Versuchen [80] wurden Böden mit chemischen und physikalischen Stoffen präpariert und die Wurzelmassenzunahme gemessen, aber nicht der potentielle Wurzeleinwuchs untersucht. Spannend aus den Ergebnissen ist jedoch, dass bei mit Kalk oder Zement versetzten Böden geringere Wurzelmassenzunahmen festgestellt wurden als bei nicht-behandelten Böden. Es wird davon ausgegangen, dass die Bodenverfestigung maßgeblich dafür ist, dass die Wurzel nicht weiter an Masse zunehmen konnten [80, S. 116]. In diesem Zusammenhang sollte aber auch diskutiert werden, ob ein erhöhter pH-Wert ebenfalls dazu beigetragen hat, dass die Wurzelmassenzunahme geringer ausfiel.

Neben den allgemeinen Fragestellungen zum Wurzelwachstum in urbanen Böden sind somit noch vergleichsweise viele Untersuchungen von porenraumarmen Verfüllstoffen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs notwendig. In der vorliegenden Arbeit sollen die Großteils im Labor ermittelten Porosität-Grenzwerte mit Feldversuchen überprüft werden (vgl. Kapitel 7.2.2). Zudem wird die Wasserdurchlässigkeit als weiterer Parameter zur Beschreibung der Wurzelfestigkeit von ZFSV untersucht (vgl. Kapitel 7.1).

3.4.3 Folien und Platten

Die Prüfungen nach FLL-Verfahren [159] und nach DIN 13948 [160] eignen sich zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit des Werkstoffs sowie deren Verbindungsbereichen. Die Wirksamkeit gegen das Um-, Über- und Unterwachsen von Folien und Platten im Erdreich kann damit jedoch nicht dargestellt werden. Die Folien und Platten werden bei diesen Norm-Prüfungen horizontal im Versuchsaufbau eingesetzt, wie es bei Dachbegrünungen durchgeführt wird. Im Leitungsraben werden die Folien und Platten i.d.R. vertikal zwischen Baum und Leitung eingebaut. Das vertikale Wurzelwachstum und somit auch ein mögliches Um-, Unter- oder Überwachsen kann mit diesen Prüfverfahren nicht dargestellt werden [9, S. 31, 41; 124, S. 48].

Mehrere der dargestellten Feldversuche [162, S. 153; 164, S. 151; 165, S. 176; 169, S. 216f.; 170, S. 8] zeigen, dass Wurzeln durchaus Folien und Platten unterwachsen können. Denn sind die Bodeneigenschaften in dieser Bodentiefe nicht für das Wurzelwachstum bzw. in höheren Bodenbereichen die Bodeneigenschaften besser für das Wurzelwachstum geeignet, können Wurzeln bevorzugt wieder nach oben wachsen [162, S. 153; 164, S. 151; 169, S. 216f.].

Wie bereits in Kapitel 2.3.1 beschrieben, sind die Bodeneigenschaften in den Leitungsgräben oftmals für Wurzeln im urbanen Raum der bevorzugte Wachstumsort. Somit ist insbesondere im urbanen Raum nicht auszuschließen, dass Wurzeln hinter den Folien und Platten wieder nach oben wachsen können. Zudem wird in [126, S. 110f.] beobachtet, dass die Wurzeln zusätzlich die Grenzfläche zwischen Boden und Folie bzw. Platte bevorzugt durchwurzeln können und somit dort eine Vielzahl von Wurzeln anzutreffen sind.

Die in den beschriebenen Feldversuchen untersuchten Folien- und Plattenhöhen sind in Betracht der oftmaligen Leitungstiefen bei Abwasserleitungen bei einer Tiefe von mindestens 1,2 Metern (vgl. Kapitel 2.1.1) vergleichsweise gering. Ggf. ist auch die Höhe der Folien und Platten ein Faktor, ob sie unterwachsen werden können.

Folien und Platten wurden in den meisten Fällen nicht durchwurzelt [162, S. 152; 164, S. 151]. Dies spricht auch für die Norm-Prüfverfahren, die die Material- und Verbindungseigenschaften hinsichtlich der Wurzelfestigkeit ausreichend prüfen können. Nur bei sehr dünnen Folien von 0,15 Millimetern wurden Risse, die auf das Wurzeldickenwachstum zurückgeführt werden, in Folien festgestellt [168, S. 257]. Nach vergleichsweise älteren Beschreibungen [174] sind Folien und Platten aus Polyethylen resistenter gegen Wurzeleinwuchs als Geotextile.

Die Recherchen und Untersuchungen der vorliegenden Arbeit sind eine Basis zur Entwicklung eines Prüfkonzepes (vgl. Kapitel 8.4) und die Durchführung eines Feldversuches (vgl. Kapitel 8.6) zur Überprüfung der Wurzelfestigkeit von Folien und Platten zum Schutz vor Wurzeleinwuchs an unterirdischen Leitungen und Kanälen. Dabei soll insbesondere das Unter- bzw. Umwachsen sowie der Einfluss der Oberflächenstrukturen und der dazugehörigen Bodeneigenschaften im Bereich der Folien und Platten überprüft werden.

4 Entwicklung von Arbeitshypothesen

Auf Basis der Literaturrecherche konnte ermittelt werden, dass Wurzel-Rohr-Interaktionen Vorgänge mit sehr komplexen und fachübergreifenden Zusammenhängen sind. Es wurden bereits viele unterschiedliche Untersuchungen zu dieser Fragestellung durchgeführt. Jedoch sind weiterhin noch viele Fragen offen. Dies gilt für das Wurzelwachstum im Leitungsgaben und für das Wurzelwachstum direkt an Rohrleitungen und deren Verbindungen. Somit sind zu allen dargestellten bautechnischen Schutzmaßnahmen ebenfalls noch offene Fragestellungen vorhanden. Ausgewählte Fragestellungen sollen in der vorliegenden Arbeit untersucht werden.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Untersuchungsschwerpunkte:

Erster Untersuchungsschwerpunkt ist die Untersuchung von Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen, da dazu bisher wenige Untersuchungen durchgeführt wurden und im Vergleich zu Abwasser- und Gasleitungen noch viele Fragestellungen offen sind.

Zweiter Untersuchungsschwerpunkt ist die Untersuchung von ZFSV als porenraumarmen Verfüllstoff. Bisher sind mit ZFSV keine langzeitigen und vergleichenden Untersuchungen mit Pflanzen durchgeführt worden.

Die Ergebnisse der ersten zwei Untersuchungsschwerpunkte tragen wesentlich zum dritten Untersuchungsschwerpunkt bei: der Entwicklung von abgestuften Prüfkonzepthen für bautechnische Schutzmaßnahmen.

Folgend werden Arbeitshypothesen zu den einzelnen Untersuchungsschwerpunkte definiert.

4.1 Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen

Bisher ist bekannt, dass Wurzeln unter bestimmten Voraussetzungen (Raum zum Einwachsen, geringer Anpressdruck) in gesteckte Rohrverbindungen im Abwasserbereich einwachsen können (vgl. Kapitel 2.3.1 und 3.1). Stoffschlüssige Verbindungen bieten im Gegensatz keine Angriffspunkte für Wurzeleinwuchs [1, S. 18].

KMR-Verbindungen können dauerelastisch ausgeführt werden [43, S. 9]. Bei diesem Verfahren werden Muffen mit Wärme an die Rohroberfläche angeschrumpft [43, S. 9] und gehen vermutlich einen Verbund ein. Sind diese Verbindungen wurzelfest, wäre dies ein weiterer Beweis dafür, dass Wurzeln (Poren-)Raum benötigen, um in Bauwerke einwachsen zu können.

Arbeitshypothese 1: Dauerelastische KMR-Verbindungen sind stoffschlüssig. Somit finden Wurzeln keine Angriffspunkte um einzuwachsen.

Insbesondere aus dem Gasbereich sind Beschädigungen der Leitungen durch Zugschlingen und Druckstempel von Wurzeln bekannt [89, S. 825ff.]. I.d.R. werden solche Beschädigungen in Zusammenhang mit Windlasten an Bäumen diskutiert, die über die Wurzeln in den Boden übertragen werden (vgl. Kapitel 2.3.2 und [90, S. 1]). Zudem ist bekannt, dass sich das radiale Wurzeldickenwachstum entsprechenden geometrischen Formen anpassen kann. Jedoch können Wurzelgeflechte auch Rohrverbindungen aufdrücken (vgl. Kapitel 2.3.1 und [18, S. 77; 19, S. 121f.]). Die PE-Ummantelung von KMR-Verbindungen ist vergleichsweise dünn. Wenn diese Ummantelungen nicht durch das reine Wurzeldickenwachstum beschädigt werden, dann sollten auch andere Vollwandrohre nicht durch das Wurzeldickenwachstum beschädigt werden können.

Arbeitshypothese 2: Die PE-Ummantelung wird nicht durch das Wurzeldickenwachstum beschädigt, da sich das radiale Wurzeldickenwachstum den geometrischen Gegebenheiten anpasst.

Bisher wurden vergleichsweise wenige Untersuchungen zum Wurzelwachstum von mehrjährigen Bäumen in unterschiedlichen Bodentemperaturen durchgeführt. Untersuchungen zeigen jedoch, dass viele Baumarten bis zu einer Temperatur von 35°Celsius Wurzelwachstum vorweisen [103; S. 319f.]. Gemessene Temperaturen an Fernwärmeleitungen liegen auch in Ausnahmefällen maximal bei ca. 35°Celsius (vgl. Kapitel 2.3.4.2). Der Einfluss der Abwärme von Fernwärmeleitungen wurde bisher nicht untersucht.

Arbeitshypothese 3: Das Wurzelwachstum wird nicht durch die Abwärme von Fernwärmeleitungen beeinflusst, da die zu erwartenden Temperaturen nicht so hoch sind, dass das Wurzelwachstum eingestellt wird.

4.2 ZFSV und Wurzeln

Als porenraumarmes Bettungsmaterial können nach Regelwerk [1, S. 17] u.a. ZFSV eingesetzt werden. Das Wurzelwachstum in Böden ist von mehreren Parametern abhängig. Ein wesentlicher Parameter, um den Porenraum im ZFSV zu beschreiben, ist die Porosität [151, S. 42]. Ist die Porosität gering, sollten auch keine Wurzeln einwachsen.

Arbeitshypothese 4: Bei geringer Porosität ist auch langfristig kein Wurzeleinwuchs zu erwarten.

Bei der Prüfung der Porosität stellt sich jedoch die Frage, ob diese ausreichend durchgehende Poren und auch maximale Porengrößen darstellen kann, die für das Wurzelwachstum maßgeblich sind. Daher sind weiterhin auch die Untersuchung von anderen Parametern zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit von ZFSV zielführend. Eine Verbindung kann ggf. zwischen Wasser- und Wurzeldurchlässigkeit hergestellt werden. Denn Wurzeln brauchen i.d.R. durchgehende und ausreichend große Poren, um einen Boden durchwachsen zu können.

Arbeitshypothese 5: Kann Wasser ZFSV schlecht durchströmen, dann können auch Wurzeln schlecht in den ZFSV einwachsen.

4.3 Folien und Platten

Bei **Folien und Platten** zeigen Studien, dass sie unter bestimmten Voraussetzungen unterwachsen werden können. Es wurden jedoch vergleichsweise geringe Folienhöhen eingesetzt, die vermutlich eher für den Schutz von Gehweg- und Straßenbelägen eingesetzt werden. Auch die Bodeneigenschaften sind vermutlich maßgeblich dafür, ob Folien und Platten einen dauerhaften Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben leisten können [162, S. 153; 164, S. 151; 165, S. 176; 169, S. 216f.]. Zur Beantwortung der folgenden Arbeitshypothese wurden Langzeit-Versuche entwickelt, deren Ergebnisse erst nach der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit vorliegen (vgl. Kapitel 8.6).

Arbeitshypothese 6: Das Gesamtsystem aus Folien und Platten, Bodeneigenschaften und Wurzeln ist maßgeblich für einen dauerhaften Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben.

5 Versuchskonzepte und -prinzipien

Es wurden Versuchskonzepte zur Untersuchung von Kunststoffmantelrohren und deren Verbindungen (vgl. Kapitel 6) und ZFSV (vgl. Kapitel 7) entwickelt, um insbesondere die in Kapitel 4 aufgestellten Hypothesen beantworten zu können. Kern beider Versuchskonzepte sind labortechnische Untersuchungen mit Pflanzen und Versuche im Maßstab 1:1 zur Ergänzung und Überprüfung der Aussagekraft bisheriger (Norm-)Prüfverfahren zur Wurzelfestigkeit (vgl. Kapitel 3). Folgende Versuchsarten werden dazu genutzt:

- labortechnische Versuche mit Pflanzen
- bautechnische Laborversuche (im Maßstab 1:1)
- Feldversuche mit Großbäumen
- In-situ-Beobachtungen in der Nähe von Großbäumen

Die Versuchsarten folgen unterschiedlichen Versuchsprinzipien. Die labortechnischen Versuche folgen dem Prinzip, mit Pflanzen im Labormaßstab unter weitestgehend bekannten Randbedingungen und möglichst kurzer Zeit einen Wurzelwuchs an einer bautechnischen Schutzmaßnahme zu simulieren. Dabei sind die Versuchsaufbauten so gewählt, dass eine Wurzel-Schutzmaßnahmen-Interaktion in vergleichsweise kurzer Zeit provoziert wird bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit eintritt. Dieses Versuchsprinzip bildet i.d.R. den Worst-Case-Fall in der Praxis ab.

Das Versuchsprinzip bautechnischer Laborversuche im Maßstab 1:1 mit Blick auf die Wurzelfestigkeit einer Schutzmaßnahme wird dazu genutzt, um mögliche Schwach- bzw. Einwuchsstellen unter weitestgehend bekannten Randbedingungen visuell ermitteln zu können. Echte Pflanzen werden dabei nicht eingesetzt, sodass ausschließlich bautechnische Rückschlüsse zur Wurzelfestigkeit gezogen werden können.

Feldversuche folgen einem ähnlichen Versuchsprinzip wie labortechnische Untersuchungen im Maßstab 1:1, jedoch werden diese Untersuchungen mit echten Pflanzen unter weitestgehend bekannten Randbedingungen durchgeführt. Dabei werden Schutzmaßnahmen und Bäume im Maßstab 1:1 eingesetzt, um die Wurzelfestigkeit einer Schutzmaßnahme zu untersuchen. Dieses Versuchsprinzip erfordert i.d.R. vergleichsweise viel Zeit, da Wurzeln zunächst zur Schutzmaßnahme wachsen müssen.

Das Prinzip der In-situ-Beobachtungen besteht darin, die durchgeführten Untersuchungen mit Praxisergebnissen zu validieren und ermitteln zu können, ob Ergebnisse der durchgeführten Versuche auch den tatsächlichen Praxisfall nachbilden bzw. so in der Praxis auch eintreten. Dabei sind i.d.R. jedoch nur wenige Randbedingungen bekannt und die Beobachtungen meistens nur einzelne Momentaufnahmen.

5.1 Wurzelfestigkeit von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren

Zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Kunststoffmantelrohren werden labortechnische Versuche mit Pflanzen und In-situ-Beobachtungen durchgeführt. Das Versuchskonzept zur Ermittlung der Wurzelfestigkeit von Kunststoffmantelrohren und deren Verbindungen ist wie folgt:

Tabelle 6: Versuchskonzept zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von Kunststoffmantelrohren

Versuchsart	Versuch
Labortechnische Versuche mit Pflanzen	Outside-In-Versuche
	Eindrückversuche
In-situ-Beobachtungen	Begleitung von Aufgrabungen an Standorten mit Bäumen und Fernwärmeleitungen

Die Outside-In-Versuche orientieren sich an den Einwuchsversuchen aus Kapitel 3.1.10. Der Begriff Outside-In soll darstellen, dass Wurzeln von außen in eine Rohrverbindung einwachsen (vgl. Abbildung 9).

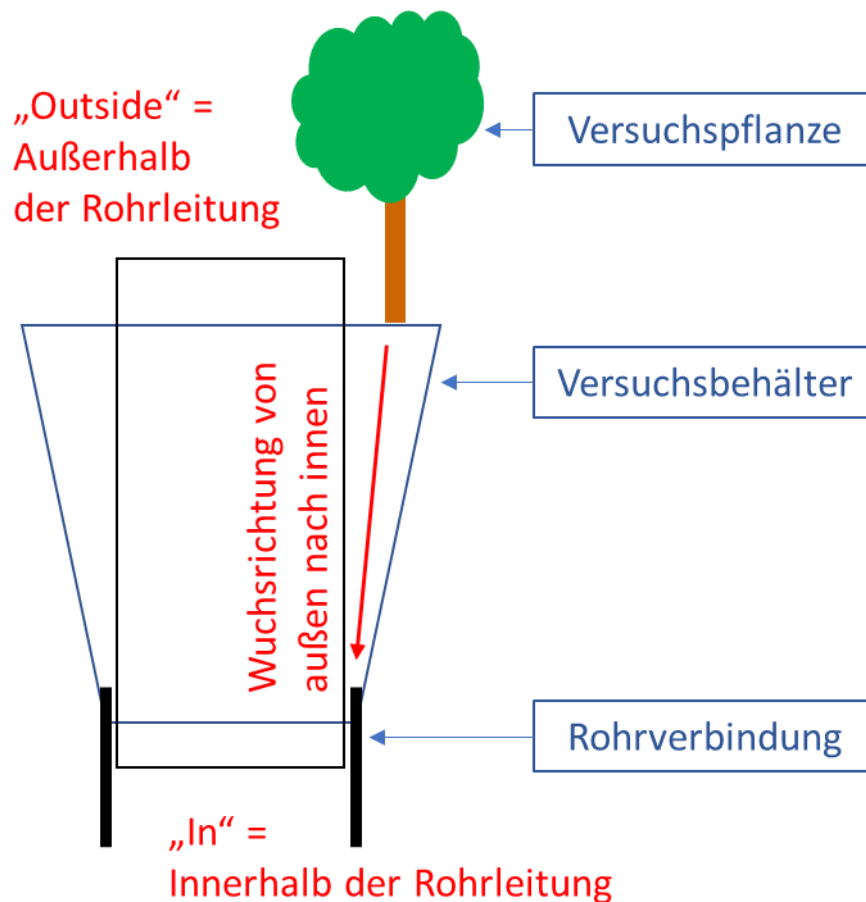


Abbildung 9: Versuchsprinzip der Outside-In-Versuche

Durch die Eindrückversuche soll untersucht werden, inwieweit das Wurzeldickenwachstum den Außenmantel von einem Kunststoffmantelrohr eindrücken kann. Das Versuchsprinzip dabei ist, dass das Wurzelwachstum in einen engen Spalt zwischen zwei Kunststoffmantelrohren provoziert wird (vgl. Abbildung 10). Dadurch sind vergleichsweise geringe Wurzeldurchmesser ausreichend, um eine Interaktion zwischen Wurzel und Fernwärmeleitung zu simulieren und ein mögliches Eindrücken des PE-Außenmantels zu provozieren.

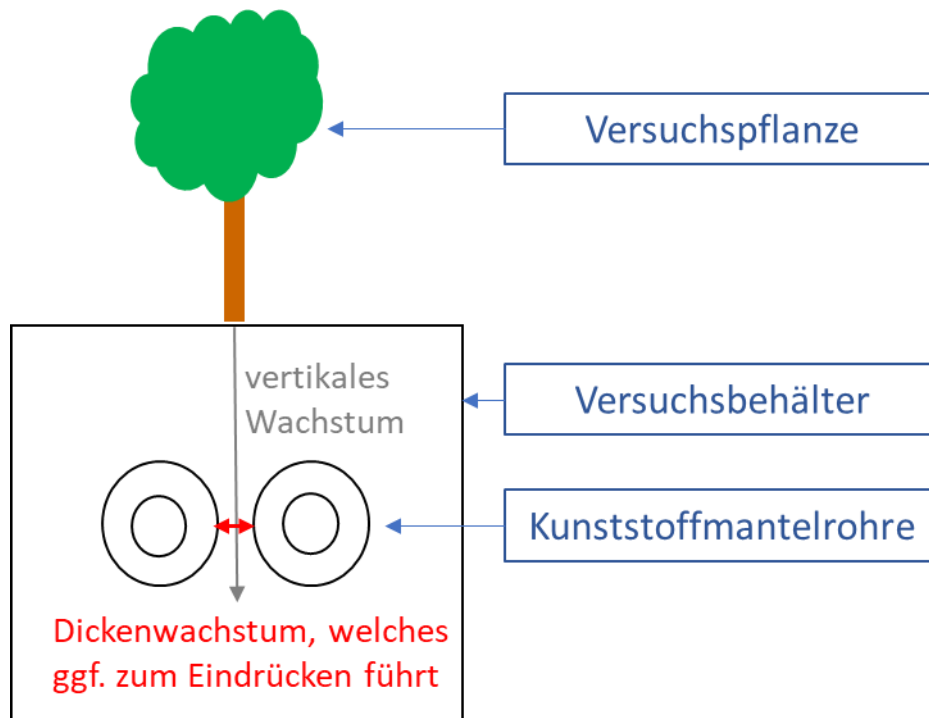


Abbildung 10: Versuchsprinzip der Eindrückversuche

Durch die In-situ-Beobachtungen soll u.a. untersucht werden, ob Wurzeln in der Praxis tatsächlich in Kunststoffmantelrohrverbindungen einwachsen und den Außenmantel der Fernwärmerohre beschädigen können.

Ergänzt werden die Untersuchungen an Kunststoffmantelrohren mit Versuchen und Simulationen zum Wärmeeinfluss von Fernwärmeleitungen auf Wurzeln (vgl. Kapitel 6.1.3 und 6.3).

5.2 Wurzelfestigkeit von ZFSV

Die Untersuchungen zur Wurzelfestigkeit von ZFSV sind labortechnische Versuche mit Pflanzen, Feldversuche und bautechnische Laboruntersuchungen (im Maßstab 1:1). Das Versuchskonzept ist folgend dargestellt:

Tabelle 7: Versuchskonzept zur Untersuchung der Wurzelfestigkeit von ZFSV

Versuchsart	Versuch
Labortechnische Versuche mit Pflanzen	Outside-Out-Versuche
Feldversuche	Feldversuche in Osnabrück
Bautechnische Laboruntersuchungen	Bautechnische 1:1-Untersuchungen über die Grabentiefe
	Untersuchungen der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1 [61]

Die Outside-Out-Versuche sind, vergleichbar mit den Outside-In-Versuchen an Rohrverbindungen (vgl. Kapitel 5.1), Einwuchsversuche mit Wurzeln. Das Versuchsprinzip ist, dass Wurzeln von außen auf die Außenfläche des ZFSV wachsen (vgl. Abbildung 11).

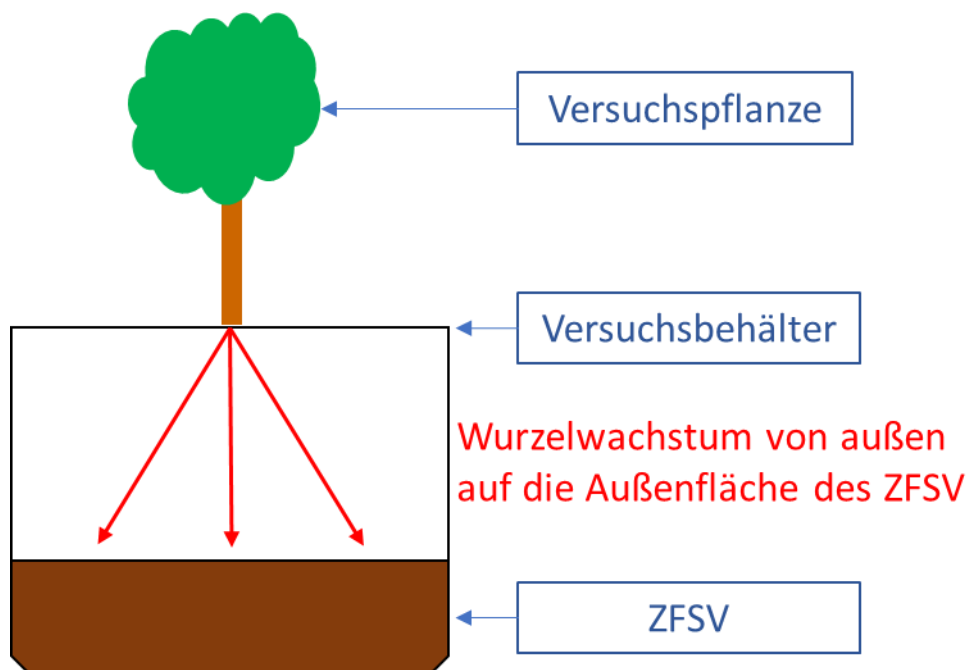


Abbildung 11: Versuchsprinzip der Outside-Out-Versuche

Mit den Feldversuchen soll die Wurzelfestigkeit von ZFSV im Maßstab 1:1 an echten Großbaumstandorten durchgeführt werden. Der Baumstandort wird in einem bestimmten Abstand mit ZFSV umhüllt, sodass die Wurzeln in alle horizontalen Wachstumsrichtungen auf ZFSV wachsen (vgl. Abbildung 12). Somit werden Wurzel-ZFSV-Interaktionen provoziert.

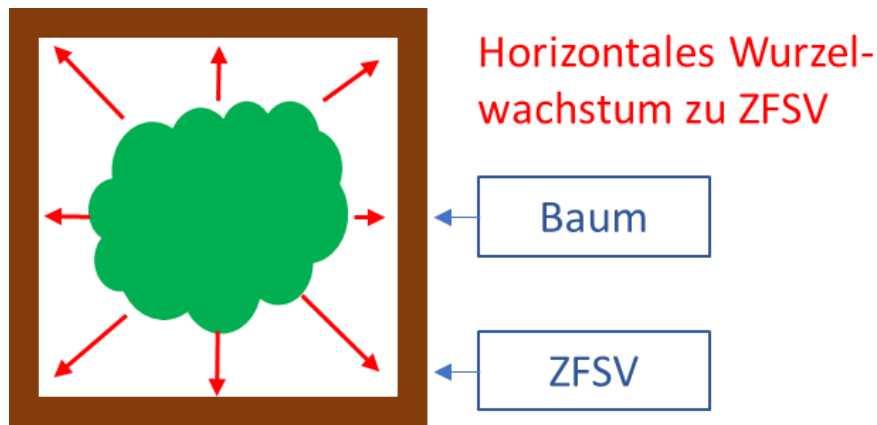


Abbildung 12: Versuchsprinzip des Feldversuches in Osnabrück (Draufsicht)

Die bautechnischen Untersuchungen über die Grabentiefe im Maßstab 1:1 sind Versuche zur visuellen Betrachtung möglicher Schwachpunkte von ZFSV mit Blick auf die Wurzelfestigkeit. Wurzeln können dort einwachsen, wo sie Raum finden. Sind in mit ZFSV verfüllten Baugruben bspw. Risse visuell erkennbar, so ist auch die Wurzelfestigkeit des ZFSV nicht mehr vollumfänglich gewährleistet.

Die Versuche an ZFSV werden mit der physikalischen Norm-Prüfung zur Wasserdurchlässigkeit [61] ergänzt, um physikalische Grenzwerte zur Wurzelfestigkeit dieser Schutzmaßnahme zu erfassen. Diese ermittelten Grenzwerte werden in Zusammenhang mit den Ergebnissen der labortechnischen Versuche mit Pflanzen betrachtet, um bestmögliche Aussagen zur Wurzelfestigkeit von ZFSV treffen zu können.

6 Untersuchungen zu Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen

Folgend werden die Untersuchungen zu Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen beschrieben. Die unter Kapitel 6.1 und 6.2 beschriebenen Untersuchungen wurden im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ durchgeführt und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde, mit fachlicher Unterstützung von insbesondere Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel (RUB) und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc. (AGFW) [6, S. 80ff.]^{1, S. 41}. In Kapitel 6.3 werden weitergehende Analysen zu Wärmefeldern an Fernwärmeleitungen aus dem o.g. Forschungsvorhaben ergänzend dargestellt. Anschließend erfolgt eine Diskussion und Einordnung der Untersuchungsergebnisse durch den Autor in der hier vorliegenden Arbeit hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf bautechnische Schutzmaßnahmen.

6.1 Experimentelle Untersuchungen

Als experimentelle Untersuchungen wurden Laborversuche mit Weidenstecklingen im botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Die Versuche werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

6.1.1 Outside-In-Versuche (Fernwärme-Rohrverbindungen und Wurzeln)

In den Outside-In-Versuchen wurde der Einfluss von Wurzeln auf KMR-Muffenverbindungen bei Kunststoffmantelrohren untersucht. Die Probekörper wurden durch den Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen der Ruhr-Universität Bochum erstellt und am botanischen Garten über die gesamte Versuchslaufzeit gepflegt. Ziel der Untersuchungen war es zu klären, ob ein Einwuchs von Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen erfolgen kann.

6.1.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Insgesamt wurden zwölf Probekörper mit KMR-Muffenverbindungen hergestellt und mit einem trapezförmigen Substratbehälter umhüllt. Nach Fertigstellung wurden diese vertikal aufgestellt und der Substratbehälter mit Oberboden aufgefüllt sowie mit Weidenstecklingen bepflanzt. Aufgrund der trapezförmigen Form und des geringen Volumens des Substratbehälters sowie der vertikalen Ausrichtung der Probekörper wurde ein Wurzelwachstum gezielt auf die KMR-Muffenverbindungen provoziert. Der Versuchsaufbau ist der folgenden Abbildung 13 zu entnehmen.



Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Wurzelfestigkeit von KMR-Muffenverbindungen (Skizze erstellt durch Grimm (AGFW), Bild rechts [96, S. 44])

Als Probekörper wurden unvernetzte Muffenrohre aus PE mit Schrumpfmanschetten aus PE-X und vernetzte Muffenrohre aus PE-X ohne Schrumpfmanschetten eingesetzt (vgl. Kapitel 2.1.2). Insgesamt wurden vier unvernetzte und acht vernetzte KMR-Muffenverbindungen untersucht. Das Versuchskonzept sah vor, dass je zwei vernetzte und zwei unvernetzte KMR-Muffenverbindungen fachgerecht hergestellt wurden. Die weiteren KMR-Muffenverbindungen wurden gezielt mit folgenden Ausführungsfehlern und Schwachstellen appliziert:

- Unzureichend erwärmte Schrumpfmanschetten (bei unvernetzt);
- Verzicht auf das Aufräuen der Ummantelungen der KMR;
- Verzicht auf Schmelzklebstoffbänder;
- Nicht entfernte Schutzfolie auf der Schrumpfmanschette (bei unvernetzt);
- Eintragung von Fremdstoffen in die Kleb- und Dichtebene.

Eine detaillierte Auflistung und Darstellung der Probekörper sind in Kapitel 6.1.1.2 in Tabelle 8 und in Anlage 1 dargestellt.

Die Versuche wurden im April 2018 gestartet und im November 2019 beendet. Die Versuchslaufzeit betrug demnach 18 Monate und zwei Wachstumsperioden. Für erste Zwischenergebnisse und zur Abschätzung des Auswurzelungsverhaltens wurden davon abweichend eine Probe im November 2018 (nach sieben Monaten) [96, S. 45f.] und zwei Proben im April 2019 (nach zwölf Monaten) geöffnet. Das Öffnen der Probekörper erfolgte mit zwei vertikalen Schnitten mit Hilfe eines Winkelschleifers an sich gegenüberliegenden Seiten. Dadurch konnte der Oberboden als ganzer Körper von der Ummantelung des KMR und der KMR-Muffenverbindung getrennt werden (siehe Abbildung 14) [96, S. 45].



Abbildung 14: Vorgehensweise zur Öffnung der Probekörper (Links: Vertikales Aufschnneiden des Blumentopfes [97, S. 26], Mitte: Vertikales Aufschnneiden des durchwurzelt Substrats [97, S. 26], Rechts: Entfernen der Schrumpfmanschette von der Rohroberfläche bei einer unvernetzten Muffe)

6.1.1.2 Versuchsergebnisse

In allen Substraten konnte ein ausgeprägtes Wurzelwachstum innerhalb des Substratbehälters festgestellt werden. Bei der Auswertung der Probekörper zeigten sich unterschiedliche Wurzelinteraktionen, die wie folgt eingeordnet werden können:

- **Wurzelanwuchs** in die Trennfläche/Spalt zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR, aber nicht in den Schmelzklebstoff bzw. in die Adhäsionsebene des Schmelzklebstoffes (an 9 von 12 Probekörpern (beispielhaft Abbildung 15, links)).
- **Wurzeleinwuchs** in die mit bewussten Applikationsfehlern ausgeführte adhäsive Ebene zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR (an 2 von 12 Probekörpern (beispielhaft Abbildung 15, rechts)).
- **Kein Wurzelwuchs bzw. -einwuchs** zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung durch eine Wurzel (an 3 von 12 Probekörpern).



Abbildung 15: Wurzelanwuchs in den nicht-stoffschlüssig verbundenen Spalt zwischen Muffe ohne Dichtband und Kunststoffmantelrohroberfläche (links), Wurzeleinwuchs in eine Muffenverbindung, bei der durch bewusst eingebrachte Fremdstoffe keine adhäsive Verbindung zwischen Muffenrohr und Ummantelung des KMR erfolgen konnte (rechts) [97, S. 27]

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei fachgerecht ausgeführten KMR-Muffenverbindungen kein Wurzeleinwuchs zu erwarten ist. Gleichzeitig ist festzustellen, dass bei einer fehlerhaften Montage bzw. Ausführungsfehlern ein Wurzeleinwuchs möglich ist. Wird die Ebene zwischen dem Ende eines vernetzten Muffenrohres aus PE-X (ohne zusätzliches Schrumpfband) nicht vollständig mit Schmelzklebstoff ausgefüllt, d. h. es erfolgt kein Austritt von Schmelzklebstoff aus dem Spalt (siehe Abbildung 16), ist in diesem Bereich ein Wurzelanwuchs möglich [97, S. 27]. Es ist darauf hinzuweisen, dass je nach System der Muffenverbindung (vgl. Kapitel 2.1.2) nach Angabe des Inverkehrbringers ein Austritt von Schmelzklebstoff nicht gefordert ist.

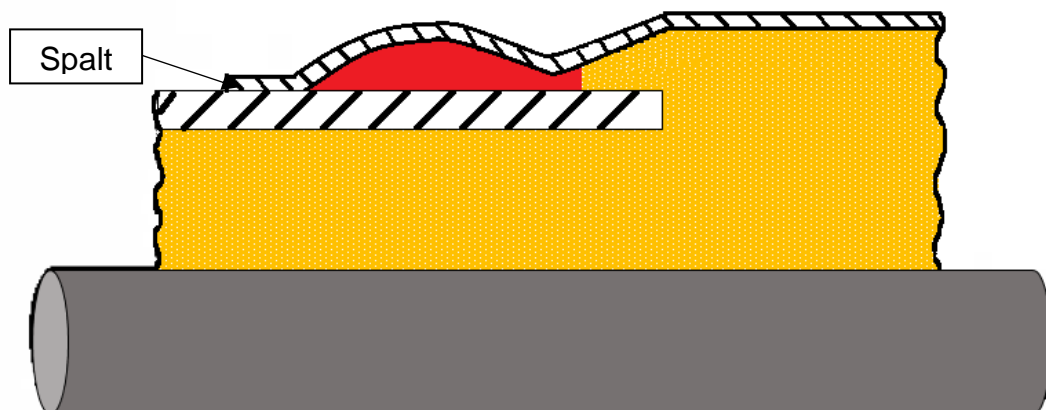


Abbildung 16: Schematische Darstellung einer fachgerecht applizierten Schrumpfmuffe aus PE-X mit Schmelzklebstoff (rot); nach AGFW FW 401-6 [43, S. 9] (erstellt durch Grimm (AGFW), modifiziert durch den Autor in der hier vorliegenden Arbeit)

Bei Muffenverbindungen, an deren Ende Schmelzklebstoff austrat und sich zu einem fest anhaftenden Wulst formte, konnte kein Wurzelanwuchs zwischen der Ummantelung des

KMR und dem Muffenrohr festgestellt werden. Direkt an der rauhen Oberfläche des Schmelzklebstoffes wuchsen Wurzeln an, was aber keinen Angriffspunkt für ein potientiellles Eindringen in die Adhäsionsschicht zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR darstellt (siehe Abbildung 17).

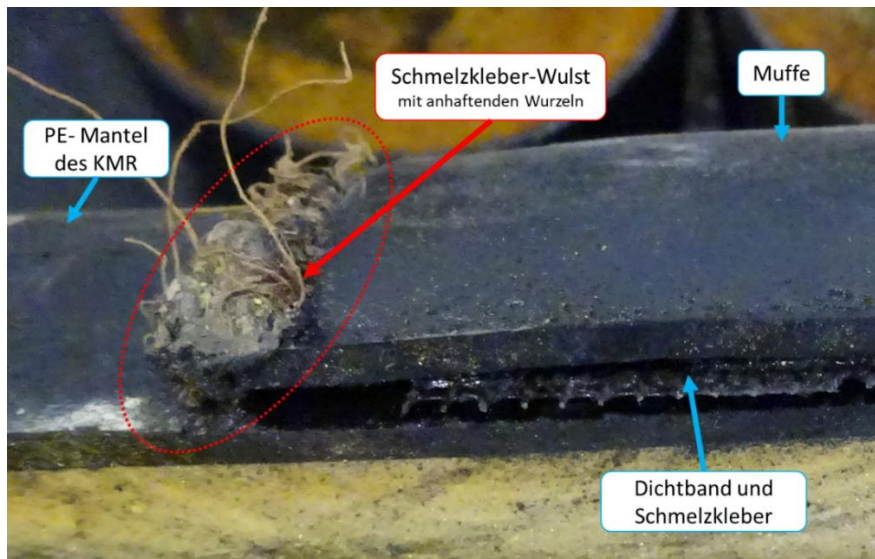


Abbildung 17: KMR-Muffenverbindung mit Schmelzklebstoffwulst am Ende (erstellt durch Grimm (AGFW))

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Outside-In-Probekörper mit Angabe des Fehlerbildes, des Muffensystems, der Wurzelinteraktion und des Wurzeleinwuchses.

Tabelle 8: Ergebnisübersicht der Outside-In-Versuche [97 ,S. 26]

Probekörper	Fehlerbild	Muffensystem	Wurzelanwuchs	Wurzeleinwuchs
I a	Fehlerfrei appliziert	vernetzt	Nein	Nein
I b	Kein Dichtband	vernetzt	Nein	Nein
II a	Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt	unvernetzt	Ja*	Nein
II b	Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt	unvernetzt	Ja*	Nein
III a	Unsauber verarbeitet, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Ja
III b	Unsauber verarbeitet, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Nein
IV a	Schutzfolie am Dichtband nicht entfernt	vernetzt	Ja	Nein
IV b	Fehlerfrei appliziert	vernetzt	Ja	Nein
VI a	Oberfläche der Ummantelung nicht aufgeraut und kein Dichtband vorhanden	vernetzt	Ja	Nein
VI b	Kein Dichtband, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Ja
VII a	Fehlerfrei appliziert	unvernetzt	Nein	Nein
VII b	Fehlerfrei appliziert	unvernetzt	Ja*	Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)

Zusammenfassend trat an neun von zwölf Probekörpern Wurzelanwuchs zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR und somit eine Interaktion zwischen Muffe und Wurzel auf. Dabei wiesen sieben dieser neun Probekörper ein absichtlich eingebrachtes Fehlerbild auf. Der fehlerfreie Probekörper IV b hatte einen minimalen Wurzelanwuchs im nicht durch Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR. Dieser Spalt lag bei allen vernetzten Probekörpern mit Wurzelanwuchs vor. Bei den drei unvernetzten Muffenrohren mit Wurzelanwuchs konnte keine Wurzel unter die Schrumpfmanschette gelangen, lediglich unter dem Montagepatch (eine reine Montagehilfe) konnte Wurzelanwuchs festgestellt werden (siehe Abbildung 18) [97, S. 28].

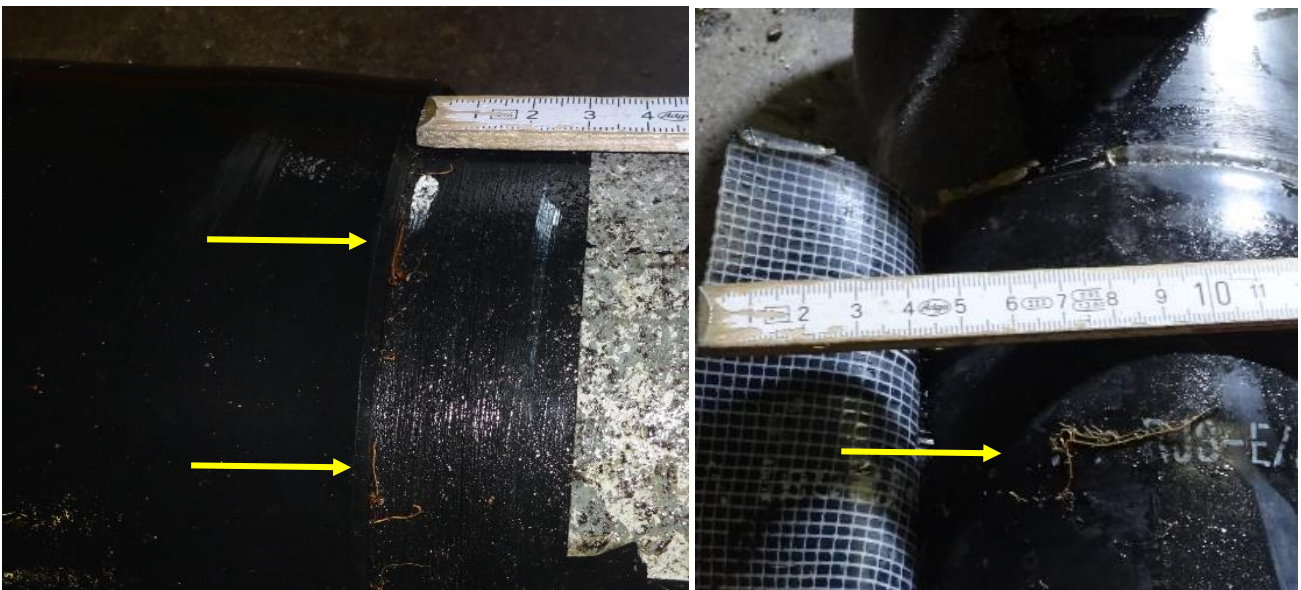


Abbildung 18: Wurzeln am nicht mit Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt am Ende des Muffenrohres von Probekörper IV b (links); Wurzeln unter dem Montagepatch von Probekörper II b (rechts)

Nur bei den zwei Probekörpern mit massiven provozierten Fehlstellen konnten tatsächliche Wurzeleinwüchse in die KMR-Muffenverbindung identifiziert werden. Bei Wurzelanwuchs in Verbindungen mit Fehlerbildern, die den adhäsiven Verbund nicht beeinflussten, oder in Verbindungen, die fachgerecht ausgeführt wurden, trat kein Wurzeleinwuchs auf [97, S. 28].

6.1.2 Eindrückversuche (Fernwärme-Rohrummantelung und Wurzeln)

Ein weiterer Versuch zur Wurzelfestigkeit von Fernwärmeleitungen an der Ruhr-Universität Bochum untersuchte die Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf die PE-Ummantelung von Kunststoffmantelrohren. Es wurde analysiert, ob das Dickenwachstum einer Wurzel zwischen einem Widerlager im Boden (in der Praxis z.B. Fels oder Stein) dazu führen kann, dass die PE-Ummantelung eingedrückt bzw. beschädigt wird.

6.1.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Drei Versuchsbehälter mit Höhe, Breite und Länge von jeweils 60 Zentimetern wurden für die Versuchsreihe erstellt. Für die Kunststoffmantelrohrleitungen wurden an zwei gegenüberliegende Seiten in einer Tiefe von 20,5 Zentimetern (von Oberkante Versuchsbehälter zu Oberkante Rohrleitung) horizontal nebeneinander liegende Aussparungen gesägt. Die KMR wurden anschließend durch die Aussparungen in die Versuchsbehälter geschoben. Es wurden 1,2 Meter lange Probestücke genommen, wodurch die Probestücke auf jeder Seite ca. 30 Zentimeter aus den Versuchsbehältern hinausragen. Somit wurden die Aussparungen in den Versuchsbehältern als Widerlager genutzt, sodass die Rohrleitungen durch das geplante Wurzeldickenwachstum nicht maßgeblich auseinander gedrückt werden konnten. Anschließend wurden die Versuchsbehälter mit Komposterde befüllt und mit jeweils drei Weidenstecklingen, zentral angeordnet über den Spalt der Rohrleitungen, bepflanzt (vgl. Abbildung 19, links). Die Weidenstecklinge wurden bis zur Tiefe der Oberkante Rohrleitung eingesetzt. Durch die zentrale Anordnung über dem Spalt zwischen den Rohrleitungen sollte das vertikale Wurzelwachstum direkt in den Spalt zwischen den Kunststoffmantelrohrleitungen geführt werden.

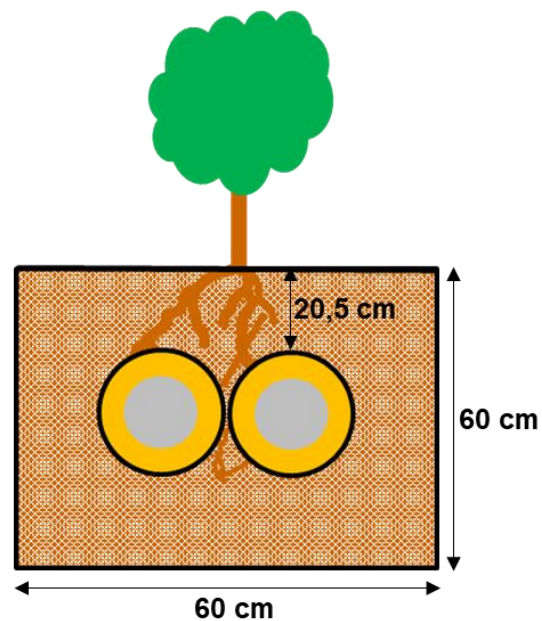


Abbildung 19: Versuchsaufbau zu Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf Kunststoffmantelrohre: Versuchsbehälter A im Mai 2020 mit ausgeprägtem Wachstum an der Oberfläche (links), Versuchsaufbauschema (rechts) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor)

Die Versuchsbehälter waren unten offen, sodass die Wurzeln in das anstehende Erdreich wachsen konnten. So sollte ein ausreichendes Dickenwachstum der Wurzeln gewährleistet werden. In Abbildung 19, rechts ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

Die Versuche wurden im April 2019 begonnen. Acht von neun Stecklingen wuchsen über 13 Monate. Ein Weidensteckling war vorzeitig eingegangen. Zur Analyse des Wurzelwachstums wurde im Mai 2020 ein Teil der Versuchsbehälter geöffnet. Für die Analyse des Wurzelwachstums und der Interaktion zwischen Wurzeln und Rohrleitungen wurde zunächst eine Seitenverkleidung der Versuchsbehälter entfernt. Anschließend wurde händisch und durch Ausspülen mit Wasser die Muttererde entfernt, um die Wurzeln und Rohrleitungen freizulegen. Die Freilegung und Auswertung erfolgte je Weidensteckling. Zur detaillierten Messung und bildlichen Dokumentation der Wurzeln und der Analyse der Rohroberfläche wurden die Stecklinge aus den Versuchsbehältern entfernt.

6.1.2.2 Versuchsergebnisse

Zunächst wurde der Abstand zwischen den KMR außerhalb der Versuchsbehälter vermessen. An den Weidenstecklingen wurden an der Oberkante zum Mutterboden die Durchmesser gemessen. Bei den zwei dicksten Weidenstecklingen (Versuchsbehälter A, Steckling 1 und Versuchsbehälter C, Steckling 2) konnte ein ovales Dickenwachstum an der Oberfläche festgestellt werden. In diesen Fällen wurden die Wurzeldicke in radialer und axialer Richtung der Rohrleitungen gemessen. Die Durchmesser der Weidenstecklinge wurden mit den Abständen der Kunststoffmantelrohrleitungen verglichen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt.

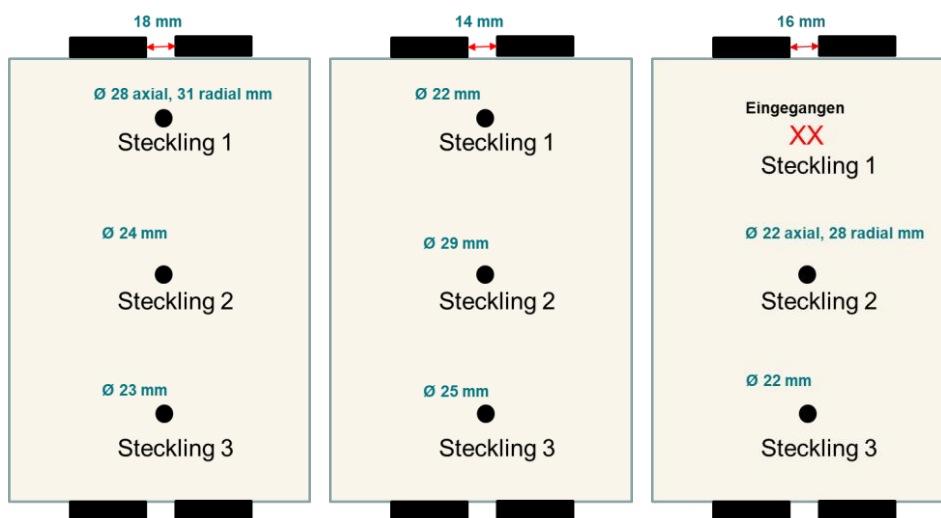


Abbildung 20: Draufsicht auf die Versuchsbehälter A (links), B (mittig), C (rechts) mit den gemessenen Durchmessern der Weidenstecklinge an der GOK und dem Abstand zwischen den Rohrleitungen

Zur Öffnung wurden aus Versuchsbehälter A Steckling 1 und aus Versuchsbehälter C Steckling 2 und 3 ausgewählt. Bei Steckling 1 aus Versuchsbehälter A und Steckling 2 aus Versuchsbehälter C wurde ein großes Dickenwachstum an der Oberfläche festgestellt, sodass dort auch ein ausgeprägtes Wurzelwachstum zu vermuten war. Steckling 3 aus Versuchsbehälter C wurde geöffnet, da durch die Auswertung von Steckling 2 bereits ein Großteil des Versuchsbehälters geöffnet und ein Wiederauffüllen nicht zielführend war. Die

Öffnungen zeigten, dass alle drei Stecklinge in den Spalt zwischen den Rohrleitungen gewachsen waren (vgl. Abbildung 21).



Abbildung 21: Wurzelwachstum zwischen den Rohrleitungen, Versuchsbehälter A, Steckling 1 (Querschnitt, links), Versuchsbehälter C, Steckling 2 (Draufsicht, rechts)

Es zeigte sich, dass sich der Querschnitt der Wurzel an den Spalt angepasst hatte. Beispielhaft ist das Wurzelwachstumsverhalten von Steckling 2 aus Versuchsbehälter C folgend in Abbildung 22 dargestellt.



Abbildung 22: Versuchsbehälter C, Steckling 2 Vorderansicht auf radiales Wurzelwachstum von 18,5 mm (links), Seitenansicht auf axiales Wurzelwachstum von 64,0 mm (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert (erstellt durch Grimm (AGFW))

Die Versuchsergebnisse zeigten bei allen drei ausgewerteten Stecklingen, dass die Wurzeln durch den Spalt zwischen den Rohrleitungen gewachsen waren. Je dicker die Stecklinge bereits an der Oberfläche waren, desto ausgeprägter war auch das Wurzelwachstum im Substrat. Jedoch veränderte sich im Spalt zwischen den Rohren die Form der Wurzel, indem sie sich der Spaltbreite anpasste. Die Messergebnisse sind vergleichend zwischen den Messungen direkt über den Rohrleitungen (im Mutterboden) und zwischen den Rohrleitungen folgend in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Vergleich der Messwerte der Eindrückversuche an der Oberfläche zum Mutterboden und zwischen den Rohrleitungen (in Millimeter)

Messstelle	Versuchsbehälter A, Steckling 1	Versuchsbehälter C, Steckling 2	Versuchsbehälter C, Steckling 3
über GOK	31 axial, 28 radial	28 axial, 41 radial	24 axial, 25 radial
zwischen KMR	45 axial, 18 radial	64 axial, 18,5 radial	21 axial, 15,5 radial
Spaltbreite (außerhalb Versuchsbehäl- ter)	18 radial	16 radial	16 radial

Für die Wurzelbreite in axialer Richtung der Rohrleitungen wurden Werte von bis zu 64 Millimeter gemessen. Das Wurzelwachstum in radialer Richtung entsprach in zwei Fällen der Spaltbreite zwischen den Kunststoffmantelrohrleitungen. Bei Steckling 2 in Versuchsbehälter C wurde eine geringfügig größere Dicke als die Spaltbreite gemessen. Als wesentliches Ergebnis blieb festzuhalten, dass bei keinem der drei ausgewerteten Stecklingen eine Beschädigung der Rohrmanteloberfläche festgestellt werden konnte (vgl. Abbildung 23).



Abbildung 23: Rohrmanteloberflächen aus Versuchsbehälter A (links) und Versuchsbehälter C (rechts)

Die Auswertung von Steckling 3 aus Versuchsbehälter C zeigte im Vergleich zu den anderen zwei Stecklingen ein geringfügiges (Dicken-)Wurzelwachstum in radialer und insbesondere axialer Richtung. Aus diesem Grund wurden die restlichen Stecklinge (Versuchsbehälter A, Steckling 2 und 3 sowie Versuchsbehälter B alle Stecklinge) daher in den Versuchsbehältern belassen, um ein Wurzeldickenwachstum (ggf. für Folgeuntersuchungen) zu ermöglichen und weitergehende Ergebnisse zu erhalten. Eine detaillierte Darstellung der Versuchsergebnisse ist Anlage 2 zu entnehmen.

6.1.3 Wärmefeldversuche (Wärmefelder und Wurzeln)

Um das Wachstumsverhalten von Wurzeln im Umfeld von Fernwärmeleitungen untersuchen zu können, wurden durch den Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen im botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Untersuchungen zur Wärmeausbreitung von erdverlegten Fernwärmeleitungen und deren Auswirkungen auf das Wurzelwachstum durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden entsprechende Wärmefelder in mit Weidenstecklingen bepflanzten Versuchsbehältern durch Heizpatronen simuliert. Ziel war die Untersuchung des Einflusses von Wärmefeldern auf die Richtung und Ausbreitung des Wurzelwachstums. Mit diesen Versuchen sollten die Arbeitshypothesen untersucht werden, ob die Temperaturfelder von Fernwärmeleitungen im Baugrund das Wurzelwachstum fördern, hemmen oder darauf keinen Einfluss haben.

6.1.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die fünf Versuchsbehälter (A-E) bestanden aus Siebdruckplatten (2 cm Wandstärke), mit den Maßen 1.000 mm Länge, 800 mm Breite und 600 mm Höhe, waren mit Substrat befüllt und mit jeweils sechs Stecklingen (aufgeteilt in drei Reihen) bepflanzt worden. Als Substrat wurde Gartenerde verwendet, da die Wurzeln hier überdurchschnittlich gut in alle Richtungen wachsen konnten und der Einfluss des Substrats auf das Wurzelwachstum so gering wie möglich gehalten wurde. Aufgrund des schnellen Wurzelaustriebs von Weiden wurden Weidenstecklinge eingesetzt, um innerhalb der 30-monatigen Laufzeit des Forschungsvorhabens ein möglichst ausgeprägtes Wurzelwachstum zu erhalten.

Es wurde ein möglichst hoher Temperaturgradient in den Versuchsbehältern erzeugt (blauer Punkt = Kaltwasserleitung, roter Punkt = Heizpatrone, vgl. Abbildung 24), um eventuelle Auswirkungen auf des Wurzelwachstum möglichst deutlich darstellen zu können. Das Versuchsdesign folgte somit dem Ansatz möglichst deutliche Effekte durch extreme Randbedingungen zu erzeugen. Ist kein Einfluss durch die extremen Parameter nachzuweisen, wird auch in situ kein Einfluss erwartet.

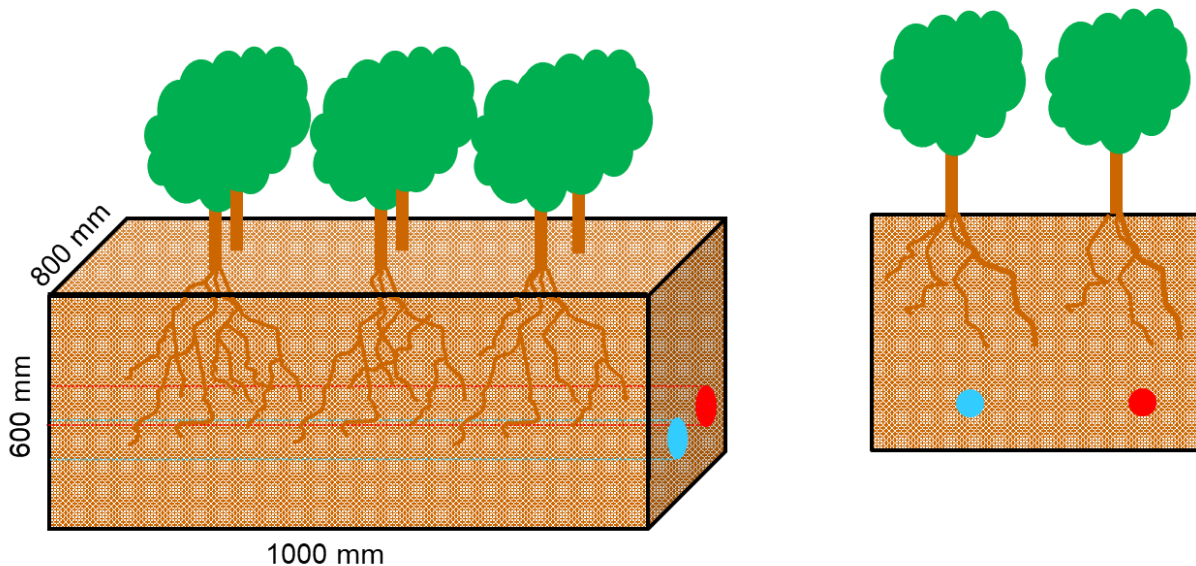
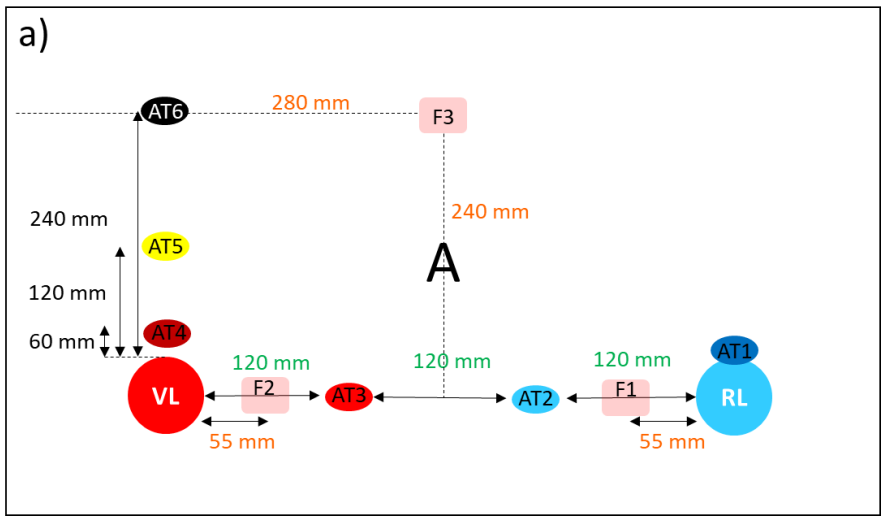


Abbildung 24: Versuchsaufbau zur Auswirkung von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum (erstellt durch Grimm (AGFW))

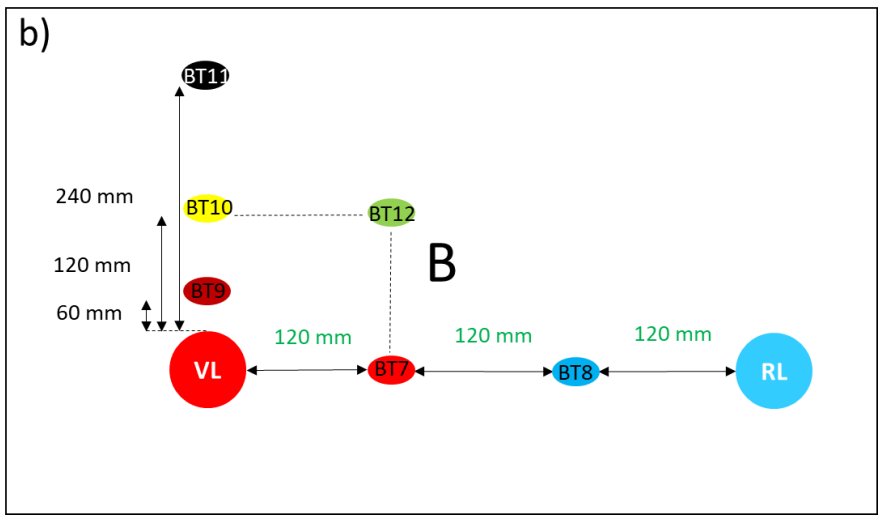
Die Temperatur der Kaltwasserleitung betrug ca. 15° Celsius (entsprechend der durchschnittlichen Temperatur von Trinkwasser). Die Temperatur der Heizpatrone war auf ca. 35° Celsius eingestellt (entsprechend der Temperaturlaufzeichnung an einer Forschungsmessstelle des AGFW, am Außenmantel eines im realen Betrieb befindlichen Kunststoffmantelrohres (vgl. Kapitel 2.3.4.2 [6, S. 53ff])). Die Heizpatronen wurden elektrisch betrieben. Die Temperaturen der Heizpatronen wurden über eine Regelungsbox gesteuert. Dazu wurden Temperatursensoren an der Oberfläche der Heizpatronen befestigt. Die Temperatur der Heizpatronen war auf den Sollwert 35° Celsius getriggert. Eine Hysterese ergab sich über die Nachlaufzeiten der Wärmeverteilung an den Heizpatronen, wodurch die Mittelwerte der Heizpatronen über die Versuchslaufzeit bei Versuchsbehälter A zu 36,6°C, Versuchsbehälter B zu 36,3°C, Versuchsbehälter C zu 36,0°C, Versuchsbehälter D zu 36,1°C und Versuchsbehälter E zu 35,4°C berechnet wurden. Die Messwerte der Heizpatronen-Regelungsbox wurden aufgrund der hohen Datenmengen (Messung alle 15 Sekunden) und verfügbaren Speicherkapazität vereinzelt nicht vollständig erfasst. Da jedoch mit den Temperatursensoren in den Versuchsbehältern (vgl. Kapitel 6.1.3.2) ein konstanter Wärmezufluss und auch Heizpatronenausfälle definitiv nachgewiesen werden konnten, wurde während der Versuchslaufzeit darauf verzichtet, das ansonsten funktionierende Regelungs- und Messsystem zu ändern, um den weiteren Versuchsablauf nicht zu stören. Die Berechnung der Heizpatronen-Temperaturmittelwerte im Normalbetrieb erfolgte auf Basis der erfassten Temperaturen der Regelungsbox von April 2018 bis Juli 2019. Messwerte nach Juli 2019 wurden nicht berücksichtigt, um Heizpatronenausfälle nicht in die Langzeitmittelwerte miteinfließen zu lassen (vgl. Kapitel 6.1.3.2). Aus diesem Grund wurden bei der Mittelwertberechnung für Versuchsbehälter D die Messwerte während des Heizpatronenausfalls im März 2019 ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Überdeckung der Heizpatrone und Kaltwasserleitung betrug 500 mm und der horizontale Abstand zwischen den Leitungen 360 mm. Die Versuchsaufbauten wurden im Außenbereich des botanischen Gartens der Ruhr-Universität Bochum platziert, wodurch eine professionelle Versorgung der Pflanzen gewährleistet war. Es wurden schattige Standorte gewählt, die den Einfluss der solaren Einstrahlung minimieren sollen.

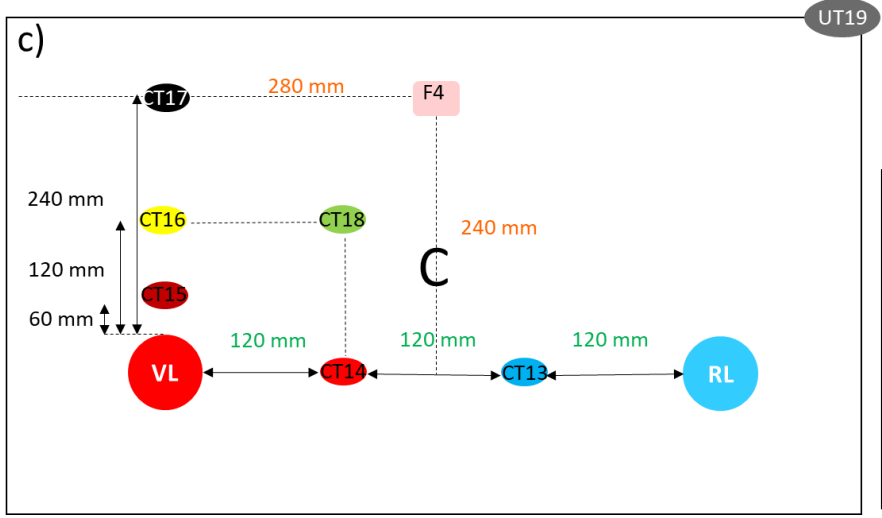
Zur Messung der Temperaturen im Substrat sind je Versuchsbehälter sechs Temperatursensoren (*Ergänzung durch den Autor in der vorliegenden Arbeit: Onset S-TMB-M006 Temperatursensor mit Messbereich: -40 - 100°C und Genauigkeit $\pm 0.2^\circ\text{C}$ bei 0° bis 50°C*) installiert worden. Die Anordnung der Heizpatrone (VL für Vorlauf), der Kaltwasserleitung (RL für Rücklauf) sowie der Temperatur- (AT, BT, CT, DT, ET, UT) und Feuchtesensoren (F) sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt und werden anschließend beschrieben. Die unterschiedlichen Farbkennzeichnungen der Temperatursensoren dienen dem besseren Verständnis der Temperaturverläufe über die Zeit in den jeweiligen Versuchsbehältern (vgl. Kapitel 6.1.3.2 und Anlage 3).



Legende:
 AT: Temperatursensor
 F: Feuchtesensor
 VL: Heizpatrone
 RL: Kaltwasserleitung



Legende:
 BT: Temperatursensor
 F: Feuchtesensor
 VL: Heizpatrone
 RL: Kaltwasserleitung



Legende:
 CT/UT: Temp.sensor
 F: Feuchtesensor
 VL: Heizpatrone
 RL: Kaltwasserleitung

Abbildung 25: Anordnung der Messsensoren in den Versuchsbehältern A (a) oben), B (b) mitte), C (c) unten) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor)

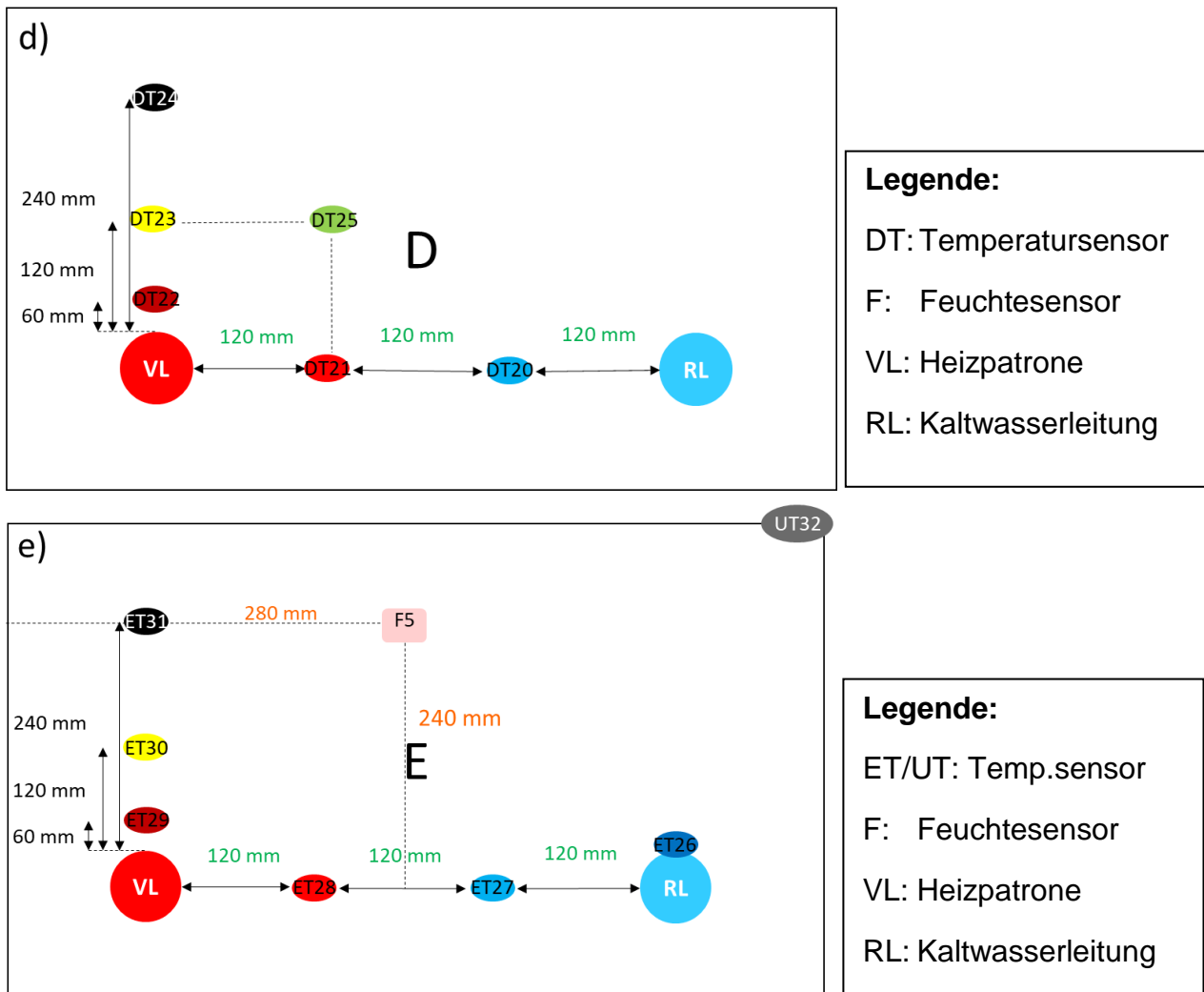


Abbildung 26: Anordnung der Messsensoren in den Versuchsbehältern D (d) oben) und E (e) unten) (erstellt durch Grimm (AGFW), angepasst durch den Autor)

Je Versuchsbehälter waren drei Temperatursensoren vertikal oberhalb der Heizpatrone mit den Abständen 60 mm (AT4, BT9, CT15, DT22, ET29), 120 mm (AT5, BT10, CT16, DT23, ET30) und 240 mm (AT6, BT11, CT17, DT24, ET31) angeordnet. Zwischen Heizpatrone und Kaltwasserleitung sind horizontal zwei weitere Temperatursensoren mit den Abständen 120 mm (AT3, BT7, CT14, DT21, ET28) und 240 mm (AT2, BT8, CT13, DT20, ET27) installiert worden. In Versuchsbehälter A und E wurde auf der Kaltwasserleitung zur Messung des Mediums der jeweils sechste Temperatursensor angeordnet (AT1, ET26). In den Versuchsbehältern B, C und D war der sechste Temperatursensor mit Abständen horizontal und vertikal zur Heizpatrone von 120 mm (BT12, CT18, DT25) eingesetzt. Die horizontale und vertikale Grundausrichtung der Temperatursensoren zur Heizpatrone wurde gewählt, um Temperaturen im Substrat zu messen und den Temperaturgradienten zwischen Kaltwasserleitung und Heizpatrone abschätzen zu können.

Um den Einfluss der Umgebungstemperatur ermitteln zu können, wurde an den Versuchsbehältern C und E jeweils ein Außentemperatursensor (UT19, UT32) installiert.

Zusätzlich wurde zur Temperatursteuerung der Heizpatronen an jeder Heizpatrone ein weiterer Temperatursensor installiert.

Zur Ermittlung des Wassergehaltes im Substrat wurden insgesamt fünf Feuchtesensoren (*Ergänzung durch den Autor in der vorliegenden Arbeit: Onset Bodenfeuchte-Smartsensor S-SMC-M005 mit 0-0,550 m³/m³ volumetrischer Wassergehalt im Boden, gemessenes Bodenvolumen ca. 0,3 l*) in den Versuchsbehältern A (F1, F2, F3), C (F4) und E (F5) installiert. Der Sensor F1 war 120 mm horizontal rechts neben der Heizpatrone und der Sensor F2 120 mm horizontal links neben der Kaltwasserleitung angeordnet. Die Sensoren F3, F4 und F5 sind mittig zwischen den Leitungen in einer Höhe von 240 mm installiert worden. Die Messungen gaben u.a. Hinweise auf die Bewässerung der Weidenstecklinge.

Die Versuche wurden im April 2018 gestartet. Die Weidenstecklinge entwickelten sich schnell und somit konnte bspw. im August 2018 im Großteil der Versuchsbehälter ein ausgeprägtes Wachstum der Weidenstecklinge festgestellt werden (vgl. Abbildung 27, links) [96, S. 48]. Jedoch war festzuhalten, dass insbesondere im zur Hauswand gewandten Bereich das Wuchsverhalten geringer ausfiel als in den von der Hauswand abgewandten Bereichen der Versuchsbehälter (vgl. Abbildung 27, rechts).

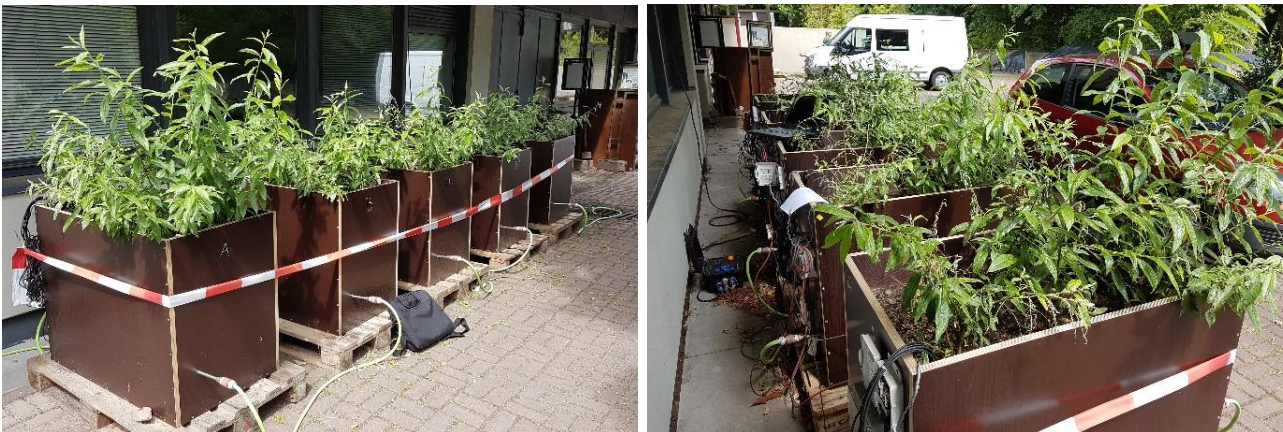


Abbildung 27: Wuchsverhalten der Weidenstecklinge (links) und reduziertes Wachstumsverhalten zur Hauswand (rechts) im Juli 2018

Daher erfolgte eine Versetzung der Versuchsbehälter zu Beginn der Wachstumsperiode 2019 mit einem größeren Abstand zur Hauswand. Zum Ende der Wachstumsperiode 2019 wurde ein für die Versuchsauswertung ausreichend ausgeprägtes Pflanzenwachstum in allen Versuchsbehältern identifiziert (vgl. Abbildung 28, links). Dabei wurden zwar Unterschiede in den Versuchsbehältern bzgl. der Wachstumsgröße der Weidenstecklinge festgestellt (vgl. Abbildung 28, mittig und rechts), jedoch in einem Maße, dass für die Versuchsergebnisse ein ausreichendes Wurzelwachstum in allen Versuchsbehältern zu erwarten war.



Abbildung 28: Versuchsbehälter v.l.n.r. A bis E (links), seitlicher Blick auf Versuchsbehälter E (mittig) und seitlicher Blick auf Versuchsbehälter A (rechts) zum Ende der Versuchslaufzeit im Juli 2019

6.1.3.2 Temperatur- und Feuchtemessungen

Zum Auslesen der Messdaten wurde die Freeware HOBOWare genutzt. Die Messdaten wurden in Microsoft Excel konvertiert und ausgewertet. Die Messintervalle betragen 15 Minuten. Die Temperaturverläufe der Versuchsbehälter zeigten, dass der Temperaturgradient zwischen den Temperatursensoren über die Versuchslaufzeit stabil gehalten werden konnte. Die in den Versuchsbehältern gemessenen Temperaturverläufe sind beispielhaft für Versuchsbehälter B (Versuchslaufzeit von April 2018 bis Juli 2019) in Abbildung 29 dargestellt. Die Temperaturverläufe der weiteren Versuchsbehälter sind Anlage 3 zu entnehmen.

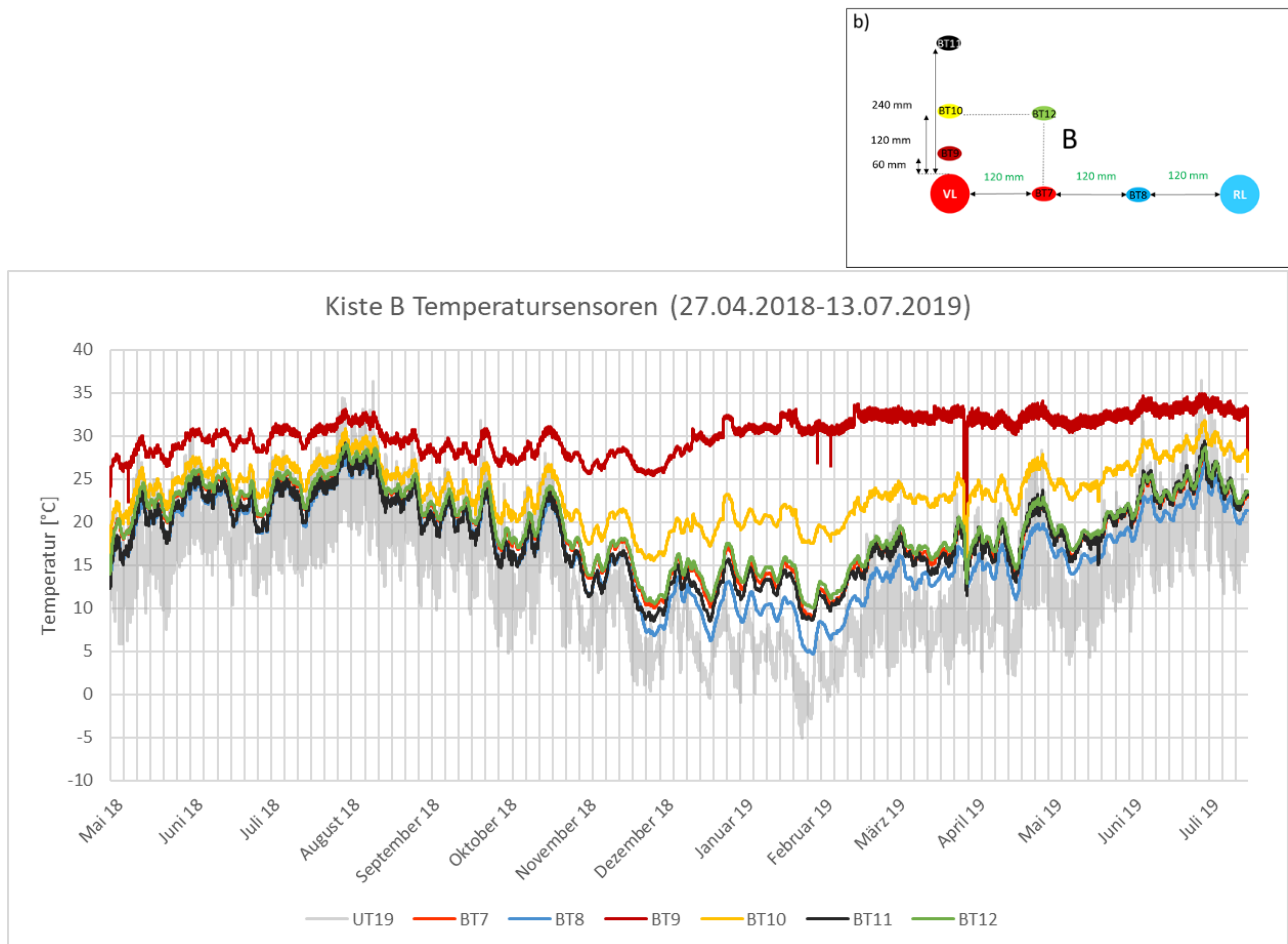


Abbildung 29: Temperaturverlauf vom 27.04.2018 bis zum 13.07.2019, hier beispielhaft an Versuchsbehälter B (Anordnung der Temperatursensoren rechts oben oder vgl. Abbildung 26 (rechts oben))

Die Außentemperatur (graue Linie) hatte einen Einfluss auf die Temperatur in den Versuchsbehältern. Je näher die Temperatursensoren an der Heizpatrone gelagert wurden, desto geringer wurde der Außentemperatureinfluss und desto größer war der Einfluss der Heizpatrone auf den Messwert. Die Messwerte zeigten, dass in horizontaler und vertikaler Richtung ein relativ gleichmäßiger Temperaturgradient erzeugt wurde. Der über die Versuchslaufzeit größer werdende Temperatureinfluss auf die vertikal über der Heizpatrone angeordneten Temperatursensoren ist vermutlich mit der Setzung der Messsensoren über die Zeit zu erklären. Um dies bildlich zu verdeutlichen, sind in Abbildung 30 nur die Messdaten der Versuchssensoren im horizontalen und vertikalen Abstand von jeweils 120 und 240 mm (BT7, BT8, BT10 und BT11) dargestellt.

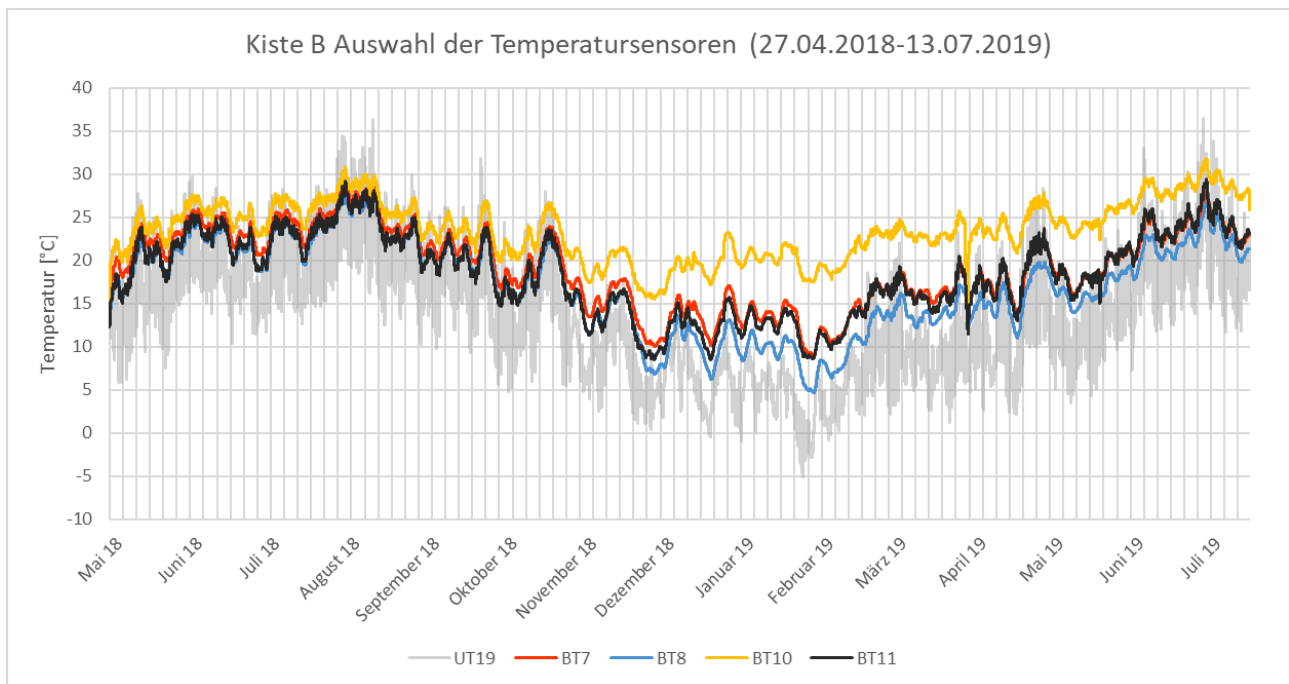


Abbildung 30: Temperaturverläufe der horizontalen und vertikalen Temperatursensoren im jeweiligen Abstand von 120 und 240 mm von der Heizpatrone, hier beispielhaft an Versuchsbehälter B (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 26 (rechts oben))

Zu Beginn der Messungen waren die Messwerte relativ identisch, mit fortschreitender Versuchslaufzeit wurde der Temperatureinfluss insbesondere auf den Temperatursensor BT10 (gelb), der zu Beginn 120 mm vertikal über der Heizpatrone angeordnet war, durch die Heizpatrone immer größer. Der Einfluss der Umgebungstemperatur nahm zeitgleich ab. Bei Öffnung der Versuchsbehälter wurde beim Temperatursensor BT10 ein Abstand von 45 mm gemessen, was eine Setzung von 75 mm bedeutet. Die gemessenen Setzungen der Temperatursensoren sind beispielhaft an Versuchsbehälter B in Abbildung 31 dargestellt.

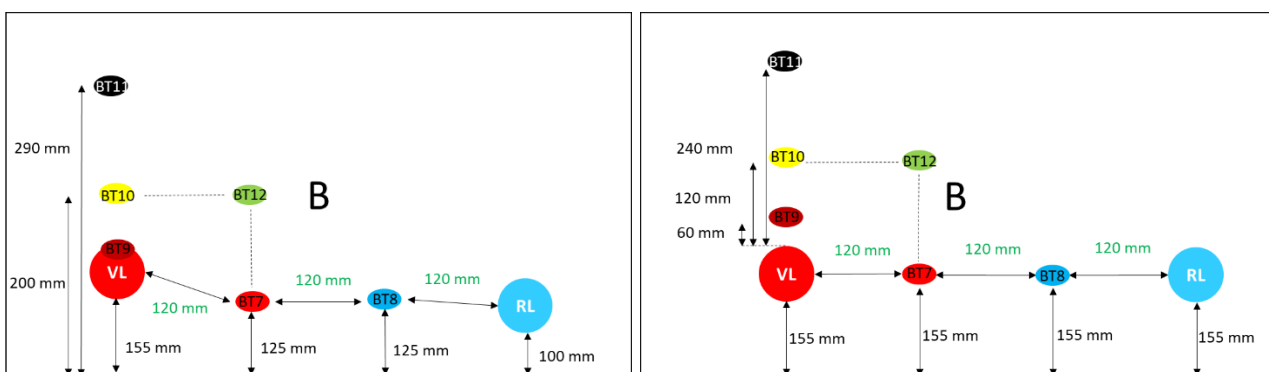


Abbildung 31: Abmessungen der Temperatursensoren zum Ende der Versuche im September 2019 (links) und zu Beginn der Versuche April 2018 (rechts)

In Versuchsbehälter A und E wurden zusätzlich die Temperaturen direkt an der Kaltwasserleitung (auch Rücklaufleitung) gemessen und verglichen. Wie in Abbildung 32 dargestellt, war die Außentemperatur ein maßgeblicher Faktor für die Temperatur an der

Kaltwasserleitung. In den Wintermonaten wurde das Trinkwasser abgestellt, sodass dort ein Temperaturabfall erkennbar war. Dies zeigte, dass das Trinkwasser insbesondere in den Monaten, in der die Trinkwassertemperatur wärmer war als die Umgebungstemperatur, einen Einfluss auf die Versuchsbehälter hatte. Denn sobald das Trinkwasser nach dem Winter wieder angestellt wurde, stiegen die Temperaturmesswerte. Zudem war abwechselnd die Zu- und Ablauftemperatur höher. Nach stichprobenartiger Kontrolle der Messwerte wurde beobachtet, dass vermutlich die Sonneneinstrahlung auf den jeweiligen Versuchsbehälter maßgeblich war, je nachdem, ob Versuchsbehälter A oder Versuchsbehälter E durch Sonneneinstrahlung beeinflusst wurde. Es war erkennbar, dass nur vereinzelt die gemessenen Temperaturen der Kaltwasserleitung über 20° Celsius erreichten. Somit konnte ein ausreichender Temperaturgradient in den Versuchsbehältern erzeugt werden. Die Auswertungen zeigten, dass eine Kombination aus Trinkwassertemperatur, Umgebungstemperatur und Sonnenstrahlung die maßgeblichen Einflüsse auf die Temperatur der Kaltwasserleitung waren.

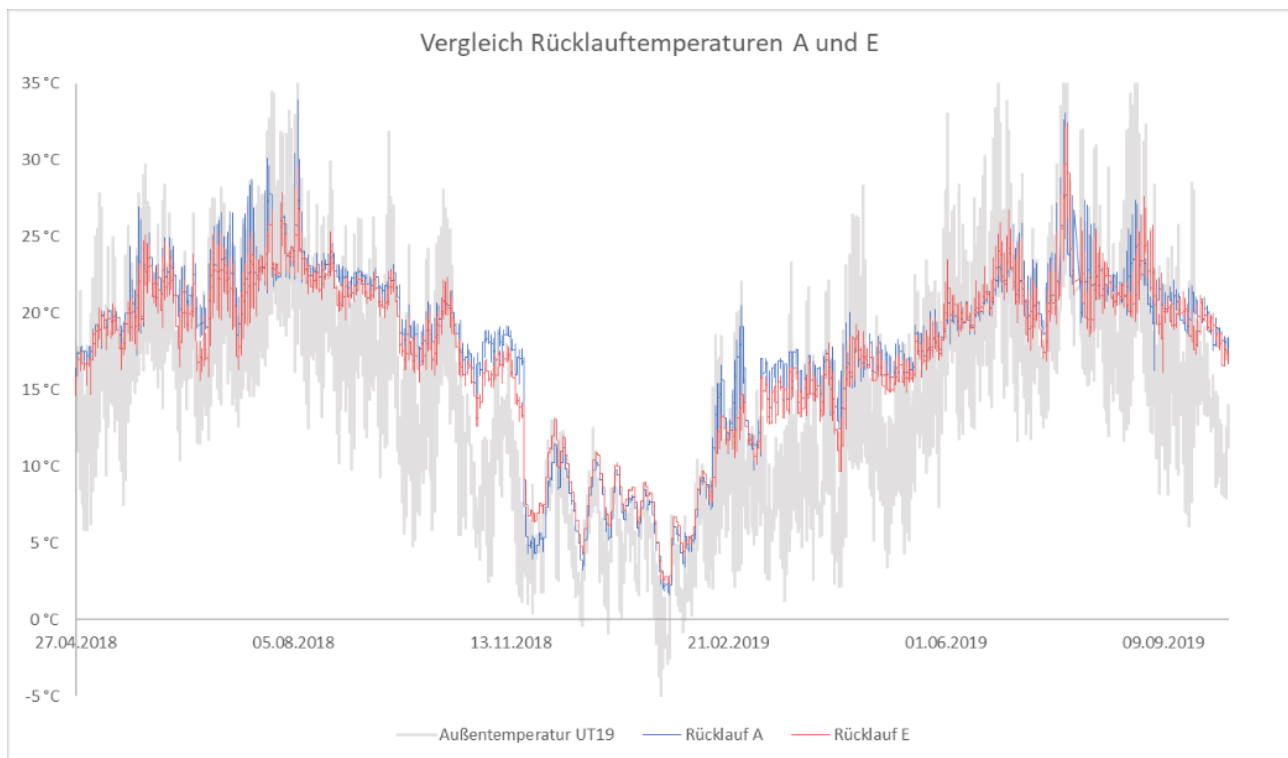


Abbildung 32: Temperaturmessungen an Zulauf (Versuchsbehälter A (blauer Graph)) und Ablauf der Kaltwasserleitung bzw. „Rücklaufleitung“ (Versuchsbehälter E (roter Graph))

Der Temperatursensor CT14 war bereits seit der ersten Wachstumsperiode defekt. Bei den Temperatursensoren AT3 und BT9 wurden über die gesamte Versuchslaufzeit einzelne Messausfälle festgestellt. Die weiteren Sensoren waren bis Juli 2019 funktionsfähig. Ab Juli 2019 gab es weitere vereinzelte Messausfälle der Temperatursensoren DT20 und ET30.

In Versuchsbehälter D war aufgrund eines elektrischen Kurzschlusses die Heizpatrone am 06. Februar 2019 ausgefallen. Als der Defekt erkannt wurde, wurde er unmittelbar am 26.

März 2019 behoben, wodurch die Versuche wie geplant in der zweiten Wachstumsperiode weiter durchgeführt wurden.

Ab Juli 2019 kam es zu weiteren Defekten und Ausfällen an den Heizpatronen, wodurch zeitweise alle Heizpatronen abgestellt waren, da der FI-Schalter im Stromsicherungskasten ausgelöst wurde. Eine schnelle Fehleranalyse und -behebung wurde dadurch erschwert, dass an einem Versuchsbehälter ein Wespennest vorgefunden wurde und dadurch Fehleranalysen und Reparaturarbeiten vor Ort nur sehr eingeschränkt möglich waren. Als Fehler wurde die Heizpatrone des Versuchsbehälters B identifiziert. Die Heizpatrone in Versuchsbehälter B konnte nicht repariert werden. Aus diesem Grund wurde der Versuch in Versuchsbehälter B im Juli 2019 beendet und im September 2019 ausgewertet. Zudem wurde ein defektes Relais in der Regelungsbox festgestellt und ausgetauscht. Der Austausch des Relais erfolgte im IKT, wodurch alle Heizpatronen für wenige Tage erneut abgeschaltet waren. Zusätzlich fiel Anfang August 2019 in Versuchsbehälter D der Temperatursensor zur Regelung der Heizpatrone aus. Der Temperatursensor wurde kurzfristig ausgetauscht. Jedoch kam es anschließend zu weiteren Regelungsausfällen der Heizpatronen, wodurch sich die Heizpatronen kurzfristig auf ca. 90°Celsius aufheizten und der FI-Schalter erneut ausgelöst wurde. Durch weitere Reparaturarbeiten konnten diese Fehler nicht behoben werden. Da sich die Defekte nach bald 18 Monaten Versuchslaufzeit unter Außenwetterbedingungen häuften und die Wachstumsperiode fast abgeschlossen war, wurden die Versuche Anfang September 2019 beendet und im November 2019 ausgewertet.

Im Nachgang konnte als Haupt-Defekt ein Feuchtigkeitseintritt in die Heizpatronen der Versuchsbehälter B und D identifiziert werden, wodurch es zu Kurzschlüssen im System kam. Für die Planung von möglichen zukünftigen Versuchen werden Heizpatronen mit weniger Leistung, Schutzrohre um die Heizpatronen (Schutz gegen Feuchtigkeit und besserer Austausch von defekten Heizpatronen und Temperatursensoren), ein Fale-Safe-Modus in der Regelungsbox sowie eine Datenfernüberwachung empfohlen.

Insgesamt wurden fünf Feuchtemesssensoren in die Versuchsbehälter eingebaut. Drei in Versuchsbehälter A (AF1, AF2 und AF3) und jeweils ein Sensor in Versuchsbehälter C (CF4) und E (EF5). Der Feuchtesensor AF1 in Versuchsbehälter A war im März 2019 nach 11 Monaten und der Feuchtesensor EF5 in Versuchsbehälter E im Februar 2019 nach 10 Monaten Versuchslaufzeit ausgefallen. Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Heizpatronenwärme auf die Bodenfeuchtigkeit und somit den Wärmegradienten konnte somit nicht getroffen werden.

Durch die Auswertung der Feuchtemessungen in Versuchsbehälter A (vgl. Abbildung 33) konnte festgestellt werden, dass in der ersten Wachstumsperiode eine geringe Bewässerung stattgefunden hatte. In der zweiten Wachstumsperiode wurden die Versuchsbehälter ausgiebiger bewässert. Auffällig war der Unterschied zwischen den Feuchtemessungen oberflächennah (AF3) und horizontal neben der Heizpatrone (AF2) in

der ersten Wachstumsperiode mit wenig Bewässerung. Ggf. war dort eine Austrocknung des Bodens durch die höhere Wärme verantwortlich. In der zweiten Wachstumsperiode war, ggf. aufgrund der ausreichenden Bewässerung und somit der Gewährleistung von ausreichender Feuchte in dem gesamten Versuchsbehälter, kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Feuchtemessungen AF2 und AF3 feststellbar. Auch nach Abschaltung der Heizpatronen im August 2019 konnte keine Veränderung der Feuchtigkeit in dem Versuchsbehälter nachgewiesen werden. Der erkennbare Peak im Juni 2019 war vermutlich auf eine sehr starke Bewässerung zurückzuführen. Ein allgemeiner Einfluss von Feuchtigkeitsunterschieden auf den Temperaturgradienten konnte nicht ausgeschlossen werden und sollte in zukünftigen Forschungsvorhaben untersucht werden.

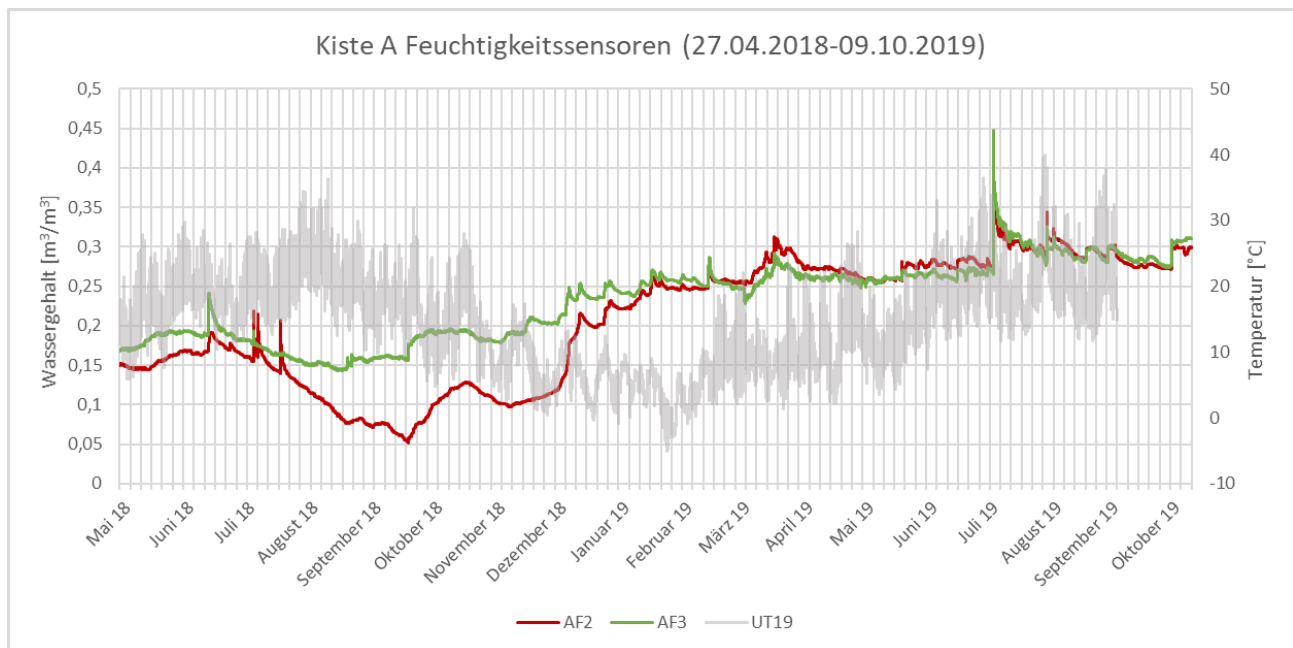


Abbildung 33: Feuchtemessungen beispielhaft an Versuchsbehälter A dargestellt (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 26 (links oben))

6.1.3.3 Versuchsergebnisse

Nach einer Standzeit von April 2018 bis November 2019 (Versuchsbehälter B lediglich bis August 2019) sowie einem erzeugten Temperaturgradienten in den Versuchsbehältern von April 2018 bis August 2019 (Versuchsbehälter B lediglich bis Juli 2019) wurde bei allen Versuchsbehältern ein ausgeprägtes Wurzelwachstum bis unter die Leitungszone festgestellt. Zur Versuchsauswertung wurde eine Siebdruckplatte vor Kopf geöffnet und nach und nach jede Pflanzreihe händisch mit Schaufeln und Harken freigelegt. Dies erfolgte mit großer Vorsicht, um die Wurzelwuchsrichtungen nicht zu verändern und mögliche Setzungen der Temperatur- und Feuchtesensoren messen zu können.

Nach Auswertung aller Pflanzreihen wurde kein Einfluss durch den Wärmegradienten auf die Wurzelwachstumsrichtung festgestellt. Bei neun von 15 Pflanzreihen wurde ein rein vertikales Wachstum über die Leitungszone hinaus bis zur Versuchsbehältersohle identifiziert (vgl. Abbildung 34, links). An der Versuchsbehältersohle stellte sich

anschließend ein horizontales Wurzelwachstum ein (vgl. Abbildung 34, rechts). An vier Pflanzreihen wurde zusätzlich zum vertikalen Wurzelwachstum eine Wachstumstendenz von der warmen zur kalten Leitung festgestellt. Eine Wachstumstendenz von der kalten zur warmen Leitung konnte, neben dem vertikalen Wachstum, an einer Pflanzreihe festgestellt werden. In einer Reihe wurde ein überkreuzendes Wurzelwachstum von warmer zur kalten und von kalter zur warmen Leitung festgestellt (vgl. Anlage 3) [97, S. 21].



Abbildung 34: Vertikales Wachstum bis zur Versuchsbehältersohle auf Seite der Heizpatrone (rote Einkreisung) und auf Seite der Kaltwasserleitung (blaue Einkreisung) (links) und horizontales Wurzelwachstum an der Versuchsbehältersohle (rechts), beispielhaft dargestellt an Versuchsbehälter C - Reihe 2

In Versuchsbehälter D wurde ebenfalls in allen drei Reihen ein vertikales Wurzelwachstum festgestellt. Jedoch wurde in Reihe 2 zusätzlich ein horizontales Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite identifiziert. An der kalten Seite wuchsen diese Wurzeln zusammen mit den Wurzeln des Stecklings der kalten Seite vertikal bis zur Versuchsbehältersohle nach unten (vgl. Abbildung 35, links). In Reihe 3 des Versuchsbehälters D erfolgte das eben beschriebene Wurzelwachstum genau spiegelverkehrt, d.h., dass die Wurzeln horizontal von der kalten zur warmen Versuchsbehälterseite wuchsen und dort dann ebenfalls zusammen vertikal bis zur Versuchsbehältersohle weiterwuchsen (vgl. Abbildung 35, rechts) [97, S. 22].



Abbildung 35: Versuchsbehälter D: Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite in Reihe 2 (links) und kalter zur warmen Seite in Reihe 3 (rechts) [97, S. 22]

Diese Beobachtungen würden bei einzelner Betrachtung vermuten lassen, dass ggf. ein Einfluss auf die Wurzelwuchsrichtung vorlag. Jedoch sind diese Ergebnisse in dem gleichen Versuchsbehälter nur wenige Zentimeter voneinander entfernt festgestellt worden. Daher konnte der Einfluss des Wärmegradienten auf die Wuchsrichtung in diesen Fällen weitestgehend ausgeschlossen werden. Diese Aussage bekräftigte die Auswertung von Versuchsbehälter C, Reihe 1. Hier zeigte sich ein horizontales Wurzelwachstum von der kalten zur warmen **und** von der warmen zur kalten Seite in einer Reihe (vgl. Abbildung 36) [97, S. 23].



Abbildung 36: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (rote Pfeile) und von der kalten zur warmen Seite (blauer Pfeil) in Versuchsbehälter C, Reihe 1 [97, S. 23]

Nur in Versuchsbehälter E wurde in den Reihen 1 und 2 der Großteil des Wurzelgeflechts auf der kalten Seite identifiziert (vgl. Abbildung 37). Die Wurzeln der warmen Seite wuchsen zur kalten Seite, ein vertikales Wurzelwachstum auf der warmen Seite war nur gering ausgeprägt [97, S. 23].



Abbildung 37: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (roter Pfeil) [97, S. 23], Versuchsbehälter E Reihe 1 (links) und Reihe 2 (rechts)

Zudem wuchsen Wurzeln der Reihe 1 auf der kalten Seite relativ nah an der Oberfläche bis zur Reihe 3 (vgl. Abbildung 38). Auch in Versuchsbehälter E war vermutlich nicht der erzeugte Wärmegradient für das Wurzelwachstumsverhalten verantwortlich. Eine näherliegende Antwort war, dass Versuchsbehälter E vor und nach dem Versetzen der Versuchsbehälter mit der warmen Seite immer außen angeordnet war. Dadurch ließ sich vermuten, dass in diesem Bereich durch Sonneneinstrahlung weniger Feuchtigkeit vorhanden war als im kalten Bereich des Versuchsbehälters E. Dies könnte zu dem vermehrten Wurzelwachstum in der kalten Seite geführt haben [97, S. 23].



Abbildung 38: Wurzelwachstum oberflächennah auf der kalten Seite von Reihe 1 bis zur Reihe 3 in Versuchsbehälter E (blauer Pfeil)

Als Ergebnis blieb festzuhalten, dass trotz des steilen Temperaturgradienten mit durchschnittlich ca. 36 °Celsius an der Heizpatrone und bis zu 20 °Celsius über der Kaltwasserleitung, ein Einfluss durch den Wärmeeintrag auf das Wurzelwachstum nicht festzustellen war [97, S. 24]. Tabelle 10 zeigt eine Übersicht über das Wachstumsverhalten der Weidenstecklinge in den Versuchsbehältern und die dazugehörigen Pflanzreihen.

Tabelle 10: Übersicht Wärmeversuche [97, S. 24]

Behälter	Reihe	Wurzelwachstum
A	1	Vertikal
A	2	Vertikal
A	3	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
B	1	Vertikal
B	2	Vertikal
B	3	Vertikal
C	1	Überkreuzend
C	2	Vertikal
C	3	Vertikal
D	1	Vertikal
D	2	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
D	3	Vertikal und Tendenz zur warmen Seite
E	1	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
E	2	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
E	3	Vertikal

6.2 In-situ-Beobachtungen (Typen von Interaktionen)

Ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt in dem hier auszugsweise dargestellten Forschungsvorhaben [6] waren In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen in der Nähe von Baumstandorten, um erstmalig umfangreiche und vergleichbare Praxiserfahrungen hinsichtlich der Interaktion zwischen Baumwurzeln und Fernwärmeleitungen zu sammeln. Zur Akquise der Aufgrabungsmaßnahmen wurden zum einen AGFW-Mitgliedsunternehmen direkt kontaktiert, zum anderen wurde die Branche durch mehrere Akquise-Fachartikel in unterschiedlichen Fachzeitschriften und Newslettern über das Vorhaben und Möglichkeiten zur Teilnahme informiert [11; 12; 13; 175, 176].

In sieben deutschen Städten erfolgten Untersuchungen an elf Baumstandorten. Dabei wurden Baumstandorte ausgewählt, an denen Bäume und Fernwärmeleitungen seit mehreren Jahren im Untergrund interagieren konnten. Sechs Aufgrabungen wurden im Rahmen regulärer Baumaßnahmen beteiligter Fernwärmeversorger begleitet. Ferner wurden an fünf, durch den Projektkreis bestimmten Standorten, anlassbezogene Aufgrabungen durchgeführt. Bei den anlassbezogenen Aufgrabungen wurden eigens für das Forschungsvorhaben Baustellen eingerichtet und Tiefbaumaßnahmen durchgeführt. Die Aufgrabungsarbeiten wurden je nach den örtlichen Verhältnissen mit Baggern, Saugbaggern und/oder Handschachtungen durchgeführt, um den Baum und die Wurzeln nicht zu beschädigen.

Während der Aufgrabungen erfolgte u.a. die Entnahme und Analyse von Bodenproben in der Bettung und im anstehenden Boden und, falls möglich und notwendig, die Entnahme und Analyse von Wurzelproben. Die Vitalität des Baumes wurde im Zuge der Aufgrabungsarbeiten vor Ort bewertet, um so mögliche Beeinträchtigungen der Bäume durch Wärmefelder zu ermitteln. Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmesystemen wurden untersucht, um eventuelle Schädigungen durch Wurzeln an Fernwärmeleitungen oder Auswirkungen von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum zu identifizieren. Die Bodenproben aus der Bettung wurden hinsichtlich Sieblinie [177], Wassergehalt, Korn- und Trockendichte [178] sowie Porenvolumen und Wasserdurchlässigkeit [61] ausgewertet. Das Porenvolumen wird aus der Korn- und Trockendichte ($1 - \text{Trockendichte} / \text{Korndichte}$) berechnet. Die Bodenproben aus dem anstehenden Boden wurden, je nach Boden- und Probenbeschaffenheit, hinsichtlich Wassergehalt, Korn- und Trockendichte [178] sowie Durchlässigkeit [61] und Glühverlust [179] analysiert.

Obwohl die Ausgangssituation der Aufgrabungen identisch waren (Fernwärmeleitung in der Nähe von einem Baumstandort), sind die Ergebnisse der Aufgrabungen bzw. die beobachteten Interaktionsarten zwischen Fernwärmeleitung und Wurzel unterschiedlich. Folgende Interaktionsarten zwischen Fernwärmeleitung und Wurzeln wurden identifiziert:

- Interaktion zwischen Fernwärmeleitung und Wurzel (bei 3 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 6.2.1)
- Interaktion zwischen Bettung der Fernwärmeleitung und Wurzel (bei 4 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 6.2.2)
- Keine Interaktion (bei 4 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 6.2.3)

Folgend ist in Tabelle 11 eine Übersicht der Aufgrabungen mit den wesentlichen Informationen zu Fernwärmeleitung und Baum sowie deren Abstand und Interaktionsart in chronologischer Reihenfolge der Aufgrabungstermine dargestellt.

.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Aufgrabungsergebnisse

Aufgrabung (Art)	Fernwärmerohrleitung						Baum					Abstand zw. Baum/Leitung (horizontal)	Interaktion
	Art	Alter [ca. a]	Außen-Ø ³ [mm]	Tiefe [m]	Betriebstemperatur [°C]		Art	Alter [ca. a]	Höhe [ca. m]	Kronendurchmesser [ca. m]	Stammumfang in 1 m Höhe [m]		
					VL	RL							
1 (BRB)	HK	60	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	Ahorn	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	0,0	keine
2 (BRB)	KMR	25-30	125	0,9	105	63	Platane	20	15	10	1,63	1,6	keine
3 (BRB)	AZR	30	300	3,0	100	n.b.	Eiche	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	1,0	Leitung
4 (BRB)	SMR	45	360	0,8	120	n.b.	n.b. ¹	>45 ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	0,0	keine
							n.b.	<45	10	3	1,16	0,6	keine
5 (BRB)	AZR	35	300	1,55	n.b.	n.b.	Linde	30-40	15-20	8	1,48	4,5	keine ²
6 (BRB)	AZR	35	300	1,55	n.b.	n.b.	Linde	30-40	15-20	8	1,82	4,5	Bettung
7 (AA)	KMR	8	220	1,5	n.b.	n.b.	Platane	100	20	15	2,70	1,5	Bettung
8 (AA)	KMR	7	630	1,8	80-120	45-80	Kastanie	60	11	10	1,30	1,5	Bettung
9 (AA)	KMR	7	630	1,8	80-120	45-80	Kastanie	60	15	10	1,60	1,5	Leitung
10 (AA)	KMR	n.b.	n.b.	1,5	80-130	60-80	Platane	95	15	23	2,67	2,2	Bettung
11 (AA)	KMR	41	n.b.	1,0	80-130	60-80	Platane	80	15	23	2,20	2,4	Leitung

BRB: Begleitung regulärer Baumaßnahme; AA: Anlassbezogene Aufgrabung

KMR: Kunststoffmantelrohr; AZR: Asbestzementrohr; SMR: Stahlmantelrohr; HK: Haubenkanal VL: Vorlauf RL: Rücklauf

n.b.: nicht bekannt

¹: Baum wurde vor Eintreffen der Projektbearbeiter entfernt.

²: Die Fernwärmeleitung wurde vor Eintreffen der Projektbearbeiter entfernt.

³: Die Angabe des Außendurchmessers dient als Anhaltspunkt zur Abschätzung der Rohrdimension. Sofern möglich, wurde dieser in situ gemessen, falls dies nicht möglich war, wurden die Maße aus der entsprechenden Norm entnommen.

Hinweise zu den Indizes ¹ und ²:

Vereinzelt war es dem Projektteam erst bei fortgeschrittenem Baufortschritt möglich an den Aufgrabungen teilzunehmen. Drei Bäume (Aufgrabung Nr. 1, 3 und 4) wurden bereits vor den Aufgrabungsarbeiten bzw. vor Eintreffen des Projektteams gefällt und entfernt. Falls möglich wurde die Baumart anhand der Aussagen des örtlichen Fernwärmeversorgungsunternehmens oder Grünflächenamtes dokumentiert. Angaben zu Baumalter und -höhe sowie Kronendurchmesser und Stammumfang konnten in diesen Fällen nicht ermittelt werden. Bei Aufgrabung Nr. 5 wurde bereits vor Eintreffen der Projektbearbeiter die Fernwärmerohrleitung und Bettung entfernt. An der Baugrubenwand konnten keine Wurzeln im Bereich der Bettung festgestellt werden. Die Rohrleitungstiefe wurde wenige Meter entfernt an einem noch nicht entfernten Rohrleitungsstück in derselben Baugrube gemessen.

Betriebsparameter, Rohrleitungsart und -alter sowie -außendurchmesser wurden durch die Fernwärmeversorgungsunternehmen mitgeteilt. Die Rohrleitungstiefe wurde von Geländeoberkante bis zur Oberkante der Rohrleitung gemessen. Die Baumart wurde durch einen Biologen bestimmt. Das Baumalter wurde durch das örtliche Fernwärmeversorgungsunternehmen oder das Grünflächenamt mitgeteilt. Baumhöhe, Kronendurchmesser und Stammumfang bei ein Meter Höhe wurden vor Ort gemessen. Der Abstand zwischen Baum und Fernwärmeleitung sowie die Interaktionsart wurden während der Aufgrabungen dokumentiert.

Tabelle 11 zeigt die Vielfalt der durchgeführten Aufgrabungen. Es wurden Aufgrabungen an vier unterschiedlichen Rohrleitungsarten durchgeführt. Das Alter der Rohrleitungen variierte von wenigen Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten. Die Außendurchmesser unterschieden sich von 125 bis zu 600 Millimetern. Auch die Rohrleitungstiefen konnten von knapp unter einem Meter bis zu drei Metern Tiefe festgestellt werden. Die durchschnittlichen Betriebstemperaturen wurden bei sieben von elf Aufgrabungen durch den jeweiligen Netzbetreiber ermittelt. Die Betriebstemperaturen variieren bei den Vorläufen von 80 bis 130° Celsius und bei den Rückläufen von 45 bis 80° Celsius.

Bei zehn von elf Aufgrabungen wurde ein Baum in der Nähe der Fernwärmeleitung, bei Aufgrabung Nr.4 wurden zwei Bäume im unmittelbaren Umfeld der Fernwärmeleitung festgestellt. Es erfolgten Aufgrabungen an fünf unterschiedlichen Baumarten. Das Baumalter konnte zwischen 20 und 100 Jahren geschätzt werden. Die Baumhöhen variierten von 10 bis 20 Metern, die Kronendurchmesser von 3 bis 23 Metern und die Stammumfänge von 1,16 bis 2,7 Metern.

Fünf Fernwärmeleitungen wurden mehrere Jahrzehnte nach Pflanzung des Baumes installiert. Bei Aufgrabung Nr. 2 wurde der Baum nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Bei Aufgrabung Nr.4 wurde ein Baum vor und ein Baum nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Bei den weiteren Aufgrabungen war eine genaue Aussage, ob Baum oder Fernwärmeleitung zuerst gepflanzt bzw. gebaut worden waren, nicht abschließend möglich.

Bei drei Aufgrabungen wurden Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung festgestellt, bei vier Aufgrabungen Interaktionen zwischen Wurzeln und Bettungsmaterial und bei den restlichen vier Aufgrabungen konnte keine Interaktion festgestellt werden. Nur bei 63 % wurde somit eine Interaktion festgestellt, obwohl bei allen durchgeführten Aufgrabungen durch die äußeren Rahmenbedingungen eine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmesystem erwartet wurde. Bei reiner Betrachtung der Fernwärmerohrleitungs- und Bauparameter in Tabelle 11 war nicht erkennbar, warum welche Interaktion eingetreten ist.

Daher wird in den folgenden Unterkapiteln eine Beschreibung und Diskussion der Aufgrabungsergebnisse nach den Interaktionsarten unterteilt, um erste Rückschlüsse diskutieren zu können, warum bei z.T. vergleichbaren Rohr- und Bauparametern unterschiedliche Interaktionsarten festgestellt werden konnten. Dazu werden insbesondere

die ermittelten Bodenkennwerte ausgewertet und dargestellt. Nur bei Aufgrabung Nr.1 konnten aus logistischen Gründen keine Bodenproben entnommen werden. Die Bodenschichten und dazugehörigen Bodenkennwerte je Aufgrabung werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

6.2.1 Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen

Bei den Aufgrabungen Nr. 3, Nr. 9 und Nr. 11 wurden Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung festgestellt. Jedoch ist die Ursache der Interaktion wie folgt zu unterscheiden:

- Bei den Aufgrabungen Nr. 3 und Nr. 11 sind die Baumwurzeln zur Fernwärmeleitung gewachsen.
- Bei Aufgrabung Nr. 9 war zunächst die Baumwurzel vorhanden, die für den Neubau einer Fernwärmerohrleitung gekappt wurde.

Aus diesem Grund werden die Beobachtungen der Aufgrabungen folgend separat beschrieben.

Aufgrabung Nr. 3⁵

Bei der Aufgrabung Nr. 3 konnte das Wurzelwachstum einer Eiche an eine Fernwärmerohrleitung (Asbestzementleitung, Vor- und Rücklauf in 300 Zentimeter Tiefe unter GOK) festgestellt werden. Es konnte nicht ermittelt werden, ob zuerst die Fernwärmeleitung gebaut oder der Baum gepflanzt worden war. In Abbildung 39 ist deutlich erkennbar, dass die Wurzeln von Richtung GOK in die Tiefe wachsen, die Rohrleitungsoberfläche berühren, vertikal an der Rohroberfläche entlang wachsen und weiter vertikal in tiefere Bodenschichten wachsen.

⁵ Die Aufgrabungsergebnisse wurden erstmalig in einem unveröffentlichten Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ durch Grimm (AGFW) beschrieben, in [6] modifiziert durch den Autor.



Abbildung 39: Blick von der GOK in den Leitungsraben: Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmerohrleitungen, Vorlauf (links) und Rücklauf (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert

Da der Baum bereits entfernt worden war, konnte keine Analyse der Vitalität des Baumes durchgeführt werden. Der Abstand zwischen Baumstammachse und Fernwärmerohrleitung betrug ca. einen Meter. Als Bodenhorizonte ist in den oberen zehn Zentimetern eine schluffige Vegetationstragschicht und darunter ein sandig-kiesiger Boden festgestellt worden. Bei der Analyse von Bodenproben bei 160 Zentimeter unter GOK (Sieblinie S, g, u') und 300 Zentimeter unter GOK (Sieblinie S, fg', mg') wurden keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich Korndichte ($2,8 \text{ g/cm}^3$), Trockendichte ($1,7\text{-}1,8 \text{ g/cm}^3$), Porenvolumen (34-39 Vol.-%) und Durchlässigkeit (5×10^{-5} bis $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) festgestellt. Der Wassergehalt betrug 6,9 % bei 160 Zentimeter Tiefe und 3,4 % in 300 Zentimeter Tiefe.

Der Wurzel lag somit über die Tiefe ein nahezu gleichbleibender Boden vor, der vertikal durchwurzelt wurde. Wurzeltiefen bis zu drei Metern sind bei (Stiel-)Eichen nach [112] bekannt. Bis zu drei Metern Tiefe konnten die Wurzeln bei Aufgrabung Nr. 3 erfasst werden. Jedoch scheinen die Wurzeln auch unterhalb der Leitung weiter in die Tiefe zu wachsen. Bis zu welcher tatsächlichen Tiefe die Wurzeln bei Aufgrabung Nr. 3 gewachsen sind, konnte im Rahmen der Aufgrabungsarbeiten nicht ermittelt werden.

Aufgrabung Nr. 11

Aufgrabung Nr. 11 wurde an einer ca. 80 Jahre alten Platane durchgeführt, die an zwei Seiten von einer Kunststoffmantelrohr-Trasse umgeben ist. Die Erdbauarbeiten erfolgten mittels Saugbagger. Da sich die Aufgrabungen im Straßenbereich befanden, war die Vorgabe, die Kopflöcher so klein wie möglich zu halten. Aufgrund der dadurch resultierenden kleinen Baugruben konnten nur gestörte Bodenproben entnommen werden. Es wurden zwei Kopflöcher hergestellt, um an beiden Trassenabschnitten (Kopfloch 1: Abstand Baumstammachse bis KMR 2,4 Meter; Kopfloch 2: Abstand Baumstammachse bis KMR 1,8 Meter) das Wurzelwachstum beobachten zu können (vgl. Abbildung 40).

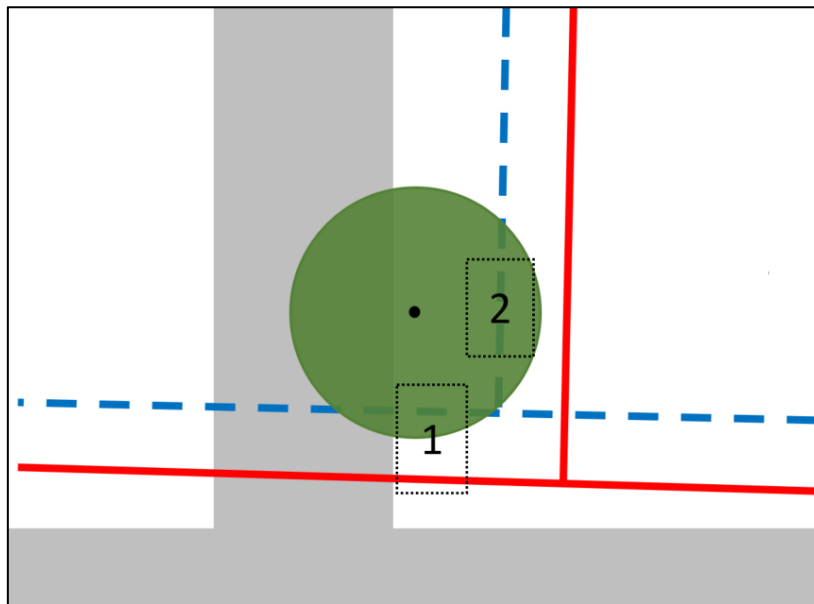


Abbildung 40: Skizze von Trassenverlauf, Baumstandort mit ungefährender Lage der Kopflöcher 1 und 2 (erstellt durch Grimm)

Es konnte ein ausgeprägtes Wurzelgeflecht unmittelbar unterhalb der Asphalttschicht bei Kopfloch 1 festgestellt werden. Zwischen GOK und Bettung wurden vereinzelt Fein- und Grobwurzeln festgestellt. Innerhalb der Bettung wurden weitere Feinwurzeln ermittelt (vgl. Abbildung 41, links).

Bei Kopfloch 2 zeigten sich zwischen GOK und Bettung mehrere Feinwurzeln und Grobwurzeln. Zwischen Vor- und Rücklauf und an den Rohroberflächen und den KMR-Muffen konnten Feinwurzeln festgestellt werden (vgl. Abbildung 41, rechts). Ein Einwuchs der Wurzeln in die Fernwärmemuffe oder eine Beschädigung des Rohraußenmantels konnte nicht festgestellt werden.

Da, im Verhältnis zu den Wurzeln oberhalb der Bettung, kleinere Feinwurzeln innerhalb der Bettung festgestellt wurden, ist es wahrscheinlich, dass diese Wurzeln erst im Nachgang des Einbaus der Fernwärmeleitung in die Bettung und an die Fernwärmeleitung gewachsen sind.



Abbildung 41: Feinwurzeln in der Bettung bei Kopfloch 1 (links) und Feinwurzeln an und zwischen Vor- und Rücklauf bei Kopfloch 2 (rechts)

Es wurde in beiden Kopflöchern jeweils eine gestörte Probe entnommen. In beiden Kopflöchern war von GOK bis 0,2 Metern Tiefe eine Asphaltenschicht mit Schottertragschicht vorhanden. In 0,6 Metern unter GOK konnte in Kopfloch 1 ein Sand mit Kiesanteilen bestimmt werden. Die Durchlässigkeit lag bei 1×10^{-5} m/s, die Korndichte bei $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte bei $1,7 \text{ g/cm}^3$ und der Wassergehalt bei 1,8 %. Das Porenvolumen lag bei 34 Vol.-%.

In Kopfloch 2 konnte im Bettungsbereich von 0,6 Metern bis zur Grabensohle ein Sand mit schwachen Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen bestimmt werden. Die Durchlässigkeit wurde zu 1×10^{-6} m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$ und die Trockendichte zu $1,7 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. Das Porenvolumen lag bei 35 Vol.-%. Der Wassergehalt konnte, wie nach den Aufgrabungsarbeiten zu erwarten (vgl. hoher Grundwasserstand in Abbildung 41, rechts), höher als bei Kopfloch 1 festgestellt werden und wurde zu 7,9 % bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [112] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen, wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 9

Bei der anlassbezogenen Aufgrabung Nr. 9 wurde eine im Jahr 2013 neu verlegte Fernwärmetrasse (KMR) an einer bestehenden Kastanie (ca. 60 Jahre) in einem Abstand von 1,5 Metern zur Baumachse untersucht. Bei den Neubaumaßnahmen im Jahr 2013 war die Kappung einer Starkwurzel kurz vor der Rohroberfläche notwendig (vgl. Abbildung 42, links). Bei der Aufgrabung im Rahmen des Forschungsvorhabens [6] im Jahr 2020 konnte bis zur o.g. Starkwurzel und Rohroberfläche aufgegraben werden und die Entwicklung des Wurzelwachstums über sieben Jahre unmittelbar an der Fernwärmeleitung untersucht

werden. Dabei zeigte sich zunächst, dass die Starkwurzel wieder vereinzelt bis zur Rohroberfläche neu ausgetrieben ist (vgl. Abbildung 42, rechts).



Abbildung 42: Gekappte Starkwurzel nah an der Rohroberfläche während der Neubaumaßnahmen der Fernwärmetrasse 2013 (links; Bildquelle: ZORN Sachverständigen Büro Gartenbau) und an der Rohroberfläche während der anlassbezogenen Aufgrabung 2020 (rechts, gelber Pfeil zeigt die Rohroberfläche)

Durch Begutachtung der Wurzel durch einen Baumsachverständigen im Leitungsraben konnte festgestellt werden, dass die Wurzel in den vorderen ca. 40 Zentimetern abgestorben war. Dieses Wurzelstück wurde daraufhin entfernt, um die Ursache des Wurzelsterbens zu analysieren. An dem Wurzelstück wurde Weißfäule durch einen holzabbauenden Pilz, festgestellt, welche durch mechanische Verletzungen der Wurzel begünstigt wird. Da das Wurzelstück verhältnismäßig sehr leicht war, war zu vermuten, dass der Pilz bereits über mehrere Jahre das Wurzelholz abbaut und somit vermutlich die mechanische Verletzung der Wurzel bei den Baumaßnahmen im Jahr 2013 verursacht wurde. Das Absterben der Wurzel aufgrund der Wärmeabstrahlung durch die Fernwärmeleitung war somit eher auszuschließen. Diese These wird durch den Neuaustrieb der Wurzel vor deren Absterben gestützt.

Im Zuge des Neubaus der Fernwärmetrasse im Jahr 2013 wurde nach Absprache zwischen Fernwärmeversorger, Grünflächenamt und Baumsachverständigenbüro über der Fernwärmetrasse im Wurzelbereich der Bestandsbäume großvolumig Baumsubstrat von der GOK bis zu einer Tiefe von 1,5 Metern eingebaut. Bei der Aufgrabung 2020 zeigte sich, dass der Großteil der Wurzelmasse (Feinst- bis Grobwurzeln) in diesem Substrat verblieben ist (vgl. Abbildung 43, links). Zusätzlich zur o.g. Starkwurzel, die bereits im Jahr 2013

vorhanden war, wurden nur vereinzelt neu gewachsene Feinwurzeln in der Sandbettung festgestellt (vgl. Abbildung 43, rechts).



Abbildung 43: Großteil der Wurzelmasse in Baumsubstrat bis 1,5 Meter unter GOK (links) und seit 2013 vereinzelt neu gewachsene Feinwurzeln in der Bettung (rechts)

Die Analyse der Bodenproben ergab, dass das Baumsubstrat ein schluffiger, stark kiesiger Sand und die Bettung ein breitgestufter Sand mit Fein-, Mittel- und Grobanteilen war. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Bodensubstrat in 0,6 Metern von ca. 11,0 M.-% und Sandbettung in 1,6 Metern von ca. 3,5 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $1,4$ bis $1,5 \times 10^{-4}$ m/s, die Korndichte zu $2,7$ g/cm³, die Trockendichte zu $1,6$ g/cm³ und das Porenvolumen zu 41 bis 42 Vol.-% bestimmt. Der Glühverlust des Substrates ergab 3,6 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,6 Metern festgestellt werden. Bei Kastanien ist nach [112] mit Wurzeltiefen bis zu drei Metern zu rechnen. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Die Vitalität des Baumes wurde seit 2013 in unregelmäßigen Abständen beobachtet und es konnten keine negativen Einflüsse durch die Wärmefelder im Erdreich festgestellt werden.

6.2.2 Interaktion von Wurzeln und Bettung

Bei den Aufgrabungen Nr. 6, Nr. 7, Nr. 8 und Nr. 10 konnten Interaktionen zwischen (Sand-)Bettung und Wurzeln festgestellt werden. Dabei konnten bei diesen Aufgrabungen zwei unterschiedliche Interaktionsarten zwischen Bettung und Wurzeln festgestellt werden:

- (Fein-)Wurzeln in der Bettung, die vermutlich nach Bau der Fernwärmetrasse in die Bettung gewachsen sind (vgl. Aufgrabungen Nr. 6, Nr. 8 und Nr. 10)
- Wurzeln in der Bettung, die vermutlich bereits beim Bau der Fernwärmetrasse vorhanden waren (vgl. Aufgrabung Nr. 7).

Aufgrabung Nr. 8

Aufgrabung Nr. 8 wurde an einer Kastanie wenige Meter entfernt von Aufgrabung Nr. 9 (vgl. Kapitel 6.2.1) an derselben Fernwärmetrasse durchgeführt. Im Gegensatz zu Aufgrabung Nr. 9 waren bei Aufgrabung Nr. 8 bei Neubau der Fernwärmetrasse im Jahr 2013 keine größeren Wurzeln im Leitungsbereich vorhanden, die weiterhin im Leitungsgaben bzw. der Bettung verbleiben mussten. Somit zeigte sich das bereits bei Aufgrabung Nr. 9 beschriebene Wurzelbild, dass im Bereich des Baumsubstrates der Großteil der Wurzelmasse (Feinst- bis Grobwurzeln) festgestellt werden konnte. In der Bettung wurden nur einzelne Feinwurzeln ermittelt.

Auch hier wurden Bodenproben aus dem Substrat und aus der Bettung entnommen. Das Baumsubstrat war ein schluffiger, stark kiesiger Sand und die Bettung ein breitgestufter Sand mit Fein-, Mittel- und Grobanteilen. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Bodensubstrat in 0,8 Metern Tiefe von ca. 10,7 bis 12,7 M.-% und Sandbettung in 1,9 Metern Tiefe von ca. 3,3 bis 3,4 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $1,1$ bis $1,0 \times 10^{-4}$ m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $1,6 \text{ g/cm}^3$ und das Porenvolumen zu 40 Vol.-% bestimmt. Der Glühverlust des Substrates ergab 3,0 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,9 Metern festgestellt werden. Bei Kastanien ist nach [112] mit Wurzeltiefen bis zu drei Metern zu rechnen. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Die Vitalität des Baumes wurde seit 2013 in unregelmäßigen Abständen beobachtet und es konnten keine negativen Einflüsse durch die Wärmefelder im Erdreich festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 6

Bei Aufgrabung Nr. 6 konnte das Wurzelwachstum einer ca. 30 bis 40 Jahre alten Linde in die Sandbettung einer 3,9 Meter entfernten Fernwärmetrasse festgestellt werden. Die Asbestzementleitung wurde nach Pflanzung der Linde errichtet. Bei den regulären Baumaßnahmen wurde die Asbestzementleitung durch eine Kunststoffmantelrohrleitung ersetzt. In der Nähe der Fernwärmeleitung konnten wenige Feinwurzeln in der Bettung festgestellt werden (vgl. Abbildung 44, links). Bei dieser Aufgrabung war besonders, dass wenige Zentimeter über der Fernwärmeleitung ein Telekommunikationskabel in derselben Bettung verlegt war. An diesem Telekommunikationskabel konnte über die gesamte Strecke der Aufgrabung eine axial zum Kabel wachsende Wurzel festgestellt werden (vgl. Abbildung 44, rechts).



Abbildung 44: Feinwurzeln in Bettung der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil zeigt zur Fernwärmeleitung, eingekreist sind die Feinwurzeln, rechts im Bild das Telekommunikationskabel) und Wurzeln, die an dem Telekommunikationskabel axial entlang wuchsen (rechts; ohne Telekommunikationskabel)

Die Sandbettung lag in einer Tiefe von 1,2 bis 1,8 Metern unter GOK. Von GOK bis zur Sandbettung war eine Vegetationstragschicht vorhanden. In der Vegetationstragschicht konnten an der Baugrubenwand vereinzelt Wurzeln (Feinst- bis Schwachwurzeln) festgestellt werden. Ein augenscheinlicher Unterschied des Wurzelwachstums zwischen Vegetationstragschicht und Sandbettung, mit Ausnahme des Wurzelwachstums entlang des Telekommunikationskabels, war nicht ersichtlich.

Die Vegetationstragschicht war ein schluffiger Sand mit schwachen Kiesanteilen und die Bettung ein Feinsand mit mittelsand- und schluffigen Anteilen. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Vegetationstragschicht in 0,25 Metern von ca. 13,0 M.-% und Sandbettung in 1,5 Metern von ca. 4 bis 4,5 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $9,5 \times 10^{-6}$ m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $1,6 \text{ g/cm}^3$ und das Porenvolumen zu 43 Vol.-% bestimmt. Die Trockendichte der Vegetationstragschicht lag bei $1,7 \text{ g/cm}^3$. Der Glühverlust der Vegetationstragschicht ergab 3,4 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,6 Metern festgestellt werden. Bei Linden ist nach [112] mit Wurzeltiefen bis zu 2,5 Metern zu rechnen. Linden sind Herzwurzler, wodurch Wurzeln auch außerhalb des Kronendurchmessers durchaus zu erwarten sind. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen, wurde nicht ermittelt.

Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 7

Aufgrabung Nr. 7 wurde an einem Z-Sprung einer Kunststoffmantelrohr-Trasse in 1,2 Metern Abstand zu einer ca. 100 Jahre alten Platane durchgeführt. Die Kunststoffmantelrohrleitung wurde im Jahr 2012 errichtet, wodurch vermutlich ein Teil der (stärkeren) Wurzeln zu diesem Zeitpunkt bereits in der Nähe der Fernwärmeleitung vorhanden war. Wenige Zentimeter von der Fernwärmeleitung entfernt konnte z.B. in der Grabensohle eine 19 Zentimeter dicke Wurzel ermittelt werden, die aufgrund ihrer Größe bereits vor Neubau der Fernwärmeleitung vorhanden sein musste (vgl. Abbildung 45, links). Zudem wurden von GOK bis zur Grabensohle in 1,5 Metern Tiefe weitere Feinst- bis Starkwurzeln festgestellt, bei denen jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Wurzeln auch im Nachgang des Fernwärmeneubaus in die Bettung gewachsen sind (vgl. Abbildung 45, rechts).



Abbildung 45: Starkwurzel (19 Zentimeter) neben der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil Wurzel, gelber Pfeil Fernwärmeleitung) und Wurzelwachstum oberhalb der Fernwärmeleitung (rechts)

Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort konnte nur eine kleine Baugrube mittels Saugbagger freigelegt werden. Von GOK bis 0,4 Metern Tiefe war eine Schottertragschicht vorhanden, an der jedoch keine Bodenprobe entnommen werden konnte. Von 0,4 Metern bis unter die Fernwärmeleitung (1,5 Meter unter GOK) war vermutlich als Bettung ein Feinsand mit schwachen schluffigen und starken mittelsandigen Anteilen vorhanden. In der Bettung konnte eine gestörte Bodenprobe entnommen werden. Die Durchlässigkeit wurde zu $7,5 \times 10^{-6}$ m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, der Wassergehalt zu 5,9 % und der Glühverlust zu 0,5 M.-% bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [112] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere

Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 10

Aufgrabung Nr. 10 wurde an einer Kunststoffmantelrohrleitung in 2,2 Metern Abstand von einer ca. 95 Jahre alte Platane durchgeführt. Die Erdbauarbeiten erfolgten mittels Saugbagger. Da sich die Aufgrabungen im Straßenbereich befanden, war die Vorgabe, dass Kopfloch so klein wie möglich zu halten. Aufgrund der dadurch resultierenden kleinen Baugrube konnten nur gestörte Bodenproben entnommen werden. Bei der Aufgrabung zeigten sich zwischen GOK und Bettung mehrere Feinwurzeln und eine Starkwurzel mit einem ovalen Umfang von 13 Zentimetern Breite und 26 Zentimetern Höhe (vgl. Abbildung 46, links). In der Bettung der Fernwärmeleitung konnten weitere Feinwurzeln festgestellt werden (vgl. Abbildung 46, rechts). Da, im Verhältnis zu den Wurzeln oberhalb der Bettung, nur kleinere Feinwurzeln in der Bettung festgestellt wurden, ist es wahrscheinlich, dass diese Wurzeln erst im Nachgang des Einbaus der Fernwärmeleitung in die Bettung gewachsen sind.



Abbildung 46: Fein- und Starkwurzel oberhalb der Bettung (links) und Feinwurzeln in der Bettung (rechts, u.a. gelber Pfeil)

Es wurde eine gestörte Bodenprobe im Leitungsraben entnommen. Von GOK bis 0,6 Metern war ein Sand-Kies vorhanden. Die Durchlässigkeit wurde zu 1×10^{-5} m/s, die Korndichte zu $2,6 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $2,0 \text{ g/cm}^3$ und der Wassergehalt zu 1,7 % bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [112] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

6.2.3 Keine Interaktionen zwischen Wurzeln und FW-Leitung/Bettung

Bei den Aufgrabungen Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4 und Nr. 5 konnte keine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung bzw. -bettung festgestellt werden, obwohl die oberirdischen Randbedingungen (u.a. Abstand zwischen Fernwärmeleitung und Baum, Rohrleitungs- und Baumalter) eine Interaktion vermuten ließen. Alle Aufgrabungen ohne feststellbare Interaktionen wurden als Begleitungen regulär stattfindender Baumaßnahmen durchgeführt. Die (vermutlichen) Gründe für die nicht festgestellten Interaktionen waren bei jeder der o.g. Aufgrabungen unterschiedlich. Folgend werden die Aufgrabungen kurz individuell beschrieben und die möglichen Ursachen für die fehlende Interaktion diskutiert.

Aufgrabung Nr. 1⁶

Aufgrabung Nr. 1 erfolgte an einem Haubenkanal unmittelbar unter einem Ahorn. Die Aufgrabung erfolgte, da vermutet wurde, dass ein Wurzeleinwuchs zu einem Leck an einer Fernwärmeleitung in einem Haubenkanal geführt hatte. Weiter wurde vermutet, dass der Wasserverlust aus dem Leck das Wurzelwerk und die Standsicherheit des Baumes gefährdet. Aus diesem Grund wurde der Baum entfernt und die Fernwärmetrasse soll zukünftig in die Fahrbahn verlegt werden, um mögliche Schäden durch Fernwärmeleckagen an weiteren Bäumen der Allee zu verhindern [vgl. [180]]. Da die Aufgrabungen aus o.g. Gründen sehr kurzfristig durchgeführt werden mussten, konnte das umfassende Prüfprogramm in diesem Fall nicht durchgeführt werden, sondern nur eine teilweise Beobachtung der Aufgrabungsarbeiten. Die Aufgrabungen zeigten jedoch keinerlei Interaktion von Baumwurzeln an oder im Haubenkanal (vgl. Abbildung 47). Das Wurzelwachstum beschränkte sich laut Aussage der Personen vor Ort auf Bereiche in der Oberflächennähe.

⁶ Die Aufgrabungsergebnisse wurden erstmalig in einem unveröffentlichten Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ durch Grimm (AGFW) beschrieben, in [6] modifiziert durch den Autor.



Abbildung 47: Blick in Haubenkanal, kein Wurzeleinwuchs sichtbar (links, Bildquelle AGFW)

Aufgrabung Nr. 2⁷

Aufgrabung Nr. 2 wurde an einer Platane durchgeführt, die durch einen Z-Sprung der Fernwärmetrasse an zwei Seiten von einer Fernwärmeleitung in einem Abstand von 1,6 Metern umschlossen wurde. Aus diesem Grund wurde hier im Vorfeld eine Interaktion zwischen der Fernwärmeleitung und Baumwurzeln vermutet. Jedoch konnten während der Aufgrabungsarbeiten nur vereinzelte Feinwurzeln an der Grabenwand festgestellt werden (vgl. Abbildung 48, links), jedoch keine Wurzeln in der Bettung oder an der Fernwärmeleitung. Als Ursache für die nicht vorliegende Interaktion konnten die ungünstigen Wachstumsbedingungen in den oberen Bodenschichten vermutet werden. Die Fläche um den Baum war, bis auf eine Baumscheibe von ca. einem Meter Durchmesser, versiegelt und stark verdichtet. Zudem war die Baumscheibe hochgesetzt, wodurch kein (Regen-)Wasser von der befestigten Fläche zur Baumscheibe fließen und dort versickern konnte (vgl. Abbildung 48, rechts) [96, S. 52f.].

⁷ Die Aufgrabungsergebnisse wurden erstmalig in einem unveröffentlichten Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ durch Grimm (AGFW) beschrieben, in [6] modifiziert durch den Autor auf Basis von [96, S. 52f.].



Abbildung 48: Vereinzelt Feinwurzeln an Grabenwand (links), hochgesetzte Baumscheibe (rechts)

Als Bodenhorizonte konnte eine Schottertragschicht bis 0,3 Meter unter GOK, Grabenverfüllung von 0,3 bis 0,9 Meter unter GOK und darunter eine Sandbettung festgestellt werden. Aus der Grabenverfüllung und der Sandbettung wurden Bodenproben entnommen. Die Grabenverfüllung war ein Sand mit Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen. Die Bettung war ein Sand mit schwachen Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen. Es war ein geringer Unterschied des Wassergehaltes zwischen Grabenverfüllung bei 0,75 Metern von ca. 6,2 M.-% und Sandbettung in 0,94 Metern von ca. 5,8 bis 6 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden von 4 bis 1×10^{-7} m/s, die Korndichte zu 2,8 g/cm³, die Trockendichte zu 1,7 bis 1,9 g/cm³ und das Porenvolumen zu 31 bis 39 Vol.-% bestimmt.

Trotz dieser Bedingungen war die Platane, ähnlich wie die umliegende Vegetation, in einem vital guten Zustand, obwohl die Aufgrabungsarbeiten nach einer langen Trocken- und Hitzeperiode stattfanden. Aus diesen Gründen wurde vermutet, dass sich die Wurzeln in einer tiefer liegenden Bodenschicht mit Wasser- und Nährstoffen versorgen konnten [96, S. 53].

Aufgrabung Nr. 4

Bei Aufgrabung Nr. 4 waren zwei Bäume in der Nähe einer Fernwärmeleitung aus dem Jahr 1974. Beide Bäume wurden auf einem privaten Grundstück vermutlich nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Baum 1 war bereits beim Eintreffen des Projektteams entfernt. Baum 2 war noch vorhanden (vgl. Abbildung 49, links). Bei den Aufgrabungen konnten Wurzeln beider Bäume oberhalb der Fernwärmetrasse im Oberboden bis zu einer Tiefe von 0,2 Metern festgestellt werden. Die Fernwärmetrasse wurde dabei durch die Wurzeln diagonal gequert („Ausdehnung“: Länge 5m, Breite 2 m von Baum 2). Ein Einwuchs in die Leitungszone konnte nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 49, rechts).



Abbildung 49: Baum 1 direkt an Fernwärmetrasse (links), Wurzeln in 0,2 Metern Tiefe unter GOK oberhalb der Fernwärmetrasse in ca. zwei Metern Abstand von Baum 1 und fünf Metern Abstand von Baum 2 (rechts)

Es wurden Bodenproben aus dem Oberboden (Sieblinie S, u, t', g') und der Sandbettung (Sieblinie mS, gs*, fs', g') entnommen. Der Wassergehalt ist beim Oberboden mit 13 bis 15 % wesentlich höher als in der Bettung mit 3 %. Die Korndichte des Oberbodens ist zu 2,5 bis 2,7 g/cm³ und der Glühverlust zu 3,4 M.-% festgestellt worden. Ein Einfluss auf die Vitalität des Baums 1 durch die Fernwärmeleitung war nicht erkennbar. Baum 2 war bereits gefällt, wodurch eine Aussage zur Vitalität des Baumes nicht mehr möglich war.

Aufgrabung Nr. 5

Aufgrabung Nr. 5 wurde im Rahmen einer Fernwärmetrassen-Erneuerung durchgeführt, zu der auch die Aufgrabung Nr. 6 gehörte (vgl. Kapitel 6.2.2). Jedoch war hier bei Eintreffen des Projektteams der Leitungsgraben bereits ausgehoben. Mögliche Wurzeln konnten somit nur an der Grabenwand betrachtet werden. Dabei konnten Wurzeln in der Vegetationstragschicht (vgl. Abbildung 50, links) und im Übergang zwischen Vegetationstragschicht und Sandbettung festgestellt werden. Auf Höhe der Sandbettung konnten keine Wurzeln an der Grabenwand ermittelt werden (vgl. Abbildung 50, rechts).



Abbildung 50: Wurzelgeflecht in Vegetationstragschicht (links) und keine sichtbaren Wurzeln in Sandbettung (rechts)

Es wurden in der Vegetationstragschicht und in der Sandbettung (unterhalb der ehemaligen Rohrachse) Bodenproben entnommen. Die Vegetationstragschicht war ein Sand mit Schluff- und Kiesanteilen. Die Bettung ein Sand mit Schluffanteilen und schwachen Kiesanteilen. Der Wassergehalt lag in der Vegetationstragschicht in 0,1 bis 0,3 Metern Tiefe bei 13,1 % und in der Sandbettung bei 1,9 Metern Tiefe bei 7,2 bis 9,5 %. In der Vegetationstragschicht wurde der Glühverlust zu 4,8 M.-% bestimmt. Die Trockendichte der Sandbettung betrug $1,7 \text{ g/cm}^3$. Die Vitalität des Baumes war augenscheinlich gut. Die maximale Wurzeltiefe wurde bei ca. einem Meter Tiefe festgestellt, was für Linden nach [112] auch zutreffend ist. Jedoch ist nicht auszuschließen, dass bei den Aushubarbeiten bereits Wurzeln vor Eintreffen des Projektteams entfernt worden waren.

6.2.4 Wesentliche Erkenntnisse aus den In-situ-Aufgrabungen

Die Beobachtungen während der In-situ-Aufgrabungen gaben erste wichtige Erkenntnisse zur Interaktion zwischen Baumwurzeln und Fernwärmeleitungen. Der potentielle Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen ins Erdreich beeinflusste bei keiner der durchgeführten Aufgrabung die Vitalität des Baumes. Zudem konnten an keiner der betrachteten Fernwärmeleitungen Schäden durch Wurzelwuchs beobachtet werden.

Bei den In-situ-Aufgrabungen konnten Fälle mit und ohne Interaktionen zwischen Fernwärmeleitung und/oder Bettung mit Wurzeln festgestellt werden. Alle betrachteten Fernwärmeleitungen waren in Sandbettungen verlegt. Die Gründe für die analysierten Interaktionen waren bereits bei dieser Stichprobe von elf Aufgrabungen sehr vielfältig und nicht an einem Parameter festzumachen. Folgend werden insbesondere die ermittelten Bodenparameter der Sandbettungen herangezogen, um für das Wurzelwachstum an Fernwärmeleitungen mögliche maßgebliche Parameter zu diskutieren. Die Begleitung von

elf Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten können somit erste Hinweise für mögliche Interaktions-Parameter geben, die in zukünftigen Forschungsvorhaben im Rahmen von weiteren In-situ-Aufgrabungen sowie Feld- und Laborversuchen weitergehend untersucht und analysiert werden sollten.

Bei einigen Aufgrabungen konnte im Bereich der Fernwärmeleitungen ein geringerer Wassergehalt in der Bettung im Vergleich zu den höheren Bodenhorizonten festgestellt werden. Jedoch ist auf Basis der In-situ-Aufgrabungen nicht zu ermitteln, ob der oftmals geringere Wassergehalt in der Bettung auf Einflüsse der Fernwärmetrasse zurückzuführen ist oder beispielsweise auf unterschiedliche Tiefenlagen, aus denen die Proben entnommen wurden. Hierzu sollten weitere Langzeitmessungen an einem Versuchsfeld durchgeführt werden (vgl. Kapitel 6.3).

Die Bettungseigenschaften hinsichtlich Wasserdurchlässigkeit, Korn- und Trockendichte sowie Porenvolumen und Interaktionsart werden zur Übersicht in Tabelle 12 dargestellt. Da es nicht bei allen Aufgrabungen möglich war gestörte und ungestörte Bodenproben zu entnehmen, konnten für einzelne Bettungen nicht alle o.g. Kennwerte ermittelt werden.

Tabelle 12: Ermittelte Bodenparameter in den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen

Aufgrabung	Tiefe unter GOK [m]	Durchlässigkeit [m/s]	Korndichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenvolumen [Vol.-%]	Interaktionsart
Nr. 2	0,94	$1,4 - 3,8 \times 10^{-7}$	2,8	1,7-1,9	31-39	keine
Nr. 3	1,60	$2,1 - 2,2 \times 10^{-5}$	2,8	1,8	35-36	Leitung
	3,00	$4,6 - 4,8 \times 10^{-5}$	2,8	1,8	34-39	Leitung
Nr. 4	0,50	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	keine
Nr. 5	1,87	n.b.	n.b.	1,7	n.b.	keine
Nr. 6	1,50	$9,5 \times 10^{-6}$	2,7	1,5	n.b.	Bettung
Nr. 7	0,85	$7,5 \times 10^{-6}$	2,7	1,7	36	Bettung
Nr. 8	1,90	$1,0 - 1,4 \times 10^{-4}$	2,7	1,6	40	Bettung
Nr. 9	1,60	$1,4 - 1,5 \times 10^{-4}$	2,7	1,6	42	Leitung
Nr. 10	0,60	$1,0 \times 10^{-5}$	2,6	2,0	22	Bettung
Nr. 11	0,60	$1,0 \times 10^{-4} - 1,0 \times 10^{-6}$	2,6-2,7	1,7	33-35	Leitung

n.b.: nicht bestimmbar

Die Korndichte lag bei allen Sandbettungen und Interaktionsarten bei 2,7 bis 2,8 g/cm³. Ein Einfluss der Korndichte auf das Wurzelwachstumsverhalten war somit unwahrscheinlich.

Die Trockendichte variierte zwischen 1,6 bis 1,9 g/cm³, das Porenvolumen zwischen 31 bis 41 Vol.-% und die Wasserdurchlässigkeit von 10⁻⁴ bis 10⁻⁷ m/s. Bei Trockendichten von 1,6 bis 1,8 g/cm³ und Porenvolumen von 34 bis 41 Vol.-% waren Wurzelinteraktionen mit Fernwärmeleitung und Bettung festgestellt worden. Bei Aufgrabung Nr. 2 konnte mit einer maximalen Trockendichte von 1,9 g/cm³ und minimalen Porenvolumen von 31 Vol.-% keine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung bzw. Bettung ermittelt werden. Jedoch waren bei diesen Ergebnissen auch die größten Schwankungen. Ergebnisse weiterer Probekörper hinsichtlich Trockendichte und Porenvolumen von Aufgrabung Nr. 2 waren mit den Ergebnissen der anderen Aufgrabungen durchaus vergleichbar. Die Stichprobenanzahl der hier vorliegenden Untersuchungen ist als eher gering einzustufen. Allgemeingültige Rückschlüsse auf mögliche Einflüsse auf das Wurzelwachstum sind auf Basis dieser Ergebnisse zunächst nicht möglich.

Die ermittelten Durchlässigkeiten nach DIN 18130 [61] waren bei den Aufgrabungen als durchlässig bis stark durchlässig einzustufen (d.h. $\geq 10^{-6}$ m/s). Auch hier bestand eine Ausnahme bei Aufgrabung Nr. 2, wo die Durchlässigkeit als schwach durchlässig nach DIN 18130 [61] einzustufen war. Zwar waren auch hier Schwankungen im Messergebnis vorhanden ($1,4 - 3,8 \times 10^{-7}$ m/s), jedoch lagen diese Werte weiterhin unterhalb der Durchlässigkeitswerte bei den anderen Aufgrabungen. Somit kann auf Grundlage der durchgeführten Aufgrabungen im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens festgehalten werden, dass die Durchlässigkeit ein möglicher Indikator für Wurzelwachstum sein kann.

An Trennflächen zwischen Rohraußenmantel und Bettung oder zwischen Bodenschichten wurde z.T. ein verstärkter Wurzelwuchs festgestellt (vgl. Abbildung 51). Größere Wurzeln wurden in der Sandbettung i.d.R. nur festgestellt, wenn sie bereits vor Errichtung der Fernwärmetrasse in oder an der Baugrube vorhanden waren. Die Ausnahme bildete die Wurzeln einer Eiche bei Aufgrabung Nr. 3.



Abbildung 51: Wurzelwuchs in Trennfläche zwischen Telekommunikationskabel und Bettung (links) und zwischen Sandbettung und Tragschicht (rechts) bei Aufgrabung Nr. 6

Hinsichtlich Wurzelform und Wurzeltiefe konnten keine wesentlichen neuen Erkenntnisse im urbanen Raum festgestellt werden. Dies lag u.a. daran, dass die Aufgrabungstiefen maximal bis zur Bettungssohle ausgeführt wurden und die Fernwärmeleitungen i.d.R. nah am Baumstandort lagen, um die Wahrscheinlichkeit möglicher Wurzelinteraktionen mit Fernwärmeleitungen bei den Aufgrabungen zu erhöhen. Die Ermittlung der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Baumwurzeln war das Hauptziel des hier dargestellten Forschungsvorhabens [6].

6.3 Weitergehende Analyse: Temperaturmessungen und Wärmefelder

Die unter Kapitel 6.3 beschriebenen Untersuchungen und Berechnungen wurden im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ maßgebend durch Herrn Sebastian Grimm, AGFW bearbeitet mit fachlicher Beratung des Autors [6, S. 45ff.]. Der Autor zitiert und fasst die wesentlichen Ergebnisse, insbesondere mit Blick auf den Einfluss auf bautechnische Schutzmaßnahmen, daraus folgend in eigenen Worten zusammen.

Die Messungen von Temperaturen und Berechnung von Wärmefeldern an Fernwärmeleitungen (KMR) wurden in [6, S. 45ff.] in den folgenden vier Schritten chronologisch durchgeführt [6, Kapitel 3]:

1. Messung und Analyse tatsächlich auftretender Temperaturen am Rohraußenmantel von KMR (vgl. Kapitel 2.3.4.2).
2. Durchführung erster FEM-Simulationen in Zusammenarbeit mit der TU Darmstadt [181] mit der Software *COMSOL Multiphysics*, um erste mögliche Einflüsse auf Wärmefelder im Erdreich an Fernwärmeleitungen ermitteln zu können.
3. Auf Basis von Schritt 1 und 2 sowie einer Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2.3.4) erfolgt die Entwicklung eines Temperatur-Messkonzeptes für eine In-situ-Fernwärmetrasse zur Erfassung von Wärmefeldern an erdverlegten KMR an Baumstandorten. Die Installation der Messsensoren und ersten Analysen wurden während der Projektlaufzeit durchgeführt.
4. Durchführung von FEM-Simulationen in Zusammenarbeit mit der TU Dresden [182] mit der Software *DELPHIN* (geplant mit den Messdaten aus den In-situ-Messungen aus Schritt 3) inklusive weitergehender Randbedingungen, die die Wärmefelder im Erdreich beeinflussen können.

Die ersten FEM-Simulationen der TU Darmstadt wurden an einem Rechengebiet mit konstanten Randbedingungen durchgeführt. Basis des Rechengebiets ist eine Teststrecke des AGFW zu Temperaturmessungen an einer bestehenden Fernwärmetrasse [183]. Das Rechengebiet umfasst u.a. eine Vor- (110°Celsius Betriebstemperatur) und Rücklaufleitung (80°Celsius Betriebstemperatur) mit einem horizontalen Abstand zwischen den Rohrmittelpunkten von einem Meter. Die Fernwärmeleitungen sind zentral in einer Sandbettung verlegt mit einer Breite von drei Metern und einer Höhe von 1,5 Metern [6, S. 57f.; 181, S. 3ff.]. Die für die Berechnung genutzten Stoffwerte von KMR, Bettung und Erdreich können [181, S. 4] entnommen werden. Die Überdeckung von Rohroberkante zu GOK beträgt 0,8 Meter [6, S. 57f.; 181, S. 3ff.]. Das Erdreich wird konstant mit 10° Celsius in zehn Meter Tiefe und die Umgebungstemperatur (Lufttemperatur) mit 0° und 20° Celsius dargestellt. Es wurden die folgenden Einflüsse auf Wärmefelder an Fernwärmeleitungen im Erdreich berechnet [6, S. 58, 181, S. 6]:

- a) trockenes/feuchtes Erdreich bei 0°Celsius und 20°Celsius Umgebungstemperatur,
- b) sprunghafter Anstieg der Umgebungstemperatur von 0°Celsius auf 20°Celsius
- c) sprunghafter Anstieg der Vorlauftemperatur von 110° Celsius auf 130°Celsius
- d) Sonneneinstrahlung über den Tagesverlauf

Bei den Szenarien b) bis c) wurden Bettung und Erdreich als feucht berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Wärmefeldberechnungen mit feuchtem und trockenem Erdreich zeigen, dass die Bodenfeuchtigkeit einen Einfluss auf die Ausbreitung der Wärmefelder hat. Je höher die Bodenfeuchte ist, desto schneller wird die Wärme von der Fernwärmeleitung in das Erdreich abgeleitet [6, S. 59ff., 181, S. 8ff.]. Im trockenen Zustand zeigten sich maximale Temperaturen bei 20° Celsius Umgebungstemperatur von 55,4°Celsius in 1,2 Metern Tiefe. Diese Temperaturen finden sich zwischen Vor- und Rücklauf und direkt an den Rohraußenmanteln. Dabei ist festzuhalten, dass es sich um erste vereinfachte Simulationen handelt. Temperaturmessungen an KMR zeigen, dass maximal 36°Celsius an KMR-Außenmanteln zu erwarten sind (vgl. Kapitel 2.3.4.2).

Durch die Berechnungen zum sprunghaften Anstieg der Umgebungstemperatur wird zunächst ersichtlich, dass durch den Einfluss der Fernwärmeleitungen im Vergleich zum gleichen Rechengebiet ohne Fernwärmeleitung eine Temperaturdifferenz an der GOK vorliegt von 2,2 Kelvin. Der sprunghafte Temperaturanstieg zeigt im Anschluss, dass beide Rechengebiete (mit und ohne Fernwärmeleitungen) einen vergleichbaren Temperaturanstieg an der Oberfläche zur Folge haben [6, S. 59ff., 181, S. 14f.].

Dagegen sind bei der Simulation mit sprunghaftem Anstieg der Vorlauftemperatur die Veränderungen an der GOK und auch zwischen Vor- und Rücklauf mit 0,4 bzw. 0,3 Kelvin vergleichsweise gering [6, S. 59ff., 181, S. 16f.].

Durch die Simulation von Sonneneinstrahlung auf die GOK wird ersichtlich, dass die Sonneneinstrahlung einen wesentlich höheren Einfluss (bis zu 40 Kelvin Temperaturanstieg) auf die GOK hat, als die Berechnungen zum Einfluss der Fernwärmeleitung auf die GOK [6, S. 59ff., 181, S. 18ff.].

Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein Temperatur- und Feuchte-Messkonzept an einer neugebauten Fernwärmetrasse an bestehenden Baumstandorten entwickelt. Temperatursensoren werden mit einem Messbereich von -40 bis 100 °Celsius und einer Genauigkeit von kleiner $\pm 0,2$ K bei 0 bis 50 °C eingesetzt. Es wurden Feuchtesensoren mit einem volumetrischen Wassergehalt-Messbereich im Boden von 0 bis 0,55 m³/m³ eingesetzt, mit denen ca. 0,3 Liter Bodevolumen gemessen werden können. Für das Prüfkonzept wurden folgende Messbereiche bereits in der Fernwärmetrasse installiert [6, S. 63ff., Anlage 2, S. 10ff.]:

- **Messbereich „Baum“:** Messungen im Wurzelraum und der Baumkrone, auch an Wurzeln im Leitungsgraben (insgesamt neun Temperatursensoren und sechs Feuchtemesssensoren im Erdreich sowie ein Temperatursensor in der Baumkrone)
- **Messbereich „Graben 1“:** Innerhalb der Fernwärmetrasse zur Ermittlung der Ausbreitung der Wärmefelder zwischen, an und über den Rohrleitungen, teilweise Messungen direkt an bestehenden Wurzelsträngen oberhalb der Bettung (insgesamt sechs Temperatursensoren und vier Feuchtemesssensoren im Erdreich)
- **Messbereich „Graben 2“:** Innerhalb der Fernwärmetrasse zur Ermittlung der Ausbreitung des Wärmefeldes um die Rohrleitungen herum (insgesamt 13 Temperatursensoren und zwei Feuchtemesssensoren im Erdreich)

Jedoch kam es zu Beginn der Messungen zu unterschiedlichen Störungen bei der Datenspeicherung. Bis zum Abschluss des Vorhabens lagen somit nur ausreichend Ergebnisse für die Analyse des Sets „Graben 1“ vor. Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass neben den Fernwärmeleitungen auch die Umgebungsbedingungen (u.a. Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Beschattung) einen Einfluss auf die Temperaturen im Erdreich haben können. Temperaturmessungen direkt an der Rohroberfläche (Rohroberkante) zeigen maximale Temperaturen von weniger als 30°Celsius und entsprechen somit den Temperaturbereichen der anderen In-situ-Messstrecke (vgl. Kapitel 2.3.4.2). Ein weiterer Temperatursensor wurde direkt an der Rohroberfläche (Rohroberkante) und unterhalb eines Dehnungspolsters installiert. Dort werden maximale Temperaturen von ca. 43°Celsius gemessen. Ein Temperatursensor unmittelbar über dem Dehnungspolster erfasste jedoch Temperaturen von weniger als 30°Celsius, wodurch die Temperaturen unterhalb des Dehnungspolsters vermutlich nicht maßgeblich für das Erdreich und somit für ein mögliches Wurzelwachstum sind. Ausreichend Ergebnisse für abschließende Aussagen und für die Nutzung der zweiten FEM-Simulation liegen bisher noch nicht vor [6, S. 74f., Anlage 2, S. 21ff.].

Somit wurde für die weitergehenden detaillierten FEM-Simulationen mit der TU Dresden wieder auf die Daten der AGFW-Messstrecke aus [183] zurückgegriffen [6, S. 75]. Mit dem eingesetzten Programm DELPHIN können numerische Simulationen für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport in porösen Medien durchgeführt werden [182, S. 3]. Ziel dieser Berechnungen ist es, im Vergleich zu den ersten Berechnungen der TU Darmstadt, detailliertere und realitätsnähere Randbedingungen abzubilden. Mit den Messdaten der In-situ-Versuche soll ein Simulationsmodell erstellt werden, welches bestmöglich die Realität nachbildet. Ist dies möglich, können auf Basis einer In-situ-Messstrecke mittels der FEM-Simulationen eine Vielzahl weiterer unterschiedlicher Randbedingungen und Einflüsse auf Wärmefelder an Fernwärmeleitungen im Erdreich nachgebildet werden, die ansonsten nur mit vielen weiteren In-situ-Messstrecken möglich wären. Des Weiteren ist eine Wichtung bzw. Einordnung der Einflüsse auf die Wärmefelder im Erdreich möglich [182, S. 2].

Für das Simulationsmodell wird, wie bereits oben beschrieben, die bestehende In-situ-Fernwärme-Messstrecke für Messwerte und geometrische Randbedingungen genutzt. Für die Materialkennwerte des Erdreichs werden als Bettung Sand und als anstehendes Erdreich schluffiger Ton ausgewählt. Weitere Einflüsse der Umgebung (bestehende Bäume als Beschattung und Fluss in geringer Entfernung) werden ebenfalls berücksichtigt. Auch klimatische Randbedingungen (u.a. Außenlufttemperatur, Sonneneinstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und -geschwindigkeit) werden für die Berechnungen herangezogen. Das 2D-Berechnungsgebiet ist 25 Meter breit und 15 Meter tief. Die Ausgangstemperaturen sind die gemessenen Werte direkt an den Rohroberkanten und -unterkanten (gemittelt) [182, S. 3ff.]. Die Simulationsdauer betrug zwei Jahre. Somit können beispielsweise Simulationsergebnisse für den Sommer und Winter dargestellt werden. Es wurden vier Simulationsvarianten durchgeführt, die sich u.a. im Feuchtegehalt und der Sonneneinstrahlung unterscheiden. Die Varianten werden hier nicht nähergehend betrachtet. Die weiteren Randbedingungen sind aus [182, S. 16f.] zu entnehmen.

Die numerischen Berechnungen zeigen Abweichungen zwischen den tatsächlichen Messwerten und den Simulationsergebnissen. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass durch einen hohen Grundwasserstand (Nähe zu einem Fluss) die Wärme aus dem Boden schneller entzogen wird als in der Simulation berücksichtigt wurde. Dies könnte auch der Grund dafür sein, dass die In-situ-Temperaturen an der Rohrunterkante geringer sind als an der Rohroberkante [6, S. 76; 182, S. 34]. Jedoch sind nach [6, S. 76]

„plausible Simulationen der Wärmeströme im Erdreich möglich“.

Wesentliche Ergebnisse der Berechnungen sind der Einfluss der Wärmefelder bis in eine Tiefe von zehn bis zwölf Metern. Am Rand des Rechengebiets ist der Einfluss der Wärmefelder über die Tiefe geringer als direkt unterhalb der Fernwärmeleitungen. An der GOK direkt oberhalb der Fernwärmeleitungen ist ein Temperatureinfluss durch die Fernwärmeleitung zu erkennen. Jedoch scheinen auch hier die Einflüsse durch die Umgebungsbedingungen (u.a. Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur) auf die GOK maßgeblicher zu sein [6, S. 76].

Zusammenfassend kann dargestellt werden, dass die Fernwärmeleitungen die Bodentemperaturen beeinflussen. Jedoch sind vergleichsweise höhere Temperaturen im direkten Bereich der Fernwärmeleitungen bzw. Bettungen zu verzeichnen. Der Großteil der In-situ-Messungen zeigt direkt an der Fernwärmeleitung maximale Temperaturen von weniger als 30°Celsius. Der Einfluss auf die Temperatur an der GOK ist vorhanden aber vergleichsweise gering. Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur haben ebenfalls einen großen Einfluss auf das Erdreich, insbesondere in der Nähe der GOK. Vereinzelt zeigen die In-situ-Temperaturmessungen und ersten FEM-Simulationen Temperaturen von mehr als 40°Celsius. Jedoch scheinen dies Einzelfälle unter extremen Bedingungen zu sein.

6.4 Diskussion und Einordnung der Untersuchungsergebnisse

Hier werden die Ergebnisse aus den Forschungsvorhaben zusammengefasst und diskutiert. Insbesondere wird der Einfluss der Ergebnisse auf bautechnische Schutzmaßnahmen dargestellt. Unsicherheiten in den Forschungsergebnissen werden ebenfalls beschrieben. Die ersten beiden Unterkapitel diskutieren die Wurzelfestigkeit von KMR und deren Verbindungen. Das dritte Unterkapitel beschreibt, ob die Abwärme von Fernwärmeleitungen Bäume und insbesondere das Wurzelwachstum beeinflusst. Im letzten Unterkapitel werden die Ergebnisse der In-situ-Beobachtungen diskutiert.

6.4.1 Outside-In-Versuche

Die untersuchten KMR-Verbindungen werden nach Norm [43, S. 8] nicht als stoffschlüssig, sondern als dauerelastisch bezeichnet. Jedoch wurde durch die Untersuchungen kein Wurzeleinwuchs in nach Norm hergestellten Verbindungen festgestellt. Die Versuche zeigen bei fachgerecht ausgeführten Muffen einen stoffschlüssigen Verbund zwischen Schrumpfmanschette und Rohrwandung (vgl. Abbildung 52) [6, S. 121; 97, S. 28]. **Somit wird die Arbeitshypothese 1 der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.1) in den durchgeführten Untersuchungen bestätigt.** Jedoch sind die Ergebnisse weitergehend zu betrachten.



Abbildung 52: Stoffschlüssiger Verbund zwischen Schrumpfmanschette und PE-Außenmantel

Ein Unterschied hinsichtlich der Resistenz gegen Wurzeleinwuchs konnte zwischen vernetzten und unernetzten Muffen nicht festgestellt werden. Es wurden jedoch auch nicht bei beiden Muffenarten die gleichen Fehler appliziert. Ein Wurzeleinwuchs in fachgerecht ausgeführte vernetzte und unernetzte Muffen ist nach den vorliegenden Daten nicht möglich. Diese Aussage wird durch die Beobachtungen bestätigt, dass Wurzeln in einen minimalen (oftmals verfahrensbedingten) Spalt zwischen Schrumpfmuffe und PE-Ummantelung gewachsen sind (in Kapitel 6.1.1 als Wurzelanwuchs bezeichnet). Jedoch konnten die Wurzeln die Verbindung zwischen Muffe und Rohrmantel nach zwei Wachstumsperioden nicht durchdringen. Im Vergleich dazu wurden in Outside-In-Versuchen über zwei Wachstumsperioden mit gesteckten Abwasserrohrverbindungen

Wurzeleinwüchse in die Rohrleitungen festgestellt [126, S. 59, 66]. Bei gesteckten Abwasserrohrverbindungen war der Wurzeldruck ausreichend, um das Dichtmittel zu überwinden [126, S. 119]. Bei den hier untersuchten KMR-Verbindungen scheint durch den stoffschlüssigen Verbund zum einen hinter dem minimalen Spalt durch die Stoffschlüssigkeit kein weiterer Angriffspunkt für Wurzeln zur Verfügung zu stehen. Zum anderen ist der Verbund anscheinend ausreichend fest, sodass durch das radiale Wurzeldickenwachstum ein Aufdrücken der Verbindung nicht möglich war. War der Spalt zwischen Schrumpfmuffe und Rohrummantelung mit Kleber ausgefüllt, so war auch kein Wurzelanwuchs möglich.

Die Versuche zeigen, dass die Ausführungsqualität maßgeblich dafür ist, ob Wurzeln in eine vernetzte oder unvernetzte Muffe einwachsen können [97, S. 35]. Wurzeleinwuchs wurde nur festgestellt, wenn durch Fremdstoffe kein stoffschlüssiger Verbund hergestellt werden konnte. Die Versuche bestätigen also auch die bisherigen Untersuchungen (vgl. Kapitel 3.1), dass Wurzeln in die kleinsten Zwischenräume wachsen können, wenn sie vorhanden sind [19, S. 121]. Jedoch scheint das System vergleichsweise robust zu sein. Applizierte Fehler, wie z.B. unzureichend erwärmte Schrumpfmanschetten (bei unvernetzt), Verzicht auf das Aufrauen der Ummantelungen der KMR, Verzicht auf Schmelzklebstoffbänder und nicht entfernte Schutzfolie auf der Schrumpfmanschette (bei unvernetzt) führten in keinem Fall zu Wurzeleinwuchs. Durch den Eintrag von Fremdstoffen in die Kleb- und Dichtebene wurde in zwei von drei Fällen Wurzeleinwuchs provoziert. Dies bedeutet auch, dass bei einem der schwerwiegenden Fehler kein Wurzeleinwuchs provoziert werden konnte. Diese Aussagen sollen aufzeigen, dass sich das KMR-System im Vergleich zu gesteckten Abwasserrohrverbindungen in den Versuchen robuster im Hinblick auf Wurzeleinwuchs darstellte. Jedoch ist weiterhin darauf hinzuweisen, dass nur bei einer fachgerecht ausgeführten Montage ein Wurzeleinwuchs weitestgehend ausgeschlossen werden kann [6, S. 164].

Bei den In-situ-Untersuchungen wurden keine Wurzelein- bzw. -anwüchse an KMR-Verbindungen beobachtet [6, S. 121].

Der Wurzeleinwuchs in Rohrverbindungen wurde bereits umfassend untersucht. Nach den Ergebnissen der hier vorliegenden Arbeit bestehen noch weitere Unsicherheiten bzgl. der Robustheit gegenüber Applikationsfehlern von vernetzten und unvernetzten KMR-Verbindungen:

- Die minimale Größe eines Fremdkörpers, damit Wurzeln die KMR-Verbindung durchdringen können. Die Ermittlung eines Grenzwertes fehlt.

6.4.2 Eindrückversuche

In den Eindrückversuchen wurden nach einer Wachstumsperiode keine Schäden an der PE-Ummantelung von KMR festgestellt. Das Wurzelwachstum zeigte eindeutig, dass es sich dem vorhanden Raum anpassen kann. Eine negative Beeinflussung der Vitalität der

Wurzeln und Sprosse konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Auch bei den In-situ-Aufgrabungen wurden keine Schäden durch Wurzeldickenwachstum an Fernwärmeleitungen beobachtet [6, S. 121f.]. **Somit trifft für eine einjährige Interaktionszeit die Arbeitshypothese 2 der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.1) zunächst zu.**

Jedoch ist die Versuchsdauer für das Wurzeldickenwachstum vergleichsweise kurz, wodurch finale Aussagen zum Risiko bzgl. der Beschädigung von Rohrleitungen durch das Wurzeldickenwachstum weiterhin offen sind. Zudem zeigen die Versuche, dass die radialen Wurzeldicken zwischen den Rohrleitungen teilweise dicker sind als der horizontale Abstand zwischen den Rohrleitungen außerhalb der Versuchsbehälter. Ob dies bereits bei Einbau der Fall war oder das Wurzeldickenwachstum die Rohrleitungen etwas auseinander gedrückt hat kann nicht mehr nachvollzogen werden. Jedoch sind noch die Hälfte der Versuche aktiv und somit Langzeitaussagen auch zu dieser Fragestellung in Zukunft möglich. Dies ist insbesondere wichtig, um Beschreibungen nach [85, S. 246] zu überprüfen, bei denen das Anheben von Randsteinen durch das Wurzeldickenwachstum beschrieben wird.

Mit den Versuchen wird nicht nachgebildet, wie lastabtragende Wurzeln (z.B. durch Windlasten) in Form von Zugschlingen oder Druckstempeln die Rohrleitungen beschädigen.

Die Anpassungen der Wurzeln an die geometrischen Gegebenheiten bedeuten insbesondere für Rohrverbindungen, dass Wurzeln, ggf. auch durch das Dickenwachstum, Rohrverbindungen erschließen können, wenn ausreichend Raum vorhanden ist. Es stellt sich die Frage, ob durch das reine Dickenwachstum die Rohrverbindung aufgedrückt werden kann oder ob sich die Wurzel nur den geometrischen Randbedingungen anpasst. Bei Betrachtung der Einwuchsmechanismen (vgl. Kapitel 2.3.1) werden eher aus der Wurzel entstehende Seitenwurzeln eine Rohrverbindung überwinden können als durch das reine Wurzeldickenwachstum. Die Aussagen können auch auf die Verbindungen von Folien und Platten übertragen werden.

Unsicherheiten bestehen weiterhin in den folgenden Fragestellungen:

- Die Ursachen der Beschädigung von (Vollwand-)Rohren durch Umschlingungen (vgl. Kapitel 2.3.2). Es sollte untersucht werden, ob diese Schäden auch durch das Wurzeldickenwachstum entsehen oder i.d.R. auf übertragende Windlasten oder Quellungs- und Setzungsvorgänge zurückzuführen sind.

6.4.3 Einfluss von Wärmefeldern auf Bäume und Wurzeln

Grundlage der Untersuchungen zum Einfluss von Wärmefeldern auf Bäume und insbesondere das Wurzelwachstum waren In-situ-Temperaturmessungen an einer nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitung in einer Teststrecke des AGFW. Dort wurden maximale Temperaturen von ca. 35°Celsius an einem KMR-Rohraußenmantel

gemessen (vgl. Kapitel 2.3.4.2). Aufbauend auf dieser Datenerhebung wurden die Laborversuche und FEM-Simulationen entwickelt.

Die Wärmefeldversuche mit Pflanzen im Labormaßstab zeigen, dass bei diesen Temperaturen kein Einfluss auf das Wurzelwachstum zu erwarten ist (vgl. Kapitel 6.1.3 [6, S. 118; 97, S. 24]). Zum einen wuchsen die Wurzeln in den Temperaturbereichen von 35°Celsius in gleichem Maße wie in anderen Bereichen der Versuchsbehälter. Zum anderen zeigte auch der horizontale Temperaturunterschied in den Versuchsbehältern von ca. 20 Kelvin keinen Einfluss auf die Wuchsrichtung. Es war nicht zu erkennen, ob die Wurzeln lieber zur wärmeren oder kälteren Seite wachsen wollten. An den Versuchspflanzen konnten zudem keine Veränderungen hinsichtlich der Periodizität beobachtet werden [6, S. 121]. Dabei bleibt festzuhalten, dass lediglich als Versuchspflanzen Weiden eingesetzt wurden [97, S. 38]. Ob Wurzeln von anderen Baumarten bereits bei diesen Temperaturen beeinflusst werden können, wie es in [103] beschrieben ist, wurde nicht untersucht.

Weitere In-situ-Temperaturmessungen zeigen, dass i.d.R. keine höheren Temperaturen als 35°Celsius an Fernwärmetrassen auftreten. Darauf aufbauende FEM-Simulationen machten ersichtlich, dass sich diese Wärmebereiche auf die unmittelbare Umgebung der Fernwärmeleitungen beschränken. Zudem wurde auch der Einfluss von weiteren Umgebungsbedingungen (z.B. Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung) auf die Temperaturen im Erdreich festgestellt, die teilweise maßgeblicher zu sein scheinen als die Wärmefelder der Fernwärmeleitungen (vgl. Kapitel 6.3).

Die In-situ-Beobachtungen bestätigen diese Ergebnisse. Ein „Wegwachsen“ der Wurzeln, wie es in [105] beschrieben wird, wurde in keinem Fall festgestellt. Allerdings wurde bei drei In-situ-Aufgrabungen eine direkte Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen ermittelt. Dies bestätigen die Beobachtungen von [104].

Auch an nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen scheinen somit unterschiedliche Bodenparameter dafür maßgeblich zu sein, ob Wurzeln zu einer Fernwärmeleitung hinwachsen oder nicht. Eine schützende oder fördernde Wirkung auf das Wurzelwachstum durch Wärmefelder ist unwahrscheinlich [6, S. 118f.].

Somit zeigte sich, dass durch die durchgeführten Untersuchungen keine Beeinflussung des Wurzelwachstums durch die Wärmefelder an den nach dem Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen ermittelt werden konnte. Somit ist Arbeitshypothese 3 der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.1) eine zunächst korrekte Annahme für die Baumart Weide.

Ein weitergehender Schutz der Wurzeln vor Fernwärmeleitungen ist in diesem Fall nicht zielführend. Der Einsatz von bautechnischen Schutzmaßnahmen, um das Wurzelwachstum von Fernwärmeleitungen fernzuhalten (z.B. Einsatz von ZFSV als Bettung oder von Folien und Platten an der Leitungsgrabenwand oder darüber hinaus), mit dem Ziel die Wurzel vor den Wärmefeldern zu schützen, ist auf Basis dieser Ergebnisse nicht erforderlich.

Jedoch bestehen noch folgende Unsicherheiten in den Aussagen:

- Auswirkungen des Temperatureinflusses von mehr als 35°Celsius auf das Wurzelwachstumsverhalten und die Periodizität der Bäume.
- Übertragung und Nutzung der Ergebnisse der Wärmefeldversuche an Weiden auf andere Baumarten.

6.4.4 In-situ-Beobachtungen

Im Vergleich zu Abwasserleitungen (vgl. Kapitel 2.3.1) war das Auffinden von geeigneten In-situ-Beobachtungen an Fernwärmeleitungen auf Einzelfälle beschränkt. Obwohl bei allen In-situ-Aufgrabungen die Randbedingungen eine Wurzel-Rohr-Interaktion vermuten ließen, konnte nur an drei von elf Aufgrabungen eine tatsächliche Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln festgestellt werden. Die geringere Trefferquote, im Vergleich zu den In-situ-Beobachtungen an Abwasserleitungen in [17; 19], liegt daran, dass an im Betrieb befindlichen Fernwärmeleitungen vorab keine TV-Befahrungen innerhalb des Rohres durchgeführt werden können. Somit ist im Vorfeld einer Aufgrabung nicht feststellbar, ob Wurzeln in das Rohr eingewachsen sind.

Die In-situ-Beobachtungen wurden entweder begleitend zu Baumaßnahmen durchgeführt oder anlassbezogen, jedoch nur punktuell, an vermuteten Wurzel-Rohr-Interaktionen. Somit war es leider nicht möglich auch aus dem anstehenden Erdreich Bodenproben zu entnehmen und diese mit den Bodenproben aus dem Leitungsgraben zu vergleichen. Aufgrund der geringen Stichprobenanzahl lassen sich keine umfassenden Aussagen aus den Bodenproben hinsichtlich des Wurzeleinwuchses in den Leitungsgraben ableiten. Die ermittelten Trockendichten variierten zwischen 1,5 bis 2,0 g/cm³ [6, S. 41]. Ein Zusammenhang zwischen Trockendichte und Wurzeleinwuchs konnte nicht festgestellt werden. Bis auf eine Ausnahme wurden die Porenvolumina zwischen ca. 31 bis 42 Vol.-% berechnet [6, S. 41]. Diese Ergebnisse für urbane Böden bzw. Bettungen sind vergleichbar mit den Untersuchungen aus [151, S. 42]. Dort wird beschrieben, dass ZFSV-Bettungen einen dauerhaften Schutz vor Wurzeleinwuchs ermöglichen, wenn sie mindestens ein Porenvolumen kleiner 30 Vol.-% aufweisen und somit geringer sind als die Porenvolumen der meisten gewachsenen urbanen Böden. Die hier vorliegenden Ergebnisse ergänzen diese Aussagen mit Kennwerten aus Fernwärmebettungen und zeigen, dass in diesen Porenvoluminabereichen Wurzeln einwachsen können. Jedoch sind nicht bei jeder Aufgrabung Wurzeln in Böden mit diesen Porenvolumina eingewachsen.

Die Ausnahme besteht bei Aufgrabung Nr.11 mit einem berechneten Porenvolumen von 22 Vol.-%. Dieses Porenvolumen ist vergleichsweise sehr gering und trotzdem wurde Wurzeleinwuchs in der Bettung festgestellt, bei einer vergleichsweise geringen Wasserdurchlässigkeit von $1,0 \times 10^{-5}$ m/s [6, S. 41]. Dies ist ein Einzelfall und es wurde nur eine Bodenprobe in diesem Bereich entnommen, sodass Ermittlungsfehler nicht auszuschließen sind. Jedoch sollte dies in weiteren Beobachtungen berücksichtigt werden.

Eine erste weitergehende Erkenntnis konnte bzgl. des Zusammenhangs zwischen der Wasserdurchlässigkeit und Wurzeleinwuchs festgestellt werden. Bei allen ermittelten Wasserdurchlässigkeiten größer 10^{-6} m/s wurden Interaktionen zwischen Wurzel und Bettung bzw. Fernwärmeleitung festgestellt. Bei einer Aufgrabung mit einer Wasserdurchlässigkeit von kleiner 10^{-6} m/s wurde hingegen kein Wurzeleinwuchs in Bettung bzw. an einer Fernwärmeleitung ermittelt [6, S. 41]. Dies zeigt, dass auch diskutiert werden sollte, ob durch die Wasserdurchlässigkeit beschrieben werden kann, ob ein Boden durchwurzelt ist oder nicht.

Zudem wurde der Wassergehalt der Böden untersucht. Hier ist zu diskutieren, inwieweit das Wurzelwachstum an Abwasserleitungen und Fernwärmeleitungen ggf. zu unterscheiden ist. In den In-situ-Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.2) wurde ermittelt, dass teilweise in der Bettung der Fernwärmeleitungen ein geringerer Wassergehalt als im anstehenden Boden vorliegt. Auch die Auswertung der Feuchtemessungen der Wärmefeldversuche (vgl. Kapitel 6.1.3) zeigte in Versuchsbehälter A, dass in der ersten Wachstumsperiode bei vergleichsweise geringer Bewässerung ein höherer Wassergehalt im oberen Bereich der Versuchsbehälter festgestellt wurde als in der Nähe der Heizpatrone [6, S. 89]. Ein direkter Zusammenhang konnte bei den In-situ-Beobachtungen zwischen Wassergehalt und Interaktionsart jedoch nicht festgestellt werden. Die Untersuchungen von [126, S. 107] unterstützen diese Hypothese, da dort beschrieben wird, dass gut durchfeuchtete Bodenbereiche bevorzugter durchwurzelt werden als trockene Bereiche.

Ob die Unterschiede des Wassergehalts auf die Abwärme der Fernwärmeleitung, der unterschiedlichen Tiefenlagen zwischen der Bodenprobeentnahme in anstehenden Boden und Bettung oder der unterschiedlichen Bodenstrukturen zurückzuführen ist, konnte mit dem durchgeführten Versuchsprogramm nicht abschließend geklärt werden [6, S. 119f.]. Würden jedoch die vergleichsweise geringeren Wurzel-Rohr-Interaktionen auf den geringeren Wassergehalt der Bettung zurückzuführen sein, so ist der Einsatz von bautechnischen Schutzmaßnahmen an Fernwärmeleitungen mit einer nicht so hohen Priorität zu betrachten, wie z.B. bei Abwasser- oder Gasleitungen.

In diesem Rahmen ist auch zu diskutieren, ob die Bodenumgebungen an Fernwärmeleitungen durch einen geringen Sauerstoffgehalt unattraktiv für Wurzeln sind. Fernwärmeleitungen sind gedämmte Druckleitungen mit dauerelastischen oder stoffschlüssigen Verbindungen. Somit ist vermutlich der Lufteintrag durch Fernwärmeleitungen unwahrscheinlicher als an Abwasserfreispegelleitungen mit gesteckten Verbindungen. Die Ergebnisse geben weitere Hinweise darauf, dass die Umgebungsbedingungen an Abwasserleitungen ggf. für Wurzeln besonders attraktiv sind, weil sie Luft in das Erdreich diffundieren können.

Somit bestehen in folgenden Punkten weiterhin Unsicherheiten:

- Die Grenzwerte für Durchwurzelbarkeit und Porenvolumen/Porosität.
- Wasserdurchlässigkeit als weiterer Parameter zur Beschreibung der Durchwurzelbarkeit eines Bodens.
- Der mögliche Sauerstoffaustritt aus unterschiedlichen Ver- und Entsorgungsleitungen zur Erhöhung des Sauerstoffgehalts in der umliegenden Bettung, insbesondere mit Blick auf mögliche Unterschiede zwischen Druck- und Freispiegelleitungen.
- Die maßgeblichen Ursachen für Wurzel-Gasrohrleitungs-Interaktionen, wenn der Sauerstoffaustritt aus Freispiegelkanälen maßgeblich für Wurzel-Rohr-Interaktionen ist.

7 Untersuchungen an ZFSV

Folgend werden die Untersuchungen an ZFSV dargestellt. Der Kern sind Untersuchungen im Maßstab 1:1 und Pflanzversuche. Die Pflanzversuche dienen insbesondere dazu, die bisher ermittelten bodenmechanischen Kennwerte mit dem tatsächlichen Wurzelwachstum zu vergleichen. Diese Vorgehensweise folgt dem ähnlichen Prinzip der Untersuchungen zur Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen: Zunächst müssen die mechanischen Randbedingungen identifiziert werden (vgl. Kapitel 3.2), um danach untersuchen zu können, ob mit diesen Randbedingungen auch ein wirksamer Schutz vor Wurzeleinwuchs gewährleistet werden kann.

7.1 Experimentelle Untersuchungen

Die unter Kapitel 7.1 beschriebenen experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des IKT-Warentests „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau“ durchgeführt und sind in gekürzter Fassung in den Abschlussberichten dargestellt [7; 8]. Die hier dargestellten ausführlichen Beschreibungen des „Teilprojekts Schutz vor Wurzeleinwuchs“ sind die Grundlagen für die Kurzfassungen in den Berichten [7; 8] und wurden durch den Autor maßgebend verfasst. Da das Ziel der hier vorliegenden Arbeit keine Produkttests sind, sondern die Ermittlung maßgeblicher Parameter zu Wurzel-Rohr-Interaktionen, sind die Produktnamen anonymisiert worden.

In einem IKT-Warentest werden Produkte im Maßstab 1:1 vergleichend bzgl. unterschiedlicher Kriterien bzw. Parameter getestet. Die Produkte und Prüfungskriterien werden von einem Lenkungskreis, bestehend aus Mitarbeitern von Abwasserbetrieben, ausgewählt. Die Auswahl der folgenden Materialien erfolgte somit nicht durch den Autor. Ziel der vergleichenden Untersuchungen sind relevante Ergebnisse für den Praxiseinsatz. Gegenstand der Untersuchungen ist, ob die auf dem Markt verfügbaren Produkte auch einen ausreichenden Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten können. Folgend werden die Untersuchungen beschrieben, die im Rahmen des IKT-Warentests „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau“ [7; 8] insbesondere für die Untersuchungen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs (Teilprojekt Schutz vor Wurzeleinwuchs) durchgeführt wurden.

Als experimentelle Untersuchungen wurden bodenmechanische Laboruntersuchungen, bautechnische Untersuchungen im Maßstab 1:1 über die Grabentiefe und Praxisversuche mit Pflanzen an fünf unterschiedlichen ZFSV-Materialien durchgeführt, die im Rahmen des IKT-Warentests „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau“ [7; 8] vergleichend getestet wurden.

7.1.1 Untersuchungen der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1

In DWA-M 162 [1] ist keine bodenmechanische Prüfung zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit von ZFSV definiert, daher wurde in dem hier vorliegenden Warentest als maßgeblicher Wurzelfestigkeits-Bewertungsparameter die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1 [61] ausgewählt. Für die Wasserdurchlässigkeitsversuche wurde beim Einbau

flüssiger ZFSV in Quader gefüllt. Die Wasserdurchlässigkeitsprüfungen wurden durch ein externes Labor nach DIN 18130-1 [61] durchgeführt.

Folgende Wasserdurchlässigkeiten wurden an den ZFSV-Produkten festgestellt:

- Material A: $1,80 \times 10^{-6}$ m/s
- Material B: $3,93 \times 10^{-6}$ m/s
- Material C: $4,39 \times 10^{-6}$ m/s
- Material D: $5,08 \times 10^{-9}$ m/s
- Material E: $3,82 \times 10^{-7}$ m/s

7.1.2 Bautechnische 1:1-Untersuchungen über die Grabentiefe

Die Bestimmung der Oberflächenauffälligkeiten erfolgte durch Begehung des Großversuchsstands mit Inaugenscheinnahme und bildlicher Dokumentation der ZFSV-Oberfläche hinsichtlich Risse und Spalten an Trennflächen zwischen Bauteilen und ZFSV. Sind an der Oberfläche eines ZFSV Risse vorhanden, ist dies eine Möglichkeit für Wurzeln in diese Bereiche einzuwachsen. Je mehr Risse vorhanden sind und je größer die Risse sind, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Wurzeln einwachsen. Sind Trennflächen zwischen ZFSV und Bauteilen vorhanden, besteht dort ebenfalls die Möglichkeit, dass Wurzeln einwachsen.

Als Oberflächenauffälligkeiten wurden bei den Materialien A, B, C und E Risse am Verbau beobachtet (vgl. Abbildung 53 und Abbildung 54, links). Diese Risse sind aufgrund des Ziehens des Verbaus entstanden. Bei Material C wurden zudem Risse im ZFSV am Schacht festgestellt (vgl. Abbildung 54, rechts). Der Verlauf der Risse liegt dabei allgemein senkrecht zum durch den Einfüllvorgang induzierten Spannungsverlauf in der Oberfläche des ZFSV. Die Risse waren jedoch allesamt oberflächlich und nicht bis zur Grabensohle bzw. den Leitungen durchgehend. Zudem wurde bei Material A und B ein Spalt zwischen der Schachtoberfläche und dem ZFSV ermittelt (vgl. Abbildung 55). Bei Material D wurden keine Oberflächenauffälligkeiten festgestellt.

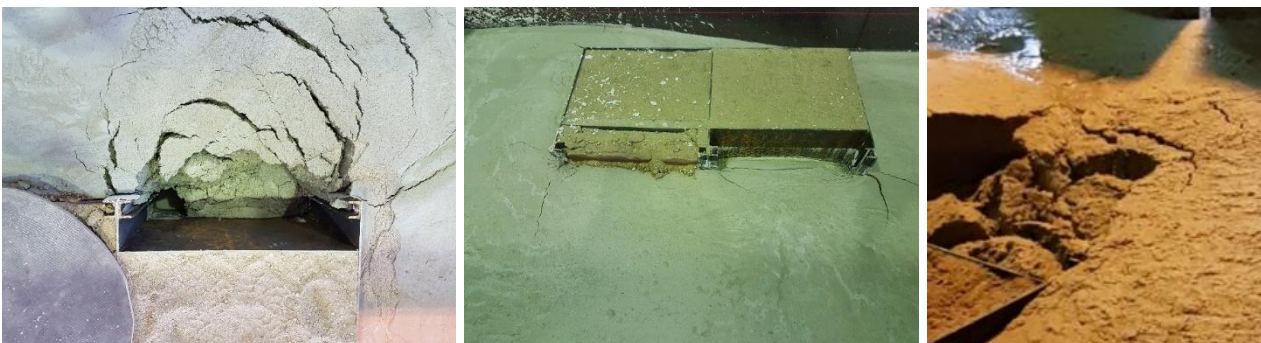


Abbildung 53: Rissfelder an Verbau in Material A (links), vereinzelte Risse an Material B (mittig) und Rissfelder an Material E (rechts)



Abbildung 54: Vereinzelt Risse in Material C an Verbau (links) und Schacht (rechts)



Abbildung 55: Spalt in Material A zwischen ZFSV und Schachtoberfläche (links) und Material B (rechts)

7.1.3 Outside-Out-Versuche

Zur Validierung der Laborversuche wurden Versuche mit Pflanzen durchgeführt, um neben den bodenmechanischen Betrachtungen auch Ergebnisse zu Wurzelanwuchs an ZFSV zu erhalten. Dazu wurde bei Einbau flüssiger ZFSV in Pflanztöpfe verfüllt. Die Pflanztöpfe haben eine Höhe von 32,5 Zentimetern mit einem Durchmesser an der offenen Oberseite von 33,5 Zentimetern und an der Sohle von 21,5 Zentimetern. Der flüssige ZFSV wurde ca. zwölf Zentimeter hoch in die Pflanztöpfe eingefüllt. Nach einer Aushärtezeit von 28 Tagen wurden die Pflanztöpfe mit handelsüblicher Blumenerde aufgefüllt und mit einer Pflanze der Gattung Ilex bepflanzt. Die Ilex wurden in einem Pflanzenfachhandel erworben, waren bei Einpflanzung 45 bis 58 Zentimeter hoch und hatten ungefähre Durchmesser von 31 bis 42 Zentimetern. Die Muttererde in den Anzuchttöpfen waren bei allen eingesetzten Ilex gesamt durchwurzelt. Je nach Einbau des Materials im IKT-Großversuchsstand erfolgte die Bepflanzung im Oktober oder November 2019. Vor der Befüllung wurden die Oberflächen der ZFSV hinsichtlich möglicher Risse oder größerer Poren begutachtet und dokumentiert

(vgl. Abbildung 56, links). Von jedem Material wurden zwei Probekörper erstellt und folgend nummeriert: 1a und 1b für Material A, 2a und 2b für Material B, 3a und 3b für Material C, 4a und 4b für Material D sowie 5a und 5b für Material E. Zusätzlich wurden zwei Referenzversuche ohne ZFSV ergänzt. Die Pflanztöpfe wurden auf dem IKT-Außengelände in den Boden eingesetzt (vgl. Abbildung 56, rechts). Die Pflanzen wurden nach Bedarf gewässert und Unkraut innerhalb und im direkten Umfeld der Pflanzkübel entfernt. Im Mai 2020 zeigten einige Pflanzen gelbe Blätter und Blattverlust. Aus diesem Grund wurden die oberen fünf Zentimeter Mutterboden entfernt und mit Humus ersetzt. Nach kurzer Zeit zeigten die Pflanzen zwar noch vereinzelt gelbe Blätter, jedoch wurde der Blattverlust reduziert.



Abbildung 56: Beispielhafte Dokumentation der ZFSV-Oberflächen vor Befüllung mit Blumenerde (links) und im Boden eingesetzte Pflanzkübel (rechts)

Die Versuche mit Pflanzen wurden im September 2020 nach einer Versuchslaufzeit von ca. zehn Monaten geöffnet, wodurch alle Versuchspflanzen weitestgehend eine volle Wachstumsperiode wachsen konnten. Vor dem Öffnen und Ausgraben der Versuchsbehälter wurde das Oberflächenwachstum der Ilex dokumentiert. Bei allen Pflanzen konnte ein Zuwachs in Höhe und Durchmesser ermittelt werden. Die Höhen variierten zwischen 52 bis 62 Zentimetern und die Durchmesser zwischen 36 bis 53 Zentimetern. Anschließend wurden die Referenzversuche geöffnet, um zu überprüfen, ob Wurzeln nach der bisherigen Versuchslaufzeit die gesamte Höhe des Pflanzkübels durchwachsen konnten. Es wurde eine durchgehende Durchwurzelung des Referenzversuches A bis zur Sohle und aus den Entwässerungslöchern hinaus festgestellt (vgl. Abbildung 57). Zudem konnten keine Wurzeln von außerhalb unter dem Pflanzkübel im anstehenden Boden festgestellt werden. Auf dieser Basis wurde beschlossen, die ZFSV-Versuchsbehälter ebenfalls zu öffnen.



Abbildung 57: Wurzeln bis zur Kübelsohle bei Referenzversuch A

Bei Referenzversuch B zeigte sich zunächst ebenfalls ein ausgeprägter Wurzelwuchs in der Muttererde (vgl. Abbildung 58, links). Jedoch wurde bei den Öffnungen und Aufgrabungen des Pflanzkübels festgestellt, dass ein ca. 40 Zentimeter vom Pflanzkübel entferntes „Unkraut“ oberflächennah an die Pflanzkübelaußenwand gewachsen ist, dort außerhalb des Blumenkübels vertikal bis zur Pflanzkübelsohle und anschließend horizontal unter den Pflanzkübel gewachsen ist. Anschließend ist diese Wurzel durch mindestens ein Entwässerungsloch vertikal nach oben in den Pflanzkübel gewachsen. Daher kann abschließend nicht mehr eindeutig nachgewiesen werden, ob Ilexwurzeln ebenfalls bis zur Kübelsohle gewachsen sind, weil die Wurzeln innerhalb des Pflanzkübels eng miteinander verwachsen waren (vgl. Abbildung 58, rechts). Somit ist dieser Referenzversuch aus der Bewertung ausgeschieden. Jedoch ist die Erkenntnis des nach oben vertikalen Wurzelwachstums (hier am Beispiel eines Unkrauts) in dem Sinne wichtig, dass ZFSV im Leitungsgraben so eingesetzt wird, dass die Leitungen oder Kanäle vollumfänglich von ZFSV eingeschlossen werden, um einen Wurzeleinwuchs von unten ggf. unterbinden zu können.



Abbildung 58: Wurzelwuchs in Referenzversuch B mit brauner Wurzel aus Entwässerungsloch – roter Pfeil - (links) und Wurzel mit Seitenwurzeln unterhalb des Pflanzkübels – roter Pfeil -, welche bis zu einer 40 Zentimetern entfernten Pflanze außerhalb des Pflanzkübels zurückverfolgt werden konnte (rechts)

Zur Öffnung wurden die Pflanzkübel mittels Handwinkelschleifer an zwei gegenüberliegenden Seiten vertikal aufgeschnitten und zunächst eine Kübelseite entfernt. Anschließend wurde das Wurzelwachstum im Mutterboden sowie in der vertikalen Trennfläche zwischen Kübelwand und ZFSV dokumentiert. Es zeigte sich bei allen Probekörpern Wurzeleinwuchs in unterschiedlicher Ausprägung und Tiefe in diese Trennfläche (vgl. Abbildung 59, links). Dieses Ergebnis bestätigt die Aussage aus [1, S. 17], dass zusammenhängende Poren- bzw. Hohlräume bevorzugt durchwurzelt werden können. Zur Überprüfung von möglichem Wurzeleinwuchs in den ZFSV wurde der ZFSV-Körper vom Mutterboden abgeklappt, wodurch die Oberflächen von Mutterboden (vgl. Abbildung 59, rechts) und ZFSV sichtbar wurden.



Abbildung 59: Wurzelwachstum in Mutterboden und Trennschicht zwischen ZFSV und Pflanzkübel beispielhaft an Material E (links) und Wurzelwachstum in Trennfläche zwischen Mutterboden und ZFSV beispielhaft an Material D (rechts)

Es wurde festgestellt, dass sich bei allen Probekörpern zwischen ZFSV und Mutterboden eine horizontal aufgeweichte Schicht gebildet hatte, die im Vergleich zum restlichen ZFSV eine weiche Konsistenz hatte. Ggf. ist diese Schicht durch die Bewässerung der Pflanzen entstanden, da das Wasser nicht vollständig aus den vertikal angeordneten Entwässerungslöchern am Rand der ZFSV-Oberfläche abfließen konnte. Bei den Materialien B, C, D und E konnte diese Schicht mit einem üblichen Kehrbesen abgefegt bzw. abgerieben werden. Bei Material A war ein Abkratzen dieser Schicht mit einem Zahnsteinreiniger notwendig. Die maximalen Dicken der aufgeweichten Schichten betragen bei Material A 5 mm, bei Material B 1 mm, bei Material C 2 mm, bei Material D 10 mm und Material E 30 mm. In allen aufgeweichten Schichten wurden Wurzeln festgestellt. Nach Entfernen der aufgeweichten Schicht wurden bei den Materialien A, B, C und E keine sichtbaren Wurzeln mehr festgestellt (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 61).



Abbildung 60: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material A (links) und Material B (rechts)

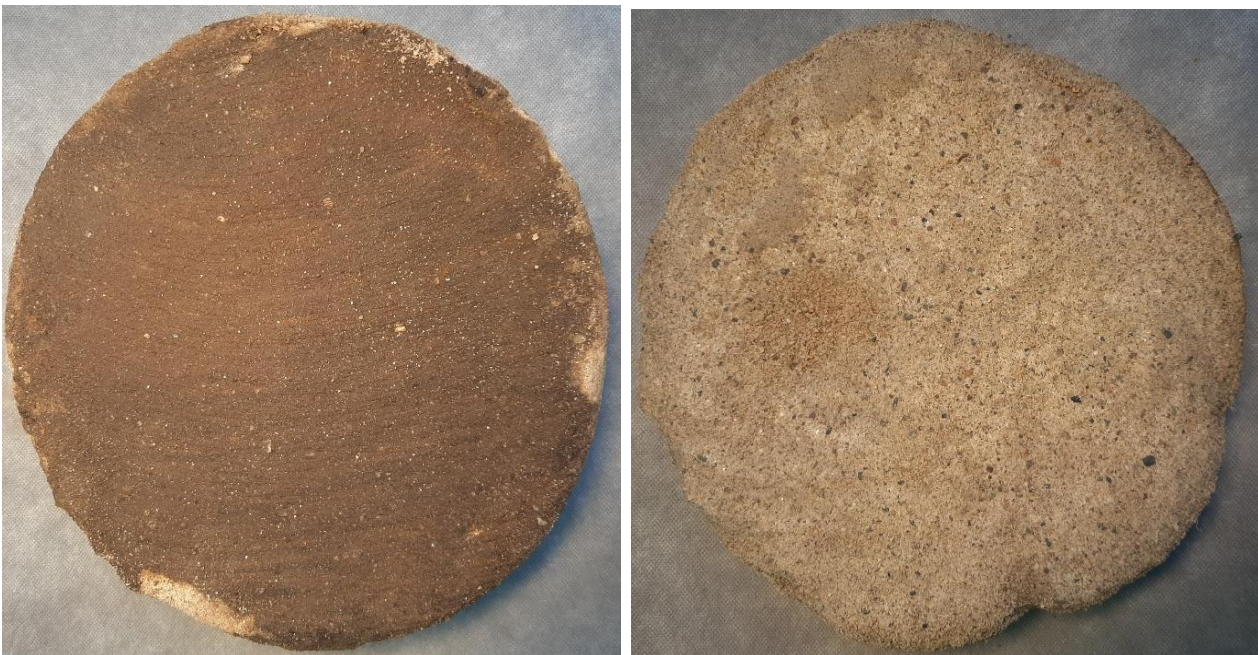


Abbildung 61: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material C (links) und Material E (rechts)

In Material D war im ausgehärteten ZFSV mehrfacher Wurzeleinwuchs sichtbar (vgl. Abbildung 62, links). Aus diesem Grund wurden bei Material D an Probekörper b die Wurzeln einzeln ausgegraben bzw. ausgeschürft, um die maximalen Wurzeleindringtiefen ermitteln zu können. Die Tiefen dieser Wurzeln betragen maximal 1,5 Zentimeter mit maximalen Wurzellängen im ZFSV von zwei Zentimetern (vgl. Abbildung 62, rechts).



Abbildung 62: Oberfläche ohne aufgeweichte Schicht von Material D (links) und Wurzeleinwuchs im ausgehärteten Material D (rechts)

Bei keinem Probekörper wurde eine durchgehende Durchwurzelung bis zum Boden des Probekörpers festgestellt (vgl. Abbildung 63, links). Da in den aufgeweichten Schichten teilweise Insekten festgestellt wurden (vgl. Abbildung 63, rechts), wurden die Probekörper 1b, 2b, 3b, 4b und 5b nach Entfernen dieser Schicht in Behältern mit Fliegengittern verschlossen. Ziel war die Ermittlung von möglichen Insekten im ZFSV, da nicht auszuschließen war, dass Insekten ebenfalls Löcher in den ausgehärteten ZFSV gegraben haben, die Wurzeln ggf. im Nachgang erschließen können. Nach vier Tagen konnten keine Insekten in den Behältern dokumentiert werden, wodurch vermutlich keine Insekten mehr im ZFSV vorhanden sind und sich auf den Bereich in der aufgeweichten Schicht konzentriert haben.



Abbildung 63: Unterseite des ZFSV ohne Wurzeln beispielhaft an Material E (links) und Spinne in aufgeweichter Schicht beispielhaft an Material B (rechts)

Der Einfluss der Wasserdurchlässigkeit k_f scheint nicht bei allen geprüften Materialien ein maßgeblicher Faktor für den Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs zu sein. Material D mit dem kleinsten k_f -Wert von ca. 5×10^{-9} m/s weist im Vergleich zu den anderen ZFSV Wurzeleinwuchs auf. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Eine erste Hypothese zum Unterschied zwischen Material D und den restlichen Materialien ist die Zusammensetzung des Korngefüges. Während die Grundlage der Materialien A, B, C und E aus einem gewaschenen Kies-Sand-Gemisch besteht, wurde bei Material D gesiebter Naturboden mit bindigen und organischen Anteilen verwendet. Ähnliche Beobachtungen von Simon [57, S. 57] bestätigen die Annahme, dass Bodenaushub einen Einfluss auf den Schutz vor Wurzeleinwuchs haben kann. Ein weiterer, erkennbarer Unterschied zwischen Material D und den Materialien A, B, C und E konnte in der vertikalen Trennfläche zwischen ZFSV und Pflanzkübel festgestellt werden. Bei Material D bildeten die eingewachsenen Wurzeln sichtbare Abdrücke in der Trennfläche zwischen ZFSV und Pflanzenkübel (vgl. Abbildung 64, links). Diese konnten, jedoch in deutlich geringerer Ausprägung, nur noch bei Material E dokumentiert werden (vgl. Abbildung 64, rechts). Bei den Materialien A, B und C konnten keine Abdrücke durch eingewachsene Wurzeln festgestellt werden.



Abbildung 64: Riefen durch Wurzelwuchs in vertikaler Trennfläche zwischen ZFSV und Pflanzkübel in Material D (links) und Material E (rechts)

Zudem kann nicht ausgeschlossen werden, dass das Material D zum Zeitpunkt des Wurzeleinwuchses seine Endfestigkeit noch nicht erreicht hatte. In Abbildung 65 (links) ist der Probekörper Nr. 1 von Material D nach 28 Tagen Standzeit dargestellt. Im Vergleich dazu beispielhaft das Material A ebenfalls nach 28 Tagen Aushärtezeit in Abbildung 65 (rechts). Bei Material D ist die Oberfläche glänzend, bei Material A ist eher eine matte Oberfläche sichtbar.



Abbildung 65: Blick auf Material D (links) und Material A (rechts) vor Bepflanzung

7.2 Feldversuche in Osnabrück

Die unter Kapitel 7.2 beschriebenen Feldversuche wurden im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ durchgeführt und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde, mit fachlicher Unterstützung von insbesondere Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel (RUB) und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc. (AGFW) [6, S. 105ff.]¹, S. 41.

In Osnabrück werden durch den Osnabrücker ServiceBetrieb (OSB) seit über 20 Jahren Baumstandorte in einem Versuchsfeld für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Errichtung des Versuchsfeldes Dodesheide wurde u.a. durch die DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt finanziert.

Das Versuchsfeld im Waldfriedhof Dodesheide in Osnabrück wurde im Rahmen des IKT-Forschungsvorhabens „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil 1: Verpflanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [161] vor über zehn Jahren entwickelt und erstellt. Im Versuchsfeld sind 24 Großbäume verpflanzt (vgl. Abbildung 66, links). 21 dieser Bäume wuchsen bereits seit dem Jahr 1997 auf dem Betriebshof des Osnabrücker ServiceBetriebs. Es wurden jeweils sieben Exemplare der Baumarten Esche (*Fraxinus excelsior* L.), der Hybridplatane (*Platanus x acerifolia*) und der Kaiserlinde (*Tilia x intermedia* cv. *Pallida*) eingesetzt. Im Jahre 2009 erfolgte die Umpflanzung zum Waldfriedhof Dodesheide in Osnabrück. Dort wurden zusätzlich drei weitere Bäume, zwei Exemplare Eiche (*Quercus* L.) und ein Exemplar Ginko (*Ginkgo bilboa* L.), eingepflanzt. Bei der Verpflanzung der Bäume erfolgte eine Durchmischung der ehemals im Verbund stehenden Bäume. Dabei wurden die Bäume in einer 130 m langen Trasse eingepflanzt (vgl. Abbildung 15) [161, S. 16ff.].

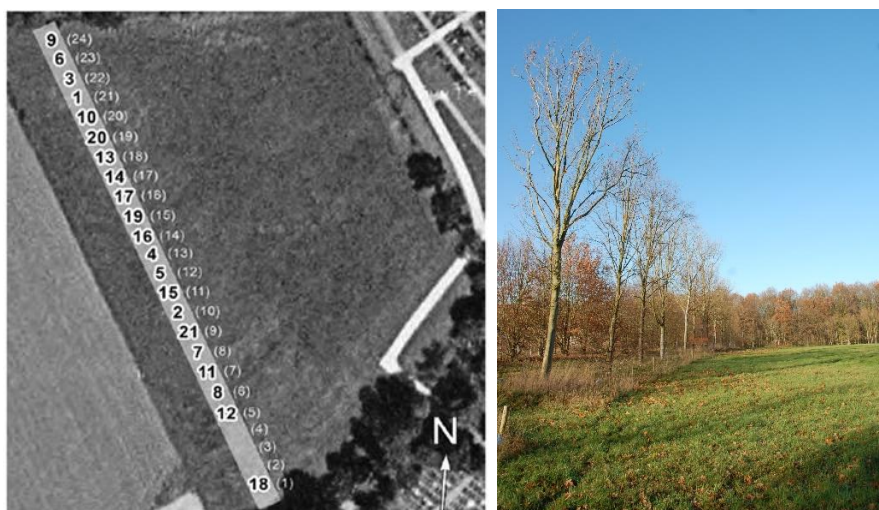


Abbildung 66: Draufsicht auf das Versuchsfeld "Dodesheide" nach der Umpflanzung im Jahre 2009 mit aktueller Nummerierung in Klammern (links) [161, S. 18], seitlicher Blick auf einen Abschnitt des Versuchsfeldes „Dodesheide“ im Jahr 2019 (rechts)

Die Errichtung von sogenannten Rehabilitationszonen mit Substraten im Versuchsfeld erfolgte im Rahmen des IKT-Forschungsvorhabens „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre –Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [184].

Ziel der hier dargestellten Untersuchungen am Versuchsfeld Dodesheide sind Langzeit-Praxiserkenntnisse zum Wurzelwachstumsverhalten von Großbäumen in Substraten bzw. an porenraumarmen Verfüllbaustoffen, die als Schutzmaßnahmen nach DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [1] beschrieben werden. Substrate (porenreiche Böden) werden als aktive Schutzmaßnahmen bezeichnet, die unmittelbar am Baumstandort stattfinden und den Wurzeln ausreichend Entwicklungsraum geben sollen. Porenraumarme Böden gehören zu den passiven Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben [1, S. 17f.]. Folgend werden die Untersuchungen und deren Ergebnisse beschrieben.

7.2.1 Aktive Schutzmaßnahmen – Substrate am Baumstandort

Aktive Schutzmaßnahmen sind nach Regelwerk [1, S. 18] Maßnahmen zur Förderung des Wurzelwachstums am Baumstandort u.a. durch den Einsatz porenreicher Substrate in Pflanzgruben oder Wurzelgräben. Folgend wird der Aufbau der bereits im IKT-Forschungsvorhaben „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre –Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [184] angelegten Rehabilitationszonen sowie die Ergebnisse aus ersten Aufgrabungen dieser Bereiche beschrieben. Die Auswertung des Wurzelwachstums nach sieben Jahren erfolgte im Forschungsvorhaben [6].

Versuchsaufbau

An jedem der 24 Bäume im Versuchsfeld Dodesheide wurde eine kreisförmige Rehabilitationszone mit einem Radius von ca. 60 Zentimetern und einer Tiefe von 80 Zentimetern angelegt. Als Substrat in der Rehabilitationszone wurden leicht durchwurzelbare Materialien eingesetzt, deren Porenräume eine ausdauernd hohe (Pflanzen-)Verfügbarkeit von Luft und Wasser sicherstellen sollen. Bei den verwendeten Substraten handelt es sich um Mischungen strukturstabiler Materialien auf der Grundlage der Produkte VulkaTree 0/16 und VulkaTree 0/32 der Firma VulkaTec Riebensahm GmbH. Die Hauptbestandteile beider Substrate bilden Natur-Bims, Leicht-Lava und Löß zu unterschiedlichen Teilen (Vol.-%) und Qualitäten (Körnungen) [184, S. 16f.].

Es wurden gestörte und ungestörte Bodenproben des Substrates und des angrenzenden Bodens entnommen. An der Platane mit der Baum-Nr. 11 konnte im Substrat in ca. 0,5 Metern Tiefe ein Sand mit Kiesanteilen und schwach schluffigen Anteilen festgestellt werden. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes von 4,7 M.-% bei der gestörten Probe

zu 5,4 M.-% bei der ungestörten Probe festzustellen. Die Trockendichte wurde mit $1,7 \text{ g/cm}^3$ und der Glühverlust mit 2,6 M.-% bestimmt. Das Porenvolumen lag bei einer angenommenen Korndichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ bei 33 Vol.-%.

Am gleichen Standort wurde der anstehende Boden als schluffiger Sand mit schwachen Kiesanteilen und schwachen Tonanteilen ermittelt. Der Wassergehalt unterschied sich von 14 M.-% der gestörten Probe zu 16,8 M.-% bei der ungestörten Probe. Die Korndichte lag bei $2,7 \text{ g/cm}^3$ und der Glühverlust bei 2,4 M.-%. Die Wasserdurchlässigkeit wurde mit $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ bestimmt. Das Porenvolumen lag bei 40,8 Vol.-%.

Um auch das Wachstum der tiefer gelegenen Wurzeln in Richtung der Rehabilitationszonen zu beeinflussen, wurden vor dem Einfüllen der Substrate pro Baum zwölf Belüftungselemente in der Grabenmitte und auf der Sohle der Gräben stehend eingelassen. Hierbei handelt es sich um HS-Baumwurzelbelüfter der Firma Funke Kunststoffe GmbH. Die geschlitztwandigen Kunststoffrohre mit DN/OD 110 mm wurden speziell für diesen Anwendungsfall mit einer Länge von jeweils 1000 mm hergestellt [184, S. 18].

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Kontrolle des Wurzelwachstums wurden im Mai 2012, April 2013 und November 2018 Aufgrabungen an jeweils einem Exemplar der Gattung Linde (Baum Nr. 10), Platane (Baum Nr. 11) und Esche (Baum Nr. 20) durchgeführt [96, S. 60].

Eine ausführliche Beschreibung des Auswurzelungsverhaltens in der Rehabilitationszone in den Jahren 2009 bis 2013 ist im Forschungsbericht des Forschungsvorhabens „Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [184] zu finden.

Im November 2018 wurden an den o.g. drei Versuchsbäumen und eingebauten Substraten im Rahmen des hier vorliegenden Projektes weitere Aufgrabungen durchgeführt, um das Wurzelwachstum nach einer Standzeit von weiteren sieben Jahren analysieren zu können. Dazu wurden rechteckige Baugruben ausgehoben, die die kreisförmige Rehabilitationszone tangieren. Die Kantenlänge der Gräben betrug ca. vier bis fünf Meter, abhängig vom Radius der kreisförmigen Rehabilitationszone (vgl. Abbildung 67). Die Grabentiefe betrug 80 Zentimeter sowie die Grabenbreite 60 Zentimeter. Die vertikalen Belüftungselemente wurden mit einer TV-Schiebekamera befahren, um erste Rückschlüsse auf möglichen Wurzeleinwuchs in die Schlitzrohre nach ca. zehn Jahren Betriebszeit ziehen zu können [96, S. 62].



Abbildung 67: Schematische Darstellung der Aufgrabungen 2018 (in Anlehnung an [184, S. 40])

Das Auswurzelungsverhalten der drei untersuchten Bäume im Versuchsfeld „Dodesheide“ nach sieben Jahren Wachstum ist folgend dargestellt.

Esche (Baum Nr. 20)

Bei den Aufgrabungen an der Esche (Baum Nr. 20) wurde ein ausgeprägtes Auswurzelungsverhalten in der Rehabilitationszone im oberflächennahen Bereich kleiner 30 Zentimeter unter Geländeoberkante festgestellt. In diesem Bereich sind große Massen an Feinwurzeln (vgl. Abbildung 68, links) sowie einige Schwachwurzeln (Durchmesser bis maximal 15 mm) vorzufinden (vgl. Abbildung 68, rechts), welche z.T. die Rehabilitationszone horizontal (> 60 cm) durchwachsen und im gewachsenen Boden weiterwachsen. In tieferen Bereichen reduziert sich die Wurzelmasse, sodass vereinzelt Feinwurzeln und Schwachwurzeln vorzufinden waren. Im gewachsenen Boden (außerhalb der Rehabilitationszone) wurden vereinzelt Feinwurzeln bis zur Grabensohle festgestellt [96, S. 63].

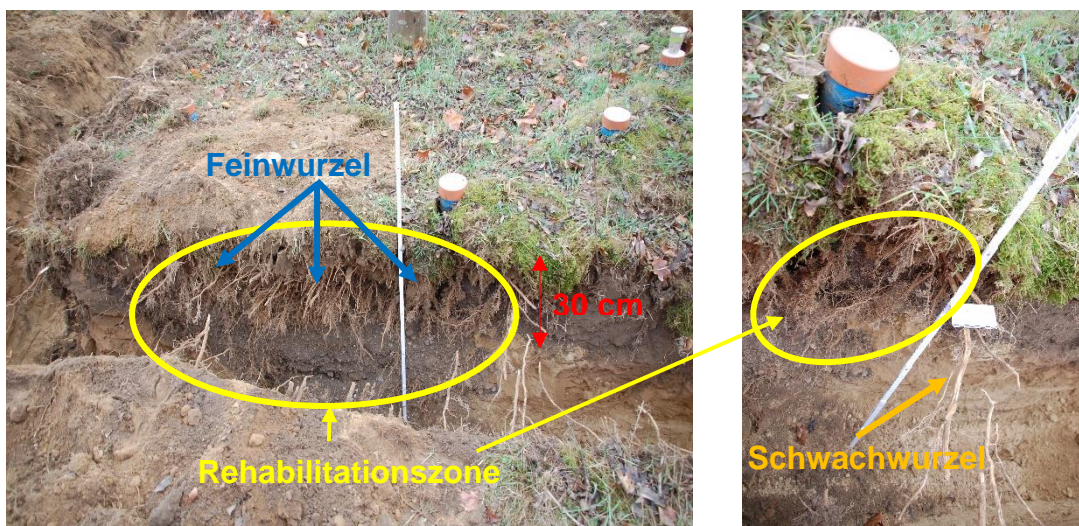


Abbildung 68: Wurzeln der Esche (Baum Nr. 20) im November 2018: Feinwurzeln im oberflächennahen Bereich, insbesondere stark ausgeprägt in Rehabilitationszone (links), Schwachwurzel im oberflächennahen Bereich im Außenbereich der Rehabilitationszone (rechts) [96, S. 63]

Platane (Baum Nr. 11)

Bei der Platane (Baum Nr. 11) wurde der Großteil der Wurzelmasse in der Rehabilitationszone identifiziert. Feinwurzeln sind überwiegend in der oberen Bodenschicht (bis ca. 30 cm unter Geländeoberkante) vorhanden. Schwachwurzeln (bis ca. 20 mm Durchmesser) sind bis zu einer Tiefe von 60 Zentimeter unter Geländeoberkante vorzufinden (vgl. Abbildung 69, links). Die Schwachwurzeln wachsen horizontal in den gewachsenen Boden und durchwurzeln z.T. die 60 Zentimeter breite Baugrube (vgl. Abbildung 69, rechts) [96, S. 64].

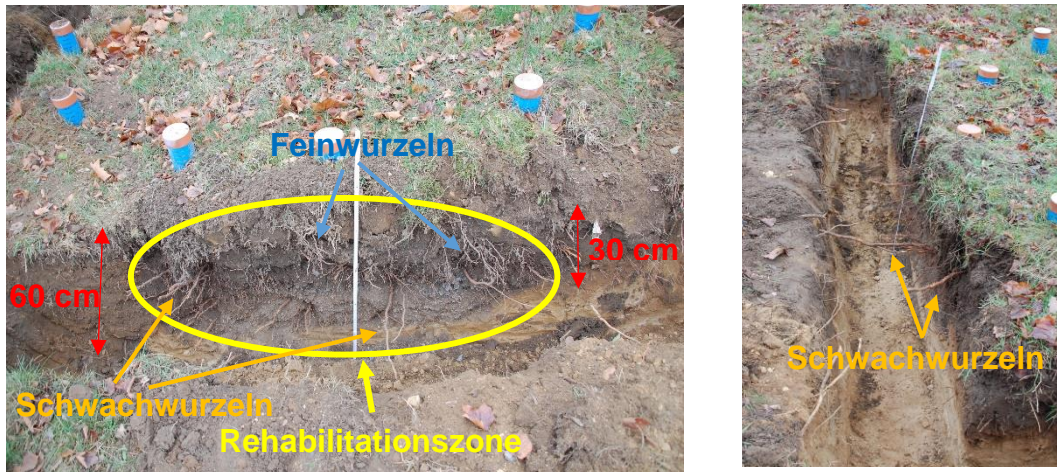


Abbildung 69: Wurzeln der Platane (Baum Nr.11) im November 2018. Fein- und Schwachwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Schwachwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts) [96, S. 64f.]

Linde (Baum Nr. 10)

Der wesentliche Teil der Wurzelmasse der untersuchten Linde (Baum Nr. 10) wurde in der Rehabilitationszone festgestellt. Feinwurzeln sind überwiegend in der oberen Bodenschicht (bis ca. 30 cm unter Geländeoberkante) vorhanden. Schwachwurzeln (bis maximal 18 mm Durchmesser) sind bis zu einer Tiefe von 80 Zentimeter unter Geländeoberkante vorzufinden (vgl. Abbildung 70, links). Die Schwachwurzeln wachsen horizontal in den gewachsenen Boden und durchwurzeln z.T. die 60 Zentimeter breite Baugrube (vgl. Abbildung 70, rechts) [96, S. 65].

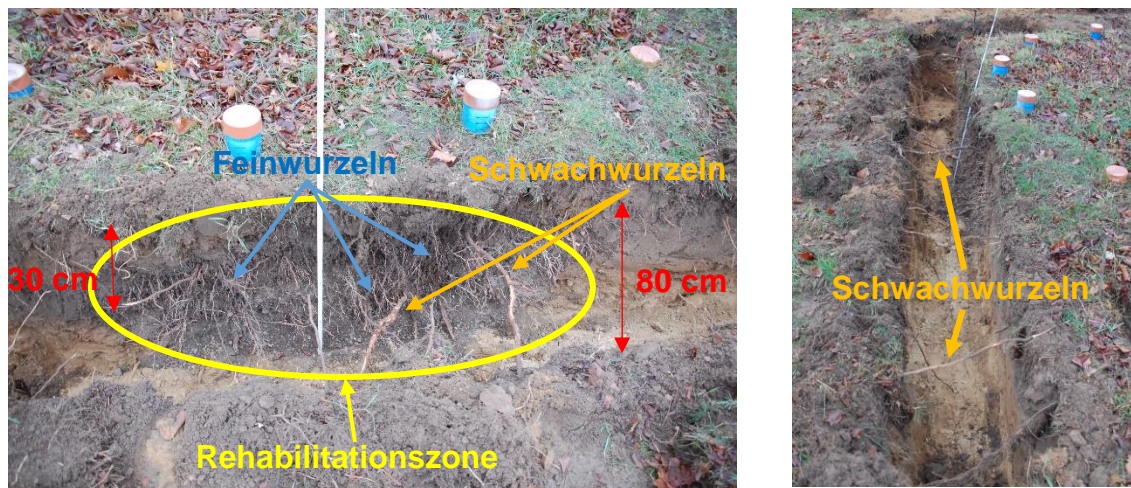


Abbildung 70: Wurzeln der Linde (Baum Nr.10) im November 2018: Fein- und Schwachwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Schwachwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts) [96, S. 65f.]

Fazit

Bei allen drei Bäumen konnte ein weitestgehend im Substrat ausgeprägtes Auswurzelungsverhalten festgestellt werden. Vereinzelt Wurzeln, insbesondere Schwachwurzeln, wachsen von der Rehabilitationszone in den anstehenden Boden weiter. Die Kombination aus porenreichen Böden und vertikalen Belüftungselementen fördert das Wurzelwachstum direkt am Baumstandort und ein Großteil der Wurzeln verbleibt im Substrat [96, S. 66].

An den untersuchten Belüftungsröhren konnten kein ausgeprägter Wurzeleinwuchs bzw. größere Querschnittsverringerungen durch Wurzeln nach knapp zehn Jahren Betriebszeit mittels TV-Kamerabefahrung festgestellt werden. Teilweise wurden kleinere Auffälligkeiten im Rohrquerschnitt festgestellt. Jedoch konnte mit Hilfe der verfügbaren Videomaterialien nicht abschließend identifiziert werden, ob die Auffälligkeiten im Querschnitt eingewachsene Feinwurzeln, Spinnweben oder auch hereingefallene Grashalme von der GOK waren. Weitergehende Detail-Untersuchungen an den Schlitzröhren z.B. mit verbesserter Kameratechnik oder Kanalspiegeln, durch Aufgrabungen oder Probenentnahmen der Auffälligkeiten sind daher zur Erzielung umfänglicher und aussagekräftiger Ergebnisse notwendig.

7.2.2 Passive Schutzmaßnahmen – ZFSV

Passive Schutzmaßnahmen sind nach DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [1, S. 17f.] Maßnahmen zur Vermeidung von Wurzelum- und -einwuchs an unterirdischen Leitungen und Kanälen u.a. durch den Einsatz porenraumarmer Verfüllstoffe im Leitungsgraben. Im Anschluss an die Aufgrabungsarbeiten und Auswertungen des Wurzelwachstums in den Rehabilitationszonen wurden die Baugruben an den drei

Baumstandorten Linde (Baum Nr. 10), Platane (Baum Nr. 11) und Esche (Baum Nr. 20) mit ZFSV verfüllt.

Versuchsaufbau

Die Baugruben (60 Zentimeter breit und 80 Zentimeter tief) wurden mit einer möglichst wurzelabweisenden ZFSV-Rezeptur verfüllt (vgl. Abbildung 71, links). Die Anforderungen an die Rezeptur ergaben sich u.a. aus den Ergebnissen des DBU-Forschungsvorhabens „Wurzelhemmende Verfüllbaustoffe“ [151]. In diesem Forschungsvorhaben wurde als ein wesentlicher Parameter zur Wurzelhemmung von ZFSV die Porosität bestimmt [151, S. 42]. Daher sollte der eingesetzte ZFSV eine möglichst geringe Porosität besitzen, bestenfalls unter 30 Vol.-%. Weitere Anforderungen ergaben sich aus Sicht des Leitungsbaus, speziell des Fernwärmeleitungsbaus [185], die nach Angabe des Herstellers mit der gewählten Rezeptur eingehalten werden können [96, S. 67]. Eine vollständige Überprüfung dieser Parameter konnte im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens allerdings nicht durchgeführt werden.

Insbesondere sollte der Wiederaushub mit leichtem Gerät gewährleistet sein, um weitere Untersuchungen am ZFSV durchführen zu können. Der ZFSV wurde mittels Fahrmischern zum Versuchsfeld geliefert und dort direkt in die Baugruben flüssig eingefüllt (vgl. Abbildung 71, rechts) [96, S. 67]. Das Basismaterial für den ZFSV wurde im Werk angemischt. Der anstehende Boden im Versuchsfeld wurde nicht zur Herstellung genutzt. Die Versuchsbäume wurden allseitig mit dem ZFSV bis zur Bodenoberkante umgeben. Damit sollte der Wurzelraum für die Bäume begrenzt, ein Umwachsen des Hindernisses unterbunden und so die Notwendigkeit eines Einwuchses in den ZFSV begünstigt werden.



Abbildung 71: ZFSV kurz nach Einbau um die Versuchsbäume (links) [96, S. 68], Einfüllen des ZFSV in die Baugrube mit Fahrmischern (rechts)

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Nach einem Jahr Versuchslaufzeit wurden im Dezember 2019 erste Aufgrabungen an den ZFSV-Körpern durchgeführt. Es wurde je Baum eine der vier ZFSV-Seiten untersucht. Dazu wurde mit einem Bagger ein ca. 60 Zentimeter breiter Graben aus Sicht des Baumes hinter dem ZFSV-Körper ausgehoben. Durch die Baggerarbeiten sind vereinzelt Schlitzrohre beschädigt worden, diese wurden daraufhin aus dem Versuchsaufbau entfernt. Der ZFSV-Probekörper wurde an den jeweiligen Enden mittels elektrischen Meißels vom restlichen ZFSV gelöst. Der freistehende ZFSV-Probekörper wurde anschließend mit der Baggerschaufel in den ausgehobenen Graben gekippt, um die Trennfläche zwischen ZFSV und Substrat bzw. anstehendem Boden augenscheinlich untersuchen zu können.

Die Auswertung erfolgte vor Ort durch Inaugenscheinnahme der ZFSV-Körper sowie der Grabenwände. Zudem wurden unterschiedliche Laborprüfungen an entnommenen ZFSV-Proben durchgeführt.

Bei den augenscheinlichen Untersuchungen vor Ort konnte unabhängig von der Baumart in keinem Fall eine Einwurzelung festgestellt werden. Der ZFSV bildete eine glatte Oberfläche, auf der die Wurzeln einen dichten Filz ausbildeten (vgl. Abbildung 72, links). Beim Umwerfen der ZFSV-Blöcke blieben die Wurzeln überwiegend an der Grabenwand zurück. Nur vereinzelt hafteten der Wurzelfilz oder einzelne Wurzeln am ZFSV (vgl. Abbildung 72, rechts).



Abbildung 72: Wurzelfilz an Grabenwand (links), umgeworfener ZFSV-Probekörper mit wenigen Erd- und Wurzelanhaftungen (rechts)

Am ZFSV haftender Wurzelfilz oder einzelne Wurzeln ließen sich mit einem Haushaltsbesen abkehren. Wurzeln, die aus der Grabenwand herausstanden und bei Einbau von ZFSV umschlossen wurden, starben im ZFSV ab (vgl. schwarze Wurzelspitze in Abbildung 73, links), konnten aber 5-10 cm im Substrat bzw. gewachsenen Boden Wurzeln regenerieren (vgl. Abbildung 73, rechts).



Abbildung 73: Abgestorbene Wurzelspitze (links, Quelle Prof. Stützel), regenerierte Wurzeln ca. 5-10 Zentimeter entfernt von ZFSV (rechts)

Während der ersten Aufgrabungen im Jahr 2019 wurden gestörte ZFSV-Proben von Bruchmaterial in Eimern und ungestörte ZFSV-Proben mittels Prüfzylindern entnommen. Anhand der entnommenen ZFSV-Proben konnten an allen drei Baumstandorten die Sieblinien nach DIN EN ISO 17892-4 [177], Korn-, Trockendichten und Wassergehalt nach DIN 18125 [178] sowie Glühverluste nach DIN 18128 [179] bestimmt werden. Aus Trocken- und Korndichte wurde das Porenvolumen berechnet. Ergänzend wurden an einer ZFSV-Probe auch die Porosität und Porenradienverteilung mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt, um einen Vergleichswert zum berechneten Porenvolumen aus Trocken- und Korndichte zu erhalten. Des Weiteren erfolgte an einer Bodenprobe des Baumstandorts Linde die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [61]. Zur Ermittlung der Umweltverträglichkeit von ZFSV wurden zusätzlich je Baum Prüfungen an Feststoff und Eluat (flüssige Lösung) nach LAGA TR Boden 2004 [154] durchgeführt. Die Prüfungen der ZFSV-Proben erfolgten in einem Unterauftrag durch ein externes Bodenlabor. Das Versuchsprogramm und die -ergebnisse sind folgend dargestellt:

Tabelle 13: Versuchsprogramm und -ergebnisse des im Versuchsfeld eingebauten ZFSV

Prüfung	Linde	Platane	Esche
Sichtbarer Wurzeleinwuchs	nein	nein	nein
Sieblinie	S, u', g'	S, u', g'	S, u', g'
Wassergehalt [M.-%]	20,9 - 21	18,2 – 19,8	18,9 – 19,8
Korndichte [g/cm ³]	2,683	2,767	2,614
Trockendichte [g/cm ³]	1,549	1,541 – 1,601	1,454 – 1,543
Porenvolumen berechnet [Vol.-%]	42,3	40,2 – 42,4	41,0 – 44,4
Porenvolumen Quecks. [Vol.-%]	/	32,73	/
Glühversuch [V _{gl} in M.-%]	0,6	0,8	0,9
Wasserdurchlässigkeit [k _f in m/s]	10 ⁻⁷	/	/
pH-Wert	11,6	11,5	11,6
Elektr. Leitfähigkeit	714	661	686

/ = Prüfung nicht durchgeführt

Die Laborergebnisse zeigten, dass das Porenvolumen über den geforderten 30 Vol.-% lag. Trotzdem konnte kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden. Der Unterschied zwischen dem berechneten Porenvolumen und dem Porenvolumen mittels Quecksilberporosimetrie lag vermutlich darin, dass bei der Quecksilberporosimetrie nur Poren im Messbereich zwischen 0,002 und 100 Mikrometern betrachtet wurden. Vermutlich reichen auch 100 Mikrometer Porendurchmesser nicht, um einen Wurzeleinwuchs zu ermöglichen, da die Wurzelspitzen in der Regel dicker sind. Hierzu werden aktuell Messungen durchgeführt, um die dünnsten Wurzelspitzen zu ermitteln. Alle Poren, die noch dünner sind, können dann als nicht durchwurzelbar klassifiziert werden. Bei dem berechneten Porenvolumen wurden keine Messgrenzen berücksichtigt. Da mit den Porenvolumen-Normversuchen keine direkten Aussagen zur maximalen Porengröße und der Durchgängigkeit von Poren möglich sind, wurden als weitergehende Untersuchungen, zusätzlich zu den Norm-Laboruntersuchungen, ZFSV-Probestücke mittels Lichtmikroskop analysiert. Diese Untersuchungen dienten als erster Test, ob weitergehende Erkenntnisse durch Mikroskopuntersuchungen hinsichtlich der maximalen Porengröße und -durchgängigkeit von ZFSV möglich sind. An der Ruhr-Universität Bochum wurde ein Fluoreszenz-Stereo-Zoom-Mikroskop der Marke ZEISS (Axio Zoom.V16) benutzt. Damit sind Bildaufnahmen bis zu einer 50-fachen Vergrößerung möglich.

Eine aus dem Versuchsfeld ungestört entnommene ZFSV-Probe wurde zunächst im Prüfzylinder bis zur Gewichtskonstanz bei 100°Celsius getrocknet. Anschließend wurden größtmögliche ZFSV-Probestücke mit einer Feinoszillationssäge herausgeschnitten. Geeignete Probestücke wurden dokumentiert (vgl. Abbildung 74, links). Anschließend wurden die Bruchflächen der Probenstücke mittels Mikroskops in einer 5-fachen Vergrößerung dahingehend betrachtet, in welchen Bereichen auf der Bruchfläche

Auffälligkeiten erkennbar sind, die ggf. als Poren identifiziert werden können (vgl. Abbildung 74, rechts).



Abbildung 74: Dokumentation der ZFSV-Probestücke (links) und Aufnahme mit 5-facher Vergrößerung der ZFSV-Bruchflächen mittels Mikroskop, in der Mitte eine erkennbare Auffälligkeit in Form eines schwarzen „Flecks“ (rechts)

Anschließend wurden die Bereiche der Probenoberflächen ausgewählt, an denen Auffälligkeiten erkennbar waren. Diese wurden bei 25-facher Vergrößerung näher betrachtet. Beispielsweise war in Abbildung 74, rechts ein schwarzer Fleck zu erkennen, welcher zur Betrachtung unter 25-facher Vergrößerung ausgewählt wurde. Der „Fleck“ wurde als Pore mit einem Durchmesser von ca. einem halben Millimeter identifiziert (vgl. Abbildung 75, rechts). In einzelnen Fällen konnten Poren bis zu einer Größe von einem Millimeter festgestellt werden (vgl. Abbildung 75, links). Tiefergehende Poren lagen nicht vor. Eine Aussage zum Porenvolumen oder zur Porosität einer ZFSV-Probe war mittels Mikroskops nicht möglich, jedoch zeigen die Ergebnisse wertvolle Hinweise zu maximalen Größen von Poren in ZFSV.

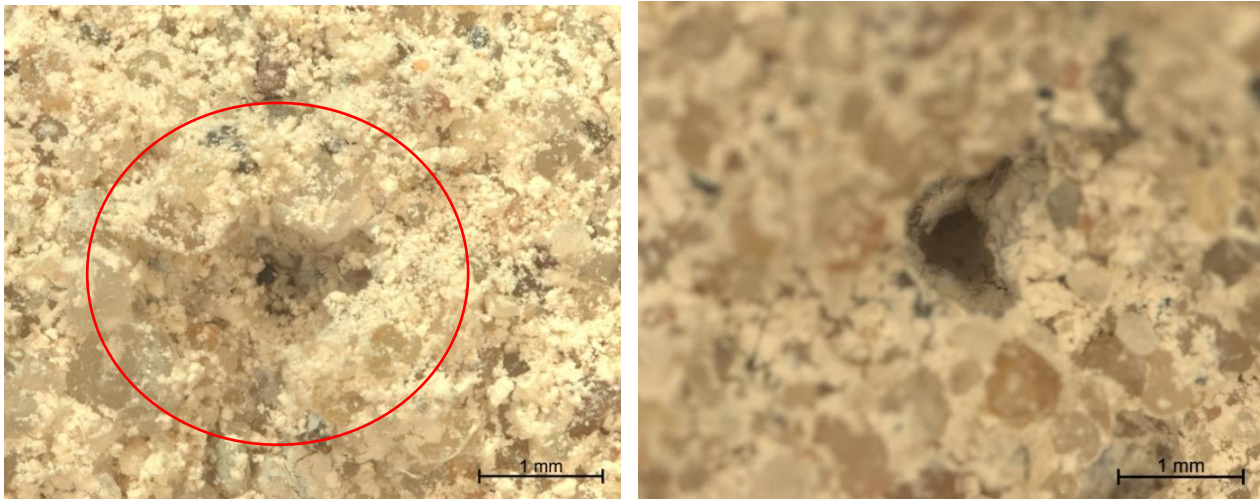


Abbildung 75: Aufnahmen mit 25-facher Vergrößerung: Pore bis zu einer Größe von einem Millimeter (links) und Pore mit einer Größe von einem halben Millimeter (rechts, vgl. Abbildung 74, rechts, „schwarzer Fleck“ bei 5-facher Vergrößerung)

Aufgrund der erhöhten pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeit im Eluat des ZFSV wurden im Nachgang dieser Untersuchungen weitere Bodenproben aus den am ZFSV angrenzenden Substraten und anstehenden Boden entnommen. Ziel war die Ermittlung des pH-Wertes bzw. des Ausspülungsverhaltens von ZFSV in die angrenzenden Böden, um dadurch weitere Rückschlüsse auf die Umweltverträglichkeit von ZFSV, insbesondere an Baumstandorten, ziehen zu können. Dabei wurden Bodenproben in ca. einem halben Meter Tiefe jeweils direkt angrenzend am ZFSV sowie mit Abständen von einem halben und einem Meter zum ZFSV im anstehenden Boden und in einem Abstand von einem halben Meter im Substrat entnommen. Zum Vergleich erfolgte die Entnahme von weiteren Bodenproben von anstehendem Boden und Substrat an einem Baumstandort ohne ZFSV im Versuchsfeld. Der ZFSV war an der Oberfläche nicht fest, vermutlich aufgrund der geringen Temperatur von ca. 0° Celsius bei Einbau [96, S. 68f.]. Wurzeln der Linde durchwuchsen an einer Stelle die gesamte Grabenbreite durch den nicht festen ZFSV (vgl. Abbildung 76). Daher wurde auch eine weitere ZFSV-Probe des nicht festen ZFSV entnommen und daran ebenfalls der pH-Wert bestimmt. Der pH-Wert im nicht abgebundenen ZFSV betrug im Feststoff 8,1 und im Eluat 8,6. Somit sind diese pH-Werte um ca. 3,0 niedriger als im ausgehärteten ZFSV (vgl. Tabelle 13).



Abbildung 76: Durchwurzelung des nicht festen ZFSV an der GOK am Baumstandort Linde

Die Ergebnisse der pH-Wert-Messungen sind in Tabelle 14 dargestellt. Die pH-Werte lagen entweder unter dem Richtwert von 8,5 [67, S. 37] oder geringfügig darüber. Weitere Zusammenhänge waren nicht erkennbar, da die pH-Werte sehr uneinheitlich waren. Für weitere Aussagen sind größere Stichproben notwendig.

Tabelle 14: Ergebnisse der pH-Wert-Messungen im Versuchsfeld Dodesheide

Abstand	Substrat		anstehender Boden	
	Feststoff (CaCl ₂)	Eluat	Feststoff (CaCl ₂)	Eluat
direkt am ZFSV	9,0	7,8	7,2	8,2
0,5 Meter Abstand vom ZFSV	7,0	7,4	8,8	9,0
1,0 Meter Abstand vom ZFSV	/	/	6,3	7,4
Baumstandort ohne ZFSV	7,2	7,5	6,2	7,5

/ Messungen wurden nicht durchgeführt

7.3 Diskussion und Einordnung der Untersuchungsergebnisse

Folgend werden zunächst die Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen und Feldversuche separat diskutiert. Anschließend erfolgt eine Einordnung der Ergebnisse untereinander mit der Darstellung weiterhin bestehender Unsicherheiten bzgl. des Schutzes vor Wurzeleinwuchs durch ZFSV.

7.3.1 Experimentelle Untersuchungen

Die unter Kapitel 7.3.1 beschriebene Diskussion der experimentellen Untersuchungen wurde im Rahmen des IKT-Warentests „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau“ durchgeführt und sind in gekürzter Fassung in den Abschlussberichten dargestellt [7; 8]. Die hier dargestellten ausführlichen Beschreibungen aus dem „Teilprojekt Schutz vor Wurzeleinwuchs“ sind die Grundlagen für die Kurzfassungen in den Berichten [7; 8] und wurden durch den Autor maßgebend verfasst.

Insgesamt zeigen die bei den **Outside-Out-Versuchen** eingesetzten ZFSV tendenziell eine abweisende Wirkung auf Wurzeln. Dies zeigt insbesondere der Vergleich zwischen dem Referenzversuch ohne ZFSV und den Versuchen mit ZFSV. Bei den Referenzversuchen mussten die Wurzeln bis zur Sohle 32,5 cm tief wachsen und hatten ein Bodenvolumen von knapp 20 Litern zur Verfügung. Bei den Pflanzversuchen mit ZFSV mussten die Wurzeln ca. 20 cm tief bis zur ZFSV-Oberfläche wachsen und hatten ein Bodenvolumen von ca. 15 Litern zur Verfügung. Da alle Ilex an der Oberfläche ähnlich groß gewachsen waren, wird angenommen, dass dies tendenziell auch für die Wurzelmasse gelten sollte. Diese Annahme wird mit den hier vorliegenden Versuchsergebnissen bestätigt, da das Bodenvolumen bei allen ZFSV-Versuchen entsprechend gut durchwurzelt war. Bei Referenzversuch A waren zwar Wurzeln bis zur Kübelsohle gewachsen, jedoch war der Wurzelballen (Volumen) deutlich weniger stark ausgeprägt als bei den ZFSV-Versuchen. Die Schlussfolgerung hieraus ist, dass den Wurzeln in den ZFSV-Versuchen tatsächlich weniger Wurzelraum zur Verfügung stand und somit der ZFSV einen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs leisten kann.

Da bei den Materialien A, B, C und E kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden konnte, wird weiterhin angenommen, dass die Wasserdurchlässigkeit ein Faktor für den Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs sein kann, sofern die Grundstruktur des ZFSV aus gewaschenen Sand-Kies-Körnungen besteht. Bei diesen Materialien bestätigen die Versuchsergebnisse, dass ein Durchlässigkeitsbeiwert k_f von kleiner 10^{-5} m/s einen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs leisten kann. In der Praxis sind jedoch stets auch die weiteren Umgebungsbedingungen, insbesondere die Parameter des anstehenden Bodens, zu beachten [151, S. 42]. D.h., je geringer beispielsweise der Durchlässigkeitsbeiwert des anstehenden Bodens ist, desto geringer sollte auch der Durchlässigkeitsbeiwert des ZFSV sein, damit der ZFSV tatsächlich seinen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs entfalten kann.

Jedoch sind bei allen Materialien mögliche Risiken eines Wurzeleinwuchses nicht gänzlich ausgeschlossen. Bei den Materialien A, B, C und E sind Oberflächenauffälligkeiten in Form von Rissen oder Trennflächen zwischen ZFSV und Bauwerken vorhanden, die ggf. durch Wurzeln erschlossen werden können (vgl. Abbildung 12). Bei Material D sind bei den Pflanzenversuchen Wurzeln eingewachsen. Die maßgebliche Ursache dafür ist jedoch bisher nicht abschließend geklärt. Aus diesem Grund wurden alle Probekörper in neue Pflanzkübel eingesetzt, wieder in die Pflanzlöcher zurückgelegt und mit den dazugehörigen Ilex erneut bepflanzt. Ziel sind weitere Langzeiterkenntnisse zum Wachstumsverhalten der Wurzeln in und am ZFSV. Da Wurzeln i.d.R. vergleichsweise langsam wachsen und der ZFSV für mehrere Jahrzehnte im Leitungsbau eingesetzt werden soll, sind die Versuche mit Pflanzen zunächst als Kurzzeit-Plausibilitätsnachweise zu sehen, die auf Langzeitwirksamkeit untersucht werden sollten. Falls in Zukunft weitere Pflanzversuche durchgeführt werden sollen, sind Platten unter den Pflanzkübeln im Boden ggf. hilfreich als Schutz vor Wurzeleinwuchs anderer Pflanzen von außen. Zudem sollte das gesamte bepflanzte Areal zunächst großflächig von Unkraut befreit werden. In weiteren Forschungsvorhaben sollten die maßgeblichen Parameter (Durchlässigkeit, Porenräume, Organik etc.) für potentiellen Wurzeleinwuchs in ZFSV untersucht werden.

Folgend werden die Versuchsergebnisse der einzelnen Materialien zusammenfassend dargestellt:

Tabelle 15: Versuchsergebnisse der experimentellen Untersuchungen zu ZFSV

Material	Wasserdurchlässigkeit	Oberflächenauffälligkeiten	Wurzeleinwuchs
A	$1,80 \times 10^{-6}$ m/s	ja	nein
B	$3,93 \times 10^{-6}$ m/s	ja	nein
C	$4,39 \times 10^{-6}$ m/s	ja	nein
D	$5,08 \times 10^{-9}$ m/s	nein	ja
E	$3,82 \times 10^{-7}$ m/s	ja	nein

7.3.2 Feldversuche

Die dargestellte Diskussion der Ergebnisse der Feldversuche in Kapitel 7.3.2 wurde im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ durchgeführt und ist weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde, mit fachlicher Unterstützung von insbesondere Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel (RUB) und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc. (AGFW) [6, S. 122ff.]^{1, S. 41}. Die Ergebnisse der Feldversuche werden folgend auch insbesondere in Zusammenhang mit den Ergebnissen der In-situ-Beobachtungen in Kapitel 6.2 diskutiert, die ebenfalls im oben aufgeführten Forschungsvorhaben durchgeführt wurden.

Die Untersuchungen im Versuchsfeld Dodesheide (vgl. Kapitel 7.2) zeigten, dass mit der eingesetzten ZFSV-Rezeptur über den Zeitraum von einem Jahr an den Baumarten Platane, Esche und Linde ein Wurzeleinwuchs in den ZFSV nicht festgestellt werden konnte.

Nach Literatur [57, S. 148; 151, S. 42] sind die wesentlichen Parameter für das Verhindern von Wurzeleinwuchs die Porosität und die Packungsdichte. Beim Vergleich der berechneten Porenvolumen des ZFSV im Versuchsfeld Dodesheide und der Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen (vgl. Kapitel 6.2) ist festzustellen, dass der ZFSV ein höheres Porenvolumen besitzt als die Sandbettungen, mit Ausnahme der In-situ-Aufgrabungen Nr. 8 und Nr. 9. Die dortige Sandbettung wies ein mit dem ZFSV vergleichbares hohes Porenvolumen (≥ 40 Vol.-%) auf. Allerdings zeigten sich dort, im Gegensatz zum ZFSV, geringfügige Wurzelinteraktionen mit der Bettung. Bei Betrachtung der Porenvolumen aller In-situ-Sandbettungen kann festgehalten werden, dass Wurzeleinwuchs im Bereich von 22 bis 42 Vol.-% festgestellt werden konnten.

Die Korndichten des ZFSV waren vergleichbar mit den Korndichten der Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen (vgl. Kapitel 6.2) und wurden zu ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Die Trockendichten des ZFSV waren z.T. mit $1,5$ bis $1,6 \text{ g/cm}^3$ geringer als bei den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen.

Die Aufgrabungsergebnisse aus Kapitel 6.2 zeigten, dass ebenfalls die (Wasser-) Durchlässigkeit von Böden im Zusammenhang mit möglichem Wurzeleinwuchs stehen kann. Die Durchlässigkeit des ZFSV wurde als schwach durchlässig ermittelt. Bei einer vergleichbaren schwachen Durchlässigkeit einer stark verdichteten Sandbettung bei Aufgrabung Nr. 2 wurde ebenfalls kein Wurzeleinwuchs festgestellt. Somit konnte in situ als ein geeigneter bodenmechanischer Parameter hinsichtlich der Wurzelfestigkeit die Durchlässigkeit ermittelt werden. In weiteren vergleichenden Untersuchungen sollten die Zusammenhänge zwischen der Durchlässigkeit von ZFSV und Sandbettungen genauer untersucht werden, um ermitteln zu können, bis zu welcher Durchlässigkeit Wurzeln einwachsen können und in welchen Boden Wurzeln wachsen, wenn sie an einer Trennfläche zwischen ZFSV und Sandbettung mit gleicher Durchlässigkeit anstehen.

Weitere Untersuchungen sind hinsichtlich der Zusammenhänge von Wurzelfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit zwischen bindigen und nicht-bindigen Böden bzw. der Höhe des Anteils von Schluff und Ton in Böden notwendig. Im anstehenden Boden im Versuchsfeld Dodesheide mit tonigen und schluffigen Anteilen ist die Wasserdurchlässigkeit mit 10^{-10} m/s sehr gering, das Porenvolumen mit $40,8$ Vol.-% vergleichsweise hoch. In diesem Boden wurde vereinzelt Wurzelwuchs festgestellt. Dies könnte u.a. daran liegen, dass die Wurzeln durchgängige Poren aufgrund von biogenen Vorgängen (z.B. Wurmlöchern oder Mausegängen) erschlossen haben. Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass unterhalb des ZFSV keine Wurzeln im anstehenden Boden festgestellt werden konnten, wobei in diesen Tiefen mit keinen biogenen Poren mehr zu rechnen ist. Diese Hypothese kann zurzeit angenommen werden, da in den ZFSV im Versuchsfeld und in In-situ-

Sandbettungen mit Durchlässigkeiten von 10^{-7} m/s kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden konnte.

Eine Aussage zum Porenvolumen von ZFSV war mittels Mikroskops nicht möglich, jedoch gaben die Aufnahmen einen wertvollen Hinweis zur maximalen Porengröße im ZFSV. Hierbei ist als Hypothese zum möglichen Wurzeleinwuchs festzuhalten, dass wenn keine durchgängigen oder tiefergehenden Poren in ausreichender Größe bzw. mit ausreichendem Durchmesser vorhanden sind, ein Wurzeleinwuchs in den ZFSV nicht stattfinden kann.

Enthält ZFSV Zement als Bindemittel, kann dies bei der Herstellung von ZFSV die Ursache für pH-Werte im alkalischen Bereich sein [57, S. 131]. Der pH-Wert ist somit ein weiterer Parameter, der ggf. das Wurzelwachstum beeinflussen kann. Z.B. wird nach FLL [67, S. 37] für Baumsubstrate ein maximaler pH-Wert von 8,5 für ein ausreichendes Baum- und Wurzelwachstum gefordert. Dabei wird zwischen kalkliebende (7,0 bis 8,5) und kalkmeidende (5,0 bis 7,0) Pflanzen unterschieden [67, S. 37]. Bei Bäumen ist allerdings meist eine weite pH-Amplitude feststellbar und es ändern sich nur die in Symbiose vorkommenden Mycorrhiza-Pilzarten pH-abhängig.

Im Versuchsfeld Dodesheide konnte festgestellt werden, dass Wurzeln einer Linde im nicht ausgehärteten ZFSV mit einem pH-Wert (CaCl_2) von 8,1 und pH-Wert im Eluat von 8,6 gewachsen sind. In den ausgehärteten ZFSV mit pH-Werten im Eluat von über 11 waren hingegen keine Wurzeln (Linde, Platane und Esche) eingewachsen. Bis zu welcher maximalen Grenze Wurzeln wachsen können, ist in weiteren Laborversuchen zu untersuchen.

Nach LAGA [154, S. 16] sind die pH-Werte des ZFSV im Versuchsfeld Dodesheide der Einbauklasse Z1.2 zuzuordnen. Dies bedeutet, dass ggf. beim Aushub eine weitere Verwertung bzw. Wiederverwertung des ZFSV durch den erhöhten pH-Wert negativ beeinflusst werden kann, zumindest innerhalb eines Jahres nach Einbau. Beim im Versuchsfeld eingesetzten ZFSV wurden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit oberhalb des Grenzwertes der Einbauklasse Z0 gemessen. Alle weiteren ermittelten Parameter aus Feststoff- und Eluatanalyse wurden als unkritisch deklariert und der Einbauklasse Z0 zugeordnet. Erste wissenschaftliche Untersuchungen von Simon [57, S. 131f.] zeigten zudem, dass der pH-Wert eines ZFSV innerhalb von 56 Tagen von 12,5 auf 10,4 ausgespült werden kann. Dies führt zu der zusätzlichen Frage hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von ZFSV, ob Ausspülungen des ZFSV das umliegende Erdreich negativ beeinflussen können.

Erste Ergebnisse zu Ausspülungen des pH-Wertes von ZFSV in das umliegende Erdreich im Versuchsfeld Dodesheide zeigten, dass in unmittelbarer Nähe im anstehenden Boden und Substrat ein, im Vergleich zu Bereichen im Versuchsfeld ohne ZFSV, erhöhter pH-Werte festgestellt werden konnte. Nach LAGA sind die pH-Werte im Eluat gemessen maßgeblich [154, S. 6]. Alle im Versuchsfeld Dodesheide gemessenen Eluat-pH-Werte im

anstehenden Boden und Substrat lagen unterhalb des maximalen Grenzwertes der Einbauklasse Z0 (<9,5 [154, S. 11]).

Für den Einsatz von Baumsubstraten sind die Feststoff-pH-Werte (CaCl_2) maßgeblich [67, S. 37]. Der im Versuchsfeld im direkten Kontaktbereich zum ZFSV ermittelte pH-Wert im Substrat lag mit 9,0 über dem Grenzwert von 8,5 nach FLL [67, S. 37]. Bei 0,5 Meter Abstand im Substrat war der pH-Wert bereits wieder vergleichbar mit den Messwerten an einem Baumstandort ohne ZFSV. Bei den pH-Werten direkt am ZFSV war außergewöhnlich, dass der pH-Wert im Feststoff gemessen höher ist als der im Eluat gemessene pH-Wert. Daher sind weitere Messungen des pH-Wertes im Versuchsfeld notwendig, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Eine Anomalie war bei den pH-Wert-Messungen im anstehenden Boden festzustellen. Der pH-Wert im anstehenden Boden direkt am ZFSV liegt mit 7,2 um 1,0 höher als der Vergleichswert ohne ZFSV und dennoch weit unterhalb des Grenzwertes von 8,5. Jedoch wurde der pH-Wert in 0,5 Meter Abstand zum ZFSV im anstehenden Boden mit 8,8 gemessen. Dies war wesentlich höher als zum Vergleichswert und über dem Grenzwert nach FLL [67, S. 37]. Der pH-Wert in einem Meter Abstand fällt deutlich ab und ist im Bereich des Vergleichswerts ohne ZFSV. Warum der Messwert in 0,5 Meter Abstand zum ZFSV wesentlich höher war als der Messwert direkt am ZFSV kann auf Basis der Messungen nicht abschließend identifiziert werden. Auch hier sind weitere Untersuchungen im Versuchsfeld für eine breitere statistische Aussagekraft notwendig. Jedoch ist festzuhalten, dass keine negativen Auswirkungen auf die Vitalität des Baumes nach einem Jahr Versuchslaufzeit augenscheinlich zu erkennen waren. In weiteren Langzeitmessungen sollte die Entwicklung des pH-Wertes in unterschiedlichen Tiefen im ZFSV, Substrat und anstehenden Boden ggf. auch unter dem ZFSV sowie die Vitalität der Bäume beobachtet werden, um die langfristige Umwelt- und Baumverträglichkeit von ZFSV weitergehend untersuchen zu können.

Die Beobachtungen am Versuchsfeld Dodesheide [96, S. 66] und bei Aufgrabung Nr. 8 und 9 (vgl. Kapitel 6.2) zeigten, dass Baumsubstrate (im Versuchsfeld Dodesheide in Kombination mit vertikalen Belüftungsrohren) das Wurzelwachstum in diesen Bereichen fördern.

Im Versuchsfeld Dodesheide konnte ausgeprägtes Wurzelwachstum in den Substraten mit vertikalen Belüftungsrohren nach knapp zehn Jahren Versuchslaufzeit festgestellt werden. Der Großteil der Wurzelmasse befand sich in den Substraten. Aus den Substraten wuchsen stärkere Wurzeln in das umliegende Erdreich. Jedoch ist aufgrund des Prüfprogramms im hier vorliegenden Forschungsvorhaben nicht ersichtlich, ob die Wurzeln aufgrund des Substrates, der Belüftungsrohre oder der Kombination aus beidem gewachsen sind [96, S. 66f.].

Bei den Aufgrabungen Nr. 8 und Nr. 9 (vgl. Kapitel 6.2) war das Substrat anscheinend so wurzelwachstumsfördernd, dass kaum Wurzeln aus dem Substrat in die tiefer liegende Bettung gewachsen sind. Dies bestätigt die Annahmen des Dichtefallenmodells (vgl.

Kapitel 2.3.3), dass Wurzeln an einer Trennfläche zwischen porenreichen und porenarmen Böden bevorzugt in den porenreichen Bereich wachsen.

7.3.3 Einordnung der Untersuchungsergebnisse

Folgend werden die Ergebnisse aus den In-situ-Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.2), experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 7.1 und 7.3.1) und Feldversuchen (vgl. Kapitel 7.2 und 7.3.2) zusammenfassend eingeordnet sowie mit den bisherigen Erkenntnissen zur Wurzelfestigkeit von ZFSV (vgl. Kapitel 3.2 und 3.4.2) im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit diskutiert. Weiterhin bestehende Unsicherheiten hinsichtlich der Wurzelfestigkeit von ZFSV werden identifiziert und dargestellt.

Das maßgebliche Ergebnis der Untersuchungen ist, dass kein Wurzeleinwuchs in ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen in Pflanz- und Feldversuchen festgestellt werden konnte (vgl. Kapitel 7.1 und 7.3.1 sowie [6, S. 122; 96, S. 116]). Eine Ausnahme bildet weiterhin ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen, wie bereits in [57, S. 57] beschrieben wurde. Mit dem durchgeführten Prüfprogramm konnte jedoch nicht ermittelt werden, warum Wurzeln in diese Art von ZFSV einwachsen können. Die Wasserdurchlässigkeit dieses Materials ist, im Vergleich mit den ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen, sehr gering (5×10^{-9} m/s). Trotzdem wurde Wurzeleinwuchs festgestellt. Die Ergebnisse von [57, S. 57] zeigen jedoch auch, dass bei einem ZFSV aus Bodenaushub mit Tonmineralen Wurzeln auch in eine Porosität kleiner 30 Vol.-% eingewachsen sind. Daher scheinen nicht die definierten Prüfparameter für ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen falsch zu sein, sondern ausschließlich für den Fall ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen nicht geeignet zu sein.

Obwohl Wurzeleinwuchs in den ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen festgestellt wurde, konnte trotzdem innerhalb einer Wachstumsperiode eine Barrierefunktion festgestellt werden. Es ist in Zukunft zu beobachten, ob die Wurzeln nur den Randbereich dieses ZFSV erschließen können oder über die Zeit den gesamten ZFSV durchwachsen. Dies würde weitere wichtige Hinweise zur Mindestummantelung von Rohrleitungen mit ZFSV liefern. Auf Basis der kurzzeitigen Versuchsergebnisse scheinen schon Ummantelungen von wenigen Dezimetern für einen Schutz vor Wurzeleinwuchs ausreichend zu sein. Jedoch sind Langzeit-Ergebnisse für abschließende Aussagen abzuwarten. Zudem dürfen keine Angriffspunkte in Form von Rissen oder Trennflächen im ZFSV vorhanden sein.

Weitergehend kann dargestellt werden, dass ZFSV-Rezepturen, die im Rahmen des IKT-Warentests [7; 8] nicht ausschließlich für den Anwendungsfall „Schutz vor Wurzeleinwuchs“ hergestellt wurden, ebenfalls einen hohen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs leisten können.

Hinsichtlich der maßgebenden, wurzelabweisenden Parameter zeigten die Feldversuche, dass auch in ZFSV mit Porositäten größer 30 Vol.-% keine Wurzeln innerhalb eines Jahres

einwachsen [6, S. 122]. Jedoch ist hier festzuhalten, dass der anstehende Boden aus Baumsubstraten besteht, welche für Wurzeln einen attraktiven Wurzelraum darstellen. Inwieweit die gleiche Rezeptur auch in hoch verdichteten, urbanen Böden wurzelfest ist, kann somit nicht festgestellt werden. Zudem war die Interaktionszeit von einem Jahr vergleichsweise gering. Langzeit-Beobachtungen sind notwendig, um abschließende Aussagen darstellen zu können. Eine Änderung des bisher dargestellten Grenzwertes von kleiner 30 Vol.-% für einen umfassenden Schutz vor Wurzeleinwuchs wird somit nicht empfohlen. **Zudem kann Arbeitshypothese 4 der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) im Rahmen der bisherigen Untersuchungen bzw. Untersuchungsdauern nicht verifiziert werden. Da jedoch bei keiner der bisherigen Pflanzversuche in ZFSV aus vorwiegend Sand-Kies-Gemischen Wurzeleinwuchs festgestellt wurde, ist anzunehmen, dass ZFSV mit geringen Porositäten langfristig wurzelabweisend ist, wenn die Porenstruktur und somit die Porosität dauerhaft erhalten bleiben.**

Die Wasserdurchlässigkeit scheint ebenfalls geeignet zu sein die Wurzelfestigkeit von ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen zu beschreiben. Erste Zusammenhänge zwischen Wasserdurchlässigkeiten von ZFSV und Sandbettungen mit Wurzelinteraktionen konnten durch die Feldversuche und In-situ-Beobachtungen hergestellt werden. Weder in ZFSV mit einer Wasserdurchlässigkeit von 10^{-7} m/s noch in eine Sandbettung von 10^{-7} m/s sind Wurzeln eingewachsen [6, S. 123]. Dies ist eine sehr kleine Stichprobe, die in Zukunft durch weitere Untersuchungen erweitert werden sollte. Bei allen im IKT-Warentest [7; 8] eingesetzten ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen wurden Wasserdurchlässigkeiten von kleiner 10^{-5} m/s festgestellt. In keinen dieser ZFSV wurde durch die Outside-Out-Versuche Wurzeleinwuchs festgestellt. Somit kann als erster Richtwert dargestellt werden, dass ZFSV mindestens einen Durchlässigkeitsbeiwert von kleiner 10^{-5} m/s aufweisen sollte. Jedoch ist auch hier weiterhin immer zu beachten, dass Wurzeln lebende Organismen sind, die sich ihren Umgebungen anpassen [19, S. 118]. Daher ist bei jedem Einsatz von ZFSV als Schutz vor Wurzeleinwuchs der anstehende Boden mitzubetrachten [151, S. 42]. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werte der Wasserdurchlässigkeit von kleiner 10^{-5} m/s sind als erste Richtwerte bzw. Mindeststandard für die Beschreibung der Wurzelfestigkeit von ZFSV zu verstehen, welcher beim Einsatz immer überprüft werden sollte. Wie bei der Porosität ist auch bei den Wasserdurchlässigkeiten der Einfluss von bindigen und organischen Anteilen auf die Wurzelfestigkeit in Zukunft zu untersuchen. **Arbeitshypothese 5 der vorliegenden Arbeit (vgl. Kapitel 4.2) kann somit nicht vollumfänglich bestätigt werden. Ein erster Zusammenhang zwischen Wurzelfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit von ZFSV konnte ermittelt werden. Jedoch gilt dieses Ergebnis zunächst nur für ZFSV aus vorwiegend Sand-Kies-Gemischen.**

Als nächster Schritt sollten die Porositäten der im IKT-Warentest [7; 8] eingesetzten Materialien untersucht werden. Dies war aufgrund des Prüfprogramms bisher nicht möglich. Anschließend sind weitergehende Zusammenhänge zwischen diesen Parametern bzgl. der Wurzelfestigkeit zu erwarten. Ggf. kann so ermittelt werden, ob derartige Zusammenhänge

zwischen Porosität und Wasserdurchlässigkeit bestehen, dass ggf. zur Prüfung als bautechnische Schutzmaßnahme nur einer der Parameter für eine hohe Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit ausreichend ist, zumindest für ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen.

Die in der hier vorliegenden Arbeit ermittelten pH-Werte von ZFSV waren nach dem Einbau vergleichsweise hoch und oberhalb der Vorgaben für Baumpflanzungen. Dies bestätigen auch Ergebnisse aus dem IKT-Warentest mit pH-Werten zwei Tage nach Einbau von 12,6 bis 13,2. Jedoch sanken auch hier die pH-Werte innerhalb von acht Wochen auf pH-Werte von 8,5 bis 10,0 [8, S. 141]. Dies deckt sich ungefähr mit den gemessenen pH-Werten nach sieben Wochen an mit Wasser durchspülten Probekörpern aus [57, S. 131]. Die pH-Werte von größer 11 im ZFSV im Versuchsfeld Dodesheide nach einem Jahr sind vergleichbar mit den Ergebnissen aus [57, S. 131] durch pH-Wert-Messungen an Probekörpern ohne äußere Einflüsse. Inwieweit ausschließlich der pH-Wert zur Wurzelfestigkeit beiträgt, konnte mit den Untersuchungen nicht ermittelt werden. Dies sollte in Zukunft mittels Pflanzversuchen untersucht werden. Erste nicht-veröffentlichte Test-Pflanzversuche zum Einfluss des pH-Werts wurden bereits an der Ruhr-Universität Bochum angesetzt und durchgeführt.

Folgende Unsicherheiten bestehen somit weiterhin bzgl. der Wurzelfestigkeit von ZFSV:

- Die Kornzusammensetzung von ZFSV hinsichtlich der Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit, insbesondere mit Blick auf die Höhe des bindigen und organischen Anteils, sodass Wurzeln in den ZFSV einwachsen können; bzw. nach [57, S. 149] wie folgt formuliert:
„Und welchen Einfluss haben verschiedene (quellfähige) Tonminerale, die im Bodenaushub enthalten sein können?“
- Die Korrelation zwischen Porosität und Wasserdurchlässigkeit hinsichtlich der Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit.
- Grenzwerte der Wasserdurchlässigkeit zur Wurzelfestigkeit von ZFSV.
- Der Einfluss des pH-Wertes auf das Wurzelwachstum und die Zeitdauer des pH-Wertes im alkalischen Bereich.
- Weitere Bodeneigenschaften zur Beschreibung der Wurzelfestigkeit von ZFSV. Die Ergebnisse zeigen, dass u.a. auch ein Unterschied zwischen ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen und ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen hinsichtlich der Festigkeit bzw. Härte bestehen kann (vgl. Abbildung 64).
- Minimale und maximale Mindestummantelungen von Rohrleitungen, die einen ausreichenden Schutz vor Wurzeleinwuchs gewährleisten und die zeitgleich so gering sind, dass so wenig wie möglich durchwurzelbarer Raum für Stadtbäume genommen wird.

8 Entwicklung von Prüfkonzepthen für bautechnische Schutzmaßnahmen

Die Ergebnisse aus Literaturstudium und durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass weiterhin einige Unsicherheiten bzgl. des Wurzeleinwuchses in bzw. an bautechnischen Schutzmaßnahmen vorhanden sind. Diese Unsicherheiten sollten in Zukunft weitergehend untersucht werden. Da Untersuchungen mit echten Wurzeln i.d.R. viel Zeit beanspruchen, ist es zielführend, wenn vorab Lösungsansätze entwickelt werden. Zunächst wird in diesem Kapitel ein weitergehendes Prüfkonzepth für die bautechnischen Schutzmaßnahmen wurzelfeste Rohrverbindungen, ZFSV als porenraumarmen Verfüllstoff sowie Folien und Platten entwickelt. Ergänzt werden diese Prüfkonzepthe mit einem bereits umgesetzten Versuchsaufbau zu Untersuchungen von bautechnischen Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1. Abschließend werden Empfehlungen für die Praxis auf Basis der Literaturstudie, den durchgeführten Untersuchungen und dem entwickelten Prüfkonzepth abgeleitet.

8.1 Entwicklung eines dreistufigen Prüfkonzepthes

Die bisher genutzten (Norm-)Prüfverfahren haben ihre Berechtigung als Prüfmethode und werden an sich nicht in Frage gestellt. Jedoch zeigen die wissenschaftlichen Untersuchungen (vgl. Kapitel 3, 5 und 7), dass teilweise Unsicherheiten bzgl. der Aussagekraft hinsichtlich der tatsächlichen Wurzelfestigkeit bestehen. Daher werden hier Vorschläge für Konzepte zur Prüfung von bautechnischen Schutzmaßnahmen entwickelt, die eine höhere Aussagekraft mit Blick auf den Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten sollen. Ziel der hier dargestellten Prüfkonzepthempfehlungen ist der nachhaltige und langfristig wirksame Einsatz von bautechnischen Schutzmaßnahmen.

Die hier dargestellten Prüfkonzepthe sind dreistufig gegliedert. Die erste Stufe und somit auch der Kern der Prüfkonzepthe sind die Norm-Prüfungen zur Wurzelfestigkeit. Bei porenraumarmen Verfüllstoffen liegen bisher keine Norm-Prüfungen zur Wurzelfestigkeit vor, daher werden hier Empfehlungen für mögliche Laborprüfungen gegeben. Mit diesen Norm-Prüfungen kann die grundsätzliche Eignung der geprüften Produkte ermittelt werden. Werden diese Prüfungen nicht bestanden, sind die zwei weiteren Prüfungsstufen nicht durchzuführen, da ein Wurzeleinwuchs bereits im Labormaßstab nicht auszuschließen ist.

Werden die Norm-Prüfungen bestanden, so ist als zweite Stufe die Ermittlung von möglichen Angriffspunkten für das Wurzelwachstum zielführend. Dies wird je nach bautechnischer Schutzmaßnahme vor oder nach Einbau durchgeführt. Die zweite Stufe ist somit als eine wesentliche Qualitätssicherungsmaßnahme zu verstehen. Denn sind keine Angriffspunkte für das Wurzelwachstum vorhanden, so ist auch ein Wurzeleinwuchs unwahrscheinlich. Bei ZFSV sowie Folien und Platten wird dieser Qualitätscheck auf der Baustelle durchgeführt. Zielführend sind hier mehrerer Muster-Baustellenbegleitungen, wodurch ein praxisnaher System-Check vor Ort durchgeführt werden kann.

Als dritte Stufe sollen Versuche mit Pflanzen durchgeführt werden. Bei Rohrverbindungen und porenraumarmen Verfüllstoffen bieten sich Pflanzversuche im Labormaßstab an, um die ausschließlich mechanischen Prüfungen aus Stufe 1 mit echtem Wurzelwachstum zu ergänzen. Die Norm-Prüfungen von Folien und Platten werden bereits mit Pflanzen durchgeführt. Daher soll in Stufe 3 untersucht werden, inwieweit Folien und Platten, die vertikal im Boden eingebaut sind, um- oder unterwachsen werden können. Die Versuche dienen somit als Validierung der Stufen 1 und 2. Je mehr Untersuchungsergebnisse mit Pflanzen vorliegen, desto besser kann die Aussagekraft der Norm-Prüfungen bewertet werden. Validieren ist im Duden definiert als:

„feststellen, dass eine bestimmte Methode für einen bestimmten Zweck geeignet und gültig ist“

Je mehr Daten aus vergleichbaren Untersuchungen mit Pflanzen an bautechnischen Schutzmaßnahmen vorliegen, desto besser kann die Aussagekraft der Norm-Prüfungen ohne Pflanzen validiert und weiterentwickelt werden. Dabei ist in Zukunft auch erneut zu diskutieren, inwieweit die derzeitigen Norm-Prüfungen für die Bestimmung der Wurzelfestigkeit ausreichend sind oder ob es Möglichkeiten gibt, diese Norm-Prüfungen weiter zu entwickeln oder neue Prüfmethode eingesetzt werden können. Denn bestehen die Schutzmaßnahmen die (Norm-)Prüfungen aus Stufe 1, aber es werden in Stufe 3 Wurzeleinwüchse festgestellt, so scheint die Methode für den Zweck „Wurzelfestigkeit“ zumindest fragwürdig zu sein.

Nicht für jede bautechnische Schutzmaßnahme und dazugehörige Stufe wird eine einzelne Prüfung als die maßgebliche dargestellt werden können. Dazu sind einige Prüfungen oder Erkenntnisse u.a. noch mit zu vielen Unsicherheiten behaftet. Daher werden in einzelnen Stufen mehrere Prüfverfahren dargestellt, die Hintergründe beschrieben und eine mögliche Empfehlung diskutiert. Die Norm-Prüfungen sind der Kern des erweiterten Prüfkonzeptes (Stufe 1) und werden umhüllt von der Ermittlung von Angriffspunkten zur Qualitätssicherung (Stufe 2) sowie der Validierung mit Pflanzversuchen für eine erhöhte Aussagekraft zum Schutz vor Wurzeleinwuchs (Stufe 3).

8.2 Wurzelfeste Rohrverbindungen

Folgend werden die in Kapitel 3.1 beschriebenen und in Kapitel 3.4.1 diskutierten Prüfverfahren sowie die Forschungsergebnisse aus Kapitel 5 dazu genutzt ein dreistufiges Prüfprogramm zur Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen zu entwickeln, wodurch ein dauerhafter Schutz vor Wurzeleinwuchs in der Praxis bestmöglich gewährleistet werden soll. Eine solche Vorgehensweise für wurzelfeste Rohrverbindungen wird bereits in [19, S. 122] gefordert. Grundlage der folgenden Beschreibungen sind die Ergebnisse aus [17; 19; 126], welche mit den Ergebnissen aus der vorliegenden Arbeit ergänzt bzw. bestätigt werden. Auch bei den folgenden Beschreibungen werden stoffschlüssige

Rohrverbindungen nicht mitbetrachtet, da sie nach [1, S. 18] keine Angriffspunkte für Wurzeleinwuchs bieten.

8.2.1 Stufe 1: Ermittlung von Grenzwerten des Anpressdrucks zur Überwindung des Dichtelements

Hier werden zunächst für den Nachweis der technischen Randbedingungen mechanische Labor-Prüfungen empfohlen. In aktuellen Normen [125; 127; 138] werden gesteckte Rohrverbindungen bei Erfüllung der Prüfkriterien einer Wasserinnendruck-Prüfung als wurzelfest beschrieben. Jedoch zeigen Untersuchungen mit Pflanzen (insbesondere Outside-In-Versuche), dass diese mechanische Prüfung eine stark vereinfachende Annahme in Bezug zum tatsächlichen Wurzelwachstum ist [9, S. 41]. Aber auch mit anderen physikalischen Prüfungen zum Langzeit-Dichtverhalten [129] ist bisher oftmals durch Pflanzversuche nicht ausreichend nachgewiesen worden, dass Wurzeln nicht einwachsen können. Die mechanischen (Norm-)Prüfungen sind aber im Vergleich zu Pflanzversuchen schnell durchzuführen und sind unabhängig von Wachstumsperioden. Somit dient die erste Stufe auch dazu, überhaupt zu ermitteln, dass eine ausreichende Voraussetzung für eine Wurzelfestigkeit vorliegen könnte. Denn wenn eine mechanische Prüfung nicht bestanden wird, dann ist es auch sehr unwahrscheinlich, dass keine Wurzeln einwachsen können. Daher werden folgende Prüfverfahren bzw. Untersuchungen dargestellt, die in der ersten Stufe durchgeführt werden können:

- Prüfung nach DIN 4060 [125] oder EN 1916 [37]
- Prüfung nach EN 14741 [129], ggf. mit höheren Belastungsstufen [130; 131] oder Messung des Anpressdrucks unter Scherlast nach [17, S. 177ff.], u.a. abhängig vom Rohrwerkstoff
- (Wasser-)Außendruckuntersuchung (empfohlen nach [17, S. 198])

Es sollte mindestens eine der o.g. Prüfungen durchgeführt werden. Die Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit von Stufe 1 wird höher sein, wenn alle Prüfungen durchgeführt werden.

Durch die Untersuchung der Anpressdruckverteilung kann ermittelt werden, ob auch im extremen Belastungsfall an der schwächsten Stelle mit dem schwächsten Anpressdruck einer Rohrverbindung ausreichend Druck ausgeübt wird, um einen Wurzeleinwuchs zu verhindern.

Als maßgeblich einzuhaltender Anpressdruck unter Scherlast wären mindestens die nach Prüfnormen bzw. den dazugehörigen Produktnormen vorgeschriebenen Drücke sinnvoll. Dies wäre ein nach Regelwerk vorgegebener Mindeststandard. Für eine bessere Aussagekraft sollten jedoch auch die in [17, S. 173ff.; 126, S. 37ff.] gemessenen radialen Wurzeldrücke berücksichtigt werden. Es wurden Wurzeldrücke bis zu 12 bar festgestellt (vgl. Kapitel 2.3.1). Für eine Aussage zum vollumfassenden Schutz vor Wurzeleinwuchs sollten auch diese Drücke bei der Prüfung berücksichtigt werden.

Es ist zu beachten, dass bautechnisch eine Erhöhung des Anpressdruckes nicht immer möglich sein wird. Gesteckte Rohrverbindungen müssen i.d.R. im Baugraben handhabbar zusammengeführt werden können. Zudem bestehen maximale Grenzen bzgl. der Festigkeit des Rohrwerkstoffs und der Stabilität der Rohrkonstruktion [17, S. 211].

Die Wasseraußendruckuntersuchung stellt eine Belastung der Rohrverbindung von außen dar und kann somit zumindest die Wuchsrichtung einer Wurzel (Durchdringung von außen nach innen) vergleichsweise besser darstellen.

Die Diskussion verdeutlicht umso mehr, wie unsicher eine mechanische Überprüfung der Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen ist. Zudem tritt eine Diskrepanz auf zwischen Mindeststandards nach Norm und den Ergebnissen aus weitergehenden Untersuchungen, die den Einwuchsvorgang vergleichsweise realitätsnäher darstellen. Jedoch sind hohe Anforderungen erforderlich, um einen Wurzeleinwuchs zuverlässig zu verhindern, da Outside-In-Versuche gezeigt haben, dass in viele Rohrverbindungen, trotz Einhaltung von Mindeststandards nach Norm, Wurzeln einwachsen können.

8.2.2 Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten

Hier wird die Messung der Größe von Ringspalt und Ringraum empfohlen. Wurzeleinwuchs kann entscheidend durch die Beschaffenheit der Rohrverbindungsgeometrie (Größe von Ringspalt und Ringraum) verhindert werden. Somit werden folgende Untersuchungsschritte für Stufe 2 empfohlen:

- Geometrische Messung des Ringspalts und Ringraums (nach [17, S. 199]).
- Prüfungen mit je sechs Rohrverbindungen

Es ist sinnvoll, eine detaillierte Analyse der Rohrverbindungsgeometrie durchzuführen. Durch die Messung der Rohrverbindungsgeometrie kann nachgewiesen werden, ob überhaupt ein Wurzeleinwuchs aufgrund der Größe des Ringraumes bzw. Ringspaltes möglich ist.

Wurzelspitzen können nach [51, S. 142] bis zu 0,2 Millimeter klein sein. Soll keine Wurzel in die Rohrverbindung einwachsen, so sollten mindestens die Wurzelspitzen nicht einwachsen können. Geringe Spaltbreiten können ebenfalls durch Haarwurzeln erschlossen werden. Es ist in Zukunft zu diskutieren, inwieweit auch Haarwurzeln (größer 100 µm) nicht einwachsen dürfen. Natürlich sollten keinerlei Wurzeln einwachsen, jedoch sind die Haarwurzellängen auf wenige Zentimeter begrenzt und sie sterben nach wenigen Tagen wieder ab. Ein tiefergehendes Wurzelwachstum durch die Haarwurzeln ist somit unwahrscheinlich.

Befinden sich in den geringen Spalten ausreichend Luft, Wasser oder Nährstoffe, könnte dies ggf. ein Anreiz sein, im Bereich der Muffe zu einem vermehrten Wurzelwachstum zu führen, was auch zu Wurzeleinwuchs führen kann (z.B. Aufdrücken des Spalts durch Wurzeldickenwachstum einer Wurzel, die direkt an dem Spalt außen entlang wächst und so

nach und nach mit der Querschnittserweiterung in den Spalt drückt bzw. gedrückt wird). Es sollte aber auch bewusst sein, dass vermutlich Spaltmaße von wenigen Mikrometern technisch schwer auszuführen sind. Die Outside-In-Versuche an KMR-Verbindungen (vgl. Kapitel 6.1.1) bestätigen, dass Wurzeln in kleinste Räume einwachsen können.

8.2.3 Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung

Hier wird die Durchführung von Outside-In-Versuchen empfohlen.

Die in der vorliegenden Arbeit recherchierten Untersuchungen zeigen, dass Wurzeln bei Outside-In-Versuchen auch in Rohrverbindungen einwachsen können, die nach Norm [125] wurzelfest sind. Solange nicht nachgewiesen ist, dass die Anforderungen aus Stufe 1 und 2 ausreichend darstellen können, dass kein Wurzeleinwuchs möglich ist, sollten weiterhin auch Versuche mit Pflanzen durchgeführt werden. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine Einbindung von Pflanzen für Prüfverfahren kein Hindernis ist, da nach maximal zwei Wachstumsperioden nachgewiesen werden konnte, dass Wurzeln das Dichtungsmaterial von nicht fachgerecht ausgeführten Kunststoffmantelrohr-Schrumpfmuffen unterwachsen können. Trotzdem ist jede Pflanze ein Individuum, welches durch viele Faktoren beeinflusst werden kann. Daher sind die Versuche immer in ausreichender Stichprobenanzahl und unter gleichen Randbedingungen durchzuführen.

Die Durchführung folgender Prüfung wird empfohlen:

- Outside-In-Versuche an mindestens sechs gesteckten Rohrverbindung

Um die Untersuchungen so vergleichbar wie möglich zu gestalten, sind die Lagerung der Pflanzen und die Versuchsdauern zu standardisieren. Dazu sollten in Zukunft die Versuche in Gewächshäusern mit konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 3.1.10 und 6.1.1), dass Versuchszeiten von maximal zwei Wachstumsperioden ausreichend sind, um eine Unterwanderung des Dichtungsmaterials von gesteckten Rohrverbindungen und Kunststoffmantelrohren zu provozieren. Daher ist die Empfehlung hier, die Outside-In-Versuche auf eine Wachstumsperiode zu begrenzen, um die Ergebnisse zeitnah erhalten zu können und auch Betriebskosten (z.B. Platzbedarf im Gewächshaus, Bewässerung, Pflege) einzusparen.

Eine weitere allgemeine Empfehlung ist, dass Outside-In-Versuche durchgeführt werden an unterschiedlichen Rohrverbindungen, die nach, in Anlehnung an oder angepasst an EN 14741 [129] geprüft wurden und beispielsweise die Eignung nach DIN 4060 [125] oder EN 1916 [37] in Verbindung mit DIN V 1201 [127] aufweisen. Somit kann ermittelt werden, inwieweit diese Normen zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit herangezogen werden können bzw. welche Grenzwerte der Anpressdrücke eingehalten werden sollten, um eine bessere Aussagekraft zur Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen zu erhalten.

8.3 Porenraumarme Verfüllstoffe (ZFSV)

Folgend werden die in Kapitel 3.2, 3.4.2 und 7 beschriebenen Untersuchungen und Forschungsergebnisse dazu genutzt einen Vorschlag für ein dreistufiges Prüfprogramm von ZFSV zu entwickeln, wodurch ein dauerhafter Schutz vor Wurzeleinwuchs in der Praxis bestmöglich gewährleistet werden soll.

8.3.1 Stufe 1: Ermittlung maßgeblicher Laborparameter

Hier werden die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit und der Porosität mittels Norm-Prüfverfahren empfohlen.

Eine Norm-Prüfung zur Wurzelfestigkeit von ZFSV ist bisher nicht vorhanden. Durch die Porosität [151, S. 42] und die Wasserdurchlässigkeit konnten bisher erste Ansätze für die Beschreibung der Wurzelfestigkeit von ZFSV dargestellt werden. Daher wird für Stufe 1 die Durchführung folgender Norm-Prüfungen empfohlen:

- Wasserdurchlässigkeits-Prüfung nach DIN 18130-1 bzw. DIN EN ISO 17892-11 [61]
- Quecksilberporosimetrie nach DIN ISO 15901-1 [186]

Bzgl. der Wasserdurchlässigkeit sind Richtwerte von kleiner 10^{-5} m/s ermittelt worden. Dies ist der Mindeststandard für das Bestehen der Stufe 1. Nach [151, S. 42] liegt der Grenzwert der Porosität bei kleiner 30 Vol.-%. Wird dies durch die ZFSV-Rezeptur erreicht, so ist ein Wurzeleinwuchs sehr unwahrscheinlich.

Solange nicht abschließend untersucht wurde, welchen Einfluss die Körnung auf die Wurzelfestigkeit hat, gelten diese Empfehlungen nur für ZFSV aus Sand-Kies-Gemischen mit sehr geringen bindigen und organischen Anteilen. Ist nicht ausreichend bekannt, ob während der Herstellung ausschließlich Sand-Kies-Gemische eingesetzt wurden, ist weitergehend die Körnung zu ermitteln.

Werden die Prüfungen bestanden, sind für eine höhere Sicherheit trotzdem die Weiteren zwei Stufen durchzuführen.

8.3.2 Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten (nach Einbau)

Hier wird eine Begehung des ZFSV nach Einbau bzw. nach Ziehen des Verbaus empfohlen.

Die Versuche im Maßstab 1:1 zeigen, dass Risse im ZFSV, z.B. durch das Ziehen des Verbaus, entstehen können. Risse können als durchgehende Pore betrachtet werden, die durch Wurzeln durchwachsen werden kann. Bestenfalls wird bei mehreren Muster-Baustellen eine Dokumentation der Angriffspunkte durchgeführt.

Folgende Oberflächenauffälligkeiten sollten bei der Begehung nach dem Verbauziehen dokumentiert werden:

- Risse im ZFSV in Bereichen des gezogenen Verbaus
- Risse im ZFSV an Bauteilen
- Augenscheinliche größere Spalten bzw. Trennflächen zwischen Bauteilen und ZFSV
- Weitergehend werden fünf Baustellenbegleitungen mit o.a. Untersuchungen der Oberflächenauffälligkeiten als vergleichende Materialtests empfohlen für eine breitere Datenbasis und höhere Aussagekraft zum Schutz vor Wurzeleinwuchs

Wurden Risse und/oder Trennflächen festgestellt, empfiehlt sich die Durchführung eines Schurfs in diesen Bereichen, um ermitteln zu können, ob die Risse durchgehend bis zur Rohrleitung sind. Ist dies nicht der Fall, sollte abgeschätzt werden, wie ausgeprägt die Ummantelung weiterhin noch ist und ob ggf. weiterhin ein Schutz vor Wurzeleinwuchs gewährleistet ist. Jedoch sind bisher keine Mindestummantelungsdicken bekannt.

8.3.3 Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung

Hier wird die Durchführung von Outside-Out-Versuchen empfohlen.

Hier gilt die gleiche Herangehensweise wie zu wurzelfesten Rohrverbindungen. So lange nicht abschließend geklärt ist, inwieweit und unter welchen Grenzwerten Wurzeln in ZFSV einwachsen können, sollten zur Validierung der labortechnischen Untersuchungen aus Stufe 1 weitergehende Pflanzversuche durchgeführt werden. Als Versuchsaufbau empfehlen sich die Outside-Out-Versuche aus Kapitel 7.1.3.

Die Durchführung folgender Outside-Out-Versuche wird empfohlen:

- Sechs Versuche mit der ZFSV-Rezeptur
- Zwei Kontrollversuche ohne ZFSV

Als Prüfdauer sollte mindestens eine Wachstumsperiode eingehalten werden. Jedoch sind bisher keine Langzeiterfahrungen bekannt, wodurch derzeit längere Prüfzeiten ggf. eine höhere Aussagekraft haben.

ZFSV wird in der Praxis unterhalb der GOK eingebaut und dies sollte dementsprechend in den Versuchen auch nachgebildet werden, damit keine äußeren Einflüsse, wie z.B. Sonneneinstrahlung oder Frost, während der Versuchszeit auf den ZFSV wirken. Aus diesem Grund sollten die Pflanzversuche im Boden eingegraben werden, um einen möglichst realitätsnahen Anwendungsfall nachbilden zu können.

Werden die Prüfungen aus Stufe 1 und 3 bestanden und sind keine Auffälligkeiten auf der Baustelle (Stufe 2) vorhanden, so sollte die geprüfte ZFSV-Rezeptur einen hohen Widerstand gegen Wurzeleinwuchs leisten.

Jedoch sind weiterhin die Grenzwerte bzgl. des Wurzeleinwuchses in ZFSV mit Unsicherheiten verbunden. Um Grenzwerte weitergehend definieren zu können, sind ggf. paarweise Vergleiche zwischen ZFSV und Böden zielführend. Das entsprechende Prüfkonzept wird folgend dargestellt.

Die folgende Versuchskonzeptentwicklung wurde im Rahmen des DBU-Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“ durchgeführt und ist weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde, mit fachlicher Unterstützung von insbesondere Herrn Prof. Dr. Thomas Stützel (RUB) und Herrn Sebastian Grimm, M.Sc. (AGFW) [6, S. 176ff.]¹, S. 41.

Mit Hilfe von paarweisen Vergleichen können die Wurzelfestigkeiten unterschiedlicher Böden und ZFSV experimentell ermittelt werden. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens [6] bzw. der vorliegenden Arbeit geben Hinweise zu den möglichen maßgeblichen Bodenparametern für Wurzeleinwuchs in Böden. Dazu gehört u.a. die Durchlässigkeit. Bezugnehmend auf das Dichtenfallenmodell (vgl. Kapitel 2.3.3) wachsen Wurzeln an einer Trennfläche zwischen zwei Böden in den porenreicheren Boden. Jedoch ist bisher nicht bekannt, in welchen Boden die Wurzeln wachsen, wenn ein sandiger Boden und ein ZFSV, z.B. mit gleicher Durchlässigkeit, zur Verfügung stehen. Dabei sollten zusätzlich Böden mit unterschiedlichen Anteilen von Ton und Schluff berücksichtigt werden. Dies soll mit einem paarweisen Vergleich nachgewiesen werden. Für Vergleichswerte können die eingesetzten Böden und ZFSV z.B. nach DIN 18130-1 [61] hinsichtlich ihrer Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden. Ein beispielhaftes Prüfprogramm ist in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Versuchsprogramm zum paarweisen Vergleich
(Erläuterung der Kürzel: ZA: ZFSV mit Durchlässigkeit A; BA: Boden mit Durchlässigkeit A; ZB: ZFSV mit Durchlässigkeit B; BB: Boden mit Durchlässigkeit B; etc.)

Kammer 1	ZA	ZB	ZC	ZD	BA	BB	BC
Kammer 2	ZB						
	ZC	ZC					
	ZD	ZD	ZD				
	BA	BA	BA	BA			
	BB	BB	BB	BB	BB		
	BC	BC	BC	BC	BC	BC	
	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD

Legende:
 Z = ZFSV
 B = Boden
 ZA, BA: $k_f = 10^{-6}$ m/s
 ZB, BB: $k_f = 10^{-7}$ m/s
 ZC, BC: $k_f = 10^{-8}$ m/s
 ZD, BD: $k_f = 10^{-9}$ m/s
 Insgesamt
 28 Versuche

In einem Pflanztopf werden vertikal nebeneinander ZFSV oder Böden mit gleichen oder unterschiedlichen Durchlässigkeiten eingebaut. Vor Einbau wird eine temporäre Trennplatte installiert, damit die ZFSV/Böden nebeneinander eingefüllt werden können. Nach Einfüllen wird die Trennplatte wieder entfernt und auf die Böden wird eine Versuchspflanze mit etwas Substrat zum Anwachsen gesetzt (vgl. Abbildung 77).

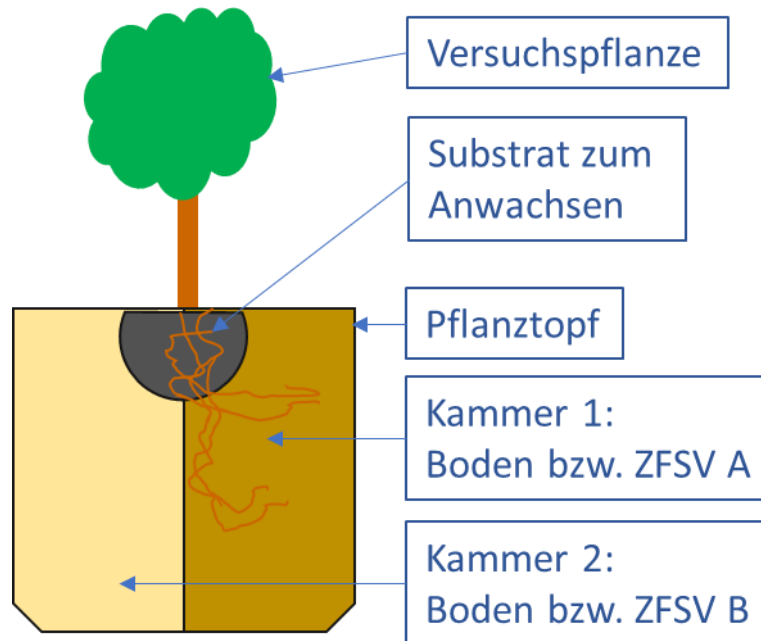


Abbildung 77: Versuchsaufbau zum paarweisen Vergleich von ZFSV und Böden

Nach einer bestimmten Versuchslaufzeit (z.B. einer Wachstumsperiode) können die Substratbehälter geöffnet und das Wurzelwachstumsverhalten ausgewertet werden. Mit Blick auf das Dichtenfallenmodell sollte die Wurzel entlang der Trennfläche wachsen und in den Boden/ZFSV, der eine größere Durchlässigkeit besitzt. Neben der Durchlässigkeit kann z.B. auch die Porosität oder das Porenvolumen als maßgeblicher Parameter der Untersuchungen herangezogen werden. Durch den paarweisen Vergleich können anschließend erste statistische Annäherungen durchgeführt werden, ab wann ein ZFSV in der Praxis wurzelabweisender ist als der anstehende Boden. Für weitergehende, statistische Aussagen sollte die Versuchsreihe mehrfach wiederholt werden.

8.4 Folien und Platten

Im Folgenden werden die in Kapitel 3.3 und 3.4.3 beschriebenen Prüfverfahren und Forschungsergebnisse genutzt, um darauf aufbauend ein dreistufiges Prüfprogramm für Folien und Platten zu entwickeln, um einen bestmöglichen Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsrinnen gewährleisten zu können.

Arbeitshypothese 6 (vgl. Kapitel 4.3) wurde nicht durch weitergehende Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit überprüft. Jedoch zeigt die Literaturstudie, dass vermutlich mehrere Parameter für einen dauerhaften Schutz durch Folien und Platten vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsrinnen maßgeblich sind. Um diese Arbeitshypothese untersuchen zu können, wird das folgende Prüfkonzept entwickelt.

8.4.1 Stufe 1: Ermittlung der Wurzelfestigkeit von Werkstoff und Verbindung

Hier wird die Durchführung der aktuell geltenden Norm-Prüfungen empfohlen.

Die Norm-Prüfverfahren werden bereits mit Pflanzen durchgeführt und sind zur Bestimmung der Wurzelfestigkeit des Werkstoffs und deren Verbindungen geeignet [9, S. 31, 41; 124, S. 48]. Felduntersuchungen bestätigen in vielen Fällen, dass keine Wurzeldurchdringungen in der Praxis festgestellt werden [162, S. 152; 164, S. 151]. Daher wird empfohlen, eine der folgenden Prüfungen in Stufe 1 durchzuführen:

- Prüfung nach DIN EN 13948 [160]
- Prüfung nach FLL-Verfahren [159]

8.4.2 Stufe 2: Ermittlung von möglichen Angriffspunkten nach Einbau

Hier wird eine augenscheinliche Begutachtung der Folien und Platten nach Einbau empfohlen.

In [168, S. 257] wird beschrieben, dass Risse in Folien und Platten durchwurzelt werden können. Um ausschließen zu können, ob Risse durch den Einbau entstanden sind, sollte vor der Verfüllung eine augenscheinliche Begutachtung der Folien und Platten durchgeführt werden. Zudem ist von den Rohrverbindungen bekannt, dass Wurzeln in kleinste Spalten einwachsen können. Daher sollte nach Einbau ebenfalls augenscheinlich überprüft werden, ob die Verbindungen fachgerecht ausgeführt wurden und keine Angriffspunkte für Wurzeleinwuchs bieten. Bestenfalls wird bei mehreren Muster-Baustellen eine Dokumentation der Angriffspunkte durchgeführt. So wären weitergehende Aussagen zur Qualitätssicherung des zu prüfenden Systems möglich. Daher werden folgende Arbeitsschritte für Stufe 2 empfohlen:

- Messung und Dokumentation von Oberflächenauffälligkeiten, z.B. Risse
- Messung und Dokumentation der Verbindung, z.B. Spaltgröße
- Weitergehend werden fünf Baustellenbegleitungen als vergleichende Materialtests empfohlen für eine breitere Datenbasis und höhere Aussagekraft zum Schutz vor Wurzeleinwuchs

8.4.3 Stufe 3: Pflanzversuche zur Validierung

Hier werden weitergehende Pflanzversuche an vertikalen Folien und Platten empfohlen. Die Wurzelfestigkeit der Werkstoffe und Verbindungen von Folien und Platten wird durch die Norm-Prüfungen bereits mit Pflanzen und Wurzeln ausreichend geprüft [9, S. 31, 41; 124, S. 48]. Somit ist dieses Prüfverfahren bereits im Vergleich zu den Prüfungen für wurzelfeste Rohrverbindungen ein geeignetes Prüfverfahren, um die Wurzelfestigkeit des Werkstoffs und deren Verbindungen festzustellen. Jedoch zeigen die recherchierten Untersuchungen in Kapitel 3.3, dass vertikal eingebaute Folien und Platten unter bestimmten Voraussetzungen durch Wurzeln unter- und überwachsen werden können [162, S. 153; 164, S. 151; 165, S. 176; 169, S. 216f.; 170, S. 8]. Daher sollte in Stufe 3 geprüft werden, ob insbesondere ein Unterwachsen der unterschiedlichen Systemarten von Folien und Platten (vgl. Kapitel 3.3: Wurzelsperren und Wurzelführungen mit/ohne Erdanker) möglich ist. Ist dies nicht der Fall, dann ist die Prüfung bestanden und die geprüften Folien und Platten bieten einen hohen Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben. Prüfanzahl, Prüfdauer und Umgebungsbedingungen können sich an den Norm-Prüfverfahren aus Stufe 1 [159; 160] orientieren, sodass beide Prüfungen parallel laufen können und somit Zeit eingespart werden kann.

Als ein möglicher Versuchsaufbau würden sich Versuchsbehälter anbieten, in denen die Folien und Platten vertikal eingebaut werden (vertikale Pflanzversuche). Die Höhe der Versuchsbehälter orientiert sich an der Höhe der zu prüfenden Folie oder Platte. Der Abstand der Folie oder Platte sollte mindestens 20 Zentimeter bis zur Versuchsbehältersohle betragen, um den Wurzeln auch ausreichend Wachstumsraum nach unten zu bieten. Ggf. sollten die Versuchsbehälter ohne Sohle direkt auf den anstehenden Boden gestellt werden, um den Wurzeln ausreichend Wachstumsmöglichkeiten nach unten zu bieten. Wachsen dann trotzdem Wurzeln unterhalb der Platte entlang und wieder nach oben, dann ist die Prüfung nicht bestanden. Ein erste Versuchsaufbauvariante ist in Abbildung 78 dargestellt.

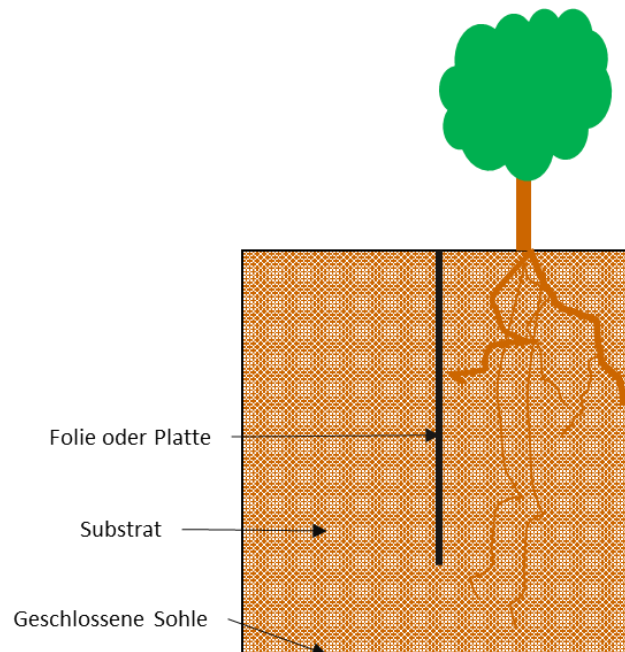


Abbildung 78: Mögliche Versuchsaufbauvariante A zur Prüfung des Unterwachsens von Folien und Platten als bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs

Für die ausschließliche Produktprüfung wäre der gleiche Boden im gesamten Versuchsbehälter zielführend. Bisherige Untersuchungen zeigen jedoch, dass auch der eingesetzte Boden bei Folien und Platten einen wesentlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum haben kann [162, S. 153; 164, S. 151; 169, S. 216f.]. Aus diesem Grund sollten ggf. auch unterschiedliche Böden in den Versuchsbehältern eingesetzt werden, die unterschiedlich gut von Wurzeln durchwachsen werden können. Befindet sich zum Beispiel auf der vom Baum abgewandten Seite im oberen Bereich ein Boden, der im Vergleich zum restlichen Boden im Versuchsaufbau gut durchwachsen werden kann, dann wäre dies der Worst-Case in der Praxis. In diesem Fall wird simuliert, dass ein Baum im anstehenden Boden gepflanzt wurde, und der Leitungsgraben vermutlich den bevorzugten Wachstumsbereich der Wurzel darstellt. Wächst in diesem Fall keine Wurzel nach oben, dann sollte die Folie oder Platte in den meisten Fällen in der Praxis ebenfalls nicht unterwachsen werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig. Ein beispielhafter Versuchsaufbau ist in Abbildung 79 dargestellt.

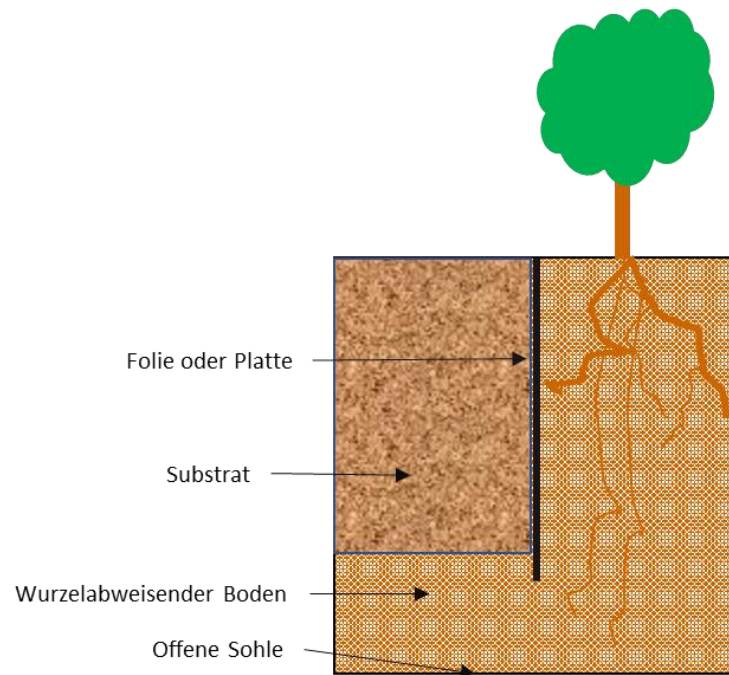


Abbildung 79: Mögliche Versuchsaufbauvariante B zur Prüfung des Unterwachsens von Folien und Platten als bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs

Die Durchführung folgender vertikaler Pflanzversuche wird empfohlen:

- Sechs Untersuchungen in Versuchsaufbau A
- Sechs Untersuchungen in Versuchsaufbau B

Werden alle Versuche bestanden, sollte ein hoher Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsräumen gewährleistet sein.

8.5 Diskussion und Einordnung der Prüfkonzepte

Die entwickelten dreistufigen Prüfkonzepte zeigen, dass die Ermittlung der Wurzelfestigkeit von bautechnischen Schutzmaßnahmen weiterhin sehr diffizil ist. Alleinige Norm-Prüfverfahren bieten i.d.R. nicht ausreichend Sicherheit in den Aussagen zur Wurzelfestigkeit, sodass gestufte Prüfungen für einen nachhaltigen und langfristigen Einsatz mehr Sicherheit zum Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten sollten.

Bei **gesteckten Rohrverbindungen** kann ggf. der Nachweis eines dauerhaften Anpressdrucks, größer der gemessenen Wurzeldrücke, ausreichend sein, um die Wurzelfestigkeit zu bestätigen. Denn die Outside-In-Versuche an Fernwärmeleitungen (vgl. Kapitel 6.1.1) zeigen, dass Wurzeln in einen geringen Spalt der dauerelastischen Verbindung einwachsen, aber anschließend nicht den Verbund aufdrücken konnten. Zur Bestätigung dieser Annahme wären zunächst an gesteckten Rohrverbindungen mit entsprechenden Anpressdrücken weitergehende Pflanzversuche notwendig.

Bei wurzelfesten Rohrverbindungen sollten in Zukunft zudem weitergehend die Auswirkungen auf das Wurzelwachstum durch die Gaspermeabilität der Verbindungen untersucht werden [124, S. 61]. Wurzeln benötigen Sauerstoff zum Wachsen, daher ist auch der Einfluss von Sauerstoff um Leitungen und Kanäle, insbesondere im stark versiegelten urbanen Raum, ein sehr wahrscheinlicher Parameter, der das Wurzelwachstum in Leitungsgräben beeinflussen bzw. fördern kann [17, S. 199]. Kann kein Sauerstoff aus den Leitungen austreten, so ist ein solcher möglicher Wachstumsanreiz für Wurzeln ausgeschlossen.

Bisherige Prüfungen von **ZFSV** umfassen ausschließlich Laborversuche, die nach dem Einbau einer ZFSV-Mischung durchgeführt werden können. Eine Überprüfung der tatsächlichen Kennwerte ist somit nur im Nachgang eines Einbaus möglich. Für die Zukunft sollte eine Prüfung entwickelt werden, die kurz vor Einbau durchgeführt werden kann und schnelle Ergebnisse liefert, um entscheiden zu können, ob der angelieferte ZFSV auch den geforderten bzw. geplanten Anforderungen entspricht, und ein dauerhafter Schutz vor Wurzeleinwuchs gewährleistet werden kann. Hier ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

Des Weiteren bestehen Unsicherheiten bzgl. möglicher Grenzwerte, ab wann eine Wurzel in ZFSV einwachsen kann oder nicht. Durch Untersuchungen von paarweisen Vergleichen könnten diese Grenzwerte ermittelt werden. Weitere mögliche Parameter, die Auswirkungen auf die Wurzelfestigkeit von ZFSV haben können, sind der pH-Wert und ggf. auch die Festigkeit oder Strukturstabilität [57, S. 149]. Hier sollten weitere Versuche und Parameterstudien durchgeführt werden, inwieweit diese Parameter einen Einfluss auf den Schutz vor Wurzeleinwuchs haben.

Auch die Mindestummantelung für einen ausreichenden Schutz vor Wurzeleinwuchs mit ZFSV kann bisher nur abgeschätzt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen notwendig.

Die Prüfung der Wurzelfestigkeit der Werkstoffe und Verbindungen von **Folien und Platten** wird bereits mit Pflanzen durchgeführt. Im Praxiseinsatz sind aber Unsicherheiten vorhanden, ob die Folien und Platten unterwachsen werden können [162, S. 153; 164, S. 151; 165, S. 176; 169, S. 216f.]. Daher wurden neue Prüfungsvorschläge entwickelt, mit denen diese Unsicherheit weitergehend untersucht werden kann. Der Einfluss des anstehenden Bodens scheint auch beim Einsatz von Folien und Platten einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit zum Schutz vor Wurzeleinwuchs zu haben [162, S. 153; 164, S. 151; 169, S. 216f.]. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden.

In Tabelle 17 werden die empfohlenen Prüfungsstufen der bautechnischen Schutzmaßnahmen wurzelfeste Rohrverbindung, ZFSV sowie Folien und Platten in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 17: Übersicht der empfohlenen Prüfungen für bautechnische Schutzmaßnahmen aufgeteilt in die Prüfungsstufen 1 bis 3

Stufe	Wurzelfeste Rohrverbindungen	ZFSV	Folien und Platten
1	Prüfung nach DIN 4060 [125] oder EN 1916 [37] und/oder Prüfung nach EN 14741 [129] oder Messung des Anpressdrucks unter Scherlast [17, S. 177ff.] und/oder Außendruckuntersuchung	Wasserdurchlässigkeits-Prüfung nach DIN 18130-1 [61] und/oder Quecksilberporosimetrie nach DIN ISO 15901-1 [186]	Prüfung nach DIN EN 13948 [160] oder Prüfung nach FLL-Verfahren [159]
2	Geometrische Messung des Ringspalts und Ringraums	Risse und Trennflächen im ZFSV	Messung und Dokumentation von Oberflächenauffälligkeiten und Verbindung
3	Outside-In-Versuche	Outside-Out-Versuche	Vertikale Pflanzversuche

Stufe 1: Norm-Prüfung

Stufe 2: Ermittlung von Angriffspunkten

Stufe 3: Validierung mit Pflanzversuchen

Allerdings bestehen immer noch Unsicherheiten in der Aussagekraft der Prüfungen. Daher ist bisweilen darüber zu diskutieren, ob ggf. **Kombinationen von Schutzmaßnahmen** eingesetzt werden sollten, um die Wahrscheinlichkeit eines Wurzeleinwuchses so gering wie möglich zu halten [19, S. 122; 124, S. 61].

Um Schutzmaßnahmen zu testen, wurde ein Prüfkonzept für mehrjährige Prüfungen im Maßstab 1:1 entwickelt, welches im nächsten Kapitel dargestellt wird und den Abschluss der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit bildet.

8.6 Anwendungsbeispiel Almere

Ergänzend zu den theoretisch entwickelten Prüfprogrammen in Kapitel 8 wurde in den Jahren 2018 und 2019 ein praxisnahes Versuchsfeld im Maßstab 1:1 in Almere (NL) errichtet, um weitergehende (Langzeit-)Praxiserkenntnisse hinsichtlich der Wurzelfestigkeit von bautechnischen Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1 ermitteln zu können.

Um Feldversuche mit Bäumen und bautechnischen Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1 durchführen zu können, sind u.a. viel Zeit und Platz notwendig. Zunächst muss eine ausreichend große Versuchsfläche gefunden werden, die auch für eine längere Zeit genutzt werden kann. Diese Möglichkeit ergab sich in Almere, NL. Im Feldversuch in Almere ist es möglich, die Interaktionen zwischen langjährigen Bäumen und im Untergrund verbauten bautechnischen Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1 nachzubilden. Somit können die bisher durchgeführten Untersuchungen ergänzt werden. Das wesentliche Ziel der Untersuchungen ist die Überprüfung der Wurzelfestigkeit einzelner bautechnischer Schutzmaßnahmen im Maßstab 1:1 [9, S. 34]. Ergänzend werden folgende Aspekte untersucht:

- Wurzelan- bzw. -einwuchs an bautechnische Schutzmaßnahmen nach ca. drei Jahren in der Praxis
- Möglichkeit des Um- und Unterwachsens von Folien und Platten.
- Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen unterschiedlicher Werkstoffe und Nennweiten

Folgend werden die Konzeptionierung und das dazugehörige Monitoringprogramm dargestellt.

8.6.1 Konzeptionierung des Feldversuches

Die folgenden Beschreibungen zur Konzeptionierung des Feldversuches in Almere wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“ durchgeführt und sind weitestgehend textgleich im Abschlussbericht dargestellt, welcher durch den Autor maßgebend verfasst wurde [9]²; S.55.

Ziel des Versuchsaufbaus ist ein Screening von Lösungswegen mit unterschiedlichen Systemen und Produktbeispielen zum passiven Schutz von Abwasserleitungen und -kanälen gegen Wurzeleinwuchs: Es werden an einer Baumreihe mit fünf neu gepflanzten Bäumen (Pappeln der Gattung *Populus c. Robusta*) insgesamt 14 gesteckte Rohrverbindungen, acht Folien bzw. Platten sowie ein porenraumarmer Verfüllstoff auf ihre Wirksamkeit untersucht. Die Auswahl der im Versuchsfeld eingesetzten Systeme erfolgte insbesondere aufgrund der Relevanz der Systeme für die Gemeinde Almere und der Bestellmöglichkeit der Baufirma bei niederländischen Lieferanten. Auf den zwei Längsseiten zur Baumreihe bildet jeweils eine Abwasserleitung den äußeren Rahmen des Versuchsaufbaus. Quer zur Baumreihe ist je Baum auf jeder Seite eine Folie bzw. Platte

oder porenraumarmen Verfüllstoff eingebaut (vgl. Abbildung 80). Durch das Umschließen des Baumes mit Systemen bzw. Rohrverbindungen sollen Interaktionen der Wurzeln mit den Systemen provoziert werden.

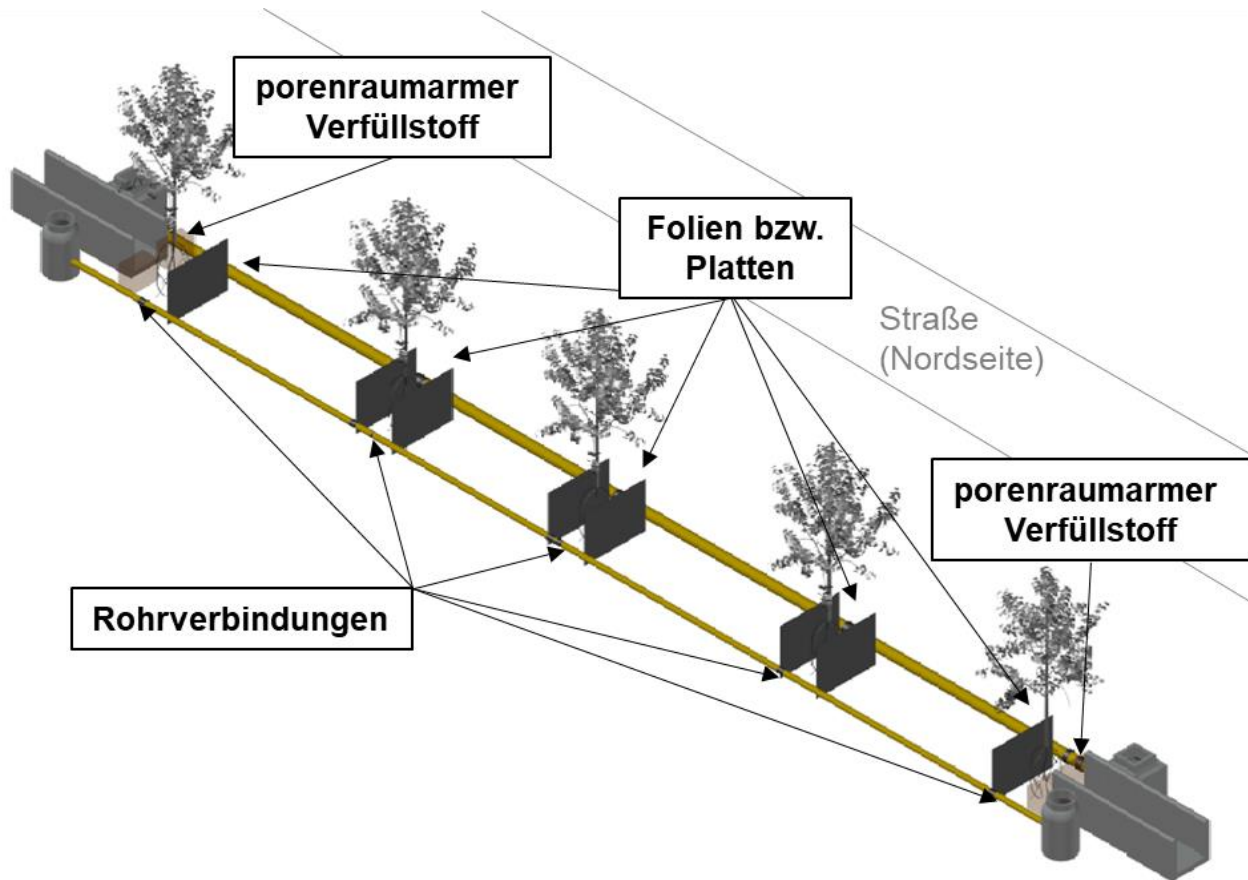


Abbildung 80: Versuchsaufbau in Almere (NL)

Die Rohrleitungssohlen befinden sich in einer Tiefe von 1,2 Metern, was einer häufigen Überdeckungshöhe von Abwasserleitungen und -kanälen in Almere entspricht. Aufgrund des hohen Grundwasserstandes wurde das Versuchsfeld um diese 1,2 Meter aufgeschüttet. Die Länge des Versuchsfeldes bzw. der Rohrleitungen beträgt 33 Meter und der Abstand zwischen den Rohrleitungsachsen beträgt 2,4 Meter. Die Längsabstände zwischen den Bäumen (Bezeichnung der Bäume: T1-T5) variieren von 6,4 bis 7,7 Metern und sind an die eingesetzten Standard-Rohrlängen der jeweiligen Werkstoffe angepasst, um ein unnötiges Kürzen der Rohrleitungen zu vermeiden. Die Rohrleitung in Richtung Straße (Nordseite) hat eine Nennweite von DN 300, die Rohrleitung an der Südseite DN 150. Die Bemaßung des Versuchsfeldes ist in Abbildung 81 dargestellt.

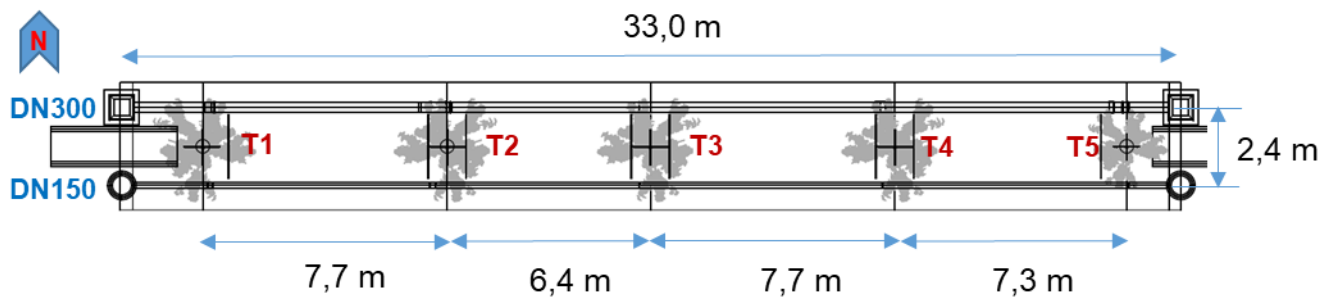


Abbildung 81: Bemaßung des Versuchsfeldes

In beiden Rohrleitungen sind jeweils sieben Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergänge installiert. Somit kann je Baum und Rohrleitung mindestens eine Verbindung untersucht werden. Die Werkstoffe der Verbindungsarten und die Bezeichnungen der einzelnen Verbindungen sind folgend in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Werkstoffe der Rohrleitungen mit Rohrverbindungen bzw. Werkstoffübergängen

Werkstoff	Anzahl	Bezeichnung
DN 300		
Beton	2	C1, C2 (Standard-Steckmuffen)
PVC	1	C3 (Standard-Steckmuffe)
PP	1	C4 (Standard-Steckmuffe)
GFK	1	C5 (Standard-Steckmuffe)
Werkstoffübergang Beton/PVC	1	MT1 (Übergangsmanschette)
Werkstoffübergang Beton/GFK	1	MT2 (Übergangsmanschette)
DN 150		
PVC	3	C6, C7, C9 (Standard-Steckmuffen)
PVC	1	C8 (Bentonitband)
PVC	1	C10 (Schrumpfschlauch)
PP	2	C11-C12 (Standard-Steckmuffen)

Die Auswahl der Werkstoffe bzw. Werkstoffübergänge orientiert sich an den eingesetzten Werkstoffen in Almere. Die Verbindungen C1-7, C9 und C11-12 sind Standard-Steckmuffenverbindungen der jeweiligen Werkstoffe. Die Verbindung C8 ist ein an der Rohraußenseite befestigtes, experimentelles Bentonitband. Die Verbindung C10 ist ein Schrumpfschlauch auf PVC. Die Werkstoffübergänge MT1 und MT2 sind Übergangsmanschetten für die jeweiligen Rohrwerkstoffe. Die Anordnung der Rohrverbindungen und Werkstoffübergänge ist in Abbildung 82 dargestellt. Je nach Versuchsanordnung befinden an jeder Rohrleitung und jedem Baum ein bis maximal zwei Rohrverbindungen bzw. Werkstoffwechsel.

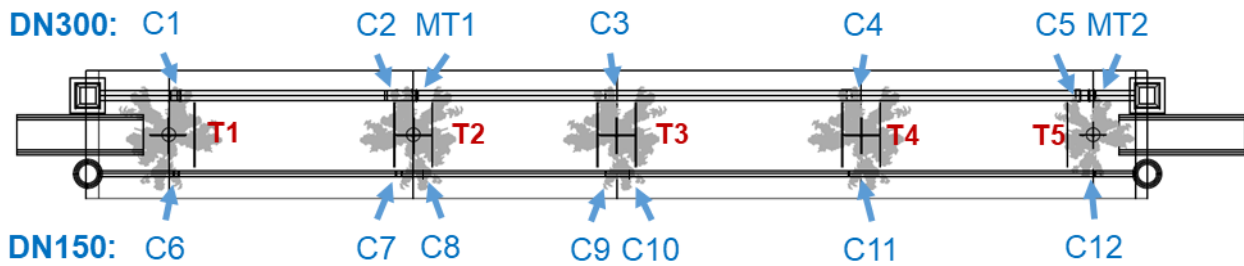


Abbildung 82: Anordnung der Rohrverbindungen (C1-C12) und Werkstoffübergänge (MT1-MT2) in den zwei Rohrleitungen (DN150, DN300) an den Bäumen (T1-T5)

Jeder Baum wird auf der West- und Ostseite von Folien bzw. Platten (FP1-FP8) oder porenraumarmen Verfüllstoffen (S) eingerahmt. An den Bäumen T2 bis T4 sind beidseitig Folien bzw. Platten installiert sowie an den Bäumen T1 und T5 an einer Seite porenraumarme Verfüllstoffe und auf der gegenüberliegenden Seite Folien bzw. Platten (vgl. Abbildung 83).

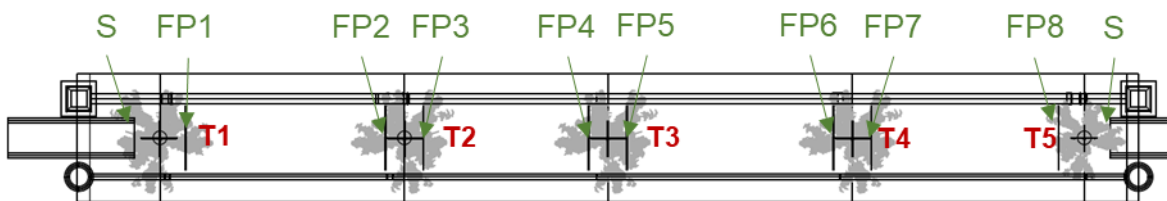


Abbildung 83: Anordnung der Folien bzw. Platten (FP1-FP8) und porenraumarmen Verfüllstoffe (S) an den Bäumen (T1-T5)

Als porenraumarmen Verfüllstoff wird ein Schüttgut zur mineralischen Kapselung von Rohrleitungen eingesetzt. Die Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 19: Werkstoffe, Verbindungsarten und Bezeichnungen der Folien bzw. Platten

Art	Werkstoff	Verbindungsart	Bezeichnung
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP1
Folie	PE-HD	stecken/einschieben	FP2
Platte	PP	stecken/einschieben	FP3
Platte	PE-HD	ohne Verbindung	FP4
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP5
Folie	PE-HD	verschraubt/geklebt	FP6
Folie	PE-HD	verschraubt	FP7
Folie	PE-HD	ohne Verbindung	FP8

Legende: FP = Sheets and Plates/Folien und Platten

Am Anfang und am Ende des Versuchsfeldes befindet sich jeweils ein Anschauungsobjekt zur Öffentlichkeitsarbeit. Dazu ist an einem Beton-U-Profil an einer Seite eine transparente Polycarbonatplatte vertikal befestigt und in das aufgeschüttete Erdreich eingebaut. Neben

der Hauptverfüllung sind zur Ansicht eine Rohrleitung mit Steckmuffenverbindung und das porenraumarme Verfüllmaterial (S) sichtbar (vgl. Abbildung 84, links). Die Rohrleitung ist zur anschaulichen Darstellung des Versuchsfeldes eingebaut und ist nicht Teil der Untersuchungen.

Ziel des Anschauungsobjektes ist es, das Wurzelwachstum an unterirdischen Leitungen darzustellen. Es soll Wurzelwuchs zur Polycarbonatplatte hin provoziert werden und bestenfalls ein „Entlangwachsen“ der Wurzeln an der Polycarbonatplatte und zwischen Rohrleitung und Verfüllstoff stattfinden. Ergänzt wird die Öffentlichkeitsarbeit mit einer Informationstafel (vgl. Abbildung 84, rechts).



Abbildung 84: Blick auf das Anschauungsobjekt (links), Informationstafel (rechts)

8.6.2 Monitoringprogramm und Auswertung der Feldversuche

Die Laufzeit des Versuchs ist von 2019 bis 2022 geplant [9, S. 39].

An den Rohrverbindungen werden nach Einbau, im Jahr 2021 und kurz vor den Aufgrabungsarbeiten im Jahr 2022 TV-Inspektionen durchgeführt. Die Prüfungen nach Einbau sind Abnahmeprüfungen der Baumaßnahme. Dabei wurden die TV-Inspektionen mit Dichtheitsprüfungen ergänzt. Ziel der Untersuchungen ist zu überprüfen, ob die Rohrverbindungen nach Stand der Technik eingebaut wurden. Denn nur dichte Rohrverbindungen können je nach Produkt wurzelfest sein. Die Inspektionen im Jahr 2021 dienen zur Ermittlung von möglichem Wurzeleinwuchs in die Rohrverbindungen, um bestmöglich die Prüfungen und Aufgrabungsarbeiten im Jahr 2022 planen und vorbereiten zu können. Zudem kann ein erster Zwischenstand nach zwei Jahren Versuchslaufzeit dokumentiert werden und somit eine mögliche Weiterentwicklung von Wurzeln in der Rohrleitung zwischen den Jahren 2021 und 2022 (z.B. Größe der Wurzel) ermittelt werden. Die Inspektionen im Jahr 2022 sind die Endabnahme zur Erfassung von möglichem Wurzeleinwuchs in die Rohrverbindungen [9, S. 38f.]. Die zum Zeitpunkt der hier vorliegenden Arbeit bereits vorliegenden Ergebnisse wurden aufgrund der laufenden Versuchsdurchführung nicht vorveröffentlicht.

Die Aufgrabungsarbeiten im Jahr 2022 erfolgen händisch sowie mittels Bagger und Saugbagger. Zunächst werden die Rückseiten der Folien und Platten vorsichtig aufgedeckt und dahingehend ausgewertet, ob Wurzeln die Folien und Platten durch- oder umwachsen konnten. Anschließend werden Aufgrabungen zwischen Baum sowie Folien und Platten durchgeführt [9, S. 42].

Mögliche Wurzeleinwüchse in Folien und Platten sowie deren Verbindungen werden visuell betrachtet. Die Oberflächen der porenraumarmen Verfüllstoffe werden ebenfalls visuell hinsichtlich Wurzeleinwuchses untersucht. Mögliche eingewachsene Wurzeln werden vorsichtig ausgegraben, die Wurzeleindringtiefe gemessen und dahingehend untersucht, ob sie noch leben oder bereits abgestorben sind [9, S. 42].

Die Rohrleitungen und Rohrverbindungen werden ebenfalls hinsichtlich Wurzelumwuchses und Wurzeleinwuchses analysiert. Dabei werden die Rohroberflächen hinsichtlich Beschädigungen, z.B. in Form von Kratzern und Dellen, untersucht. Die Rohrverbindungen werden aus dem Boden entnommen und mögliche Wurzeln in den Muffen und Dichtungen ermittelt und mit den Inspektionsdaten der Kamerabefahrungen verglichen [9, S. 42].

8.6.3 Zu erwartende Ergebnisse des Anwendungsbeispiels

Mit diesem Prüfaufbau sollen ausgewählte bautechnische Schutzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wurzelfestigkeit im Maßstab 1:1 über mehrere Jahre vergleichend untersucht werden [9, S. 34]. Ziel ist ein langjähriger Praxisabgleich mit den Ergebnissen der (Norm-)Prüfungen und weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen. Auch wenn hier „nur“ der Praxisfall mit der Baumart Pappel in einer ausgewählten Bodenart dargestellt wird, so werden doch weitergehende Aussagen zum tatsächlichen Wurzelwachstum von langjährigen Bäumen erzielt, und ein weiterer Schritt wird für das bessere Verständnis des Wurzelwachstums von Bäumen in Böden getan. Durch die vergleichenden Untersuchungen an unterschiedlichen bautechnischen Schutzmaßnahmen können Aussagen zur Wurzelfestigkeit und bestmöglich auch zu deren Stärken und Schwächen getroffen werden.

Des Weiteren sind Erkenntnisse zu erwarten, inwieweit auch der Einsatz von Kombinationen aus bautechnischen Schutzmaßnahmen möglich und zielführend ist [9, S. 42]. Bewusst wurden die Leitungen nicht vom Baum aus gesehen hinter die Folien verlegt, sondern daneben, um möglichst viele Wurzel-Schutzmaßnahmen-Interaktionen im Versuchsaufbau provozieren zu können. Es werden Ergebnisse erwartet, inwieweit einzelne Systeme wurzelfest sind. Dazu gehören Aussagen zur Wurzelfestigkeit der Materialien und Verbindungen, aber auch zum Wurzelwachstum in dem eingesetzten Boden in Kombination mit den Schutzmaßnahmen.

8.7 Empfehlungen für die Praxis

Die Empfehlungen für die Praxis beziehen sich auf die wesentlichen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in Bezug auf die Prüfung und den Einsatz der bautechnischen Schutzmaßnahmen: wurzelfeste Rohrverbindungen, ZFSV als Beispiel für porenraumarme Verfüllstoffe sowie Folien und Platten.

8.7.1 Wurzelfeste Rohrverbindungen

Rohrverbindungen sind wurzelfest, wenn sie stoffschlüssig verbunden sind. Fachgerecht ausgeführte dauerelastische KMR-Verbindungen sind ebenfalls stoffschlüssig und somit wurzelfest. Ein Einsatz dieser KMR-Verbindungen ist bei fachgerechter Ausführung auch in der Nähe von Baumstandorten unbedenklich. Bei der Ausführung ist auf eine große Sorgfalt zu achten, damit die KMR-Verbindungen einen stoffschlüssigen Verbund eingehen können [6, S. 164; 97; S. 35]. Allerdings wird das Ausbilden von Zugschlingen und Druckstempeln um die Leitung herum nicht verhindert, dieses Risiko gilt es weiterhin zu beachten.

Gesteckte Rohrverbindungen können ebenfalls wurzelfest sein, jedoch sind im Vergleich zu stoffschlüssigen Verbindungen weiterhin Angriffspunkte möglich. Auch hier bieten die nach Stand der Technik und sorgfältig ausgeführten Verbindungen einen höheren Schutz vor Wurzeleinwuchs. Für einen vollumfänglichen Schutz, auch vor Zugschlingen und Druckstempel, sollte im Einzelfall über Kombinationslösungen mit weiteren bautechnischen Schutzmaßnahmen entschieden werden [1, S. 14; 19, S. 122; 124, S. 61].

Empfohlen wird zur Überprüfung der Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen die Prüfung entsprechend dem dreistufigen Prüfkonzept (vgl. Kapitel 8.2). Mit diesem Prüfkonzept sollte eine erhöhte Sicherheit in der Aussage zur Wurzelfestigkeit von gesteckten Rohrverbindungen möglich sein.

Eine weitere Empfehlung ist, neuverbaute Rohrleitungen aus gesteckten Rohrverbindungen an Baumstandorten, z.B. Allees, als Referenzstrecken zu benutzen. In diesen Strecken können über die Zeit regelmäßige TV-Inspektionen durchgeführt werden. So wären weitere praxisnahe Langzeitbeobachtungen zur Wirksamkeit von wurzelfesten gesteckten Rohrverbindungen möglich. Eine gute und umfassende Dokumentation der Neubauarbeiten ist dafür erforderlich.

8.7.2 Porenraumarme Verfüllstoffe

Als porenraumarmer Verfüllstoff wurde in der vorliegenden Arbeit ZFSV untersucht. Die Ausarbeitungen zeigen, dass bestimmte ZFSV-Rezepturen einen hohen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten können (vgl. Kapitel 7.1 und 7.3.1 sowie [6, S. 122; 96, S. 116]). Vor dem Einsatz sollten die Eigenschaften des anstehenden Bodens in die Entwicklung der ZFSV-Rezeptur miteinfließen [151, S. 42]. Der ZFSV sollte so eingestellt werden, dass er eine geringere Porosität [151, S. 42] und Wasserdurchlässigkeit als der anstehende Boden aufweist. So können für das

Wurzelwachstum unattraktive Bedingungen geschaffen werden, sodass Wurzeln nicht in den ZFSV einwachsen [6, S. 166]. Als Basismaterial sollten zum Schutz vor Wurzeleinwuchs zunächst nur Sand-Kies-Gemische eingesetzt werden, solange nicht abschließend geklärt ist, warum Wurzeln in ZFSV mit bindigen und organischen Anteilen während der Durchführung von Pflanzversuchen einwachsen konnten.

Beim Einsatz von ZFSV ist zudem eine Qualitätssicherung auf der Baustelle zielführend, um frühzeitig Risse, Brüche oder Trennflächen erkennen und ggf. untersuchen zu können. Nur bei einer vollumfänglichen Rohr-Ummantelung können Wurzeln nicht zu der Leitung wachsen. Eine Mindestummantelung von Rohrleitungen ist bisher nicht abschließend definiert. Jedoch zeigen die Untersuchungsergebnisse der Pflanzversuche nach einer Wachstumsperiode, dass durchaus einige Dezimeter ausreichend sein können. Aber hier sind noch Langzeit-Ergebnisse abzuwarten. Diese Aussagen beziehen sich ausschließlich auf den Schutz vor Wurzeleinwuchs. Mindestummantelungen zum zusätzlichen Schutz vor lastübertragenden Wurzeln sollten ggf. größer ausgeführt werden. Jedoch sind hierzu bisher keine Untersuchungen durchgeführt worden, wodurch keine weitergehenden Empfehlungen dazu möglich sind.

Zudem zeigen die Feldversuche (vgl. Kapitel 7.2.1) und In-situ-Beobachtungen (vgl. Kapitel 6.2.1) an Baumsubstraten, dass bei fachgerechtem Einbau Wurzeln in diesem Bereich attraktive Bedingungen vorfinden [6, S. 167; 96, S. 114]. Daher empfiehlt sich der Einsatz von porenraumarmen Verfüllstoffen (z.B. ZFSV) im Leitungsbereich in Kombination mit porenraumreichen Verfüllstoffen (Baumsubstraten) am Baumstandort und ggf. der Hauptverfüllung, um einen Wurzeleinwuchs in die Bettungszone bestmöglich zu verhindern.

8.7.3 Folien und Platten

Folien und Platten können nach Regelwerk [1, S. 18] als Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsräumen eingesetzt werden. Jedoch ist die Wirksamkeit abhängig von den Bedingungen des Einzelfalls [1, S. 18]. Dies bestätigen teilweise die recherchierten Studien in Kapitel 3.3 [162, S. 153; 164, S. 151; 165, S. 176; 169, S. 216f.].

Somit sollte beim Einsatz von Folien und Platten auf den fachgerechten Einbau geachtet werden. Dies bezieht die fachgerechte Ausführung der Verbindungen von Folien und Platten mit ein. Zudem sollten die Bodeneigenschaften, insbesondere des Leitungsräumens in Verbindung mit dem anstehenden Boden, berücksichtigt werden. Auch hier gilt das Dichtefallenmodell (vgl. Kapitel 2.3.3). Ist vom Baum aus hinter der Folie der Boden nicht attraktiver als der anstehende Boden bzw. der Boden vor der Folie oder Platte für das Wurzelwachstum eines Baumes, so wird auch hier das Risiko eines Wurzeleinwuchses reduziert.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In Städten konkurrieren unterirdische Leitungen und Kanäle mit Bäumen bzw. Baumwurzeln. Durch Wurzel-Rohr-Interaktionen können an Leitungen und Bäumen Schäden entstehen. Bäume spenden Schatten, verdunsten Wasser, binden Stäube [2, S. 5f.; 3, S. 101] und sind somit ein wesentlicher Faktor für eine hohe Lebensqualität der Bürger in den Städten. Leitungen und Kanäle sind unverzichtbar für die Versorgung der Einwohner u.a. mit Strom, Trinkwasser und Gas sowie die Entsorgung von Abwasser. Mit Blick auf nachhaltige und smarte Städte der Zukunft, die auf mögliche Klimaveränderungen (z.B. lange Hitzeperioden und Sturzfluten) angepasst sowie zur Digitalisierung (z.B. Breitband) und nachhaltiger Energieversorgung (z.B. Fernwärme) ausgebaut werden müssen, wird sich zukünftig der Nutzungskonflikt zwischen Grün und Infrastruktur vermutlich weiter verschärfen.

Wurzeln können den Leitungsgraben erschließen und an bzw. in Rohrverbindungen einwachsen, wenn keine zusätzlichen Schutzmaßnahmen ergriffen werden. Mit Blick auf den o.g. zukünftigen Wandel in den Städten wird deutlich, dass Infrastrukturbetreiber innovative und nachhaltige technische Lösungen zum Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben und in Rohrleitungen benötigen. Dabei sind Maßnahmen gefragt, die Bäume und unterirdische Leitungen bestmöglich und langfristig in Einklang bringen.

Eine Möglichkeit unterirdische Leitungen vor Wurzelein- und -anwuchs zu schützen, sind bautechnische Schutzmaßnahmen vor Wurzel-Rohr-Interaktionen nach DWA M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [1]. Zu diesen Schutzmaßnahmen gehören u.a. [1, S. 17f.]:

- Einsatz porenraumarmer Verfüllstoffe im Rohr- oder Leitungsgraben
- Einbau von Platten oder Folien im Leitungsgraben
- Auswahl wurzelfester Rohrverbindungen

Porenraumarme Verfüllstoffe umschließen die Leitung vollständig und aufgrund der porenraumarmen Struktur soll ein Wurzeleinwuchs verhindert werden. Eine Art von porenraumarmen Verfüllstoffen sind zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe, kurz ZFSV. Folien und Platten werden i.d.R. an der Leitungsgrabenwand vertikal eingesetzt, wodurch ein Einwachsen der Wurzeln bereits in den Leitungsgraben verhindert werden soll. Wurzelfeste Rohrverbindungen sind so konstruiert, dass ein Wurzeleinwuchs in die Rohrverbindung bestmöglich verhindert wird [1, S. 17f.]. Geschweißte Rohrmuffen bieten aufgrund ihrer stoffschlüssigen Verbindung keine Angriffspunkte für Wurzeln und sind, als Mantelrohre bzw. Schutzrohre ebenfalls nach [1, S. 18], bautechnische Schutzmaßnahmen [1, S. 17f.].

Normen und Standards regeln die Eignung als Schutz vor Wurzeleinwuchs bei Folien und Platten sowie gesteckten Rohrverbindungen⁸ (vgl. Kapitel 3.1 und 3.3). Dennoch sind Wurzeleinwüchse an nach Norm wurzelfesten Rohrverbindungen festgestellt worden [19, S. 69ff., 120]. Bei Folien und Platten wird wiederum das um-, über- und unterwachsen in den Normprüfungen nicht betrachtet. Porenraumarme Verfüllstoffe werden bisher in keiner Prüfnorm bzgl. des Schutzes vor Wurzeleinwuchs beschrieben (vgl. Kapitel 3.2). Daher stellt sich die Frage, inwieweit die Aussagekraft der Norm-Prüfverfahren für den langfristigen Praxiseinsatz der Schutzsysteme gegeben ist und inwieweit Regelungslücken geschlossen werden können?

Hier setzt die vorliegende Arbeit an: Ein wesentlicher Schwerpunkt liegt in der Analyse, Bewertung und (Weiter-)Entwicklung von (Norm-) Prüfverfahren für bautechnische Schutzmaßnahmen (vgl. Kapitel 8). Um eine solche Analyse mit Bewertung umfänglich durchführen zu können, sind eine Literaturrecherche (vgl. Kapitel 2 und 3) sowie umfassende weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen notwendig (vgl. Kapitel 6 und 7). Dabei wurde auf Forschungsergebnisse aus drei Forschungsvorhaben zurückgegriffen, die der Autor als (Teil-)Projektleiter bearbeitete. Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben zeigte sich die Interdisziplinarität der Forschungsfragen. U.a. sind Botanik, Bodenmechanik, Werkstoff- und Geotechnik beteiligte Fachdisziplinen bei der Untersuchung von Wurzel-Rohr-Interaktionen. In der hier vorliegenden Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den bautechnischen Fragestellungen. Ziel ist die bautechnische Analyse und Bewertung von Schutzmaßnahmen, damit diese einen bestmöglichen Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten. Insbesondere soll ein Prüfkonzept entwickelt werden, für das geeignete bautechnische Laborprüfungen ausgewählt und um eine Bewertung mit Blick auf oberflächliche und geometrische Angriffspunkte sowie Pflanzversuche zur Validierung ergänzt werden.

Bei Gas- sowie Trink- und Abwasserleitungen sind Wurzel-Rohr-Interaktionen bereits umfänglich untersucht worden und in einem Regelwerk beschrieben [u.a. 1, 17, 18, 19]. Bei Wurzeln und Fernwärmeleitungen bestehen bzgl. der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen noch Wissenslücken. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ [6] Laborversuche und In-situ-Beobachtungen an Kunststoffmantelrohrleitungen (Fernwärme) mit Pflanzen durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1.1 und 6.1.2). Es zeigte sich, dass Wurzeln bei zwei von drei Probekörpern in eine nicht stoffschlüssige Verbindung eingewachsen sind. Sind die Verbindungen jedoch stoffschlüssig ausgeführt, so wurde auch kein Wurzeleinwuchs festgestellt. In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss des Dickenwachstums von Wurzeln auf die vergleichsweise dünne PE-Ummantelung von Kunststoffmantelrohrleitungen untersucht.

⁸ Geschweißte Rohrverbindungen bieten nach [1, S. 18] keine Angriffspunkte für Wurzeleinwuchs. Aus diesem Grund werden Norm-Prüfungen von geschweißten Rohrverbindungen nicht weitergehend untersucht und beschrieben.

Nach einem Jahr Wachstumszeit konnten bei allen ausgewerteten Wurzeln keine Beschädigungen an den PE-Ummantelungen, z.B. in Form des Eindrückens, festgestellt werden. Die In-situ-Beobachtungen bei Aufgrabungsarbeiten an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten bestätigen die Laborergebnisse. Es konnten bei elf Aufgrabungen keine Beschädigungen an Fernwärmeleitungen durch Wurzeleinwuchs oder Wurzelan- bzw. -umwuchs beobachtet werden (vgl. Kapitel 6.2). Aus bautechnischer Sicht sind diese Ergebnisse sehr wertvoll: Die Wurzelfestigkeit von fachgerecht ausgeführten stoffschlüssigen Rohrverbindungen wird in Stichprobenuntersuchungen bestätigt, der Einfluss des Dickenwachstums von Wurzeln (nach einem Jahr) auf den Rohraußenmantel zeigte sich in den Versuchen unkritisch.

Labortechnische Untersuchungen zum Einfluss von Wärmefeldern durch Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum zeigten, dass eine Abwärme von bis zu 36° Celsius keinen nennenswerten Einfluss auf das Wurzelwachstum hat (vgl. Kapitel 6.1.3).

Während der elf In-situ-Beobachtungen konnte ebenfalls kein Einfluss auf das Wurzelwachstumsverhalten festgestellt werden (vgl. Kapitel 6.2). Erste In-situ-Temperaturmessungen und Wärmefeldsimulationen zeigen zudem, dass keine höheren Temperaturen als 36° Celsius an nach Stand der Technik betriebenen Kunststoffmantelrohrleitungen zu erwarten sind (vgl. Kapitel 6.3). Zudem sollten in Zukunft allein aus Betreiber motivation (u.a. Energiewende) die Wärmeverluste weiter geringgehalten werden, sodass langfristig keine Steigerungen der Temperaturfelder zu erwarten sind. Aussagen zu bisherigen Bedenken bzgl. der Abwärme von Fernwärmeleitungen auf die Periodizität (z.B. verspäteter Laubfall oder Blühen im Winter) von Bäumen konnten durch die durchgeführten Untersuchungen nicht vollumfänglich ermittelt werden. Langzeit-Beobachtungen ausgewählter Baumstandorte sind hier zielführend. Jedoch lässt sich ein Ausbau des Fernwärmenetzes an Baumstandorten mit Blick auf die Abwärme von nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen nach den bisher durchgeführten Untersuchungen als eher unbedenklich einstufen (vgl. Kapitel 6.4.3). Bei zukünftigen Bauarbeiten sollte an bzw. in der Nähe von Baumstandorten der Schutz des Baumes und insbesondere der Wurzeln verstärkt berücksichtigt und kontrolliert werden [6, S. 163]. Daher sollte der nächste Schritt die Information und Schulung von Baufirmen hinsichtlich geeigneter Baumaßnahmen bzw. Baugeräte an Baumstandorten und eine intensivere Planung und Überwachung dieser Baumaßnahmen durch den Infrastrukturbetreiber bzw. die zuständige Verwaltung sein [6, S. 169ff.].

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt waren Untersuchungen an ZFSV zum Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsrinnen (vgl. Kapitel 7). Das Prüfprogramm umfasste Laboruntersuchungen sowie Feld- und Pflanzversuche. Es wurde festgestellt, dass ZFSV einen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs leisten kann. Jedoch sind teilweise Restrisiken vorhanden, die weitergehend untersucht werden müssen. Im Bauablauf kann das Ziehen von Verbauteilen zu Rissen und Brüchen im ZFSV führen. Zudem können u.a.

Spalten zwischen vertikalen Bauteilen und ZFSV entstehen. In beiden Fällen können diese Risse bzw. Spalten als durchgehende Poren betrachtet werden, in denen Wurzeln einwachsen können. Sind diese Risse oder Spalten durchgängig bis zur Rohrleitung, so ist ein Wurzelwuchs bis zur Rohrleitung oder sogar Wurzelein- bzw. -umwuchs nicht auszuschließen.

Diffiziler gestaltet sich die Beschreibung möglicher Bodenparameter, die maßgeblich für Wurzeleinwuchs in ZFSV sein können. Einjährige Feld- und Pflanzversuche zeigen, dass Wurzeln in ZFSV aus hauptsächlich sand-kiesigen Kornzusammensetzungen nicht einwachsen. Jedoch konnte bisher nicht abschließend ermittelt werden, welcher Parameter maßgeblich für den Beitrag zum Wurzelschutz ist. Porosität und Packungsdichte [151; 57] sowie die Wasserdurchlässigkeit (vgl. Kapitel 7) wurden bisher bzgl. des Wurzeleinwuchses in ZFSV detaillierter untersucht. Die hier vorliegenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass ebenfalls Rückschlüsse zwischen Wurzeleinwuchs und Wasserdurchlässigkeit bei ZFSV und Sandbettung möglich sind. Je geringer der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass keine Wurzeln einwachsen. Bei einjährigen Pflanz- und Feldversuchen konnte kein Wurzeleinwuchs in ZFSV aus Sand-Kies-Mischungen mit Durchlässigkeitsbeiwerten zwischen $4,39 \times 10^{-6}$ und $3,82 \times 10^{-7}$ m/s festgestellt werden. Langzeit-Pflanzversuche, weitere bodenmechanische Analysen und insbesondere In-situ-Beobachtungen sind notwendig, um endgültige Aussagen bzgl. der Wurzelfestigkeit von ZFSV treffen zu können. Ergänzend sollte ermittelt werden, inwieweit Porosität und Wasserdurchlässigkeit bzgl. der Prognose bzw. Bewertung zur Wurzelfestigkeit zusammenhängen, damit bestenfalls in Zukunft nur eine Laborprüfung zur Wurzelfestigkeit von ZFSV notwendig ist.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis der ZFSV-Versuche mit Pflanzen bestätigt die bisherigen Erkenntnisse [57, S. 57], dass Wurzeleinwuchs in ZFSV aus gesiebttem Naturboden mit bindigen und organischen Anteilen möglich ist. Der Unterschied zwischen Einwuchs und Nicht-Einwuchs liegt in den hier vorliegenden Untersuchungen vermutlich in der Zusammensetzung des Korngefüges und ggf. in der Höhe des organischen Anteils. Nur bei ZFSV aus Sand-Kies-Korngefügen sind keine Wurzeln eingewachsen.

Auf Basis der hier vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist eine differenzierte Analyse, Bewertung und (Weiter-)Entwicklung der Norm-Prüfverfahren von bautechnischen Schutzmaßnahmen gegen Wurzel-Rohr-Interaktionen möglich (vgl. Kapitel 8).

Die gängigen Norm-Prüfungen von Folien und Platten sind für reine Material- und Verbindungsprüfungen gegen Wurzeleinwuchs geeignet. Jedoch wird in den Norm-Prüfungen nicht berücksichtigt, ob Wurzeln die Folien und Platten um- bzw. unterwachsen können [9, S. 31, 41; 124, S. 48]. Ein neues Laborversuchskonzept und ein Monitoring-Programm in Almere (NL) werden hier weitere Erkenntnisse liefern (vgl. Kapitel 8.6). Auch Angriffspunkte an der Oberfläche, z.B. größere Poren oder Löcher, oder an den

Verbindungen, z.B. größere Spalten, sollten auf der Baustelle erfasst werden, um möglichen Wurzeleinwuchs zu verhindern.

Eine Schlussfolgerung aus den Normprüfungen der Folien und Platten im Vergleich zu den Norm-Prüfungen der Rohrverbindungen ist, dass es zielführend sein kann, auch Norm-Prüfungen an Rohrverbindungen mit Pflanzen durchzuführen. Pflanzversuche an Steckverbindungen von Abwasserleitungen [19, S. 69ff.] und an Kunststoffmantelrohrverbindungen (vgl. Kapitel 6.1.1) zeigen, dass in nicht stoffschlüssige Verbindungen Wurzeln einwachsen können. Zudem ist auch bekannt, dass die Geometrie der Rohrverbindungen einen möglichen Wurzeleinwuchs fördern kann [17, S. 209]. Aus diesen Gründen kann die Ergänzung der bisherigen Norm-Rohrverbindungsprüfungen nach DIN 4060 [125], DIN EN 1916 [37] und EN 14741 (mit höheren Belastungen) [129; 130; 131] mit weiteren Messungen des Anpressdrucks, Außendruckuntersuchungen sowie Outside-In-Versuchen und Analysen der Rohrverbindungsgeometrie die Aussagekraft der Prüfergebnisse verbessern. Bau- und materialtechnisch können viele Aspekte hinsichtlich der Wurzelfestigkeit theoretisch untersucht und beschrieben werden. Eine weitestgehend gesicherte Aussage zur tatsächlichen Wurzelfestigkeit von Rohrverbindungen lässt sich jedoch bisher nur aus einer Kombination von Norm-Laborprüfungen, der Ermittlung von oberflächlichen Angriffspunkten und Versuchen mit Pflanzen treffen.

Die gängigen Norm-Prüfverfahren für Rohrverbindungen betrachten zudem nur einen Teil des Gesamtsystems. I.d.R. werden in den Norm-Prüfungen nur die Rohrverbindungen getestet. Umschlingungen der Rohrleitungen werden nicht geprüft. Die Eindrückversuche aus Kapitel 6.1.2 zeigen, dass das Dickenwachstum von Wurzeln nach einem Jahr auf die vergleichsweise dünne PE-Ummantelung einer Kunststoffmantelrohrleitung keinen schädlichen Einfluss hat. Jedoch sind Praxisbeispiele an Gasleitungen bekannt, bei denen es durch Wurzeln in Verbindung mit Windlasten zu Schäden an Gasleitungen kam, aus deren Konsequenz auch ein Mensch zu Tode kam [91]. Daher sollte insbesondere bei Gasleitungen bereits ein Wurzelanwuchs verhindert werden, um sog. Druckstempel oder Zugschlingen [1, S. 10] an Rohrleitungen auszuschließen. Das Risiko eines Wurzelanwuchses kann durch den Einsatz von Folien und Platten sowie porenraumarmen Verfüllstoffen vermindert werden.

Norm-Prüfungen zur Wurzelfestigkeit bzw. Wurzelhemmung von ZFSV sind bisher nicht bekannt (vgl. Kapitel 3.2). Die Untersuchungen in Kapitel 7 zeigen, dass bisher auch nicht abschließend geklärt ist, welche Faktoren maßgeblich sind für möglichen Wurzeleinwuchs in ZFSV. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Eine Kombination aus Laborprüfungen und Pflanzversuchen bietet einen ersten Prüfungsansatz. Auch hier sind weitere Untersuchungen und Langzeit-Tests notwendig. Zudem sollten auf der Baustelle Begehungen durchgeführt werden, um mögliche Schwachpunkte für Wurzeleinwuchs, z.B. Risse, Brüche und Spalten, vor Ort dokumentieren und ggf. beheben zu können.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bisher bei allen Schutzmaßnahmen Restrisiken für Wurzeleinwuchs vorhanden sind. Mit Blick auf langfristige und nachhaltige Investitionen in die Infrastruktur sollten diese Restrisiken durch weitere Untersuchungen vermindert werden. Um diese Restrisiken kurzfristig zu minimieren, ist bei allen Systemen ein dreistufiges Prüfprogramm aus (Norm-)Laboruntersuchungen, der Ermittlung von möglichen Angriffspunkten (ggf. in situ) sowie Plausibilitätsnachweisen mit Pflanzen zielführend (vgl. Kapitel 8). Des Weiteren sind ggf. Kombinationen aus Schutzmaßnahmen sinnvoll [1, S. 14; 19, S. 122; 124, S. 61], um die Zuverlässigkeit des Schutzes vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben zu erhöhen. Wurzelfeste Rohrverbindungen in Kombination mit Folien bzw. Platten oder porenraumarmen Verfüllstoffen sollten einen erhöhten Schutz vor Wurzeleinwuchs bieten. Jedoch sind bei Folien und Platten bzgl. des möglichen Unterwachsens noch die größten Unsicherheiten vorhanden. Auch der Einsatz von Pflanzsubstraten direkt am Baumstandort kann einen wesentlichen, ergänzenden Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs in die Leitungszone leisten (vgl. Kapitel 6.2).

Bei der (Norm-)Prüfung aller beschriebenen Schutzmaßnahmen (Rohrverbindungen, Folien/Platten und ZFSV) ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis für den Hersteller und die Infrastrukturbetreiber maßgeblich dafür, dass Produktprüfungen auch durchgeführt werden. Daher wird vorgeschlagen, dass in zukünftigen Forschungsvorhaben die Laborprüfungen weitergehend untersucht und ggf. modifiziert werden, und Versuche mit Pflanzen in großer Stichprobenzahl über einen ausreichend langen Zeitraum durchgeführt werden. Liegen Ergebnisse aus vergleichenden Labor- und Pflanzversuchen in einer ausreichenden Stichprobenanzahl vor, so sollten daraus Rückschlüsse möglich sein, bei welchen mechanischen Randbedingungen ein Wurzeleinwuchs möglich ist und wann nicht. Diese umfassenden Verifizierungen und Validierungen der Norm-Prüfungen fehlen bisher allerdings. Hier zeigt sich noch erheblicher Forschungsbedarf, der allerdings auch mit außergewöhnlich hohem Aufwand verbunden ist.

Wurzeln wachsen langsam, Leitungen sind oftmals über mehrere Jahrzehnte im Betrieb. Daher sind die hier vorliegenden Ergebnisse ein weiterer wichtiger Schritt hinsichtlich der Ermittlung des Schutzes vor Wurzeleinwuchs bzw. der Wurzelfestigkeit von bautechnischen Schutzmaßnahmen. Die bisher geringe Stichprobenanzahl (Laborversuche, Feldversuche und In-situ-Beobachtungen) sollte ausgeweitet werden. Daher sind aktuell viele weitere Unsicherheiten bzgl. Wurzel-Rohr- und Wurzel-Bettungs-Interaktionen zu verzeichnen. Der Großteil der noch bestehenden Unsicherheiten ist epistemischer Natur, da i.d.R. nur vermutet werden kann, welcher Parameter in welchem Praxisfall maßgeblich für Wurzeleinwuchs ist. Aleatorische Unsicherheiten sind z.B. bei der Zusammensetzung der Kornstruktur von ZFSV vorhanden. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um diese Unsicherheit quantifizieren zu können. Insbesondere beim ZFSV scheint eine Vorgehensweise im Sinne des Ausschlussprinzips sinnvoll. Es sollte jeweils ein einzelner Parameter, z.B. Wasserdurchlässigkeit, pH-Wert oder Porosität, für ein umfangreiches Prüfprogramm (Laborprüfungen, Pflanzversuche, In-situ-Beobachtungen) ausgewählt

werden, um zu überprüfen, inwieweit dieser Parameter im direkten Zusammenhang mit Wurzeleinwuchs steht. Zudem sollten Untersuchungen durchgeführt werden, um überprüfen zu können, ob unter definierten Randbedingungen Grenzwerte abgeschätzt werden können, ab wann eine Wurzel in ZFSV einwächst und ab wann nicht mehr. Dazu können paarweise Vergleiche durchgeführt werden, bei denen Wurzeln in einem Pflanzkübel in zwei Böden mit z.B. unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerten wachsen sollen. Je nachdem in welchen Boden die Wurzeln einwachsen, kann ermittelt werden, wann ein Boden wurzelfester ist als der andere (vgl. Kapitel 8.3.3).

Die Aufgrabungen im Versuchsfeld Almere werden weitere Erkenntnisse zum bautechnischen Schutz vor Wurzeleinwuchs geben. Weitere Untersuchungen sollten folgen. Wichtig ist die Erweiterung der Stichprobenanzahl und Parameter von Laborversuchen und In-situ-Erkenntnissen, da für das Wurzelwachstum je nach Umgebungsbedingung unterschiedliche Parameter maßgeblich sein können. Daher sind weitere und modifizierte Versuche sowie neue Versuche mit gleichen und weiteren Systemen sowie anderen Pflanzenarten notwendig, wie sie beispielsweise in der vorliegenden Arbeit oder in [6, S. 173ff.] dargestellt werden. Maßgebliche (Boden-) Parameter für das Wurzelwachstum sind weiter einzugrenzen bzw. genauer zu definieren.

Langfristiges Ziel ist die Ermittlung der technischen Beständigkeit und Dauerhaftigkeit der bautechnischen Schutzmaßnahmen gegen Wurzeleinwuchs. Dafür ist viel Zeit notwendig, jedoch wurde die methodische Basis dafür im Rahmen der Forschungsvorhaben bzw. der vorliegenden Arbeit bereits gelegt.

Ein besserer Schutz der unterirdischen Infrastruktur vor Wurzeleinwuchs und somit für mehr Bäume in Städten als Beitrag zur Lebensqualität der Einwohner und zum lokalen Klimaschutz ist aus Sicht des Autors das wichtige Ziel für nachhaltige Städte. Ein chinesisches Sprichwort sagt:

„Die Vorfahren pflanzten Bäume, damit sich die Nachkommen an ihrer Kühle freuen.“

In diesem Sinne soll auch mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag geleistet werden, um für die Zukunft und die nächsten Generationen die urbanen Räume so zu gestalten, dass Bäume und unterirdische Infrastruktur im Einklang stehen.

10 Literaturverzeichnis

- [1] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt DWA-M 162 „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“. (Ausgabe: Februar 2013, textgleich mit DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939). Hennef, Februar 2013.
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): „Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil Landschaftspflege, Abschnitt 4: Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen, RAS-LP4“. Köln, 1999.
- [3] Moser, M.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H.: „Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven“. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 188. Jg., 5/6., S. 94-111, Oktober 2017.
- [4] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF): Merkblatt 27 „Kohlenstoffspeicherung von Bäumen“. Freising, Juni 2011. Abgerufen am 08.11.2021:
https://www.lwf.bayern.de/service/publikationen/lwf_merkblatt/022680/index.php
- [5] United Nations: “Paris Agreement”. 2015. Abgerufen am 03.01.2020:
http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- [6] Salomon, M.; Grimm, S.; Stützel, T.; Hay, S.; Besier, R.; Bosseler, B.; Kamarianakis, S.; Bersuck, F.; Möllers, K.; Hörster, T.; Weinz, K.; Elfroth, E.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“. Gefördert durch die DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Antragsstellung durch AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK, in Zusammenarbeit mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur und der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen, Frankfurt am Main, redaktionell überarbeitete Version, November 2020. (unveröffentlicht)
- [7] Salomon, M.; Ulutaş, S.; Liebscher, M.; Klameth, M.; Rofall, N.; Knott, W.; Niedrig, N.; Toth, D.; Bischoff, E.: „IKT-Warentest „Flüssigboden (ZFSV) im Kanalbau – Kapitel Bewertungskriterium Schutz vor Wurzeleinwuchs“. Gefördert durch MULNV - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW sowie zehn Abwassernetzbetreiber, bearbeitet durch IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, 2020.

- [8] Salomon, M.; Bosseler, B.; Liebscher, M.; Klameth, M.; Rofall, N.; Ulutaş, S.; Knott, W.; Niedrig, N.; Toth, D.; Bischoff, E.: „Endbericht zum Forschungsvorhaben „Vergleichende Untersuchung von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) – Kapitel Schutz vor Wurzeleinwuchs“. Gefördert durch MULNV - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW sowie zehn Abwassernetzbetreiber, bearbeitet durch IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Gelsenkirchen, Dezember 2020. (Vorabzug, unveröffentlicht)
- [9] Salomon, M.; Bosseler, B.; Bresser, J.; Busch, S.; Becker, M.; Kotas, L.: „Untersuchungen zur Wirksamkeit von passiven Leitungsschutzmaßnahmen an unterirdischen Leitungen“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, im Auftrag der Gemeinde Almere (NL) und Stichting RIONED. Gelsenkirchen, Oktober 2019. (unveröffentlicht)
- [10] Bosseler, B.; Goerke, M.; Salomon, M.: „Rohre vor Wurzeln schützen und Wurzeln vor Rohren – Empfehlungen nach FGSV 939 / DWA-M 162 / DVGW GW 125 im Kanal- und Leitungsbau“. Tagungsband IKT-Forum Niederschlagswasser, S. 24-38, Gelsenkirchen, April 2016.
- [11] Salomon, M.; Grimm, S.: „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“. Veröffentlicht in „Fernwärme + KWK – durch Forschung fit für die Zukunft, 2. Auflage. AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., S. 167-180, Frankfurt am Main, Oktober 2018.
- [12] Grimm, S.: „Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen“. Neues Forschungsvorhaben von IKT und AGFW. In: EuroHeat&Power 47 (9), S. 44, 2018.
- [13] Salomon, M.: „Praxisrelevantes Wissen für eine Optimierung der Trassenfindung“. In: EuroHeat&Power 47 (9), S. 46–47, 2018.
- [14] Salomon, M.; Bresser, J.; Bloedjes, L.: „Leitungen schützen, Bäume erhalten“. Straßen-&Tiefbau, Heft Nr. 04, S. 31-33, Juli 2018 und B_I galabau, Heft Nr. 10, S. 60-62, November 2018 (weitestgehend textgleich).
- [15] Grimm, S.; Huther, H.; Salomon, M.: „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“. bbr Leitungsbau | Brunnebau | Geothermie, Heft Nr. 07/08, S. 25-33, Juli 2019.
- [16] Salomon, M.; Grimm, S.; Stützel, T.; Winter, H.: „Zu warm für Wurzeln? Interaktion von Fernwärmeleitungen und Stadtbäumen“. bbr Leitungsbau | Brunnenbau | Geothermie, Heft Nr. 02, S. 18-21, 2021.

- [17] Stützel, T.; Bosseler, B.; Bennerscheidt, C.; Schmiedener, H.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum unter Beteiligung verschiedener Netzbetreiber und wissenschaftlicher Unterstützung durch den Lehrstuhl für Angewandte Bodenkunde der Universität Duisburg-Essen im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juli 2004.
- [18] Bennerscheidt, C.; Streckenbach, M.; et al.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle – „ergänzende Feldversuche““. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum und dem Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juni 2007.
- [19] Stützel T.; Bennerscheidt C.; Bosseler B.; Schmiedener H.; Streckenbach M.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle – „Ergänzungsvorhaben““. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juli 2007.
- [20] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen: „Klimawandel und Klimafolgen in Nordrhein-Westfalen - Ergebnisse aus den Monitoringprogrammen 2016 - LANUV-Fachbericht 74“. Recklinghausen, 2016.
- [21] Neue Landschaft: „Paris investiert 72 Millionen Euro in seine Grünräume“. Artikel erschienen in der Ausgabe NEUE LANDSCHAFT 11/2019. Internetinformationen, abgerufen am 11.02.2021 unter <https://neuelandschaft.de/artikel/paris-investiert-72-millionen-euro-in-seine-gruenraeume-12607.html>
- [22] Rathaus Umschau München: „München pflanzt 100.000 Bäume pro Jahr“. Rathaus Umschau 5/2020, veröffentlicht am 09.01.2020. Internetinformationen, abgerufen am 11.02.2021 unter <https://ru.muenchen.de/2020/5/Muenchen-pflanzt-100-000-Baeume-pro-Jahr-89090>
- [23] Norfolk County Council: „1 Million Trees for Norfolk – County’s ambitious planting project gets underway“. Norfolk County Council News, veröffentlicht am 04.12.2020. Internetinformation, abgerufen am 11.02.2021 unter <https://www.norfolk.gov.uk/news/2020/12/one-million-trees-for-norfolk-countys-ambitious-planting-project-gets-underway>
- [24] Berger, C.; Falk, C.; Hetzel, F.; Pinnekamp, J.; Ruppelt, J.; Schleiffer, P.; Schmitt, J.: „Zustand der Kanalisation in Deutschland – Ergebnisse der DWA-Umfrage 2020“. Sonderdruck aus KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 67. Jahrgang, Heft 12/2020, S. 939-953, Hennef, 2020.

- [25] Thamling, N.; Langreder, N.; Rau, D.; Wunsch, M.; Maaß, C.; Sandrock, M.; Fuß, G.; Möhring, P.; Purkus, A.; Strodel, N.: „Perspektive der Fernwärme – Maßnahmenprogramm 2030 – Aus- und Umbau städtischer Fernwärme als Beitrag einer sozial-ökologischen Wärmepolitik (Kurzfassung)“. Im Auftrag des AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V., durchgeführt von Prognos AG und Hamburg Institut, Frankfurt am Main, November 2020.
- [26] DIN 1998: „Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2018.
- [27] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Arbeitsblatt DWA-A 125 „Rohrvortrieb und verwandte Verfahren“. Hennef, Dezember 2008.
- [28] DIN EN 752: „Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden - Kanalmanagement; Deutsche Fassung EN 752:2017“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2017.
- [29] DIN EN 16323: „Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik; Dreisprachige Fassung EN 16323:2014“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2014.
- [30] DIN 4045: „Abwassertechnik - Grundbegriffe“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2016.
- [31] Abwassertechnische Vereinigung (ATV): „ATV-Handbuch: Planung der Kanalisation“. Verlag Ernst & Sohn, 4. Auflage, Berlin, 1995.
- [32] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Arbeitsblatt DWA-A 139 „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen“. Hennef, März 2019.
- [33] DIN EN 1610: „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und kanälen; Deutsche Fassung EN 1610:2015“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2015.
- [34] DIN 18196: „Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2011.
- [35] ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (Landesverband Nordrhein-Westfalen): „Das Baustellenhandbuch“. Hennef, 1. Auflage, 2002.
- [36] Stein, D.; Stein, R.: „Instandhaltung von Kanalisationen – Band 1“. Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH, 4. Auflage, Band 1, Bochum, 2014.
- [37] DIN EN 1916: „Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton; Deutsche Fassung EN 1916:2002“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2003. In Verbindung mit Berichtigung 1 von Mai 2004 und Berichtigung 2 von August 2008.

- [38] DIN 19543: „Allgemeine Anforderungen an Rohrverbindungen für Abwasserkanäle und -leitungen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 1982. Zurückgezogen. Zitiert aus [36, S. 84].
- [39] Rohrleitungsbauverband e. V.: „Netzmeister – Technisches Grundwissen – Gas – Wasser – Fernwärme“. Oldenbourg Industrieverlag, 2. Auflage, München, 2008.
- [40] Konstantin, P.: „Praxisbuch der Fernwärmeversorgung - Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung“. Springer Vieweg, 1. Aufl., Wiesbaden, Mai 2018. Internetauszug, abgerufen am 14.02.2021 unter https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-55911-6_1
- [41] Firmeninformation: isoplus Fernwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbH „Starre Verbundsysteme“. Kapitel 2, Rosenheim, Dezember 2013. Internetinformation, abgerufen am 14.02.2021 unter https://www.isoplus.de/fileadmin/data/downloads/documents/germany/Catalogue_German/Kapitel_2_Starre_Verbundsysteme.pdf
- [42] DIN EN 253: „Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen; Deutsche Fassung EN 253:2019“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2020.
- [43] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: AGFW-Arbeitsblatt FW 401 - Teil 6: „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze - Bauteile; Rohrverbindungen“. Frankfurt am Main, Dezember 2007.
- [44] DIN 4124: „Baugruben und Gräben - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2012.
- [45] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: AGFW-Arbeitsblatt FW 401 – Teil 12: „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bau und Montage; Organisation der Bauabwicklung, Tiefbau“. Frankfurt am Main, Dezember 2007.
- [46] DIN EN 13941: „Berechnung und Verlegung von werkmäßig gedämmten Verbundmantelrohren für die Fernwärme; Deutsche Fassung EN 13941:2003-10“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2003. ZURÜCKGEZOGEN. Zitiert aus [45, S. 14].
- [47] DIN 4226-101: „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2017. Zitiert aus [45, S. 18].

- [48] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (Gesteinskörnungen und Werksteine im Straßenbau) (TL Min-StB 2000). Köln, 2000. Zitiert aus [45, S. 18].
- [49] Lüttge, U.; Kluge, M.; Thiel, G.: „Botanik – Die umfassende Biologie der Pflanzen“. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1. Auflage, Weinheim, 2010.
- [50] Kadereit, J.; Körner, C.; Kost, B.; Sonnewald, U.: „Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften“. Springer Spektrum, Springer-Verlag, 37. Auflage, Berlin Heidelberg, 2002, 2008, 2014.
- [51] Gisi, U.; et al.: „Bodenökologie“. Georg Thieme Verlag, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart, New York, 1997.
- [52] Canadell, J.; et al.: „Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale“. *Oecologia*, 108, S. 583–595, 1996. Zitiert aus [50, S. 795].
- [53] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): „ZTV-Baumpfleger – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Baumpfleger“. Bonn, 2017.
- [54] DIN 19683-13: „Bodenbeschaffenheit - Physikalische Laboruntersuchungen - Teil 13: Bestimmung des Substanzanteils, Porenanteils und der Porenziffer“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2007.
- [55] Karl Josef Witt (Hrsg.): „Grundbau-Taschenbuch – Teil 1: Geotechnische Grundlagen“. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 7. Auflage, 2008.
- [56] DIN 18128: „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2012.
- [57] Simon, J.: „Granulometrische Anpassung von ZFSV zur Optimierung von Wurzelhemmung und thermischer Leitfähigkeit“. Dissertation, Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 31, kassel university press GmbH, Kassel, 2019.
- [58] Frede, H.G.: „Der Gasaustausch des Bodens“. Göttinger Bodenkundliche Berichte, Nr. 87, 1986. Zitiert aus [17, S. 16].
- [59] Zausig, J.; Hell, U.; Horn, R.: „Die Bedeutung der Aggregation für den Gashaushalt im Intraaggregatporensystem“. *Z. Pflanzenern. und Bodenkd.*, Nr. 153, S. 5-10, 1990. Zitiert aus [17, S. 16].
- [60] Hartge, K.; Horn, R.: „Die physikalische Untersuchung von Böden – Praxis, Messmethoden, Auswertung“. Schweizerbart, 4. vollständig überarbeitete Auflage, 2009.

- [61] DIN 18130-1: „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1998. Wurde während der Forschungsvorhaben zurückgezogen. Ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11: „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit“ (ISO 17892-11:2019-05); Deutsche Fassung EN ISO 17892-11:2019-05. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2019.
- [62] Männer, J.: „Untersuchung des thermischen Verhaltens von Böden“. Projektarbeit an der Technischen Universität Dresden, Kurzfassung, Dresden, Januar 2012. Online abgerufen am 28.02.2021 unter https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/geotechnik/ressourcen/dateien/studium/abschlussarbeiten/abgeschlossenearbeiten/projektarbeiten/2012/Kurzfassung_JM.pdf?lang=de
- [63] Hölting, B.; Coldewey, W.: „Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie“. Springer Spektrum, Heidelberg, 8. Auflage, Oktober 2008.
- [64] Benk, J.; Artmann, S.; Kutscheidt, J.; Müller-Inkmann, M.; Streckenbach, M.; Weltecke, K.: „Praxishandbuch Wurzelraumsprache“. Arbeitskreis Baum im Boden, Möhnese, 2020.
- [65] DIN 18920: „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2014.
- [66] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil1: „Planung, Pflanzarbeiten, Pflege“. Bonn, 2015.
- [67] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): „Empfehlungen für Baumpflanzungen - „Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“. Bonn, 2010.
- [68] Stichting RIONED; Eindhoven: „Riolering en wortelingroei – Verkennend onderzoek“. April 2016.
- [69] IRWA: IKT- Insitut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: „Best practices – Vegetation and infrastructures – Reducing conflicts in the underground“. September 2015. (Unveröffentlicht)
- [70] WRc Water Research Centre Limited: “Tree Root Barriers to Protect Sewer Systems“. In Kooperation mit IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, Swindon, Gelsenkirchen, Juni 2015. (Unveröffentlicht)

- [71] Wichern, M.; Berzio, S.; Lange, R.L.; Bosseler, B.; Ulutas, S.; Schlüter, M.; Treinen, M.: „Untersuchung zur bedarfsorientierten Kanalreinigung unter Nutzung betrieblicher Synergien – Phase I & II (Abschlussbericht)“. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Umwelttechnik mit Projektbeteiligung des IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur, gefördert durch das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz NRW mit fachlicher Begleitung durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Bochum, Mai 2015.
- [72] Randrup, T.: „Occurrence of tree roots in danish municipal sewer systems“. *Arboricultural Journal, The International Journal of Urban Forestry*, Vol. 24, S. 283-306, Dezember 2000. DOI: 10.1080/03071375.2000.9747282
- [73] Randrup, T.: “Tree root intrusion in sewer systems: review of extent and costs”. *Journal of infrastructure systems*, Vol.7, Heft Nr. 1, S. 26-31, März 2001.
- [74] Stål, Ö.: „The interaction of tree roots and sewers: The swedish experience“. *Arboricultural Journal* 22 (4), S. 359-367, 1998.
- [75] Kuliczowska, E; Parka, A.: „Management of risk of tree and shrub root intrusion into sewers“. *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 21, S. 1-10, 2017.
- [76] Ridgers D., Rolf K., Stål Ö.: „Management and planning solutions lack of resistance to root penetration to modern PVC- and concrete sewer pipes“. *Arboricultural Journal*, Nr. 29, S. 269-290, 2006.
- [77] Marlow, D. R.; Boulaire, F.; Beale, D.J.; Grundy, C.; Moglia, M.: „Sewer Performance Reporting: Factors That Influence Blockages“. *Journal of Infrastructure Systems*, Januar 2010. DOI: 10. (ASCE)IS.1943-555X.0000041.
- [78] Water Service Association of Australia (WSAA), and National Water Commission (NWC): „National performance report 2006-2007, urban water utilities.“ NWC, Canberra, Australia, 2008. Zitiert aus [77, S. 43].
- [79] Beattie, M.; Brownbill, D.: „The trials and tribulations of reducing sewer blockages“. 70th Annual Water Industry and Operators´ Conference, Bendigo Exhibition Centre, S. 100-107, 4 to 6 September 2007.
- [80] Pohls, O.; Bailey, N.G.; May, P.B.: „Study of Root Invasion of Sewer Pipes and Potential Ameliorative Techniques“. *Acta horticultrae*, S. 113-121, Januar 2004. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.643.13.
- [81] Östberg, J.; Martinsson, M.; Stål, Ö.; Fransson, F.: „Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas“. *Urban Forestry & Urban Greening*, Vol. 11.1, S. 65-71, 2012.

- [82] Torres, M.; Rodriguez, J.; Leitao, J.: „Geostatistical analysis to identify characteristics involved in sewer pipes and urban tree interactions“. Urban Forestry & Urban Greening, Heft Nr. 25, S. 36-42, 2017.
- [83] Okwori, E.; Viklander, M.; Hedström, A.: „Spatial heterogeneity assessment of factors affecting sewer pipe blockages and predictions“. Water Research, Heft Nr. 194, S. 1-13, 2021.
- [84] Bosseler, B.; Bennerscheidt, C.; Bartel, M.; Schmiedener, H.: „Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanälen und -leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur in Kooperation mit Gelsenkanal (Auftraggeber), gefördert vom Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW, März 2001.
- [85] Reichwein, S.: „Baumwurzeln unter Verkehrsflächen – Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung“. Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur, Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover, Beiträge zur räumlichen Planung, Heft Nr. 66, 2002.
- [86] DIN EN 13508 Teil 2: „Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion; Deutsche Fassung EN 13508-2:2003+A1:2011“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2011.
- [87] Bennerscheidt, C.: „Betriebs- und Sanierungsmaßnahmen bei Wurzelschäden in öffentlichen und privaten Abwasserleitungen und -kanälen – Inspektionen“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH in Kooperation mit der Gemeinde Raesfeld und dem Lehrstuhl für Biodiversität und Evolution der Pflanzen an der Ruhr-Universität Bochum. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Juli 2007.
- [88] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt DWA-M 149-3 „Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden Teil 3: Beurteilung nach optischer Inspektion“. Hennef, April 2015.
- [89] Hondt, M.: „Baumwurzeln und erdverlegte Leitungsanlagen – Ursachen und Folgen einer komplexen Koexistenz“. 3R, Nr. 11/2011, S. 825-829, 2011.
- [90] Mattheck, C.; Breloer, H.: „Die Mechanik der Baumwurzeln als Grundlage für die Beurteilung der Standsicherheit“. Erschienen in 11. Osnabrücker Baumpflegetage 14. und 15. September 1993.

- [91] RP Online: „Frau starb bei Gasexplosion in Viersen“. 2013. Online verfügbar unter: https://rp-online.de/nrw/staedte/viersen/frau-starb-bei-gasexplosion-in-viersen_aid-20111941, abgerufen am 07.10.2020.
- [92] BSI British Standard Institution: British Standard BS 5837 : 1991 „Trees in relation to construction“. London, 1991. Zitiert aus [90, S. 16].
- [93] Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: Technischer Hinweis – Merkblatt DVGW GW 125-B1 (M) „1. Beiblatt zu GW 125 Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle: Beurteilungskriterien für Baumwurzeln-Gasrohrleitungs-Interaktionen“. Bonn, März 2016.
- [94] Donaukurier: „Baumwurzel kappt Stromleitung“. 2006. Online verfügbar unter: <https://www.donaukurier.de/lokales/riedenburg/5e-strom14-K-Baumwurzel-kappt-Stromleitung;art602,1563130>, abgerufen am 05.03.2021.
- [95] Ahmels, P.; Brandmeyer, O.; Bruns, E.; Grünert, J.; Voß, U.: „Auswirkungen verschiedener Erdkabelsysteme auf Natur und Landschaft „EKNA“ (FKZ 3514 82 1600)“. Deutsche Umwelthilfe, Institut für nachhaltige Energie- und Ressourcennutzung und Bundesamt für Naturschutz, Berlin, Leipzig, 2016.
- [96] Hörster, T.: Masterarbeit „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen – Vorteile und Grenzen von abgestimmten Bauweisen von Fernwärmetrassen an Baumstandorten“. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb in Kooperation mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, März 2019. (unveröffentlicht)
- [97] Weinz, K.: Projektarbeit „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen - Ausschreibung und Vergabe von Neubau- und Erneuerungsmaßnahmen von Fernwärmeleitungen in Bereichen mit Baumbestand“. Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb in Kooperation mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Juli 2020. (unveröffentlicht)
- [98] Stützel, T.: „Vortrag zur Genese von Schäden an Straßenbelegen durch Wurzeln“. IKT-Seminar, 2011.
- [99] Thoma, W.: „Entwicklung von Untersuchungs- und Prüfverfahren zur Klärung des Zusammenhangs zwischen Alterung und Undichtigkeit bei Dichtungswerkstoffen und -systemen in industriellen und öffentlichen Abwasserrohrleitungen“. Forschungsvorhaben TÜV Südwest, BMBF 02-WK 9175/0, Filderstadt, 1996.

- [100] Bennerscheidt, C.; Goerke, M.; Schmiedener, H.: „Erarbeitung eines Konzepts für die Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen (Vorstudie)“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH im Auftrag des AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2013.
- [101] Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. bei der VDEW e.V. (1988): „Bodenbeeinflussung durch Bau und Betrieb erdverlegter Fernwärmeleitungen“. Eine Ausarbeitung der Arbeitsgruppe "Bodenbeeinflussung" im AK "Netzbautechnik". Merkblatt 4.2.2. Unter Mitarbeit von Altenöder, Block, Gerke-Reineke, Hagemeister, König, Marschinski et al. Frankfurt (Main) (Merkblätter der Fernwärmeversorgung, 4), 02.08.1988 (46).
- [102] Mosler, J.: „Wärmeverlust von Fernwärmeleitungen“. Dissertation, Universität Dortmund, Fachbereich Chemietechnik, 1987. Zitiert aus [101, S. 18].
- [103] Lyr, H.: „Effect of tree root temperature on growth parameters of various European tree species“. Ann Sci For Hefreihe 53, Seiten 317-323, 1996.
- [104] Heidger, Clemens, IHK-Hannover ö.b.u.v. Sachverständiger für Garten- und Landschaftsbau: Vortrag auf dem IKT-Lehrgang „Sachkundiger für Vegetation und unterirdischer Infrastruktur“. Zitiert aus [100, S. 26f.]. Datum nicht vorhanden.
- [105] Dengler, Roland: „Sachverständigen-Gutachten Nr. 72/86 BV - Erneuerung der Promenade - Untersuchungen des vorhandenen Baumbestandes sowie der Silberhorn-Reihe in der Fürstenberg-Allee“. Im Februar 1987 durch das Gartenbauamt der Stadt Münster abgezeichnet.
- [106] Richner, Walter: „Wurzelwachstum junger Maispflanzen in Abhängigkeit von der Temperatur“. Dissertation, ETH Zürich, 1992. Zitiert aus [100, S. 6].
- [107] Engels, Ch.; Marschner, H.: „Einfluss suboptimaler Wurzeltemperaturen auf Wachstum und Nährstoffaufnahme bei Mais“. Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenernährung, Mitt. Ges. Pflanzenbauwis., Heftnummer 1, Seiten 58-60, 1988. Zitiert aus [100, S. 6].
- [108] Canham, A.E.: „Soil Temperature and Plant Growth“. Advan. Hort. Sci., Seiten 440-451, 1962. Zitiert aus [100, S. 6].
- [109] Macduff, J.H.; Hopper, M.J.; Dhanoa, M.S.: „Wild Effect of temperature on parameters of root growth“. Plant and Soil, Heftnummer 94, Seiten 321-332, 1996. Zitiert aus [100, S. 6].
- [110] Rogler, R.-D.; Loth, C.: „Parameterstudie zur Erwärmung erdverlegter Kabelanlagen unter Berücksichtigung von Geometrie und Materialeigenschaften der Bettung“. IRO-Tagungsband „Rohrleitungen – Transportmedium für Trinkwasser und Abwasser“ Tagungsband zum 33. Oldenburger Rohrleitungsforum, Band 46, S. 712-724. Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2019.

- [111] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW): „Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme - Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung, LANUV-Arbeitsblatt 13“. Recklinghausen, 2015.
- [112] Kutschera, L.; Lichtenegger, E.: „Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher“. Leopold Stocker Verlag, Graz, 2002. Zitiert aus [111, S. 123ff.].
- [113] Hausen, Robert: „Das Wetter und der Rasen“. Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach, 2016. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2016/5/9.html, abgerufen am 22.05.2020.
- [114] Böhme, M.; Böttcher, F.: „Bodentemperaturen im Klimawandel - Auswertungen der Messreihe der Säkularstation Potsdam“. Deutscher Wetterdienst, Klimastatusbericht 2011, S. 85-90, Offenbach, 2011.
- [115] Trüby, P.: „Auswirkungen der Wärmeemission von Höchstspannungserdkabeln auf den Boden und auf landwirtschaftliche Kulturen“. Gutachten im Auftrag der Amprion GmbH, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Br., Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre und Terra Planta, Prof. Dr. Peter Trüby, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Land- und Forstwirtschaftliche Bodenkunde, Schopfheim, Mai 2014.
- [116] N.N.: Fachvortrag „Erdkabel-Pilotprojekt Raesfeld“. Vortrag als Internetinformation, abgerufen am 21.02.2021 unter <https://docplayer.org/64168863-Erdkabel-pilotprojekt-raesfeld.html>
- [117] Brüggmann, J.: Fachvortrag „Bodenschutz bei Erdverkabelung Programm Umweltdialog“. Amprion GmbH, Bonn, Juni 2018.
- [118] Feldwisch, N.: Fachvortrag „Bodenschutz und Bodenmonitoring bei der Erdverkabelung“. Ingenieurbüro Feldwisch, Bürgerdialog Stromnet, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Juni 2016.
- [119] energate messenger+: „Tennet untersucht Auswirkungen von Erdkabeln auf Landwirtschaft“. Internetinformation abgerufen am 21.02.2021 unter <https://www.energate-messenger.de/news/190718/tennet-untersucht-auswirkungen-von-erdkabeln-auf-landwirtschaft>
- [120] Thrän, D.; et al.: „Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft („EE-Monitor““). Bundesamt für Naturschutz, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ GmbH, Deutsches Biomasseforschungszentrum – DBFZ gGmbH, Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH, Leipziger Institut für Energie GmbH, Bosch & Partner GmbH, BfN-Skripten 562, 2020.

- [121] Runge, K.; Baum, S.; Meister, P.; Rottgart, E.: „Umweltauswirkungen unterschiedlicher Netzkomponenten“. OECOS GmbH, Räumliche Planung + Umweltuntersuchungen im Auftrag der Bundesnetzagentur, Hamburg, September 2012.
- [122] Harms, G.: „Erdkabel: Jetzt geht es los!“. Top agrar, 10/2013, S.28-30, 2013.
- [123] Glück, Bernd: „Wärmeverlustströme von erdverlegten Rohrleitungen“. Stadt- und Gebäudetechnik Vol. 38 No. 5, S: 65-68, 1984.
- [124] Kotas, L.: Bachelorarbeit „Bäume und unterirdische Leitungen – Qualifizierte Marktrecherche zu passiven Wurzelschutzmaßnahmen mit Analyse von Fallbeispielen“. Hochschule Bochum, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen, Fachgebiet Geotechnik in Kooperation mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, März 2018. (unveröffentlicht)
- [125] DIN 4060: „Rohrverbindungen von Abwasserkanälen und -leitungen mit Elastomerdichtungen – Anforderungen und Prüfungen an Rohrverbindungen, die Elastomerdichtungen enthalten“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2016.
- [126] Streckenbach, M.: „Interaktion zwischen Wurzeln und unterirdischer technischer Infrastruktur – Grundlagen und Strategien zur Problemvermeidung“. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Biologie und Biotechnologien, Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen, Bochum, 2009.
- [127] DIN V 1201: „Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle - Typ 1 und Typ 2 - Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2004.
- [128] DIN EN ISO 13259: „Erdverlegte Rohrleitungssysteme aus Thermoplasten für drucklose Anwendungen – Prüfverfahren für die Dichtheit von elastomeren Dichtringverbindungen“; Deutsche Fassung EN ISO 13259:2020. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2020.
- [129] DIN EN 14741: „Rohrleitungs- und Schutzrohrsysteme aus Thermoplasten - Verbindungen für erdverlegte drucklose Anwendungen - Prüfverfahren für das Langzeit-Dichtverhalten von Verbindungen mit Elastomer-Dichtungen durch Abschätzung des Dichtdrucks“; Deutsche Fassung EN 14741:2006. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2006.
- [130] Güteschutzverband Rohre im Siedlungswasserbau: GRIS-Gütevorschrift GV 16 „Spezielle Gütevorschrift für Kanalrohre und Formstücke aus Polypropylen (PP) für den Siedlungswasserbau“. Wien, August 2019.
- [131] EADIPS/Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR) e. V: EADIPS®/FGR® 76 „Steckmuffen-Verbindungen duktiler Guss-Rohrsysteme – Beständigkeit gegen das Eindringen von Wurzeln – Anforderungen und Prüfverfahren“. Herten, Februar 2017.

- [132] Australian/New Zealand Standard™: AS/NZS 1462.13:2006 „Methods of test for plastics pipes and fittings – Method 13: Method for the determination of elastomeric seal joint contact width and pressure“. Sydney, Wellington, Februar 2006.
- [133] DIN 4062: „Kalt verarbeitbare plastische Dichtstoffe für Abwasserkanäle und -leitungen – Dichtstoffe für Bauteile aus Beton – Anforderungen, Prüfungen und Verarbeitung“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 1978. Zurückgezogen.
- [134] Burn L.S., Lu J.P Whittle A.J.: “Performance of Elastomeric Joints for PVC Sewer Pipes”. CSIRO, Australia, 1997.
- [135] Sadler, P.A., Burn, L.S., Whittle, A.J.: „Elastomeric pipe joint performance requirements for use in PVC sewer-lines“ CSIRO Building, Construction and Engineering, Melbourne, Victoria, Australia, 2001. Zitiert aus [17, S. 37f.].
- [136] Whittle, A.: PVC Technical Information. Plastics Industry Pipe Association of Australia Limited, July 2003.
- [137] Uni Bell, PVC Pipe Association: “Maintenance of PVC Sewer Pipe”. UNI-TR-3-03. www.uni-bell.org.
- [138] DIN EN 295-1: „Steinzeugrohrsysteme für Abwasserleitungen und -kanäle - Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und Verbindungen“; Deutsche Fassung EN 295-1:2013. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2013.
- [139] DIN EN 598: „Rohre, Formstücke, Zubehörteile aus duktilem Gusseisen und ihre Verbindungen für die Abwasser-Entsorgung - Anforderungen und Prüfverfahren“; Deutsche Fassung EN 598:2007+A1:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [140] DIN V 19543-2: „Rohre und Formstücke aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) mit Steckmuffe für Abwasserkanäle und -leitungen – Technische Lieferbedingungen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992. Zurückgezogen.
- [141] DIN EN 1401-1: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U) - Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem; Deutsche Fassung EN 1401-1:2019“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 2019.
- [142] DIN EN 1852-1: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Polypropylen (PP) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem; Deutsche Fassung EN 1852-1:2018“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2018.
- [143] DIN EN 14758-1: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Polypropylen mit mineralischen Additiven (PP-MD) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem; Deutsche Fassung EN 14758-1:2012“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2012.

- [144] DIN EN 12666-1: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Polyethylen (PE) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem; Deutsche Fassung EN 12666-1:2005+A1:2011“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2011.
- [145] DIN EN 13476-1: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Leistungsmerkmale; Deutsche Fassung EN 13476-1:2018“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2018.
- [146] DIN EN 13476-2: „Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) – Teil 2: Anforderungen an Rohre und Formstücke mit glatter Innen- und Außenfläche und an das Rohrleitungssystem, Typ A; Deutsche Fassung EN 13476-2:2018+A1:2020“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2020.
- [147] DIN EN 13476-3: „Rohrleitungssysteme mit profilierter Wandung aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U), Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) – Teil 3: Anforderungen an Rohre und Formstücke mit glatter Innen- und profilierter Außenfläche und an das Rohrleitungssystem, Typ B; Deutsche Fassung EN 13476-3:2018+A1:2020“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2020.
- [148] OENORM EN 1852-1:2018-07-01: „Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen - Polypropylen (PP) - Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem“. Wien, Juli 2018.
- [149] Australian/New Zealand Standard™: AS/NZS 1260:2017 „PVC-U pipes and fittings for drain, waste and vent applications“. Sydney, Wellington, 2017.
- [150] DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Merkblatt DWA-M 146 „Abwasserleitungen und -kanäle in Wassergewinnungsgebieten – Hinweise und Beispiele“. Hennef, November 2018.
- [151] Simon, J.; Felde, V.; Peth, S.; Kimm-Friedenberg S.; Middendorf B.: „Entwicklung selbstverdichtender Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs“. DBU Deutsche Bundestiftung Umwelt, Kassel, 2016.
- [152] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) - Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau: „Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau – H ZFSV“. Köln, 2012.

- [153] Smiley, T.; Calfee, L.; Fraedrich, B.R.; Smiley, E.J.: "Comparison of Structural and Noncompacted Soils for Trees Surrounded by Pavement". *Arboriculture & Urban Forestry*, Nr. 32(4), S. 164-169, Juli 2006.
- [154] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung von Bodenmaterial (TR Boden)“. Potsdam, November 2004.
- [155] Produktinformation KING Rootbarrier: „RootBarrier® RootPanels® Rib“. Abgerufen am 07.08.2019 unter: <https://www.kingrootbarrier.com/media/1798/rootbarrier-rootpanels-rib-flyer-de.pdf>
- [156] Produktinformation GREENMAX B.V.: „Wurzelführung oder Wurzelschutz?“. Abgerufen am 07.08.2019 unter: https://www.greenmax.eu/cms/uploads/downloads/de/Downloads/Produktinformationen/Leaflet%20brochure%202017%20DU_keuzemenu%20wortelwering%20en%20geleiding.pdf
- [157] Internetauftritt GEFA Produkte Fabritz GmbH: „Wurzelmanagement“. Abgerufen am 08.08.2019 unter: <https://www.gefafabritz.de/wissenbereich/wurzelmanagement.html>
- [158] Internetauftritt Greenleaf Deutschland KG: „Wurzelschutz“. Abgerufen am 08.08.2019 unter: <https://www.greenleaf.de/arborsystem/wurzelschutz/>
- [159] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.: „FLL-Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen“. Bonn, 2018.
- [160] DIN EN 13948: „Abdichtungsbahnen - Bitumen-, Kunststoff- und Elastomerbahnen für Dachabdichtungen - Bestimmung des Widerstandes gegen Wurzelpenetration“; Deutsche Fassung EN 13948:2007. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [161] Stützel, T.; Bennerscheidt, C.; et al.: „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil I: Verpflanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“. Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), AZ 28019-23. Projektleitung IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen, 2011.
- [162] Gilman, E.: „Root barriers affect root distribution“. *Journal of Arboriculture*, Heft Nr. 22(3), S. 151-154, Mai 1996.
- [163] Smiley, T.: „Comparison of Methods to Reduce Sidewalk Damage from Tree Roots“. *Arboriculture & Urban Forestry*, Nr. 34(3), S. 179-183, Mai 2008.
- [164] Smiley, T.: „Root growth near vertical root barriers“. *Research Note, International Society of Arboriculture*, S. 150-152, 2005.

- [165] Kopinga, J.: „Aspects of the Damage to Asphalt Road Pavings Caused by Tree Roots“. International Society of Arboriculture, The Landscape below ground; proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils; presented by the Morton Arboretum held September 30 and October 1, 1993, S. 165-178, 1994.
- [166] Morgenroth, J.: „A Review of Root Barrier Research“. Arboriculture & Urban Forestry, Heft Nr.34(2), S. 84-88, 2008.
- [167] Barker, P.: „Managed development of tree roots. I. Ultra-deep rootball and root barrier effects on european hackberry.“ Journal of Arboriculture, Heft Nr. 21(4), S. 202-208, 1995.
- [168] Barker, P.: „Managed development of tree roots. II. Ultra-deep rootball and root barrier effects on southwestern black cherry.“ Journal of Arboriculture, Heft Nr. 21(5), S. 251-259, 1995.
- [169] Costello, L.R.; Elmore, C.L.; Steinmaus, S.: „Tree Root Response to Circling Root Barriers“. Journal of Arboriculture, Nr. 23(6), S. 211-218, November 1997.
- [170] Peper, P.J.; Mori, S.: „Root barrier and extension casing effects on Chinese Hackberry“. Journal of Arboriculture, Heft Nr. 25(1), S. 1-8, Januar 1999.
- [171] DIN 16726: „Kunststoffbahnen – Prüfungen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2017.
- [172] Barley, K.: „The Effects of Mechanical Stress on the Growth of Roots“. Journal of Experimental Botany, Heft Nr. 13 (37), S. 95-110, 1962. Zitiert aus [126, S. 119].
- [173] Whiteley, G. M.; Hewitt, J. S.; Dexter, A. R.: „The buckling of plant roots“. Physiologia Plantarum, Heft Nr. 54 (3), S. 333-342, 1982. Zitiert aus [126, S. 119].
- [174] Stål, Ö: „Rotspärrer haller rotterna I schack“. Sveriges trädgårdsanläggningsförbund, Utemiljö, Gröna Fakta 2, 1995 (in Schwedisch). Zitiert aus [74, S. 364].
- [175] IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: „Wurzeln und Fernwärmeleitungen: Neues Forschungsvorhaben von IKT und AGFW“. Veröffentlicht im IKT-Newsletter, September 2017.
- [176] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: „Forschungsvorhaben: Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen“. Veröffentlicht in AGFW Aktuell, Ausgabe 29/17, Frankfurt am Main, November 2017.
- [177] DIN EN ISO 17892-4: „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016)“; Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2017.
- [178] DIN 18125-2: „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2011.

- [179] DIN 18128: „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2002.
- [180] Süddeutsche Zeitung GmbH (Hg.): „Leck in Leitung für Fernwärme. Pro Tag versickern 50 000 Liter Wasser an Karl-Theodor-Straße“. 2018. Abgerufen am 27.04.2018, online verfügbar unter:
<https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-leck-in-leitung-fuer-fernwaerme-1.3959766>
- [181] Eicke, J.: „Untersuchung des Einflusses von Fernwärmeleitungen auf die Temperaturverteilung im Erdreich“. Unterauftrag des Instituts für Technische Thermodynamik (TTD) der Technischen Universität Darmstadt (TUD) im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“, Juli 2020. Ergebnisse sind in [6, Anlage 1] dargestellt.
- [182] Grunewald, J.; Conrad, C.: „Simulation von Wärmefeldern im Erdreich unter Berücksichtigung von Fernwärmeleitungen“. Unterauftrag der Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer der TU Dresden mbH im Rahmen des Forschungsvorhabens „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“, Juli 2020. Ergebnisse sind in [6, Anlage 3] dargestellt.
- [183] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (Hg.): „EnEff: Wärme - Technische Gebrauchsdaueranalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien. Teil I: Untersuchungsergebnisse zur Materialdegradation“. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung & Entwicklung, 55). Frankfurt am Main, 2020. Zitiert aus [6; S. 55f.].
- [184] Streckenbach, M.; Bennerscheidt, C.; Schröder, K.: „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre - Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“. Sachverständigen Büro für urbane Vegetation, Bochum und IKT - Institut für unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen, 2013.
- [185] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: „EnEff:Wärme - Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung & Entwicklung, 43). Frankfurt am Main, 2017.
- [186] DIN ISO 15901-1:2019-03: „Bewertung der Porengrößenverteilung und Porosität von Feststoffen mittels Quecksilberporosimetrie und Gasadsorption - Teil 1: Quecksilberporosimetrie (ISO 15901-1:2016)“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2019.

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Outside-In-Versuche

Anlage 2: Eindrückversuche

Anlage 3: Wärmefeldversuche

Anlage 4: Lebenslauf

Die Anlagen 1 bis 3 werden aus dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ [6; 97, S. 42ff.] zitiert und werden in der vorliegenden Arbeit zur besseren Übersicht der Ergebnisse ebenfalls dargestellt.

Anlage 1: Outside-In-Versuche

Anlage 1 wird aus dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ [6; 97, S. 53ff.] zitiert und wird in der vorliegenden Arbeit zur besseren Übersicht der Ergebnisse ebenfalls dargestellt.

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: I a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 04.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 04.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe I a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: I b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Kein Dichtband

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe I b

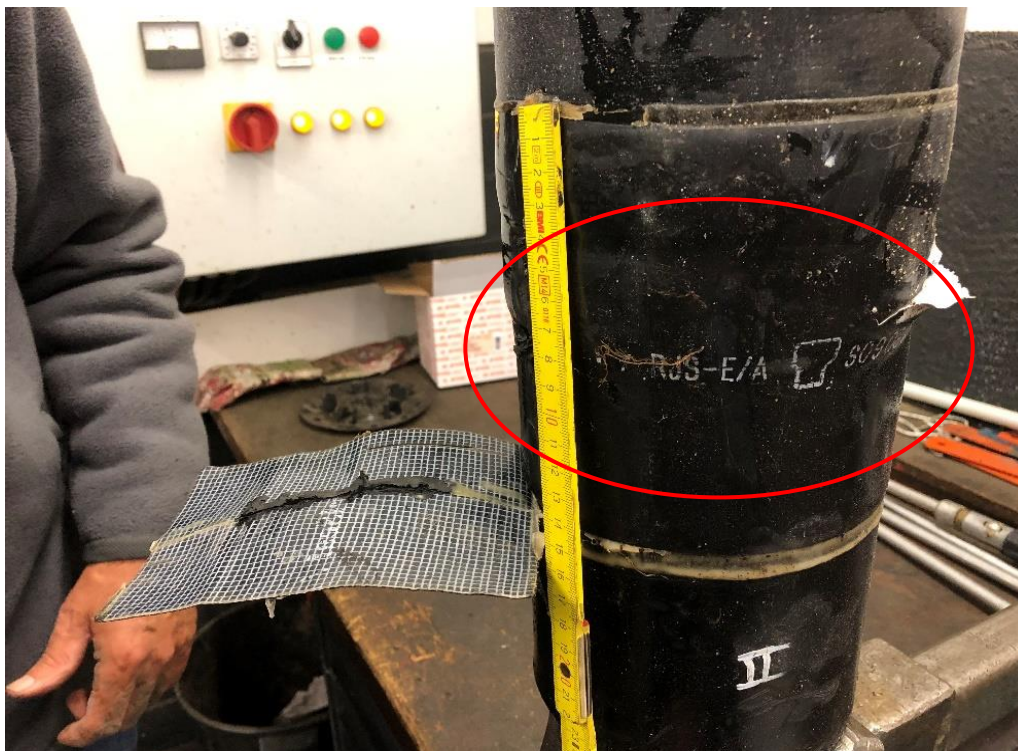
Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: II a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr
Pflanze: Weide
Wurzelanwuchs: Ja *
Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Probe II a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: II b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 04.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 04.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja *
Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Probe II b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: III a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Unsauber verarbeitet, Fremdkörper eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Ja



Probe III a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: III b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Unsauber verarbeitet, Fremdkörper eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja (Wurzeln haftend an Dichtmaterial)
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe III b

Auswertung Outside-In-Versuche

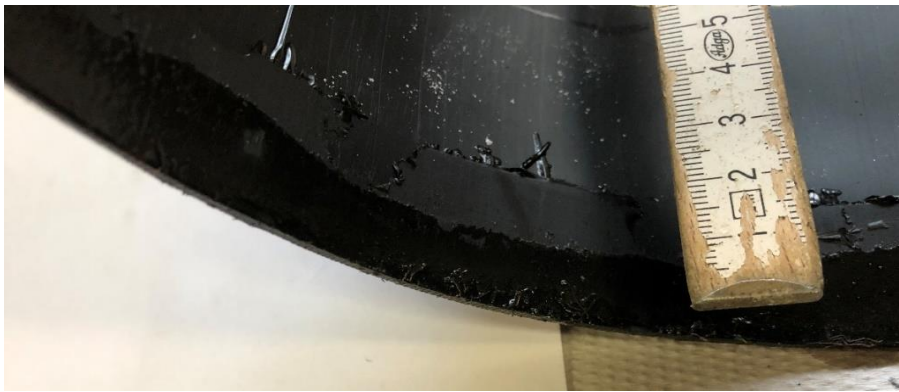
Probekörper: IV a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Schutzfolie am Dichtband nicht entfernt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Nein



Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: IV b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe IV b

Auswertung Outside-In-Versuche

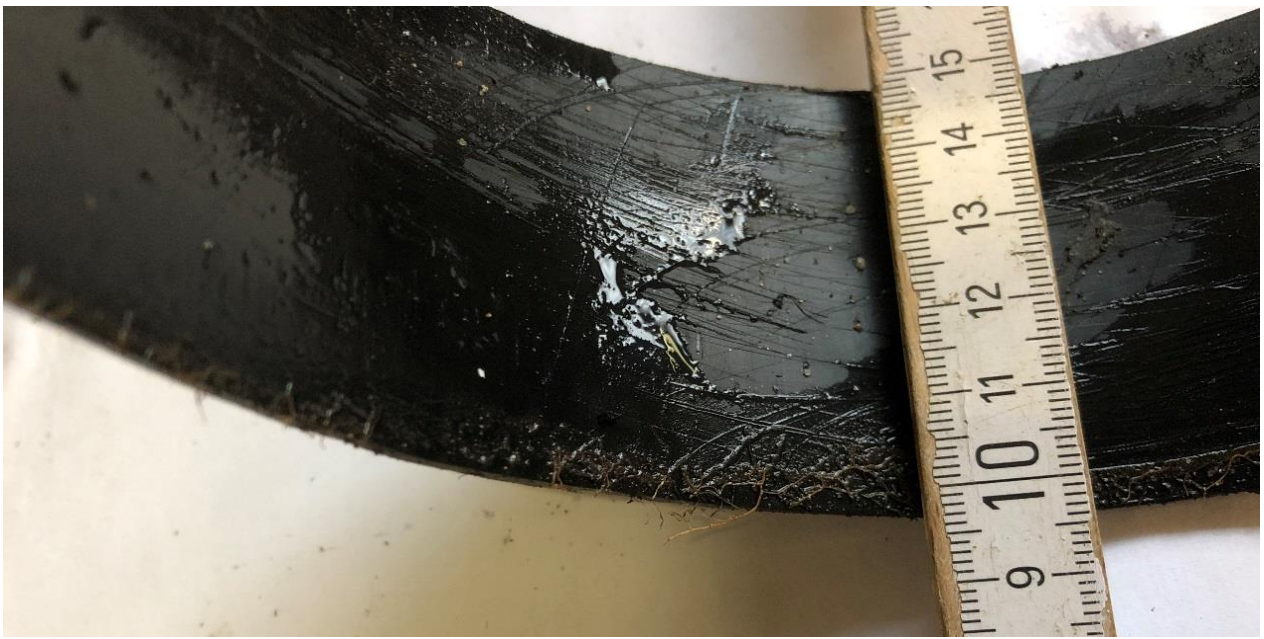
Probekörper: VI a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Oberfläche der Ummantelung nicht aufgeraut,
kein Dichtband vorhanden

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe VI a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VI b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Kein Dichtband, Fremdstoffe eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Ja



Probe VI b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VII a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2018
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2018
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe VII a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VII b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja *

Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Anlage 2: Eindruckversuche

Anlage 2 wird aus dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ [6] zitiert und wird in der vorliegenden Arbeit zur besseren Übersicht der Ergebnisse ebenfalls dargestellt.

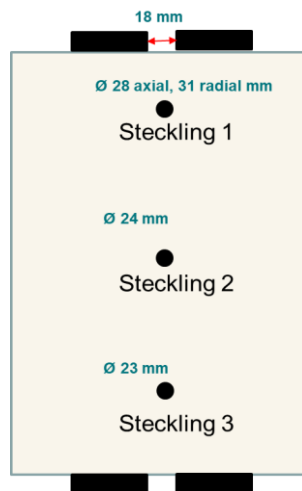
Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: A
Versuchszeitraum: 04.2019 – offen
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020
Steckling 1 wurde geöffnet, danach wurde die Kiste wieder verschlossen

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

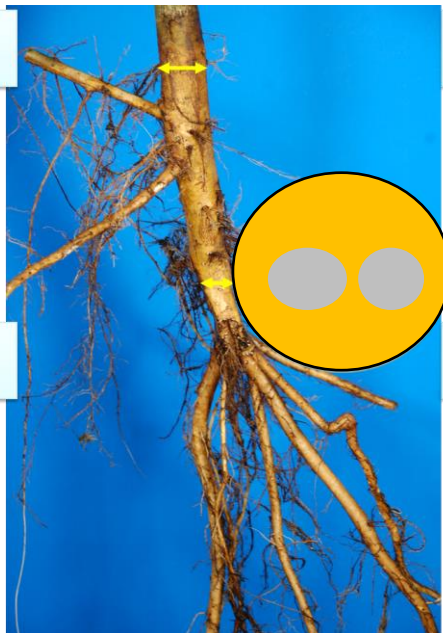
Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 1

Über Rohren:
Radial 28 mm



Zw. Rohren:
Radial 18 mm

Über Rohren:
Axial 31 mm



Zw. Rohren:
Axial 45 mm

Kiste A

Steckling 1

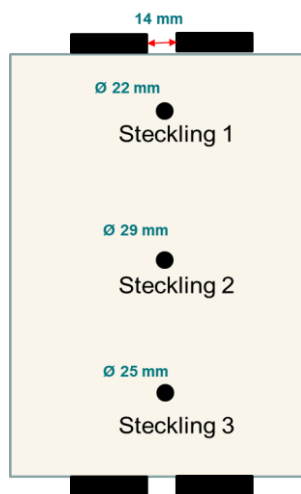
Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: B
Versuchszeitraum: 04.2019 – offen
Versuchsverlauf: Versuchskiste wurde nicht geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

Auffälligkeiten: Die Versuchskiste wurde nicht geöffnet

Draufsicht



Kiste B

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: C - Steckling 2
Versuchszeitraum: 04.2019 – 05.2020
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020
Versuchskiste wurde vollständig geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzhöhe: ca. 200 cm

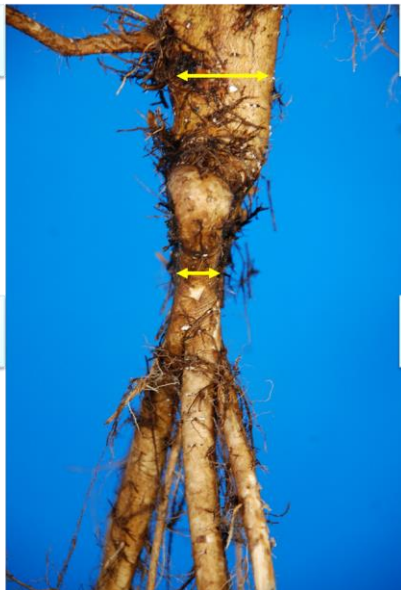
Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 2

Über Rohren:
Radial 41 mm



Über Rohren:
Axial 28 mm



Zw. Rohren:
Radial 18,5 mm

Zw. Rohren:
Axial 64 mm

Kiste C

Steckling 2

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: C - Steckling 3
Versuchszeitraum: 04.2019 – 05.2020
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020
Versuchskiste wurde vollständig geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzhöhe: ca. 200 cm

Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 3

Über Rohren:
Radial 25 mm



Zw. Rohren:
Radial 15,5 mm

Über Rohren:
Axial 24 mm



Zw. Rohren:
Axial 21 mm

Kiste C

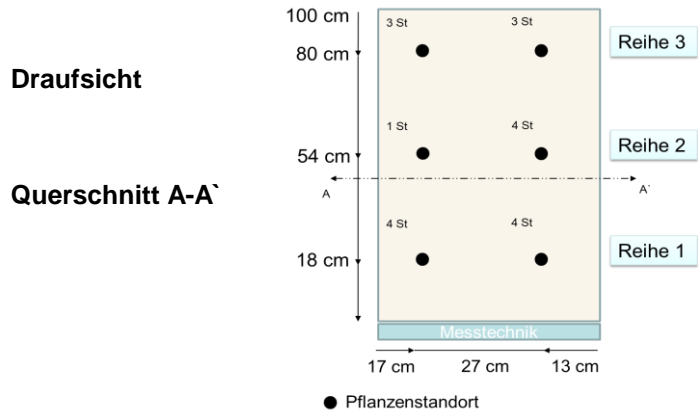
Steckling 3

Anlage 3: Wärmefeldversuche

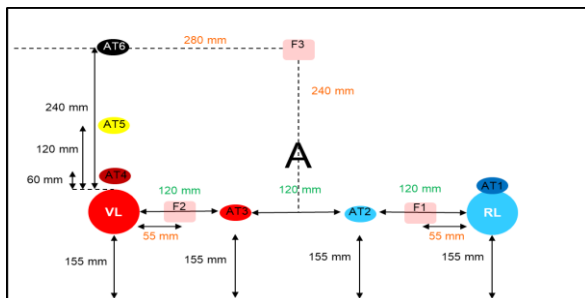
Anlage 3 wird aus dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ [6; 97, S. 42ff.] zitiert und wird in der vorliegenden Arbeit zur besseren Übersicht der Ergebnisse ebenfalls dargestellt.

Auswertung Wärmeversuche

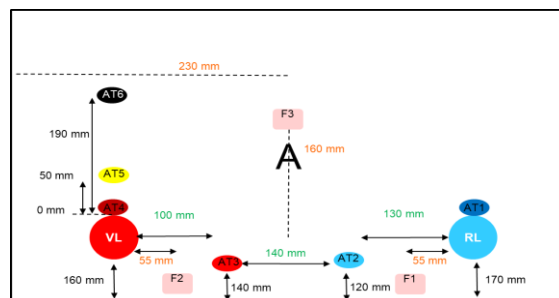
Versuchskiste: A
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
 In Reihe 3 Tendenz zur kalten Seite
Pflanze: Weide
Vegetation:



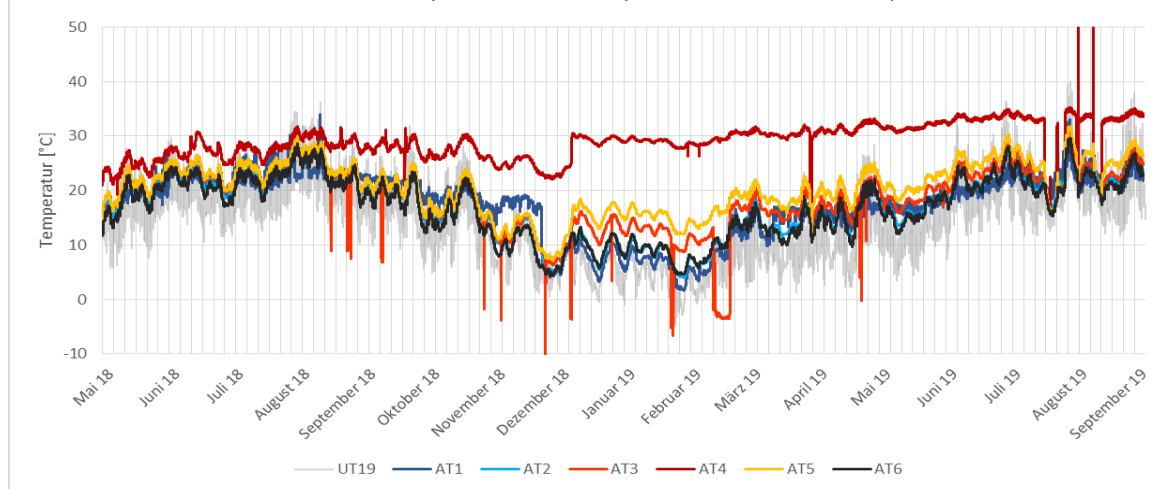
Querschnitt A-A'
Sensorenposition (Versuchsbeginn)



Querschnitt A-A'
Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste A Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 2:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 3:**
- Vermehrtes Wurzelwachstum auf der warmen Seite
 - Dazu Erschließung der kalten Seite



Kiste A

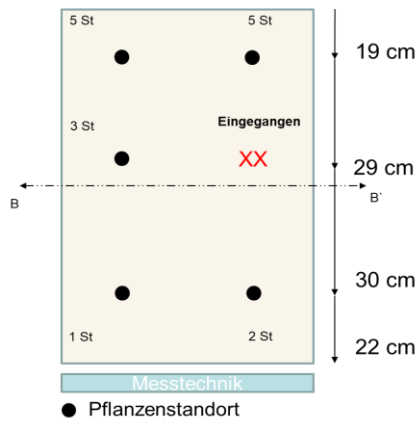
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

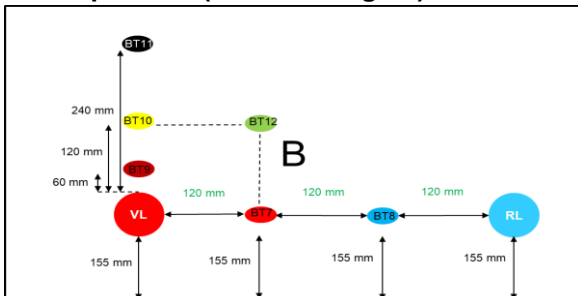
Versuchskiste: B
Versuchszeitraum: 04.2018 – 09.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
Pflanze: Weide
Vegetation:

Draufsicht

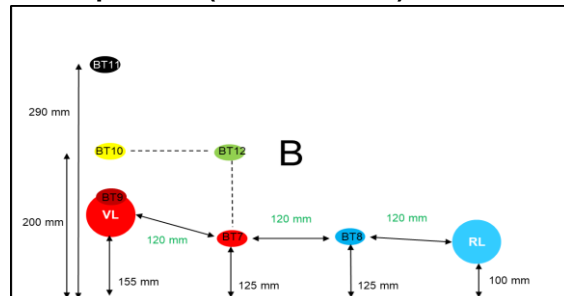
Querschnitt B-B'



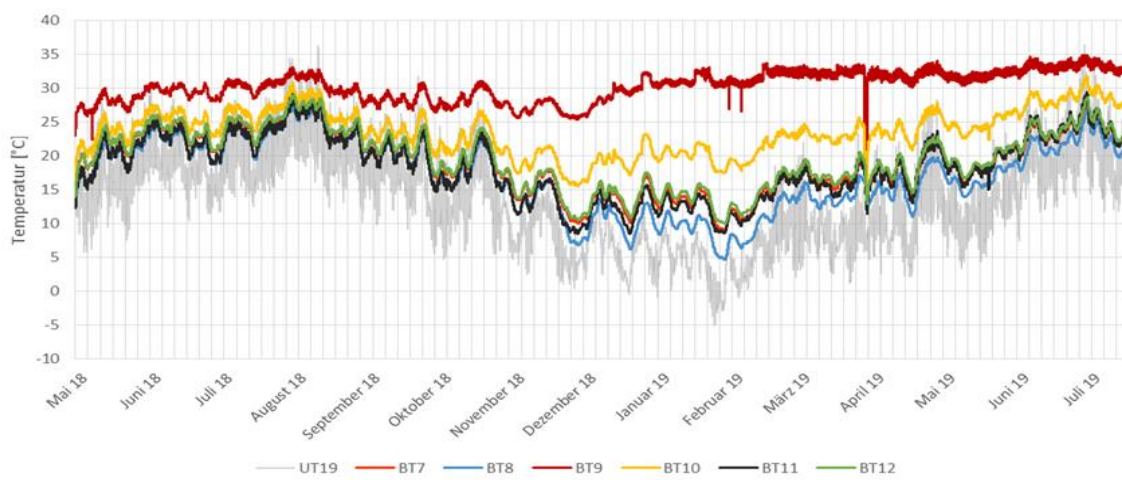
Querschnitt B-B'
Sensorenposition (Versuchsbeginn)



Querschnitt B-B'
Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste B Temperatursensoren (27.04.2018-13.07.2019)

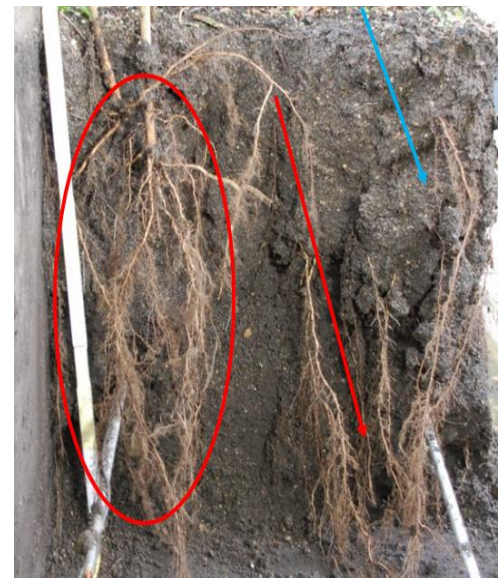


Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 2:**
- Deutlich ausgeprägtes Wurzelwachstum auf der warmen Seite in der Leitungszone
 - Auf der kalten Seite nutzt die Weide der Reihe 3 den Wurzelraum von Reihe 2
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 3:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Kiste B

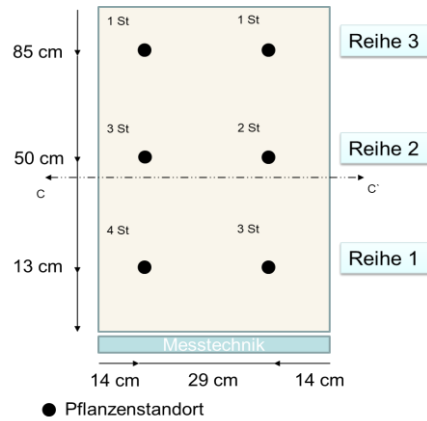
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

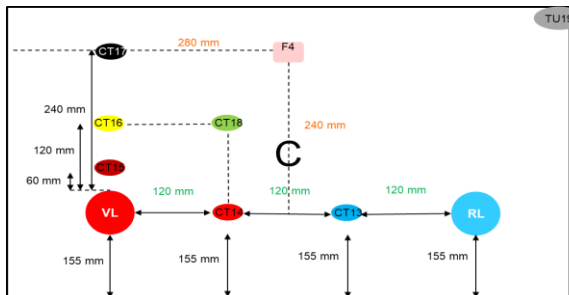
Versuchskiste: C
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle, Probeöffnung 11.2018: Untersuchung Reihe 1
Pflanze: Weide
Vegetation:

Draufsicht

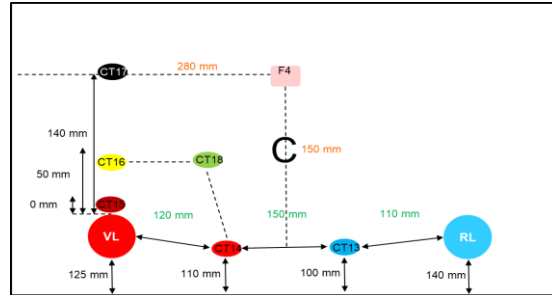
Querschnitt C-C'



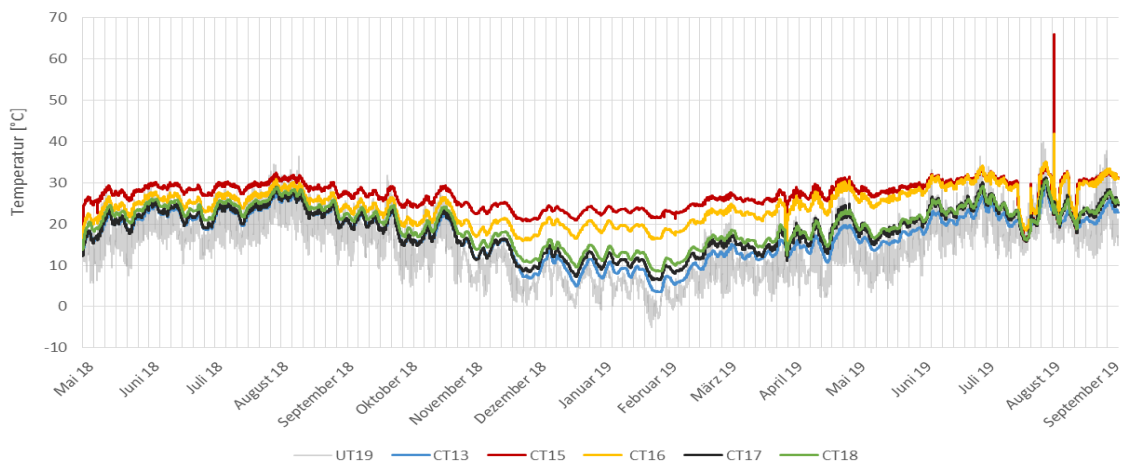
Querschnitt C-C'
Sensorenposition (Versuchsbeginn)



Querschnitt C-C'
Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste C Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019) ohne CT14



Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum sowohl von warmer zur kalten Seite als auch von kalter zur warmen Seite



- Reihe 2:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen, wobei das Wurzelbild auf der Vorlaufseite ausgeprägter ist
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 3:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Deutlich schwächeres Wurzelbild als in Reihe 1 und 2
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Kiste C

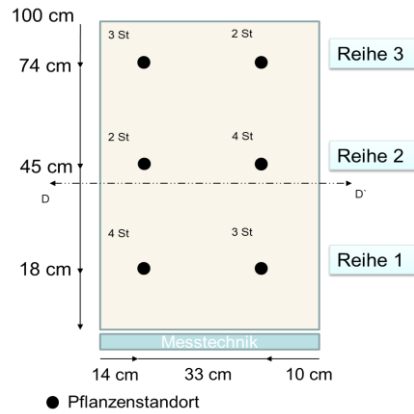
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

Versuchskiste: D
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle, Heizpatrone 03.2019 defekt -> unmittelbare Reparatur
Pflanze: Weide
Vegetation:

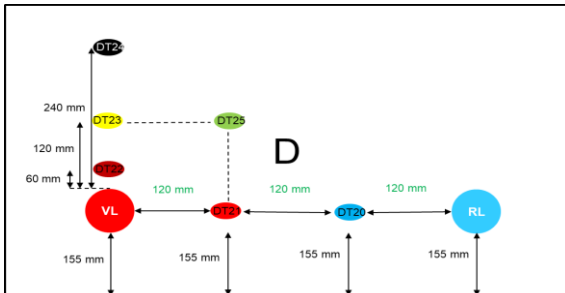
Draufsicht

Querschnitt D-D'



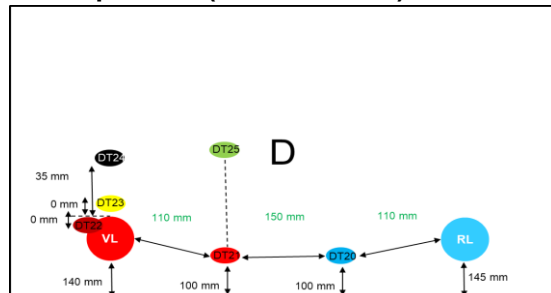
Querschnitt D-D'

Sensorenposition (Versuchsbeginn)

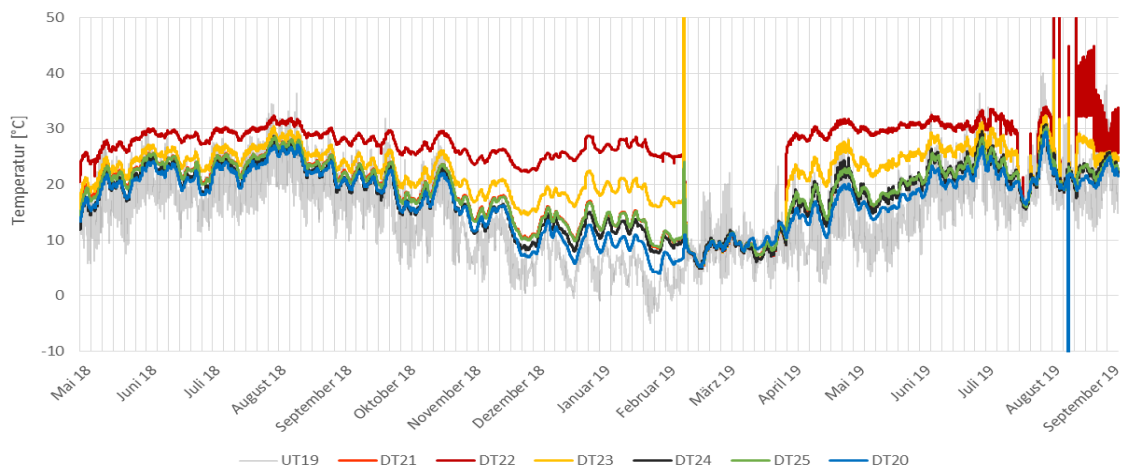


Querschnitt D-D'

Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste D Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Wurzelwachstum auf der kalten Seite entlang der Wand vertikal nach unten



- Reihe 2:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite
 - Wurzelwachstum der warmen Seite deutlich ausgeprägter



- Reihe 3:**
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum von kalten zur warmen Seite
 - Wurzelwachstum der kalten Seite deutlich ausgeprägter
 - Wurzelwachstum auf der warmen Seite entlang der Wand vertikal nach unten

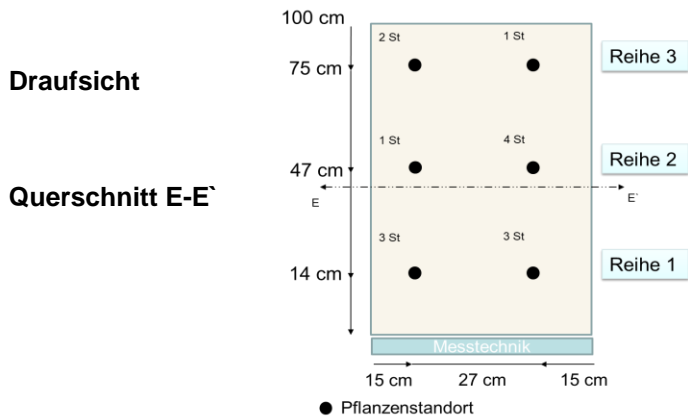


Kiste D

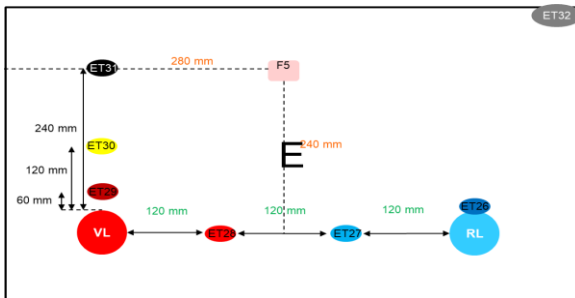
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

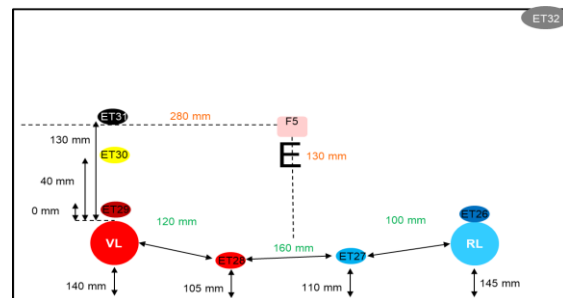
Versuchskiste: E
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
Pflanze: Weide
Vegetation:



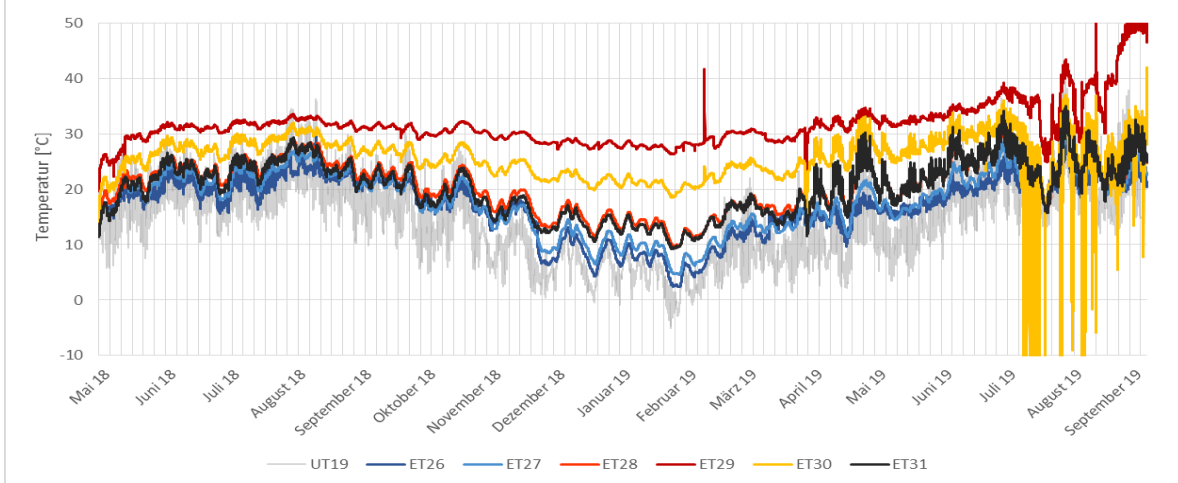
Querschnitt E-E'
Sensorenposition (Versuchsbeginn)



Querschnitt E-E'
Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste E Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Auswertung Wärmeversuche

Reihe 1:

- Wachstumstendenz zur kalten Seite
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
- Wurzelwachstum auf der kalten Seite oberflächennah entlang der Wand, horizontal von Reihe 1 bis Reihe 3



Reihe 2:

- Wachstumstendenz zur kalten Seite
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Reihe 3:

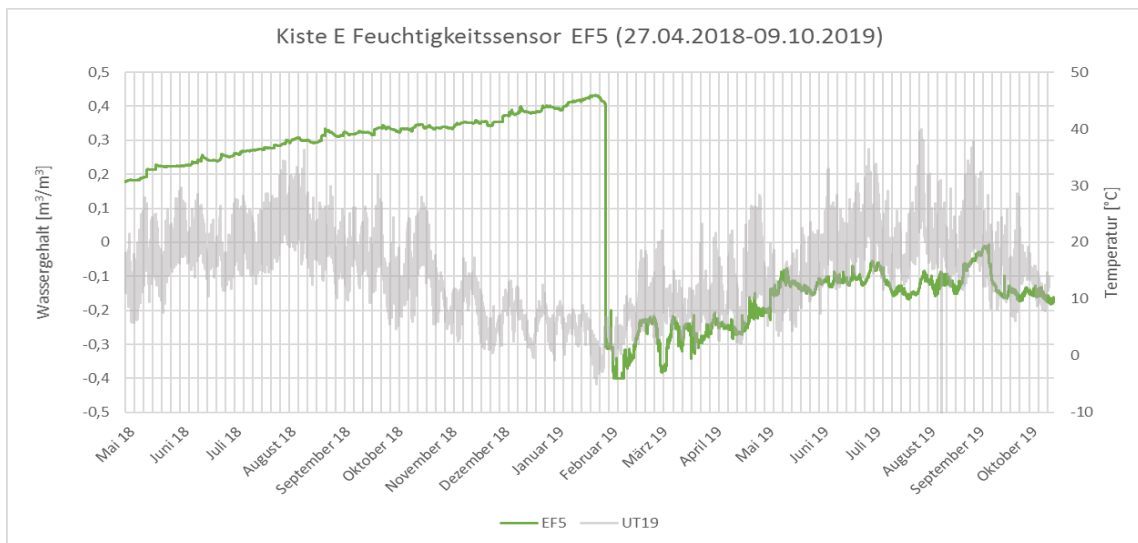
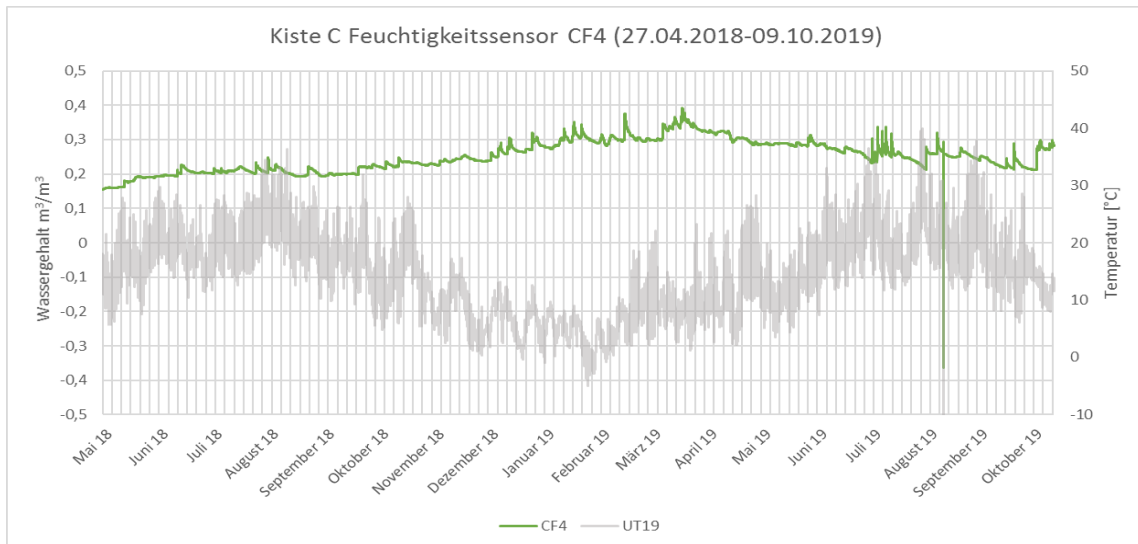
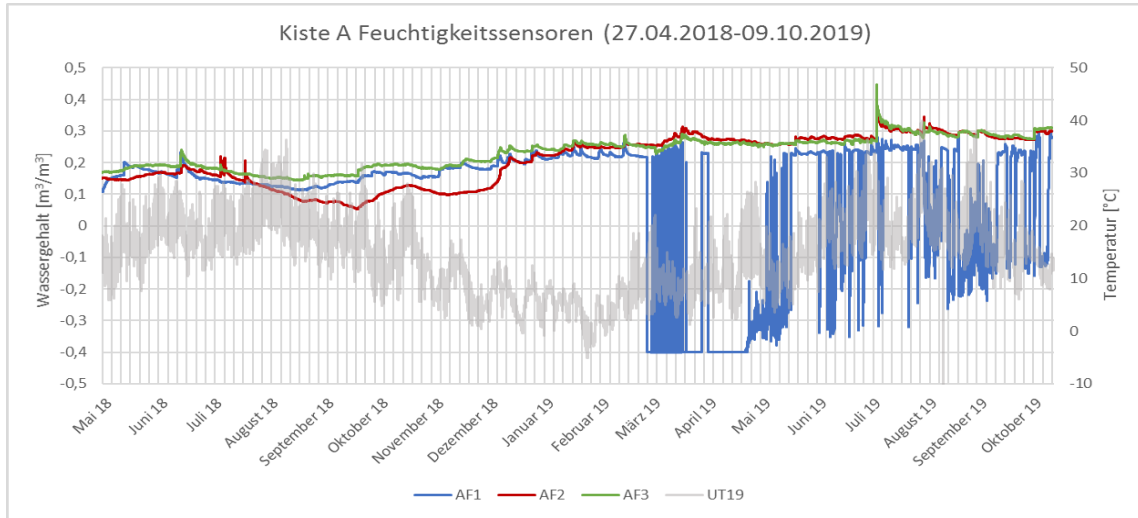
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Kiste E

Seite 2

Auswertung Wärmeversuche Feuchtigkeitsmessung



Anlage 4: Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Mirko Salomon
Geburtsdatum/-ort: 29. Oktober 1987 / Gelsenkirchen
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder (2016, 2020)

Beruflicher Werdegang

02/2016 – heute IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

02/2009 – 01/2016 IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen
Studentische Hilfskraft

Akademischer Werdegang

01/2020 – heute Doktorand am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb,
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes,
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften,
Ruhr-Universität Bochum

04/2014 – 01/2016 Master-Studium Bauingenieurwesen
Vertiefungsrichtung Geotechnik und Tunnelbau,
Ruhr Universität Bochum

10/2009 – 03/2014 Bachelor-Studium Umwelttechnik und Ressourcenmanagement
Vertiefungsrichtung Umwelttechnik und Umweltplanung,
Ruhr Universität Bochum

10/2008 – 09/2009 Bachelor-Studium Entsorgungswesen,
RWTH Aachen

Zivildienst

07/2007 – 03/2008 Arbeiterwohlfahrt Unterbezirk Gelsenkirchen/Bottrop

Schulabschluss

2007 Ricarda-Huch-Gymnasium, Gelsenkirchen
Allgemeine Hochschulreife